



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Larbi TEBESSI-Tébessa



Facultés des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

Département : Sciences de la matière

## MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine :** Sciences de la matière

**Filière :** Chimie

**Option :** Chimie des produits naturels

### *Thème*

**Approche verte et durable pour la protection d'un  
acier au carbone contre la corrosion en milieu acide**

*Présenté par :*

Adel MANSAR

Zakaria MESSIID

Devant le jury :

Sabrina BOUGUESSA	<b>M. C. A</b>	Université de Tébessa	<b>Président</b>
Merzoug BENAHMED	<b>Professeur</b>	Université de Tébessa	<b>Rapporteur</b>
Lakhdar MANSOURI	<b>M. C. A</b>	Université de Tébessa	<b>Examineur</b>

**Date de soutenance :** 22 /09 /2020



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Larbi TEBESSI-Tébessa



Facultés des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

Département : Sciences de la matière

## MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine :** Sciences de la matière

**Filière :** Chimie

**Option :** Chimie des produits naturels

### *Thème*

**Approche verte et durable pour la protection d'un acier  
au carbone contre la corrosion en milieu acide**

*Présenté par :*

Adel MANSAR

Zakaria MESSIID

Devant le jury :

Sabrina BOUGUESSA	<b>M. C. A</b>	Université de Tébessa	<b>Président</b>
Merzoug BENAHMED	<b>Professeur</b>	Université de Tébessa	<b>Rapporteur</b>
Lakhdar MANSOURI	<b>M. C. A</b>	Université de Tébessa	<b>Examineur</b>

**Date de soutenance :** 22 /09 /2020

Note : ..... Mention : .....

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Remerciements

Nous remercions tout d'abord notre Dieu de nous avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce modeste travail.

Nous offrons nos sincères remerciements avec tout notre respect pour notre encadreur le professeur *Merzoug BENAHMED* pour nous suivre, nous lui exprimons notre profonde gratitude parce qu'il nous a transmis une partie de son savoir en domaine de corrosion et son goût pour la recherche et ses précieux conseils qui nous ont permis de bien mener ce travail.

Nous tenons tout particulièrement à remercier notre enseignante *Sabrina BOUGUESSA*, maitre de conférence classe A à l'université de Tébessa pour l'honneur qui nous a fait de présider le jury et d'évaluer notre travail.

Nous exprimons également nos sincères remerciements à notre enseignant *Lakhdar MANSOURI* maitre de conférence classe A à l'université de Tébessa pour avoir accepté l'évaluation de notre travail.

Nous remercions aussi notre enseignantes *Karima HANINI* et *Sameh BOUDIBA* pour leurs précieux aides. Je remercie également le doctorant *Hatem BEDDIAR* pour sa gentillesse et sa contribution à la réalisation de ce travail.

Nous remercions tout d'abord nos collègues du laboratoire de chimie qui nous ont aidés d'une façon ou d'une autre par leurs encouragements et leurs sympathies.

Enfin, il n'est pas possible de citer toutes les personnes qui ont collaborés de près ou de loin à la réalisation de ce travail, nous lançons un remerciement général à ceux qui ont participé au bon déroulement de ce travail.

# *Dédicace*

*À mes parents, je vous rends hommage par ce modeste travail en guise de ma reconnaissance et de tout mon amour.*

*À toute ma famille.*

*À tous mes collègues et amis.*

*À tous ceux qui me sont chers.*

*Adel*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À mes très chers parents : mon père et ma mère  
pour leur patience, leur soutien et leur  
encouragement durant mon parcours scolaire.*

*À mes chers frères et sœurs : qui m'ont appris le  
sens de la sincère fraternité.*

*À mon binôme : qui m'a soutenu en redoublant ses  
efforts pour terminer notre travail.*

*À mes chers enseignants et mes camarades de  
l'étude.*

*Zakaria*

## Table de matières

Introduction générale.....	I
<b>CHAPITRE I</b>	
A. Corrosion .....	1
I. A. 1. Introduction .....	1
I. A. 2. Définition de corrosion .....	1
I. A. 3. Les types de corrosion.....	2
I. A. 4. Les formes de corrosion .....	2
I. A. 5. Facteurs de corrosion .....	8
I. A. 6. Définition d'un acier .....	8
I. A. 7. Différents types des aciers .....	9
I. A. 8. La lutte contre la corrosion.....	9
B. Inhibition de la corrosion.....	10
I. B. 1. Introduction .....	10
I. B. 2. Définition d'un inhibiteur.....	10
I. B. 3. Les classes d'inhibiteurs.....	10
I. B. 4. Propriétés des inhibiteurs .....	11
I. B. 5. Inhibiteurs synergiques.....	11
I. B. 6. Inhibiteurs verts de corrosion.....	11
I. B. 7. Inhibiteurs utilisés dans le cadre de cette étude.....	12
I. B. 8. Travaux antérieurs sur les inhibiteurs à base d'extraits.....	12
I. B. 9. Types d'adsorption .....	13
I. B. 10. Modèles d'isothermes.....	14
C. Électrodéposition .....	16
I. C. 1. Introduction .....	16
I. C. 2. Définition et principe.....	16

---

I. C. 3. L'influence des paramètres de dépôt sur procédés d'électrodéposition .....	17
I. C. 4. Additifs des bains électrolytiques.....	17
I. C. 5. Avantages et inconvénients de l'électrodéposition.....	18
I. C. 6. Etapes de l'électrodéposition.....	18
I. C. 7. Mécanismes d'actions des additifs .....	19
I. C. 8. Classification des additifs .....	20
I. C. 9. Additifs à base des plantes .....	21

## CHAPITRE II

II. 1. Introduction.....	23
II. 2. La méthode gravimétrique .....	23
II. 3. Procédures expérimentales .....	24
II. 4. Rappel botanique de la plante <i>Turgenia latifolia</i> .....	25
II. 5. Techniques électrochimiques.....	29

## CHAPITRE III

III. Introduction .....	32
A. Corrosion .....	32
III. A. 1. Etude gravimétrique (perte en masse) .....	32
III. A. 2. Mécanisme d'adsorption .....	35
III. A. 3. Etude électrochimique .....	44
B. Électrodéposition .....	49
III. B. 1. Conditions expérimentales.....	49
III. B. 2. Qualité de la couche de zinc déposée .....	49
III. B. 3. Calcul de l'épaisseur .....	49
Conclusion générale .....	52
Perspectives .....	53
Références bibliographiques .....	54



# Liste des tableaux

Tableau 1 : Principaux facteurs de corrosion .....	8
Tableau 2 : Travaux réalisés sur les inhibiteurs à base d'extraits de plante.....	13
Tableau 3 : Principales différences entre les deux types d'adsorption .....	14
Tableau 4 : Composition chimique de l'acier A283 Gr-C .....	24
Tableau 5 : Composition chimique de l'acier doux de nuance E24-2 .....	24
Tableau 6 : Classification botanique de la plante <i>Turgenia latifolia</i> .....	26
Tableau 7 : Influence de la concentration de l'EBTL sur l'efficacité inhibitrice à différentes températures (20 – 50) °C .....	33
Tableau 8 : Coefficient de corrélation des différentes isothermes d'adsorption à différentes températures .....	36
Tableau 9 : Paramètres du coefficient de corrélation et la constante d'adsorption pour l'extrait de la plante <i>Turgenia latifolia</i> .....	38
Tableau 10: Paramètres thermodynamiques relatifs à l'adsorption d'EBTL sur la surface de l'acier A283 Gr-C dans une solution de HCl 1M .....	40
Tableau 11 : Paramètres d'activation pour l'acier au carbone dans HCl 1 M pour différentes concentrations d'EBTL .....	43
Tableau 12 : Paramètres de polarisation pour la corrosion de l'acier A283 Gr-C dans la solution à 1M HCl en présence des différentes concentrations d'extrait.....	46
Tableau 13 : Paramètres d'impédance et valeurs d'efficacité d'inhibition de l'acier A283 Gr-C dans la solution à 1M HCl en présence des différentes concentrations d'extrait .....	47
Tableau 14 : L'adhérence, la masse, l'épaisseur, la brillance de la couche de zinc déposée lors de l'utilisation d'extrait de <i>Turgenia latifolia</i> comme additif.....	50

# Liste des figures

Figure 1 : Corrosion généralisée .....	3
Figure 2 : Corrosion par piqure .....	4
Figure 3 : Structure métallurgique touchée par la corrosion inter-granulaire .....	4
Figure 4 : Corrosion par crevasse d'une valve sphérique en acier inoxydable 316.....	5
Figure 5 : Corrosion galvanique de l'acier inoxydable .....	6
Figure 6 : Corrosion par érosion sur un acier au carbone .....	6
Figure 7 : Fissuration par corrosion sous contrainte de l'acier inoxydable austénitique .....	7
Figure 8 : Corrosion par frottement d'un frein de disque .....	7
Figure 9 : Classement des inhibiteurs de corrosion.....	11
Figure 10 : Schéma de montage d'une cellule d'électrodéposition .....	17
Figure 11 : Adsorption de l'additif sur la surface du substrat.....	20
Figure 12 : Photographies de la plante <i>Turgenia latifolia</i> .....	26
Figure 13 : Schéma général de l'extraction.....	28
Figure 14 : Les paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel.....	30
Figure 15 : Exemple du tracé dans le plan complexe (plan de Nyquist).....	30
Figure 16 : Evolution de la vitesse de corrosion en fonction de la concentration d'extrait dans la solution à 1M HCl à différentes températures .....	33
Figure 17 : Evolution de l'efficacité inhibitrice en fonction de la concentration de l'EBTL dans une solution HCl 1M à différentes températures .....	34
Figure 18 : L'isotherme d'adsorption de Langmuir de l'extrait de la plante sur la surface de l'acier A283 Gr-C dans la solution HCl 1M à différentes températures .....	36
Figure 19 : L'isotherme d'adsorption de Temkin de l'extrait de la plante sur la surface de l'acier A283 Gr-C dans la solution HCl 1M à différentes températures .....	37
Figure 20 : L'isotherme d'adsorption de Frumkin de l'extrait de la plante sur la surface de l'acier A283 Gr-C dans la solution HCl 1M à différentes températures .....	37
Figure 21 : L'isotherme d'adsorption de Freundlich de l'extrait de la plante sur la surface de l'acier A283 Gr-C dans la solution HCl 1M à différentes températures .....	38
Figure 22 : Variation de la constante d'adsorption en fonction de 1/T pour l'EBTL .....	40
Figure 23 : Tracé d'Arrhenius de $\ln V_{\text{corr}}$ en fonction de 1/T en absence et présence d'EBTL.....	42
Figure 24 : Tracé d'Arrhenius de $\ln V_{\text{corr}}/T$ en fonction de 1/T en absence et présence d'EBTL .....	43
Figure 25 : Dispositif des mesures électrochimiques.....	44

Figure 26 : Evolution du potentiel de corrosion de l'acier A283 Gr-C dans la solution à 1M HCl.....	45
Figure 27: Courbes de polarisation de l'acier A283 Gr-C dans la solution à 1M HCl en présence des différentes concentrations d'extrait .....	46
Figure 28 : Impédance électrochimique de l'acier A283 Gr-C dans la solution à 1M HCl en absence et en présence d'extrait.....	48

# Liste des abréviations

Abréviation	Désignation
AcOEt	Acétate d'éthyle
C	Concentration
CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	Dichlorométhane
CSC	Corrosion Sous Contrainte
E <sub>OCP</sub>	Potentiel Circuit Ouvert
EATL	Extrait acétate d'éthyle de la plante <i>Turgenia latifolia</i>
EBTL	Extrait butanolique de la plante <i>Turgenia latifolia</i>
ECS	Electrode au Calomel Saturé
EDTL	Extrait dichlorométhane de la plante <i>Turgenia latifolia</i>
EI	Efficacité inhibitrice
Gr	Grade
K	Kelvin
ISO	International Organization for Standardization
LPR	Résistance de polarisation linéaire
NACE	National Association of Corrosion Engineers
n-but	Butanol
pH	Potentiel d'hydrogène
s	Seconde
SIE	Spectroscopie d'Impédance Electrochimique
°C	Degré celsius

# Liste des symboles

Symbole	Désignation	Unité de mesure
$\Delta H_a^\circ$	Enthalpie standard d'activation	$\text{kJ mol}^{-1}$
$\Delta S_a^\circ$	Entropie standard d'activation	$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
$E_a$	Energie d'activation	$\text{kJ mol}^{-1}$
$V_{\text{corr}}^\circ$	Vitesse de corrosion en absence l'inhibiteur	$\text{mg cm}^{-2} \text{h}^{-1}$
$V_{\text{inh}}$	Vitesse de corrosion en présence de l'inhibiteur	$\text{mg cm}^{-2} \text{h}^{-1}$
$\Delta G_{\text{ads}}^\circ$	Energie d'adsorption libre	$\text{J mol}^{-1}$
$\Delta H_{\text{ads}}^\circ$	Enthalpie standard d'adsorption	$\text{J mol}^{-1}$
$\Delta S_{\text{ads}}^\circ$	Entropie standard d'adsorption	$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
$C$	Concentration	$\text{mg L}^{-1}$
$C_{\text{dc}}$	Capacité de la double couche	$\text{F cm}^{-2}$
$C_{\text{H}_2\text{O}}$	Concentration de l'eau dans la solution	$\text{mg L}^{-1}$
$E$	Potentiel	V
$i_{\text{corr}}$	Densité de courant de corrosion	$\text{A cm}^{-2}$
$k_{\text{ads}}$	Constante d'équilibre du processus d'adsorption	$\text{L mg}^{-1}$
$m$	Masse	mg
$M$	Molarité	$\text{mol L}^{-1}$
$\Theta$	Taux de recouvrement	-
$R^2$	Coefficient de corrélation	-
$R_{\text{tc}}$	Résistance de transfert de charge	$\Omega \text{ cm}^2$
$S$	Surface de l'électrode	$\text{cm}^2$
$T$	Température	$^\circ\text{C}, \text{K}$
$t$	Temps	h
$\beta_a$	Coefficients de Tafel anodique	$\text{V décade}^{-1}$
$\beta_c$	Coefficients de Tafel cathodique	$\text{V décade}^{-1}$
$-Z_i$	Partie imaginaire de l'impédance	$\Omega \text{ cm}^2$
$Z_r$	Partie réelle de l'impédance et imaginaire	$\Omega \text{ cm}^2$
$\alpha$	Paramètre qui tient compte de l'hétérogénéité de la surface	-

## Liste des constantes

Symbole	Désignation	Valeur	Unité de mesure
<b>F</b>	Constante de Faraday	<b>96484.56</b>	C mol <sup>-1</sup>
<b>h</b>	Constante de Plank	<b>6,626 10<sup>-34</sup></b>	J K <sup>-1</sup>
<b>N<sub>A</sub></b>	Nombre d'Avogadro	<b>6,023 10<sup>23</sup></b>	atomes mol <sup>-1</sup>
<b>R</b>	Constante des gaz parfaits	<b>8.314</b>	J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>

## ملخص

تم تقييم خصائص تثبيط التآكل لمستخلص البيتانول لنبته *Turgenia latifolia* على الفولاذ A283 Gr-C في محلول HCl 1M بواسطة قياس فقدان الكتلة والتقنيات الكهروكيميائية. وكشفت النتائج التي تم الحصول عليها أن المستخلص الذي تم اختباره يعمل كمثبط جيد للتآكل مع كفاءة تثبيط تبلغ 81.04 % عند 50 جزء في المليون. وقد تسببت الزيادة في درجة الحرارة الى انخفاض كبير في الفعالية المثبطة. أشارت تقنية الاستقطاب إلى أن مستخلص النبتة يعمل كمثبط من النوع المختلط، يتبع نموذج ادمصاص لانغمير وامتزاز المثبط في هذه الحالة هو من النوع الفيزيائي.

بالإضافة إلى ذلك، تم تنفيذ تأثير مستخلص البيتانول لنبته *Turgenia latifolia* كمضافات في عملية الطلاء الكهربائي للزنك على الفولاذ في محلول الكلوريد باستخدام تيار مباشر. وتبين النتائج التجريبية أن وجود المستخلص كمادة إضافية في حوض الإلكتروليت يضمن جودة طبقة الزنك المترسبة.

**الكلمات المفتاحية:** مستخلص البيتانول، مثبط جيد للتآكل، الطلاء الكهربائي.

# Abstract

The corrosion inhibition properties of butanolic extract of *Turgenia latifolia* on **A283 Gr-C** carbon steel (CS) in 1.0 M HCl solution were evaluated by gravimetric and electrochemical technics. The obtained results revealed that the tested extract acted as a good corrosion inhibitor with inhibition efficiency of 81.04 % at 50 ppm and the increase in temperature caused a significant decrease in inhibitory efficacy. The polarization technique indicated that the plant extract acts as a mixed-type inhibitor, follows a Langmuir adsorption type model and its inhibition mechanism is assisted by physical interactions.

Additionally, the effect of *Turgenia latifolia* butanolic extract as additives on zinc electroplating on the mild steel was carried out using a direct current. The experimental results show that the presence of the extract as an additive in the electrolytic bath ensures the quality of the deposited zinc.

**Keywords:** Corrosion inhibition, butanolic extract, electroplating.



# Résumé

Les propriétés inhibitrices contre la corrosion de l'extrait butanolique de *Turgenia latifolia* sur l'acier au carbone **A283 Gr-C** en solution HCl 1,0 M ont été évaluées par des techniques gravimétriques et électrochimiques. Les résultats obtenus ont révélé que l'extrait testé agissait comme un bon inhibiteur de corrosion avec une efficacité d'inhibition de 81,04 % à 50 ppm. L'augmentation de la température a entraîné une diminution significative de l'efficacité inhibitrice. La technique de polarisation a indiqué que l'inhibiteur est de type mixte, suit l'isotherme d'adsorption de Langmuir et l'adsorption est de type physique.

De plus, l'effet de l'extrait butanolique de *Turgenia latifolia* comme additifs dans les bains d'électrodéposition du zinc sur l'acier doux a été effectué à l'aide d'un courant continu. Les résultats expérimentaux montrent que son addition dans le bain électrolytique améliore la qualité du dépôt.

**Mots clés :** Inhibiteur de corrosion, extrait butanolique, électrodéposition.

A blue graphic resembling a scroll, with a white border and rounded corners. The top and bottom edges are slightly curved, and there are small circular details on the left side that suggest the scroll is unrolled.

*INTRODUCTION  
GÉNÉRALE*

## Introduction générale

La corrosion est la détérioration des métaux et des alliages qui résulte d'une action chimique ou électrochimique d'un environnement sur ces derniers. Les conséquences sont néfastes dans divers domaines et surtout dans l'industrie : arrêt de production, remplacement des pièces corrodées, accidents et risques de pollutions. Ces problèmes sont fréquents avec parfois de lourdes incidences économiques et écologiques [1]. Ce phénomène provoque des pertes économiques intense de 2.5 billions de dollars dans le monde par an (3 à 4 % du PIB 'Produit Intérieur Brut' des pays industrialisés) d'après CEFACOR (Centre Français de l'Anticorrosion), elle provoque également 28 milliards d'euros de pertes en France et entre 375 et 875 milliards de dollars américains aux Etats-Unis selon NACE (National Association of Corrosion Engineers - 2016) [2].

Pour limiter et combattre ce phénomène, plusieurs méthodes de protection ont été mis en évidence, tel que l'ajout des inhibiteurs de corrosion qui constituent un moyen unique de protection contre la corrosion métallique. La plupart d'inhibiteurs de corrosion sont des composés organiques à base de synthèse contiennent des hétéroatomes (le soufre, l'oxygène, l'azote...) présentent une bonne efficacité [3-6]. C'est-à-dire l'ajout de ces composés chimiques, en faible quantité au milieu, fait diminuer la vitesse de corrosion des matériaux. Néanmoins, leur utilisation est limitée à cause de leur toxicité et leur non-biodégradabilité, donc la recherche des inhibiteurs verts biodégradables, non coûteux et efficaces devient indispensable [7]. Une lecture attentive de la littérature montre clairement que l'ère des inhibiteurs verts a déjà commencé [8].

Une autre méthode de protection contre la corrosion s'avère intéressante, c'est l'application d'un revêtement imperméable sur la surface métallique ; généralement par voie électrochimique (électrodéposition), son principe consiste à appliquer un courant continu afin de réduire les cations métalliques dissous, conduisant à la formation d'une couche cohérente sur le substrat à protéger. Le développement de revêtements nécessite l'ajout de petites quantités de certains additifs synthétiques ou naturels au bain d'électrolyse. Ces derniers contribuent à réduire la rugosité de surface, améliorer l'adhérence et la brillance du dépôt qui sont inscrites dans cette étude [9].

Le but de ce travail est l'évaluation de l'efficacité inhibitrice de l'extrait butanolique de la plante *Turgenia latifolia* contre la corrosion de l'acier **A283 Gr-C** en milieu acide chlorhydrique une fois molaire et son utilisation comme additif dans l'électrozincage d'un acier

doux de nuance **E24-2**. Au cours de cette étude, nous avons utilisé la technique gravimétrique et des techniques électrochimiques qui nous ont permis de déterminer l'efficacité inhibitrice de notre inhibiteur et son mode d'action, plus certains paramètres propres à la corrosion.

A blue graphic element resembling a scroll, with a white border and rounded corners. The text is centered within the scroll.

*CHAPITRE I*  
*SYNTHÈSE*  
*BIBLIOGRAPHIQUE*

---

## A. Corrosion

---

### I. A. 1. Introduction

La corrosion est un phénomène naturel résulte d'une action chimique ou électrochimique d'un environnement sur les métaux et les alliages qui a tendance à retourner les métaux et alliages vers leur état original tel que les oxydes de fer (FeO), les sulfures (FeS), les carbonates (FeCO<sub>3</sub>) ou d'autres sels (FeCl<sub>3</sub>) qui sont plus stables dans le milieu ambiant. Ce fléau peut toucher les matériaux utilisés dans de nombreux domaines industriels : industries pétrolières, chimiques, électriques, nucléaires, installations portuaires, génie civil, santé, environnement et agroalimentaire...[10].

### I. A. 2. Définition de corrosion

Plusieurs définitions peuvent être adoptées :

Selon le point de vue des ingénieurs constructeurs, la corrosion est une dégradation du matériau ou de ses propriétés par une réaction chimique avec son environnement. Cette définition admet que la corrosion est un phénomène nuisible détruit le matériau ou réduit ses propriétés et le rend inutilisable pour une application prévue. L'usure peut être aussi considérée comme phénomène de corrosion provoquant la dégradation des matériaux [11].

Selon **NACE** (National Association of Corrosion Engineers) la corrosion est la détérioration d'un matériau, généralement métallique qui résulte d'une réaction avec son environnement, soit gazeux (oxygène de l'air par exemple) soit liquide (eau de mer par exemple), soit un environnement de contraintes dans de tels milieux, elle se produit aussi en milieu biologique (bactéries se déposant dans les tuyères industrielles - chimique ou pétrochimique - ou d'extraction pétrolière)[12, 13].

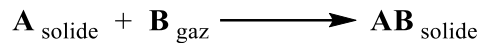
Selon la norme **ISO 8044**, la corrosion des métaux est une interaction physico-chimique entre le métal et son environnement entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs [14, 15].

### I. A. 3. Les types de corrosion

Selon la nature de l'environnement et son comportement qui autour le métal, il existe trois grandes types de corrosion : chimique, biologique et électrochimique [16].

#### I. A. 3. 1. La corrosion chimique (sèche)

Il s'agit d'une réaction hétérogène entre une phase solide (le métal) et une phase gazeuse sans intervenir du passage d'un courant électrique, la réaction qui se produit est de la forme :



Il est très difficile à donner des exemples sur ce type de corrosion puisque elle est accompagnée de la corrosion électrochimique [17].

#### I. A. 3. 2. La corrosion biochimique (bactérienne)

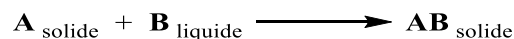
Ce type de corrosion appelé aussi la bio-corrosion, c'est une attaque des métaux par les produits du métabolisme de certains micro-organismes [17].

Elle rassemble « tous les phénomènes de corrosion où les bactéries agissant directement ou par un intermédiaire des substances provenant de leur métabolisme, jouent un rôle primordial, soit en accélérant un processus déjà établi, soit en créant les conditions favorables à son établissement ». C'est un cas particulier de corrosion électrochimique qui concerne un métal en contact avec une phase aqueuse [18].

#### I. A. 3. 3. La corrosion électrochimique (humide)

Ce type de corrosion s'effectue dans un milieu liquide, il est en général accompagné d'une corrosion électrochimique, ceci est produit essentiellement par l'oxydation d'un métal sous forme d'ions ou d'oxydes et réduite l'agent corrosif existant dans la solution électrolytique par un transfert de charge en présence d'une circulation d'un courant électrique [19].

Pour une corrosion électrochimique on a :



### I. A. 4. Les formes de corrosion [11, 20-22]

On décrit ci-dessous les grandes principales formes de corrosion qui sont illustrées par des figures :

#### I. A. 4. 1. Corrosion uniforme ou générale

La corrosion générale est une forme de corrosion plus répandue correspond à une diminution uniforme de l'épaisseur du métal.

Elle se caractérise par une réaction chimique ou électrochimique qui se produit sur la surface exposée. Cette forme ne présente pas une grande menace du point de vue technique car la durée de vie de l'équipement peut être estimée à partir de taux de corrosion obtenus par immersion d'un échantillon de matériau dans le milieu considéré. La corrosion générale peut être empêchée ou réduite par le choix approprié des matériaux, par l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion ou par la protection cathodique [9, 23].



Figure 1 : Corrosion généralisée

#### I. A. 4. 2. Corrosion localisée [24, 25]

La corrosion localisée est une corrosion se déroule dans des lieux spécifiquement anodiques d'une surface ou d'une structure métallique. Elle diffère de la corrosion uniforme car on distingue clairement les endroits anodiques à ceux cathodiques.

En pratique, la corrosion localisée provient d'une hétérogénéité du matériau ou de l'environnement, elle provoque plus souvent des problèmes à l'ingénieur que la corrosion uniforme.

La corrosion localisée intervenant sur des sites discrets de la surface d'un métal exposé à un environnement corrosif et peut apparaître sous forme de piqûres, fissures (intergranulaire), par crevasse, etc.

##### I. A. 4. 2. 1. Corrosion par piqûres

Ce type de corrosion se caractérise par une attaque très localisée, elle est généralement associée à une rupture locale du film passif qui se produit souvent en présence des halogénures



ou à une passivation incomplète. La quantité du métal corrodé est très faible mais cette forme d'attaque est dangereuse parce qu'elle peut conduire parfois à des perforations rapides des pièces affectées.

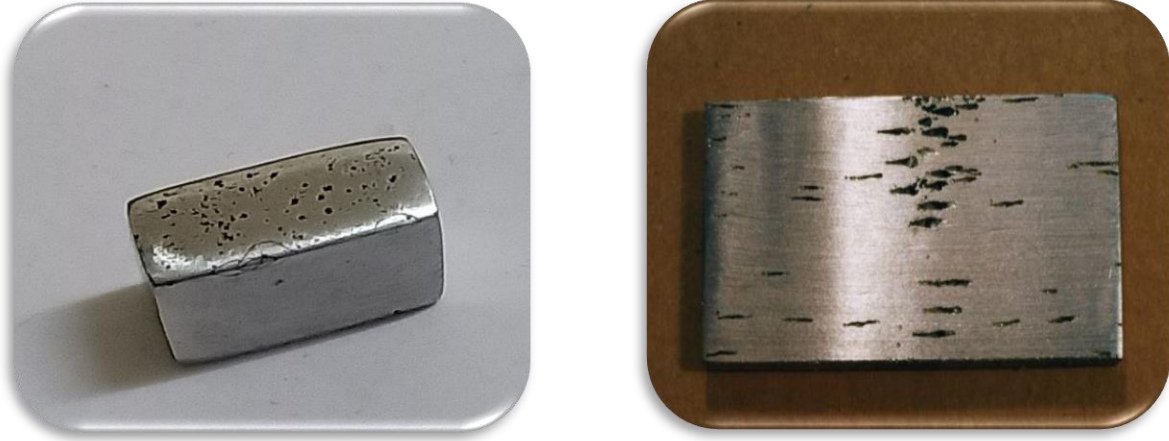


Figure 2 : Corrosion par piqure

#### I. A. 4. 2. 2. Corrosion inter-granulaire

La plupart des métaux et alliages sont sensibles à la corrosion inter-granulaire lorsqu'ils sont exposés à un environnement de corrosion particulier. Les limites des grains sont habituellement plus réactives que la matrice des grains. Par conséquent, une attaque localisée se produit aux limites des grains et à proximité avec un peu de destruction de la matrice. Ce type d'attaque est habituellement rapide et pénètre profondément dans le métal, ce qui entraîne une perte de force et des défaillances catastrophiques. Il est causé par : des impuretés aux limites des grains, enrichissement d'un des éléments de l'alliage ou épuisement d'un des éléments de la zone limitrophe [26].



Figure 3 : Structure métallurgique touchée par la corrosion inter-granulaire

#### I. A. 4. 2. 3. Corrosion par crevasse

Cette forme de corrosion est extrêmement répandue et présente de très grandes similitudes avec la corrosion par piqûres. Elle est favorisée souvent par la présence d'halogénures (surtout chlorures). Son développement est fondamentalement lié à l'existence d'une zone de recoin (ou crevasse) due à un recouvrement partiel de pièces métalliques à un dépôt, filetage et un joint...

Pour pallier à cet inconvénient, il faut utiliser des solutions tel que les joints soudés bout à bout à la place de joints rivés ou boulonnés, la fermeture des fissures dans les joints à recouvrement par des soudures continues, la conception des canots qui permet un séchage complet sans stagnation, l'élimination des dépôts solides et l'utilisation des inhibiteurs [27].



Figure 4 : Corrosion par crevasse d'une valve sphérique en acier inoxydable 316

#### I. A. 4. 3. Corrosion galvanique

La corrosion galvanique, appelée aussi la corrosion bimétallique, se produit lorsque deux métaux immergés dans un électrolyte sont en contact électrique et se caractérisent par une noblesse pratique différente c'est-à-dire un potentiel de corrosion libre différent. Le métal moins noble M, avec un potentiel plus négatif, fonctionne comme anode et son taux de corrosion est accéléré par le couplage. Le métal noble N, avec un potentiel plus positif, se comporte comme cathode, de sorte que son taux de corrosion diminue jusqu'à un arrêt. De plus, les matériaux à conductivité électronique peuvent fonctionner comme cathode, comme le graphite (C) et les sulfures (S) dans les procédés industriels.

Un courant  $I$ , appelé courant galvanique circule à l'intérieur de l'électrolyte du métal moins noble au plus noble et dans le circuit métallique à une direction opposée [28].



Figure 5 : Corrosion galvanique de l'acier inoxydable

#### I. A. 4. 4. Corrosion par érosion

La corrosion par érosion affecte de nombreux matériaux (aluminium, acier, etc), ce phénomène correspond à une dégradation de la surface sous l'effet de l'impact de particules, de gouttelettes, d'un jet ou sous l'action d'un écoulement turbulent au voisinage d'un défaut de surface et conduit à un amincissement local qui revêt souvent l'aspect d'une piqûre allongée. La turbulence créée ainsi contribue à éroder le film protecteur jusqu'à le faire disparaître, créant ainsi une pile de corrosion.



Figure 6 : Corrosion par érosion sur un acier au carbone

#### I. A. 4. 5. Corrosion sous contrainte

Comme son nom l'indique, la corrosion sous contrainte (CSC) résulte de l'action conjuguée d'une contrainte mécanique (résiduelle ou appliquée) et d'un milieu agressif vis-à-vis du matériau, chacun de ces facteurs pris séparément n'étant pas susceptible à lui seul d'endommager la structure. Ce type de corrosion, particulièrement sournois et dangereux pour

les installations, se caractérise par l'apparition de fissures inter ou transgranulaires dont la direction générale de propagation est perpendiculaire à la plus grande contrainte.



Figure 7 : Fissuration par corrosion sous contrainte de l'acier inoxydable austénitique

#### I. A. 4. 6. Corrosion par frottement

La corrosion par frottement concerne les dégâts provoqués au niveau du contact de deux surfaces métalliques en mouvement relatif l'une par rapport à l'autre. Elle se produit essentiellement lorsque l'interface est soumise à des vibrations et à des effets de compression. En présence d'un mouvement de frottement continu en milieu corrosif, on utilise de préférence le vocable de tribocorrosion [24].



Figure 8 : Corrosion par frottement d'un frein de disque

### I. A. 5. Facteurs de corrosion

La résistance à la corrosion d'un matériau n'est pas une propriété intrinsèque. Elle dépend à la fois des caractéristiques du matériau et de celles du milieu à l'addition des conditions d'emploi et la durée d'exploitation qui ont un rôle prépondérant sur les phénomènes de corrosion [29]. Le tableau 1 résume quatre principaux facteurs de corrosion.

Tableau 1 : Principaux facteurs de corrosion [30]

<b>Facteurs du milieu corrosif</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentration du réactif</li> <li>• Teneur en oxygène</li> <li>• pH du milieu</li> <li>• Température</li> <li>• Pression</li> </ul>
<b>Facteurs métallurgiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Composition de l'alliage</li> <li>• Procédés d'élaboration</li> <li>• Impuretés</li> <li>• Traitement thermique</li> <li>• Traitement mécanique</li> </ul>
<b>Facteurs définissant les conditions d'emploi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Etat de la surface</li> <li>• Forme des pièces</li> <li>• Procédés d'assemblage</li> </ul>
<b>Facteurs dépendant du temps</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vieillessement</li> <li>• Tensions mécaniques</li> <li>• Modification des revêtements protecteurs</li> </ul>

### I. A. 6. Définition d'un acier

L'acier peut être défini comme un matériau composé essentiellement de fer et présente une teneur en carbone entre 0,12 et 2,0 % [8, 31]. 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 propriétés des aciers varient dans de grandes proportions avec la teneur en carbone et avec la teneur en éléments d'apport Ni, Cr, Mn, etc. D'une façon générale les aciers possèdent d'excellentes propriétés.



Les aciers sont élaborés pour résister à des sollicitations mécaniques ou des agressions chimiques ou une combinaison des deux [31].

### I. A. 7. Différents types des aciers

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

- Les aciers au carbone d'usage général.
- Les aciers de traitements thermiques.
- Les aciers à outils.
- Les aciers inoxydables [31].

### I. A. 8. La lutte contre la corrosion

La lutte contre la corrosion représente toutes les mesures qu'on peut les prendre pour protéger les matériaux métalliques contre l'action destructive du milieu. La protection la plus immédiate est de choisir des métaux ou alliages résistant aux milieux agressifs. Ainsi dès la phase de conception d'une installation, la prévention contre la corrosion doit être considérée pour éviter de nombreux problèmes et garantir une certaine durée de vie. La solution adoptée doit être compatible avec les prescriptions concernant la protection de l'environnement et permettre le recyclage ou l'élimination des différents composants à la fin de leur utilisation.

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 [32].

---

## B. Inhibition de la corrosion

---

### I. B. 1. Introduction

Pour lutter contre la corrosion, il ne suffit pas de choisir un matériau qui résiste bien à un certain milieu [33]. Alors, il faut également mettre en évidence des méthodes de protection présentant de bonne efficacité et adéquation d'une part de l'installation et d'autre part à faible cout, ne sont pas toxique. Parmi ces méthodes, les inhibiteurs de corrosion sont les plus préconisés.

### I. B. 2. Définition d'un inhibiteur

Les inhibiteurs de corrosion considérés comme un moyen de lutte originale contre la corrosion des métaux. L'originalité vient du fait que le traitement anticorrosif ne se fait pas sur le métal lui-même mais par l'intermédiaire du milieu corrosif.

Selon **NACE** (**N**ational **A**ssociation of **C**orrosion **E**ngineers), un inhibiteur est une substance chimique retarde le taux de corrosion lorsqu'il est ajouté à un environnement en faible concentration [13].

Selon la norme **ISO 8044**, un inhibiteur est une substance chimique ajoutée au système de corrosion à une concentration choisie pour son efficacité en entraînant 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 [34].

### I. B. 3. Les classes d'inhibiteurs

Il existe plusieurs manières pour classer les inhibiteurs de corrosion. Généralement, ils sont classés :

- Par réaction partielle.
- Par mécanisme réactionnel.
- Par domaine d'application (organique ou minérale) [26].

Néanmoins, cette classification n'est pas tout à fait adéquate car un même inhibiteur peut présenter à la fois des caractéristiques propres à chaque groupe de classement.

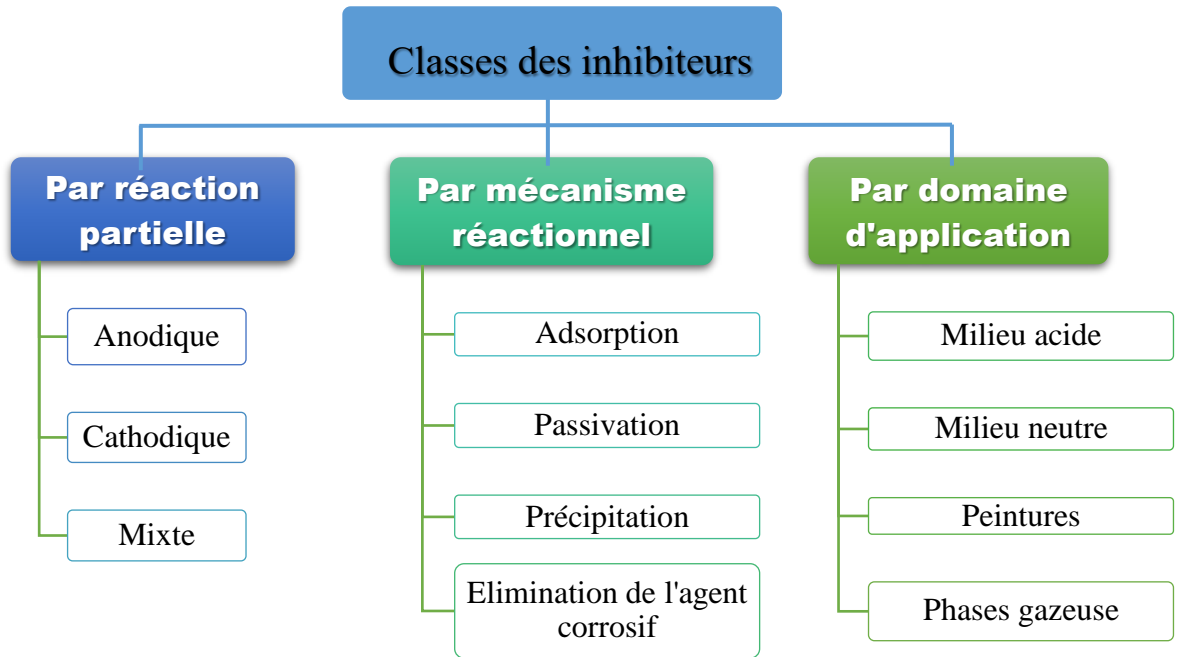


Figure 9 : Classement des inhibiteurs de corrosion

#### I. B. 4. Propriétés des inhibiteurs

Un inhibiteur de corrosion doit réduire la vitesse de corrosion d'un métal sans affecter les caractéristiques physicochimiques. Il doit être stable en présence des autres constituants du milieu sans influencer sur la stabilité d'autres espèces présentes dans ce même milieu. Un inhibiteur doit être également stable à la température d'utilisation et efficace à faible concentration et sa compatibilité avec les normes de non toxicité. Il peut être utilisé en vue d'une protection permanente ou bien agir comme protection temporaire lorsque la pièce métallique est soumise à des risques de corrosion comme le stockage, l'usinage ou le décapage [35].

#### I. B. 5. Inhibiteurs synergiques

Il s'agit d'un inhibiteur unique utilisé dans les systèmes d'eau de refroidissement. Les uns les plus répandus sont ceux qui ont une combinaison d'inhibiteurs (anodiques et cathodiques) et peuvent être utilisés pour obtenir de meilleures propriétés de protection contre la corrosion. Exemples : chromate-phosphates, polyphosphatésilicate, zinc-tanins et zinc-phosphates [26].

#### I. B. 6. Inhibiteurs verts de corrosion

Il n'existe pas d'une définition claire et acceptée pour les inhibiteurs verts de corrosion qui peuvent être appelés « respectueux de l'environnement ». Dans la pratique, les études d'inhibition de la corrosion se sont orientées vers la santé et la sécurité humaine. Récemment



les chercheurs sont concentrés sur l'utilisation de composés écologiques tels que les extraits des plantes, les médicaments non toxiques périmés qui contiennent de nombreux composés organiques [36, 37]. Les acides aminés, alcaloïdes, pigments et tanins sont utilisés comme alternatifs verts pour les composés toxiques et dangereux en raison de la biodégradabilité, l'écoconvivialité, le faible coût et de sa facile disponibilité. Les extraits de certaines plantes et plantes médicinales communes ont été étudiés comme des inhibiteurs de corrosion pour divers métaux et alliages dans différentes conditions environnementales [26].

### I. B. 7. Inhibiteurs utilisés dans le cadre de cette étude

Les inhibiteurs à base de synthèse sont largement utilisées parce qu'ils présentent de bonne activité inhibitrice [38, 39]. Néanmoins, leur utilisation est limitée à cause de leurs effets toxiques et polluants [40, 41], pour pallier ce problème plusieurs recherches sont orientées vers l'utilisation des inhibiteurs à base des produits naturels d'origines végétales [23].

### I. B. 8. Travaux antérieurs sur les inhibiteurs à base d'extraits

Jusqu'à aujourd'hui, plusieurs extraits de plantes ont été utilisés comme inhibiteurs de corrosion pour différents types de métaux en milieu acide chlorhydrique. Toutefois, l'acier et ces alliages ont attiré l'attention des chercheurs à cause de leur large utilisation. Le tableau 2 mentionne l'efficacité inhibitrice des extraits des produits naturels dans le milieu chlorhydrique et à la concentration critique des extraits :

Tableau 2 : Travaux réalisés sur les inhibiteurs à base d'extraits de plante

Référence	Produit vert	Milieu	C Critique	EI <sub>Moy</sub> (%)
[42]	Extrait dichlorométhane de <i>Reutera lutea</i>	1M HCl	700 mg L <sup>-1</sup>	70.00
	Extrait butanolique de <i>Reutera lutea</i>	1M HCl	800 mg L <sup>-1</sup>	85.00
[5]	Extrait dichlorométhane de <i>Taxus baccata</i>	1M HCl	600 mg L <sup>-1</sup>	79.46
	Extrait acétate d'éthyle de <i>Taxus baccata</i>	1M HCl	800 mg L <sup>-1</sup>	78.45
	Extrait butanolique de <i>Taxus baccata</i>	1M HCl	700 mg L <sup>-1</sup>	83.28
[43]	Extrait de <i>Limonium thouinii</i>	1M HCl	400 mg L <sup>-1</sup>	72.72
[38]	Extrait de la plante <i>Justicia gendarussa</i>	1M HCl	200 ppm	91.30
[44]	Extrait de <i>henna</i>	1 M HCl	3000 ppm	92.72
[45]	Extrait de feuilles d' <i>Osmanthus fragran</i>	1 M HCl	0.340 g/l	96.80
[46]	Extrait de <i>Pelargonium</i>	1 M HCl	10 ml L <sup>-1</sup>	76.79
[47]	Extrait de feuilles de <i>Geissospermum</i>	1 M HCl	100 mg L <sup>-1</sup>	92.00

## I. B. 9. Types d'adsorption

L'adsorption est un phénomène de surface universelle car toute surface est constituée d'atomes n'ayant pas toutes leurs liaisons chimiques satisfaites. Cette surface a donc tendance à combler ce manque en captant les atomes et les molécules qui se trouvent à proximité. Ce processus est régi par deux facteurs : la charge électrique résiduelle à la surface du métal et la structure chimique de l'inhibiteur. Deux types d'adsorption peuvent être distingués : la physisorption et la chimisorption [28, 48].

### I. B. 9. 1. Adsorption physique

La physisorption est due aux forces de Van Der Waals ou aux forces électrostatiques existant entre les charges ioniques ou les dipôles de l'espèce inhibitrice et la surface du métal électriquement chargée [49, 50].

Du point de vue énergétique, la physisorption se produit aux basses températures avec des énergies de l'ordre de 10 Kcal.mol<sup>-1</sup>, elle correspond à un processus réversible (équilibre dynamique d'adsorption et de désorption) et ne conduit pas à une modification de l'identité chimique de la molécule adsorbée [51].

### I. B. 9. 2. Adsorption chimique

La chimisorption, consiste en la mise en commun d'électrons entre la partie polaire de la molécule et la surface métallique, ce qui engendre la formation de liaisons chimiques beaucoup

plus stables car elle est basée sur des énergies de liaison plus importantes. Les électrons proviennent en grande majorité des doublés non appariés des molécules inhibitrices tels que O, N, S, P... (tous ces atomes se distinguant aux autres atomes par leur grande électronégativité). L'adsorption chimique s'accompagne d'une profonde modification de la répartition des charges électroniques des molécules adsorbées. elle est souvent un mécanisme irréversible [48].

Le tableau 3 montre la différence entre l'adsorption physique et chimique:

**Tableau 3 :** Principales différences entre les deux types d'adsorption [52]

CRITERE DE COMPARAISON	ADSORPTION PHYSIQUE	ADSORPTION CHIMIQUE
Nature des interactions	Liaisons faibles de Van Der Waal	Liaisons chimiques
Activation du processus	Processus non activé	Processus activé
Cinétique du processus	Spontanée	Appréciable
Réversibilité	Complètement réversible	Souvent irréversible
Spécificité	Non spécifique	Spécifique
Nombre de couches adsorbées	Mono- ou polymoléculaire	Monomoléculaire
Température du processus	Basse température	Température élevée

## I. B. 10. Modèles d'isothermes

Les composés organiques présentent un effet inhibiteur par l'adsorption sur la surface du métal, certains isothermes d'adsorption ont été largement utilisés pour étudier le mécanisme d'inhibition de la corrosion. On a tenté d'adapter les données expérimentales à divers isothermes [45]. Différents auteurs utilisent les isothermes de Langmuir, Temkin, Freundlich et Frumkin pour connaître le mode d'adsorption des inhibiteurs à base des extraits de plantes [53-55].

### I. B. 10. 1. Isotherme de Langmuir

Le modèle de Langmuir suppose qu'il existe à la surface un nombre fixe de sites. Chacun de ces sites ne peut adsorber qu'une seule particule [56]. La vitesse d'adsorption est proportionnelle à la concentration en inhibiteur  $C_{inh}$  et à la fraction des sites d'adsorption non occupés ( $1 - \theta$ ), sachant que  $\theta$  représente la fraction des sites occupés par l'inhibiteur ( $0 < \theta < 1$ ).

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C \dots\dots\dots(I.1)$$

$\theta$  : Taux de recouvrement.

$C$  : La concentration de l'inhibiteur dans l'électrolyte.

$K_{ads}$  : La constante d'équilibre du processus d'adsorption.

### I. B. 10. 2. Isotherme de Freundlich

Le modèle d'adsorption de Freundlich est utilisé dans le cas de formation possible de plus d'une couche sur la surface et les sites sont hétérogènes avec des énergies de fixation différentes [57].

L'isotherme de Freundlich est donné par la relation suivante :

$$\log \theta = \log K_{ads} + \alpha \log C \dots\dots\dots(\mathbf{I.2})$$

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

### I. B. 10. 3. Isotherme de Temkin

Le modèle de Temkin est caractérisé par une distribution uniforme des énergies de liaison jusqu'à une certaine énergie maximale de liaison [58].

L'équation de l'isotherme de Temkin est :

$$\theta = \frac{1}{\alpha} \log(K_{ads} C) \dots\dots\dots(\mathbf{I.3})$$

### I. B. 10. 4. Isotherme de Frumkin

L'équation de Frumkin (également appelée Frumkin-Fowler-Guggenheim, FFG, Équation) a été spécialement développée pour tenir compte des interactions latérales en surface [59].

L'équation de l'isotherme de Frumkin est :

$$\ln \left( \frac{\theta}{C(1-\theta)} \right) = \ln K_{ads} + \alpha \theta \dots\dots\dots(\mathbf{I.4})$$

---

## C. Électrodéposition

---

### I. C. 1. Introduction

L'électrodéposition est une méthode largement utilisée pour conférer une protection aux surfaces métalliques. Ces revêtements peuvent être constitués de métaux simples, de nombreux alliages binaires et même ternaires peuvent être aussi déposés, produisant dans de nombreux cas, une protection renforcée contre la corrosion. Une grande variété de métaux peut être déposée de cette manière allant de métaux nobles tels que l'or et l'argent ou métaux de base tels que le zinc et le cadmium. Le zinc fournit une bonne protection aux substrats ferreux sous-jacents. Toutefois, plus récemment, on s'est beaucoup intéressé à l'utilisation d'alliages de zinc électrodéposés pour des utilisations finales semblables. Ces alliages sont généralement une combinaison de zinc et un métal dit "bloc de fer". Les exemples les plus courants et plus répandus sont le zinc-fer, le zinc-nickel et le zinc-cobalt [60].

### I. C. 2. Définition et principe

Les termes "déposition" et "électrodéposition" sont des termes anglophones. Il serait plus correct d'utiliser "dépôt" ou "électrodépôt" pour parler de l'objet déposé, mais aussi de l'action de déposer. Ces termes étant malgré tout peu usités dans ce dernier sens, même dans la littérature scientifique francophone, nous avons choisi de les utiliser malgré tous les termes anglophones [61, 62].

L'électrodéposition est une technique permettant de réduire les espèces présentes en solution, afin de réaliser un dépôt sur un substrat. Les revêtements issus de l'électrodéposition sont destinés souvent à conférer des nouvelles propriétés au substrat, tel que la protection contre la corrosion, la brillance métallique, la rugosité nanométrique et l'amélioration de différentes propriétés, etc. Le choix de métal et le sel qui lui correspond dépend des objectifs de l'étude. L'électrodéposition a été utilisée pour l'électroformage [63], les dispositifs d'enregistrement magnétiques à haute densité (figure 10) présente les différents éléments d'un montage d'électrodéposition. Il est constitué d'une cellule d'électrolyse, deux électrodes et un générateur de courant. La cellule renferme un électrolyte contenant les ions du métal à déposer et selon les cas : un sel conducteur, un agent tampon, un agent complexant et des additifs. Le générateur électrique permet de faire circuler un courant entre les deux électrodes ; la cathode est constituée

par le substrat à revêtir et une anode sert à fermer le circuit électrique comme indiqué dans la figure 10 [64, 65].

A l'électrode de travail (cathode) se produit la réduction de l'ion métallique suivant la demi-réaction :  $M^{n+} + n e^{-} \rightarrow M_{(s)}$

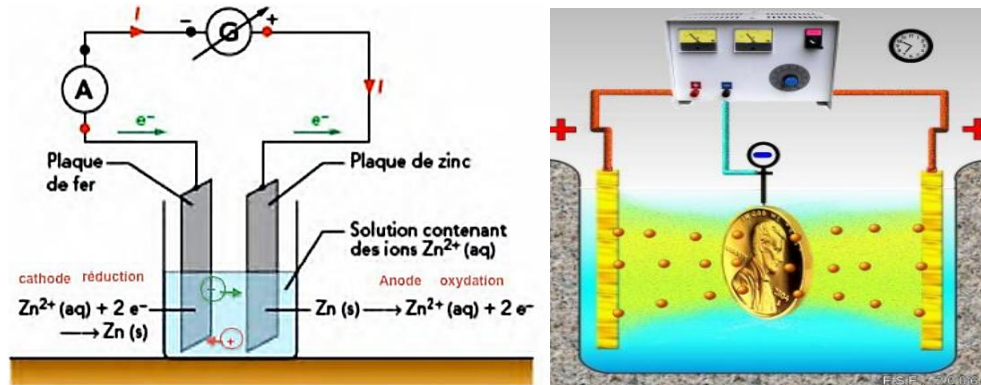


Figure 10 : Schéma de montage d'une cellule d'électrodéposition

### I. C. 3. L'influence des paramètres de dépôt sur procédés d'électrodéposition

Différents paramètres influencent la structure des dépôts électrolytiques. Cette caractéristique est d'une importance primordiale car elle conditionne les propriétés des dépôts. La structure dépend des plusieurs paramètres tels que:

- ✓ La nature du métal à déposer.
- ✓ L'état de surface du substrat.
- ✓ La densité de courant.
- ✓ La température de fonctionnement est habituellement entre 15 et 70 °C.
- ✓ L'agitation du bain.
- ✓ Le pH et la composition de l'électrolyte [66].

### I. C. 4. Additifs des bains électrolytiques

Lors de l'électrodéposition, il est admis que l'ajout de faibles quantités des additifs conduit à des modifications importantes sur les propriétés des dépôts. Ces additifs vont modifier les mécanismes d'électrodéposition en affectant de manière sélective la vitesse de l'étape de germination et/ou de croissance. L'utilisation d'additifs dans les bains d'électrolyse est nécessaire afin d'améliorer les propriétés du revêtement telles que la microstructure, la

morphologie, les propriétés mécaniques (la micro dureté, la rugosité, les contraintes internes...) et électrochimiques (la résistance à la corrosion) [67].

## I. C. 5. Avantages et inconvénients de l'électrodéposition [9]

### I. C. 5. 1. Avantages

- ✓ Rentable (économique).
- ✓ Simplicité de mise en œuvre
- ✓ Peu coûteuse
- ✓ Possibilité de dépôt sur de grandes surfaces et de surfaces irrégulières.
- ✓ Métal déposé à haute pureté.
- ✓ Assure un contrôle précis du processus en réglant plusieurs paramètres.
- ✓ Epaisseur de revêtement strictement définie.
- ✓ Dépôt continu.
- ✓ Facilité à automatiser.
- ✓ Gamme de températures étendue et possibilité de géométries complexes.

### I. C. 5. 2. Inconvénients

Il nécessite un contact électrique tout au long du process

## I. C. 6. Etapes de l'électrodéposition

Lors d'une réaction d'électrodéposition en milieu aqueux, les cations présents dans l'électrolyte sont transférés sur la surface de la cathode pour former le dépôt métallique. Il est couramment admis que ce procédé fait intervenir plusieurs étapes intermédiaires [68-70]. Il comporte :

- ✓ Transport de l'ion métallique hydraté ou du complexe hydraté du centre de la solution vers la cathode.
- ✓ Perte d'une partie de l'hydratation de l'ion métallique hydraté à la surface de la cathode.
- ✓ Transfert de charge avec la formation d'adatoms (ou adions) à la surface de la cathode.
- ✓ Formation de germes à la surface de la cathode par diffusion des adatoms à la surface de l'électrode.

- ✓ Rassemblement de plusieurs germes afin de minimiser l'énergie de surface pour former des noyaux stables.

Dans le cas d'une surface idéale, les ions métalliques présents en solution sont généralement hydratés ou complexés. Ceux-ci sont transportés vers la cathode à travers la couche de diffusion et la double couche d'Helmholtz. En se rapprochant de la cathode, les ions métalliques se déshydratent où se décomplexent. Une fois déshydratés ou décomplexés, ceux-ci se déchargent en combinant leurs électrons avec ceux de la cathode pour former des atomes métalliques à la surface de la cathode [71].

### I. C. 7. Mécanismes d'actions des additifs

Les additifs sont responsables de la qualité finale des dépôts et leur utilisation est extrêmement importante en raison de leurs effets sur la morphologie, la structure... etc des dépôts. Malgré leurs classifications, nous ne pouvons pas établir de mode d'action général, chaque additif a sa propre façon d'agir qui dépend fortement du milieu où il se trouve. Néanmoins, nous savons que les additifs peuvent agir sur la cinétique de la réaction selon trois types de mécanismes [72].

#### I. B. 7. 1. Blocage de la surface

L'additif s'adsorbe sur la surface et bloque totalement certains sites de transfert de charge [73]. En présence d'additif, la constante cinétique globale  $k$  n'est pas modifiée, cependant la réduction se fait sur une aire réduite. Le mécanisme de cristallisation n'est pas modifié mais la quantité des espèces électro actives réduites est directement fonction du taux de recouvrement  $\theta$  de l'additif. Ce paramètre est lui-même fonction de la nature du substrat, de l'affinité de chaque molécule avec la surface (pour des raisons soit géométriques, soit électroniques ...), du pH, du potentiel imposé et de la température [68].

#### I. B. 7. 2. Adsorption réactive

L'additif s'adsorbe à la surface et modifie la cinétique de réaction sur certains sites. Il est peut agir sur la constante cinétique selon les cas par modification du potentiel d'Helmholtz, par effet de pontage (catalyse) et/ou par modification de tension interraciale [73]. Il y a deux principaux facteurs qui déterminent l'adsorption : le substrat et les facteurs d'adsorbat. Les facteurs de substrat incluent la densité électronique, l'emplacement de la bande d et les formes des orbitales électroniques du substrat. Les facteurs d'adsorbat incluent l'électronégativité et la forme des orbitales d'adsorbat. Il y a deux types d'adsorption : adsorption chimique et adsorption physique [67].



La réduction de la constante cinétique  $k$ , l'additif peut ralentir ou accélérer la réaction de réduction comme indiqué dans la figure 11, en modifiant  $k'$  qui est une seconde constante de vitesse. La constante cinétique globale est donnée par [64] :

$$k_t = k'(\theta) + k(1 - \theta) \dots\dots\dots(1.5)$$

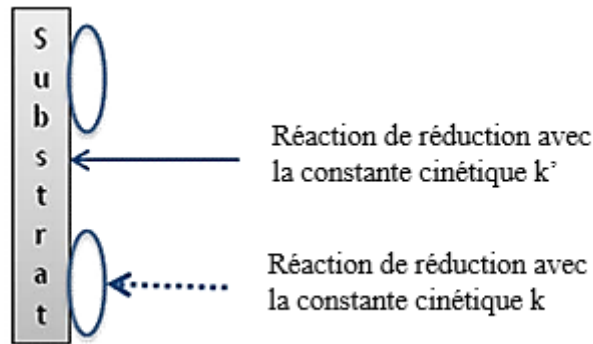


Figure 11 : Adsorption de l'additif sur la surface du substrat

### I. B. 7. 3. Complexation en solution

L'additif complexe l'espèce électroactive en solution. Dans ce cas c'est l'étape de décomplexation qui introduit une nouvelle constante cinétique avant la formation de l'adatom [73]. Dans la littérature, le citrate est l'agent complexant le plus utilisé lors de l'électrodéposition des alliages à base de cuivre. Cette déposition dépend de plusieurs paramètres comme la stabilité du complexe d'ion métallique/citrate, la concentration des ions citrate et le pH de la solution électrolytique [67].

## I. C. 8. Classification des additifs [67]

### I. C. 8. 1. Agents mouillants

Les mouillants sont des molécules actives ceci permet d'améliorer la qualité de dépôt. Ce phénomène sont également capables de solubiliser des substances organiques insolubles dans l'eau. Ce dernier utilisée dans les bains de dégraissage où ils déplacent les huiles et il constituée de deux parties ;

- ✓ Une partie qui s'accroche à l'eau : la partie hydrophile (lipophobe)
- ✓ Une partie qui s'accroche à la graisse : la partie hydrophobe (lipophile)

Selon la charge de la tête hydrophile, on distingue quatre types des agents mouillants :

1. Les anioniques : leur tête hydrophile est contient une charge négative.
2. Les cationiques : leur tête hydrophile est contient une charge positive.

3. Les non ioniques : la molécule ne comporte aucune charge nette.
4. Les amphotères : leur tête hydrophile comporte une charge positive et une charge négative, la charge globale est nulle.

#### I. C. 8. 2. Agents brillants

La brillance d'un dépôt électrolytique est l'une de ces qualités les plus importantes, en particulier quand il s'agit de revêtements décoratifs et l'action de brillance représente l'une des fonctions primordiales des additifs organiques. Cette caractéristique est obtenue si le dépôt remplit deux critères. La taille des cristallites qui le composent doit être inférieure à la longueur d'onde de la lumière visible (0,4  $\mu\text{m}$ ) et d'autre part, le dépôt doit présenter une structure de grains orientée. Mais le premier critère n'est pas suffisant car la brillance dépend du degré d'orientation dans le même plan.

#### I. C. 8. 3. Agents nivelant

L'élimination des irrégularités de surface est l'un des effets macroscopiques intéressants apportés par ce type d'additifs. On appelle cet effet : effet nivelant. Ce processus est une résultante directe de l'action catalytique des additifs. En effet, la concentration des espèces activantes est différente sur une surface concave ou convexe en fonction des effets de champ. Ainsi la vitesse de cristallisation augmente dans les trous (surface concave) et diminue sur les bosses (surface convexe). Il en résulte une mise à niveau immédiate de la surface.

### I. C. 9. Additifs à base des plantes

Les différents additifs sont utilisés aujourd'hui dans les bains électrolytiques. Cependant, la plupart de ces substances sont toxiques et très dangereux pour l'être humain et inapproprié pour l'environnement, comme exemple le furfurale et la thiourée qui sont des additifs très toxiques utilisés dans les bains de zincage [74-78]. La toxicité de ces composés, se manifeste durant la synthèse ou l'application. Par conséquent, de nombreuses études ont été recherchées dans le but pour trouver un moyen de remplacer ces produits synthétiques par d'autres à base de plantes.

A blue graphic resembling a scroll, with a white background and a blue border. The text is centered within the scroll.

*CHAPITRE II*  
*TÉCHNIQUES ET*  
*PROCÉDURES*  
*EXPÉRIMENTALES*

## II. 1. Introduction

Les phénomènes de corrosion sont très complexes, nécessitent l'emploi de différentes méthodes expérimentales pour estimer le taux de corrosion et l'action de l'inhibiteur utilisé. La gravimétrie est la plus utilisée à cause de sa facilité d'application et de sa simplicité. Les techniques électrochimiques présentent une sensibilité et une précision remarquable, ce qui rend leur utilisation indispensable pour l'étude des phénomènes liés à la corrosion, de ce fait les méthodes électrochimiques sont capables d'expliquer ces phénomènes à plus loin [79].

Donc ce chapitre a pour but de présenter les méthodes et les techniques expérimentales à utiliser dans le cadre de cette étude.

## II. 2. La méthode gravimétrique

Cette méthode présente l'avantage d'être d'une mise en œuvre simple, nécessitant tout simplement une balance sensible aux faibles mesures, bien qu'elle représente une méthode directe pour la détermination de la vitesse de corrosion et en conséquence l'efficacité inhibitrice dans le cas de l'utilisation des inhibiteurs. Son principe repose sur la mesure de la perte de masse ( $\Delta m$ ) subie par un échantillon de surface ( $S$ ), pendant un temps d'immersion ( $t$ ) dans une solution corrosive maintenue à température constante (Un bain thermostaté est à utiliser pour permettre le maintien de l'électrolyte à la température désirée). Le but de cette méthode est l'évaluation de la vitesse de corrosion ( $V_{corr}$ ) qui se définit comme une perte de masse par unité de surface et de temps et peut être exprimée en ( $\text{mg cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) par la relation suivante [80] :

$$V_{corr} = \frac{\Delta m}{S \cdot t} \dots\dots\dots(\text{II.1})$$

$$\Delta m = m_1 - m_2 \dots\dots\dots(\text{II.2})$$

$m_1$  : La masse de l'échantillon avant l'immersion en mg.

$m_2$  : La masse de l'échantillon après l'immersion en mg.

$S$  : La surface totale exposée des échantillons en  $\text{cm}^2$ .

$t$  : Temps d'immersion des échantillons dans la solution en heures.

Le taux de recouvrement  $\theta$  et l'efficacité inhibitrice  $EI$  (%) sont calculés par les équations suivantes :

$$\theta = \frac{V_{corr}^{\circ} - V_{corr}^{inh}}{V_{corr}^{\circ}} \dots\dots\dots(II.3)$$

$$EI (\%) = \theta \times 100 \dots\dots\dots(II.4)$$

$V_{corr}^{\circ}$  et  $V_{corr}^{inh}$  sont respectivement les vitesses de corrosion de l'échantillon après l'immersion dans le milieu corrosif sans et avec addition de l'inhibiteur.

Néanmoins cette méthode ne permet pas d'accéder à des paramètres cinétiques, tel que la vitesse des réactions électrochimique, elle ne permet pas aussi l'approche des mécanismes mis en jeu lors de la corrosion. Le recours donc à des techniques électrochimiques s'avère nécessaire pour compléter l'étude de la corrosion et l'inhibition contre la corrosion.

## II. 3. Procédures expérimentales

### II. 3. 1. Matériaux

Le matériau utilisé dans l'étude de la corrosion est un acier au carbone de type **A283 Gr-C** dont la composition est détaillée dans le tableau 4.

Tableau 4 : Composition chimique de l'acier **A283 Gr-C**

Elément	C	Mn	Si	P	S	Fe
%	0.23	0.85	0.4	0.024	0.030	Le reste

Tandis que pour l'électrodéposition, les essais ont été réalisés sur un acier doux de nuance **E24-2** dont la composition est détaillée dans le Tableau 5. Des plaques de 2 cm x 3 cm x 0.1 cm de dimension ont été recouvertes de résine époxy en laissant une seule surface d'exposition.

Tableau 5 : Composition chimique de l'acier doux de nuance **E24-2**

Elément	C	Mn	P	S	Si	Al	N	Fe
%	0.17	0.6	0.035	0.035	0.04	0.02 – 0.05	0.05	Le reste

### II. 3. 2. Milieu corrosif

Le milieu agressif est une solution acide *HCl* 1 M obtenue par la dilution, à l'eau distillée, de l'acide commercialisé grade 37% (Merck).

### II. 3. 3. Inhibiteur utilisé

Dans le présent travail, on a étudié l'effet l'extrait butanolique de la plante *Turgenia latifolia* comme inhibiteur de la corrosion de l'acier **A283 Gr-C**, et comme additif dans les bains l'électrodéposition.

### II. 3. 4. Bains d'électrodéposition

Les bains d'électrodéposition sont constitués d'un mélange de  $ZnCl_2$  (65 g/l), KCl (200 g/l),  $H_3BO_3$  (20 g/l) et différentes concentrations de l'extrait butanolique de la plante *Turgenia latifolia* (1 g/l à 1,6 g/l) [81].

## II. 4. Rappel botanique de la plante *Turgenia latifolia*

### II. 4. 1. La famille des Apiacées

La famille des Apiaceae est une famille de plantes appartenant à la classe des Magnoliopsida (Dicotylédones), cette famille renferme 3000-3700 espèces regroupées en 300-450 genres [82, 83]. Elle est répartie sur la majeure partie du globe, plus commune dans les régions montagneuses tempérées et relativement rare en zone tropicale [84]. En Algérie, cette famille est très importante, elle est représentée par 55 genres [85].

### II. 4. 2. Le genre *Turgenia*

Le *Turgenia* a le calice à cinq dents sétacées; les pétales obovés, échancrés, en languette recourbée ; les extérieurs plus grands et bifides, le fruit resserré sur le côté et presque didyme; les arêtes primaires latérales, muriquées ou aiguillonnées; les autres primaires et secondaires aiguillonnées sur deux ou trois rangs; les bandelettes solitaires sous les arêtes secondaires, le carpophore sétacé et bifide, la semence recourbée sur les côtés [86].

### II. 4. 3. Description

Tige scabre, robuste, hispide (10-40 cm) ; feuilles pinnatiséquées, scabres, à segments larges, lancéolés ou oblongs, pinnati- fides ; ombelles longuement pédonculées, à 2-5 rayons; involucre à 2-5 folioles elliptiques, obtuses, membraneuses aux bords; involucrels pareils aux involucre; fleurs assez grandes, ordinairement rosées, les externes fertiles et brièvement pédicellées; fruits gros, à gros aiguillons ordinairement rouges-violacés [87].

### II. 4. 4. Distribution

Afrique du Nord, Europe centrale et méridionale, Iran, Sibérie et Asie occidentale, Afghanistan, Himalaya en Inde et W. Pakistan.



Figure 12 : Photographies de la plante *Turgenia latifolia*

#### II. 4. 5. Classification botanique

Tableau 6 : Classification botanique de la plante *Turgenia latifolia*.

<b>Ordre</b>	Apiales
<b>Famille</b>	Apiaceae
<b>Genre</b>	<i>Turgenia</i>
<b>Espèce</b>	<i>Turgenia latifolia</i>

#### II. 4. 6. Les synonymes de la plante *Turgenia latifolia*

- ✓ *Caucalis latifolia* L.
- ✓ *Daucus turgenia*.
- ✓ *Selinum turgenia*.
- ✓ *Turgenia brachyacantha* Boiss.
- ✓ *Turgenia tuberculata* Boiss (<https://www.tela-botanica.org> 2020).

#### II. 4. 7. Récolte de la plante

Les parties aériennes de *Turgenia latifolia* (Apiaceae), ont été collectés à la région de Sétif (Est de l'Algérie) pendant la période de floraison en juin (2019), identifiée par le Pr. H. Laouer (Département de biologie, Université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie).

#### II. 4. 8. Extraction

Les tiges et les feuilles de la plante sont coupées en petits morceaux, elles sont ensuite extraites par macération dans un mélange Méthanol-Eau à chaud (7/3 : V/V) pendant 24 heures. Cette opération est répétée trois fois. Les diverses fractions récupérées sont ensuite réunies et évaporées sous pression réduite à une température inférieure à 70 °C jusqu'à l'obtention d'un résidu sirupeux. Ce dernier est repris par de l'eau bouillante, une décantation pendant trois nuits permet l'élimination de la chlorophylle. Le mélange filtré est soumis à une extraction liquide-liquide en utilisant plusieurs solvants séparément dans une séquence de polarité croissante en partant du dichlorométhane, acétate d'éthyle et le *n*-butanol, où la phase organique est récupérée pour chaque solvant. Les dernières solutions ont été évaporées à sec en utilisant un évaporateur rotatif pour obtenir les extraits désirés [88, 89].

Les différentes étapes de l'extraction sont représentées sur la figure 13.



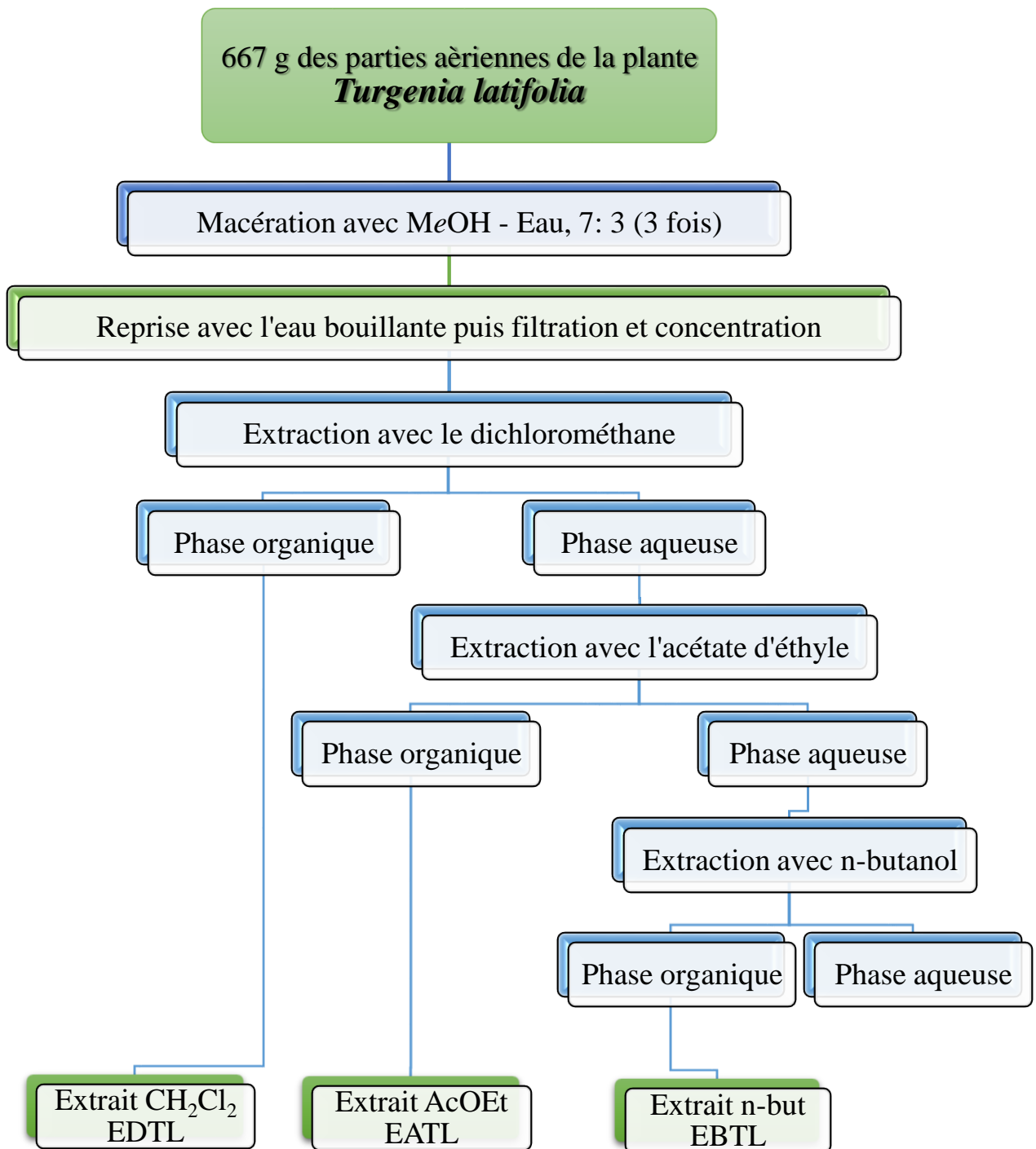


Figure 13 : Schéma général de l'extraction

## II. 5. Techniques électrochimiques

### II. 5. 1. Suivi du potentiel de corrosion en circuit ouvert (OCP)

Egalement désigné par le potentiel spontané, potentiel d'abandon, de repos ou encore libre,  $E_{OCP}$  (le potentiel en circuit ouvert) est la grandeur électrochimique mesurable la plus immédiate. Cette technique simple, qui consiste à suivre le potentiel en fonction du temps d'immersion dans le milieu est la seule mesure qui n'entraîne absolument aucune perturbation de l'état du système étudié. Elle est mesurée par rapport à un potentiel de référence, dans ce cas celui de l'électrode au calomel saturée Hg/Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>/KCl. Le suivi du potentiel en circuit ouvert apporte des informations préliminaires sur la nature des processus se produisant à l'interface métal/électrolyte (corrosion, passivation ...) [1].

### II. 5. 2. Les courbes de polarisation (LPR)

Cette méthode permet de déterminer d'une façon précise les paramètres électrochimiques d'un métal au contact d'un électrolyte à savoir : l'intensité de courant de corrosion ( $i_{corr}$ ), le potentiel de corrosion ( $E_{corr}$ ), les pentes de Tafel, la résistance de polarisation ( $R_p$ ).

Nous intéressons sur un paramètre ( $i_{corr}$ ), pour calculer l'efficacité inhibitrice de notre extrait à partir l'équation suivante :

$$EI (\%) = \frac{i_{corr} - i_{corr}^{inh}}{i_{corr}} \times 100 \dots\dots\dots(II.5)$$

$EI$  (%): L'efficacité inhibitrice.

$i_{corr}$ ,  $i_{corr}^{inh}$ : La densité de courant de corrosion en absence et en présence de l'inhibiteur.

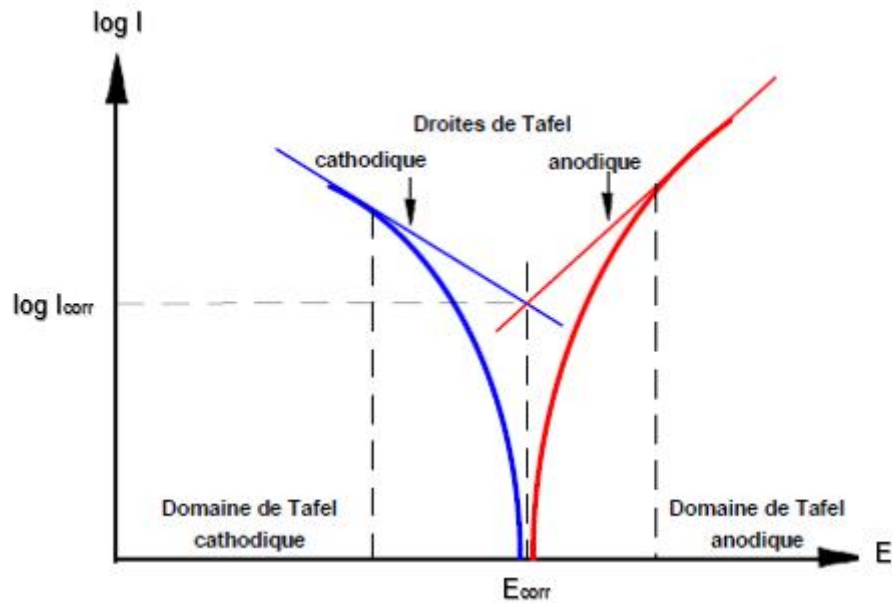


Figure 14 : Les paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel

### II. 5. 3. La spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE)

La spectroscopie d'impédance électrochimique est une méthode qui permet d'avoir des informations sur les étapes élémentaires qui constituent le processus électrochimique global [1].

La méthode d'impédance est une des puissantes techniques utilisées dans le domaine de l'électrochimie et des matériaux. Elle donne des renseignements sur les propriétés de transport de charge au sein des matériaux et des phénomènes électrochimiques qui se produisent aux interfaces électrode- solution.[90]

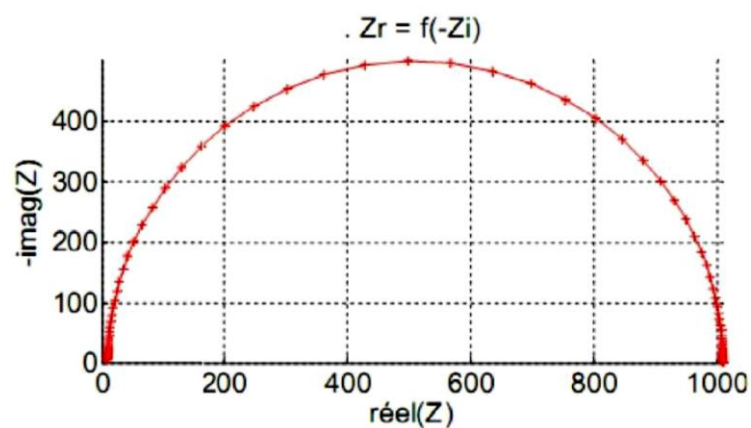


Figure 15 : Exemple du tracé dans le plan complexe (plan de Nyquist)

A blue graphic resembling a scroll, with a white border and rounded corners. The top and bottom edges are slightly curved, and there are small circular details on the left side that suggest the scroll is unrolled. The text is centered within the scroll.

*CHAPITRE III*

*RÉSULTATS*

*ET*

*DISCUSSIONS*

---

### III. Introduction

Le présent travail est consacré à l'étude de l'extrait butanolique des parties aériennes de la plante *Turgenia latifolia* **EBTL** comme inhibiteur de corrosion de l'acier au carbone **A283 Gr-C** en solution 1M HCl, en plus, son utilisation comme additif dans l'électrodéposition d'une plaque d'acier doux de nuance **E24-2**. Les méthodes gravimétrique et électrochimique comme la polarisation potentiodynamique et la spectroscopie d'impédance électrochimique ont été utilisées lors de cette étude. Puis, nous avons calculé et commenté à certaines valeurs thermodynamiques du processus d'adsorption et d'activation à partir des isothermes d'adsorption.

---

## A. Corrosion

---

### III. A. 1. Etude gravimétrique (perte en masse)

La méthode de perte de poids a trouvé une large application pratique grâce à sa simplicité relative et sa disponibilité parce qu'elle utilise un paramètre direct pour l'évaluation quantitative de la corrosion, c'est-à-dire la perte de masse du métal [53]. Les données obtenues pour le comportement à la corrosion de l'acier **A283 Gr-C** dans une solution de 1 M HCl avec et sans addition de différentes concentrations de l'**EBTL**, après 5 heures de période d'immersion à une gamme de température allant de 20 à 50 °C et à l'air atmosphérique, donc on a testé à la fois l'effet de la concentration de l'extrait et l'effet de la température. Le taux de recouvrement et l'efficacité inhibitrice ont été calculés et regroupés dans le tableau 7 pour chaque température testée.

Les échantillons de l'essai gravimétrique sont coupés d'une tôle de l'acier **A283 Gr-C** à l'aide d'une tronçonneuse à froid sous une forme rectangulaire et subissent avant chaque essai un prétraitement, qui consiste en un polissage mécanique aux papiers abrasifs en grains décroissante (160, 300, 400, 800, 1000, 1500 et 2000) sous jet d'eau suivi d'un rinçage à l'eau distillée puis à l'acétone puis séchés à l'air.

Tableau 7 : Influence de la concentration de l'EBTL sur l'efficacité inhibitrice à différentes températures (20 – 50) °C

C (mg L <sup>-1</sup> )	Température											
	20 °C			30 °C			40 °C			50 °C		
<i>V<sub>corr</sub></i> (mg cm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	$\theta$	<i>EI</i> (%)	<i>V<sub>corr</sub></i> (mg cm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	$\theta$	<i>EI</i> (%)	<i>V<sub>corr</sub></i> (mg cm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	$\theta$	<i>EI</i> (%)	<i>V<sub>corr</sub></i> (mg cm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	$\theta$	<i>EI</i> (%)	
0	0,1676	-	-	0,3201	-	-	0,3525	-	-	0,8510	-	-
10	0,0709	0.5765	57.65	0,1601	0.4997	49.97	0,2201	0.3755	37.55	0,6448	0.2422	24.22
20	0,0593	0.6490	64.90	0,1398	0.5632	56.32	0,2038	0.4219	42.19	0,5467	0.3575	35.75
30	0,0581	0.6532	65.32	0,1337	0.5822	58.22	0,1526	0.5671	56.71	0,4039	0.5253	52.53
40	0,0413	0.7531	75.31	0,1002	0.6871	68.71	0,1191	0.6620	66.2	0,3687	0.5667	56.67
50	0,0317	0.8104	81.04	0,0890	0.7219	72.19	0,1067	0.6973	69.73	0,3052	0.6413	64.13

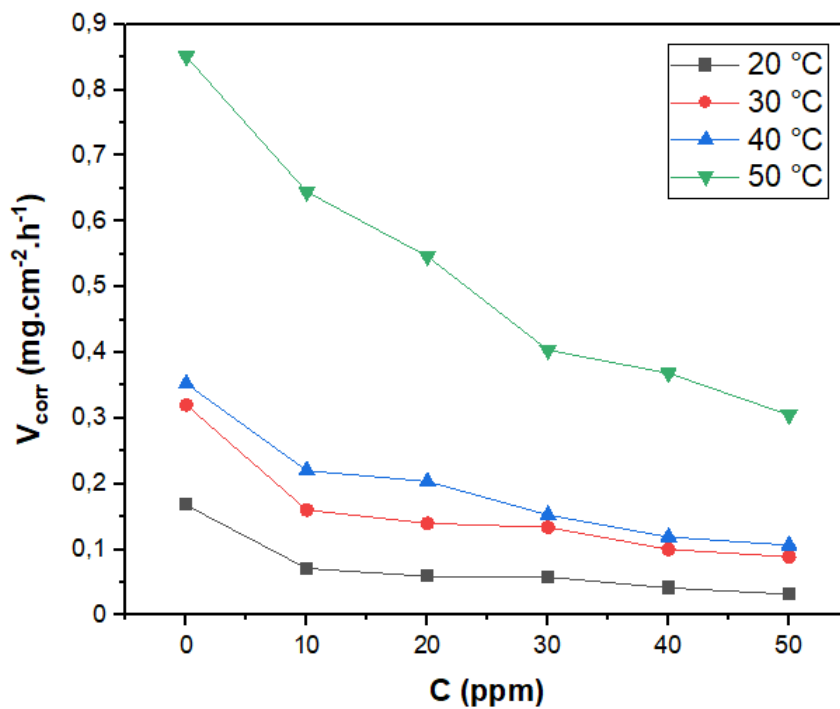


Figure 16 : Evolution de la vitesse de corrosion en fonction de la concentration d'extrait dans la solution à 1M HCl à différentes températures

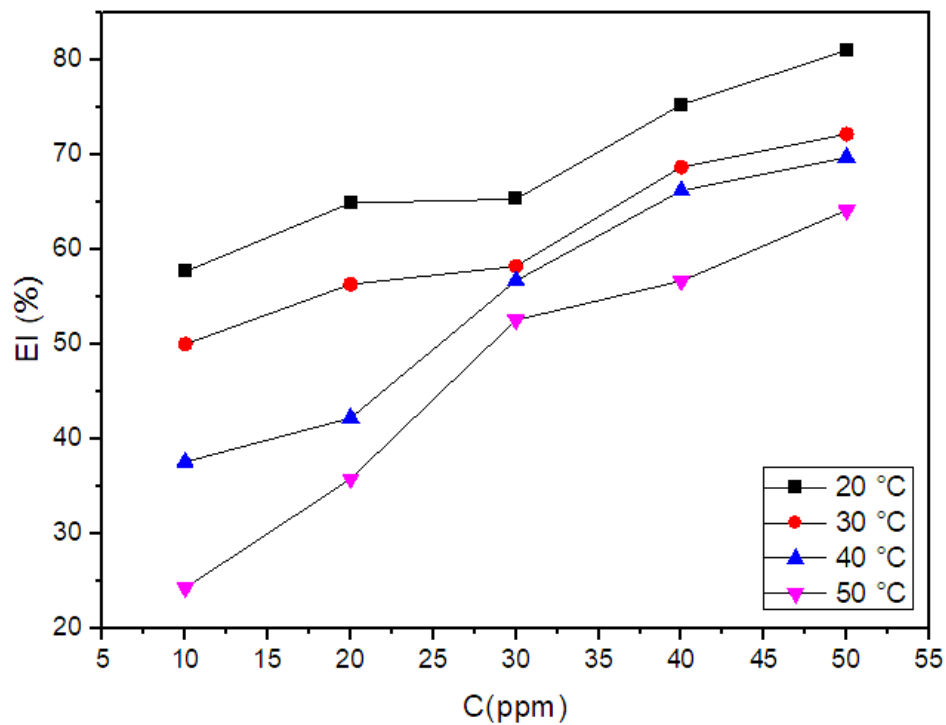


Figure 17 : Evolution de l'efficacité inhibitrice en fonction de la concentration de l'EBTL dans une solution HCl 1M à différentes températures

L'examen des résultats du le tableau 7, les figures 16 et 17 montrent que :

- ✓ L'EBTL possède de bonne propriété inhibitrice contre la corrosion de l'acier A283 Gr-C en milieu HCl 1 M.
- ✓ La vitesse de corrosion diminue avec l'augmentation de la concentration d'extrait, par conséquent le taux de recouvrement augmente et atteint une valeur maximale à 20 °C.
- ✓ L'efficacité inhibitrice augmente avec la concentration de l'extrait. Elle atteint une valeur maximale de l'ordre de 81.04 % à 50 mg L<sup>-1</sup> de l'EBTL à 20 °C. Ce comportement peut être attribué à l'augmentation du taux de recouvrement, celle due à l'adsorption de composés naturels sur la surface du métal [91, 92].
- ✓ Dans la gamme de température étudiée, on constate que l'augmentation de la température provoque une diminution de l'efficacité inhibitrice. On déduit que la couche protectrice formé sur la surface de l'acier par l'adsorption de l'EBTL est détruite et n'est pas résistante avec l'augmentation de la température c'est-à-dire, cette couche n'a pas pu maintenir la protection contre la corrosion permettant d'avoir une attaque sur la surface de l'acier et une perte de masse par sa dissolution dans HCl 1M. Ceci peut être expliqué par une adsorption qui s'effectue à la température ambiante puis une

désorption partielle d'extrait de la surface de l'acier en augmentant la température [93, 94].

### III. A. 2. Mécanisme d'adsorption

#### III. A. 2. 1. Isotherme d'adsorption

L'adsorption est un phénomène de surface par lequel les molécules de l'**EBTL** se fixent sur la surface de l'acier selon divers processus : on distingue souvent la chimisorption et la physisorption. Le mécanisme de l'interaction entre l'inhibiteur et la surface métallique peut être expliqué à l'aide d'isothermes d'adsorption, on doit tester plusieurs modèles d'isothermes. Plusieurs auteurs utilisent les isothermes de Langmuir, Temkin, Frumkin et Freundlich [53].

$$\checkmark \text{ Langmuir : } \frac{C}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C \dots\dots\dots(\text{III.1})$$

$$\checkmark \text{ Temkin : } \theta = \frac{1}{\alpha} \log K_{ads} C \dots\dots\dots(\text{III.2})$$

$$\checkmark \text{ Frumkin : } \ln \left( \frac{\theta}{C(1-\theta)} \right) = \ln K_{ads} + \alpha\theta \dots\dots\dots(\text{III.3})$$

$$\checkmark \text{ Freundlich : } \log \theta = \log K_{ads} + \alpha \log C \dots\dots\dots(\text{III.4})$$

$\theta$  : Le taux de recouvrement de la surface par l'extrait, il est défini par la relation suivante :

$$\theta = EI \times 100 \dots\dots\dots(\text{III.5})$$

$C$  : Concentration de l'extrait dans la solution en  $\text{mg L}^{-1}$

$\alpha$  : Paramètre qui tient compte de l'hétérogénéité de la surface et des interactions intermoléculaires dans la couche adsorbée.

$K_{ads}$  : Constante d'équilibre du processus d'adsorption.

Le coefficient de corrélation  $R^2$  a été un moyen utile de déterminer l'isotherme le mieux adapté. D'après le tracé des différentes isothermes pour chaque température on constate que les coefficients de corrélation linéaires sont proches de l'unité pour l'ensemble des isothermes (Tableau 8) ; Néanmoins le  $R^2$  pour l'isotherme de Langmuir est le plus proche à l'unité par rapport aux autres modèles, ce qui nous a permis de dire que l'adsorption de l'**EBTL** sur la surface de l'acier **A283 Gr-C** obéit au modèle de Langmuir dans le domaine des concentrations et des températures étudiées.



Tableau 8 : Coefficient de corrélation des différentes isothermes d'adsorption à différentes températures

Modèle d'isotherme	Coefficient de corrélation ( $R^2$ )			
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
Langmuir	<b>0,97092</b>	<b>0,97056</b>	<b>0,92856</b>	<b>0,94437</b>
Temkin	<b>0,93496</b>	<b>0,94847</b>	<b>0,94806</b>	<b>0,94031</b>
Frumkin	<b>0,87982</b>	<b>0,90878</b>	<b>0,92167</b>	<b>0,96268</b>
Freundlich	<b>0,85984</b>	<b>0,95254</b>	<b>0,91435</b>	<b>0,95506</b>

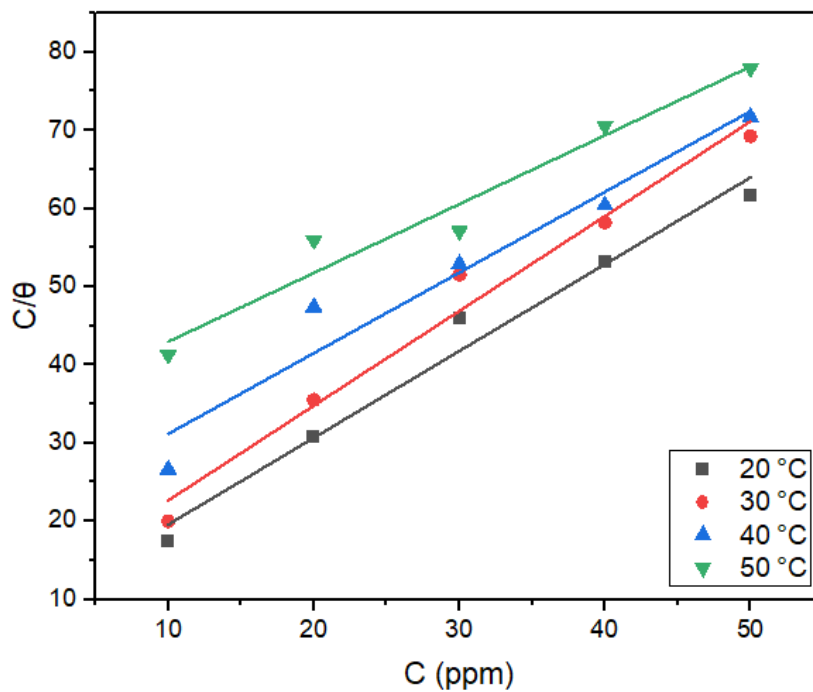


Figure 18 : L'isotherme d'adsorption de Langmuir de l'extrait de la plante sur la surface de l'acier A283 Gr-C dans la solution HCl 1M à différentes températures

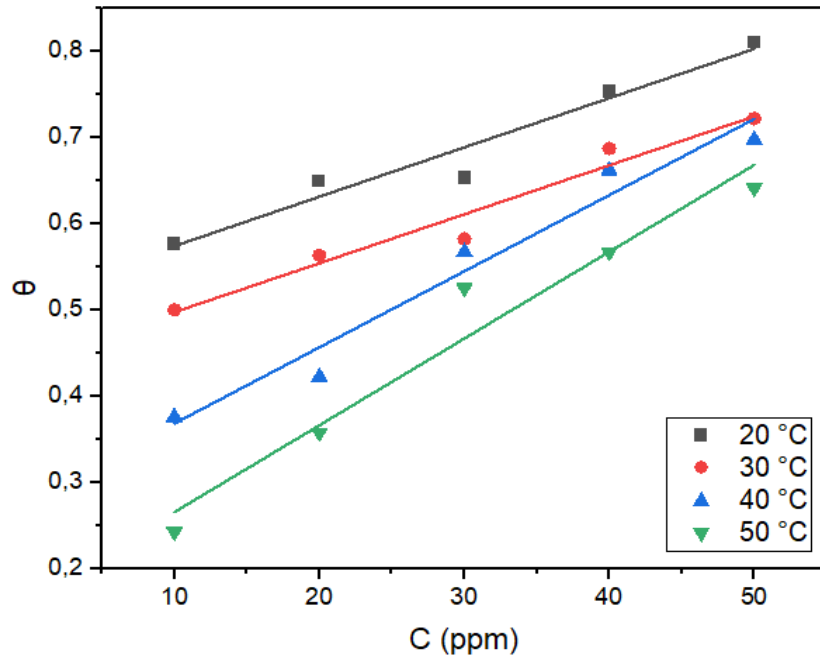


Figure 19 : L'isotherme d'adsorption de Temkin de l'extrait de la plante sur la surface de l'acier A283 Gr-C dans la solution HCl 1M à différentes températures

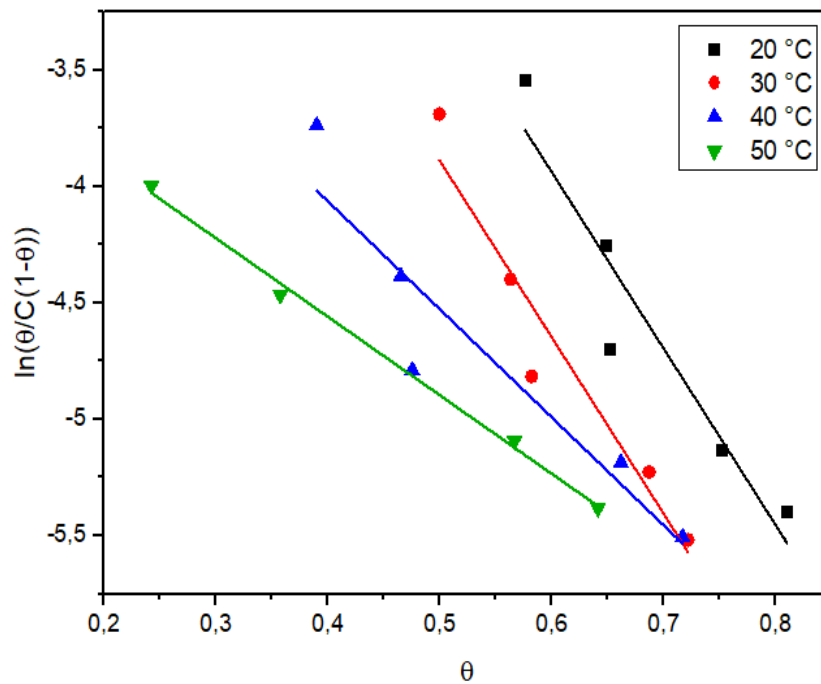


Figure 20 : L'isotherme d'adsorption de Frumkin de l'extrait de la plante sur la surface de l'acier A283 Gr-C dans la solution HCl 1M à différentes températures

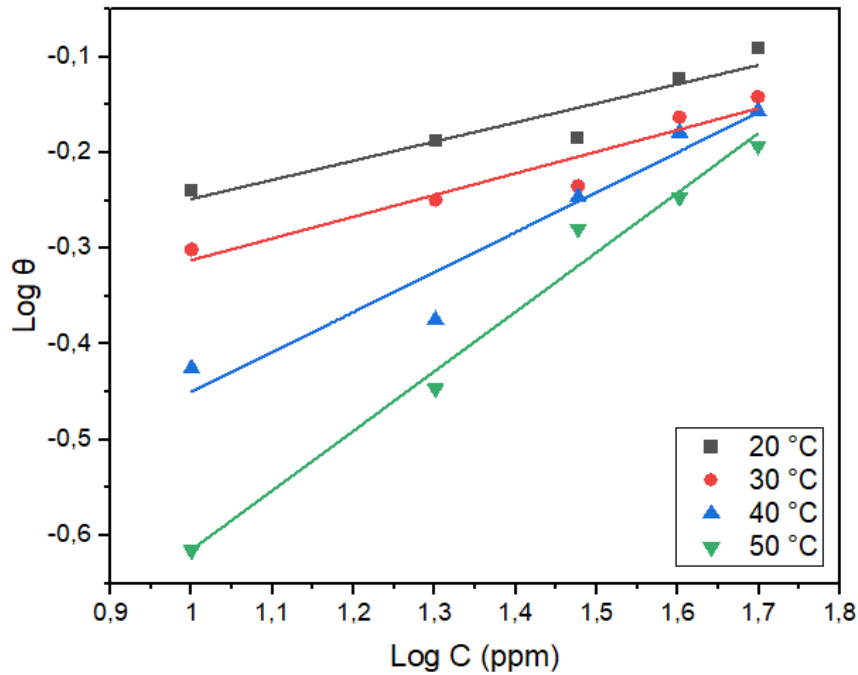


Figure 21 : L'isotherme d'adsorption de Freundlich de l'extrait de la plante sur la surface de l'acier A283 Gr-C dans la solution HCl 1M à différentes températures

Les valeurs de la constante d'adsorption présentée dans le tableau 9 sont déduits facilement à partir des interceptes tracés d'isotherme de Langmuir.

Tableau 9 : Paramètres du coefficient de corrélation et la constante d'adsorption pour l'extrait de la plante *Turgenia latifolia*

Extrait	Température (°C)	$R^2$	$k_{ads}$ ( $L \cdot mg^{-1}$ )
n-Butanol	20	0,97092	0,117922
	30	0,97056	0,094868
	40	0,92856	0,047936
	50	0,94437	0,029269

La valeur de  $k_{ads}$  peut être prise comme indicatrice de la force d'adsorption de l'inhibiteur à la surface du métal [95]. Les grandes valeurs de  $k_{ads}$  impliquent une adsorption plus efficace et donc une meilleure efficacité inhibitrice [96]. Ces résultats sont en bonne concordance avec les valeurs d'efficacité inhibitrice [97, 98] et impliquent qu'une grande quantité des molécules d'extrait ont été adsorbées à la surface d'acier **A283 Gr-C**. La

diminution des valeurs de  $k_{ads}$  lorsque la température augmentée peut s'expliquer par une désorption des composants adsorbés à la surface de l'acier [99].

### III. A. 2. 2. Les paramètres thermodynamiques d'adsorption

L'enthalpie libre d'adsorption et la constante d'adsorption  $k_{ads}$  sont des grandeurs thermodynamiques relatives à l'adsorption d'extrait sur la surface de l'acier et qui sont reliés par la relation suivante [100].

$$\Delta G_{ads}^{\circ} = -RT \ln(C_{H_2O} k_{ads}) \dots \dots \dots (III.6)$$

$R$  : La constante des gaz parfaits.

$T$  : La température absolue.

$C_{H_2O}$  : La concentration en eau exprimée en  $mg.L^{-1}$  avec une valeur approximative de  $10^6$  [101].

Les valeurs de l'enthalpie d'adsorption standard  $\Delta H_{ads}^{\circ}$  ont été obtenues à partir de l'équation de Van't Hoff [102] :

$$\frac{\delta \ln k_{ads}}{\delta T} = \frac{\Delta H_{ads}^{\circ}}{RT^2} \dots \dots \dots (III.7)$$

Cette équation peut être réécrite comme suite :

$$\ln k_{ads} = \frac{-\Delta H_{ads}^{\circ}}{RT} + C \dots \dots \dots (III.8)$$

$C$  : La constante d'intégration.

La variation de  $\ln k_{ads}$  en fonction de l'inverse de la température  $1/T$  à différentes températures est illustrée dans la figure 22. Les valeurs de  $\Delta H_{ads}^{\circ}$  ont été calculées à partir de la pente  $(\frac{-\Delta H_{ads}^{\circ}}{R})$  et sont présentées dans le tableau 10.

L'entropie d'adsorption standard  $\Delta S_{ads}^{\circ}$  peut être calculée à partir de l'équation thermodynamique de Gibbs – Helmholtz ci-dessous [103] :

$$\Delta S_{ads}^{\circ} = \frac{\Delta H_{ads}^{\circ} - \Delta G_{ads}^{\circ}}{T} \dots \dots \dots (III.9)$$

Tous les paramètres thermodynamiques sont rassemblés dans le tableau 10.

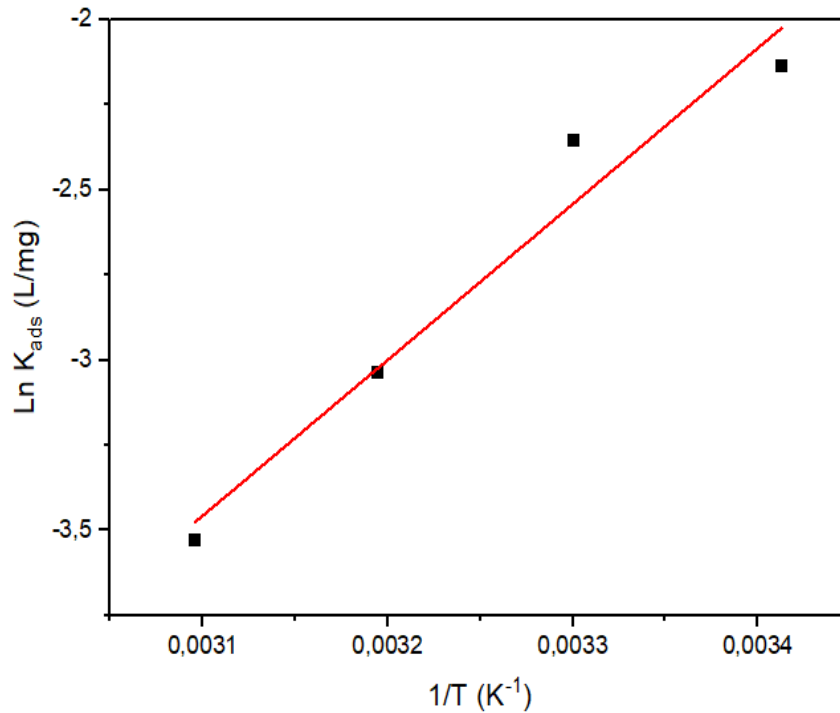


Figure 22 : Variation de la constante d'adsorption en fonction de 1/T pour l'EBTL

Tableau 10: Paramètres thermodynamiques relatifs à l'adsorption d'EBTL sur la surface de l'acier A283 Gr-C dans une solution de HCl 1M

Extrait	T(K)	$\Delta G_{ads}^{\circ} (KJmol^{-1})$	$\Delta H_{ads}^{\circ} (KJmol^{-1})$	$\Delta S_{ads}^{\circ} (Jmol^{-1}K^{-1})$
n-Butanol	293	-28,44	-38,09	-32,91
	303	-28,87		-30,42
	313	-28,04		-32,08
	323	-27,61		-32,42

D'après le tableau 10, le signe négatif de  $\Delta H_{ads}^{\circ}$  indique que l'adsorption de l'EBTL sur la surface du métal est un processus exothermique [104]. En général, un processus d'adsorption exothermique signifie une physisorption ou une chimisorption, tandis que le processus endothermique est attribuable sans équivoque à la chimisorption [105]. Dans un processus exothermique, la physisorption se distingue de la chimisorption en considérant la valeur absolue de l'enthalpie d'adsorption. En règle générale, l'enthalpie d'un processus de physisorption est

inférieure à 41,86 kJ/mol, tandis que celle d'un processus de chimisorption approche 100 kJ/mol [106].

Dans notre cas, La valeur de l'enthalpie calculée à partir de l'équation de Van 't Hoff est de l'ordre de -38,09 kJ/mol, ce qui montre le caractère exothermique de l'adsorption de ce dernier sur la surface de l'acier confirmant la physisorption. Cela peut être aussi expliqué par la diminution de l'efficacité inhibitrice en augmentant la température [107].

Les valeurs négatives de  $\Delta G_{ads}^{\circ}$  indiquent que l'adsorption d'extrait étudié sur l'acier été spontanée, et la stabilité de la couche adsorbée sur la surface métallique [108, 109]. Généralement, les valeurs de  $\Delta G_{ads}^{\circ}$  voisines de  $-20 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$  ou moins négatives, sont liées à des interactions électrostatiques entre les molécules chargées et le métal chargé cela indique que le mode d'adsorption est de type physique (physisorption), alors que celles proches de  $-40 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$  ou plus négatives impliquent un transfert de charge entre les molécules de l'inhibiteur et la surface métallique, ceci dénote que le mode d'adsorption est de type chimique (Chimisorption) [110, 111]. Dans notre étude, les valeurs obtenues de  $\Delta G_{ads}^{\circ}$  étaient comprises entre  $-27,61 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$  et  $-28,44 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ , ce qui indique que l'extrait étudié est physiquement adsorbé.

Le signe négatif de  $\Delta S_{ads}^{\circ}$  montre que le processus d'adsorption est accompagné par la diminution de cette dernière. Ceci peut être expliqué comme suit : avant l'adsorption de l'extrait sur l'acier, le degré de désordre des molécules de l'extrait est élevé, mais quand les molécules sont adsorbées sur la surface du substrat, il y a une diminution de désordre, c'est à dire une diminution de l'entropie lors de la transformation des réactifs en complexe activé, et lorsque la température augmente le désordre de ces molécules augmente [45].

### III. A. 2. 3. Détermination des énergies d'activation

L'énergie d'activation apparente pour le processus de corrosion est calculée par l'équation d'Arrhenius suivante [53, 112] :

$$\ln V_{corr} = -\frac{E_a}{RT} + \ln D \dots \dots \dots \text{(III.10)}$$

$V_{corr}$  : La vitesse de corrosion.

$D$  : Le facteur pré-exponentiel d'Arrhenius.

$E_a$  : L'énergie d'activation.

$R$  : La constante des gaz parfaits.

$T$  : La température absolue.

La dépendance de la vitesse de corrosion avec la température est exprimée par l'équation d'Arrhenius [44, 113], qui considère que la variation du logarithme népérien de la vitesse de corrosion est une fonction de l'inverse de la température. Cette variation du  $\ln V_{corr} = F(1/T)$  est une droite de pente  $\left(-\frac{\Delta E_a}{R}\right)$ .

$$\ln \frac{V_{corr}}{T} = \left[ \ln \frac{R}{hN_a} + \frac{\Delta S_a}{R} \right] - \frac{\Delta H_a}{RT} \dots \dots \dots (III.11)$$

$h$  : La constante de Planck.

$N_a$  : Le nombre d'Avogadro.

La courbe  $\ln \frac{V_{corr}}{T}$  en fonction de  $1/T$  a donné une droite comme indiqué dans la figure 24 avec une pente de  $\left(-\frac{\Delta H_a}{R}\right)$  et une intersection de  $\ln \frac{R}{hN_a} + \frac{\Delta S_a}{R}$ , à partir de laquelle les valeurs de  $\Delta S_a$  et  $\Delta H_a$  ont été calculées.

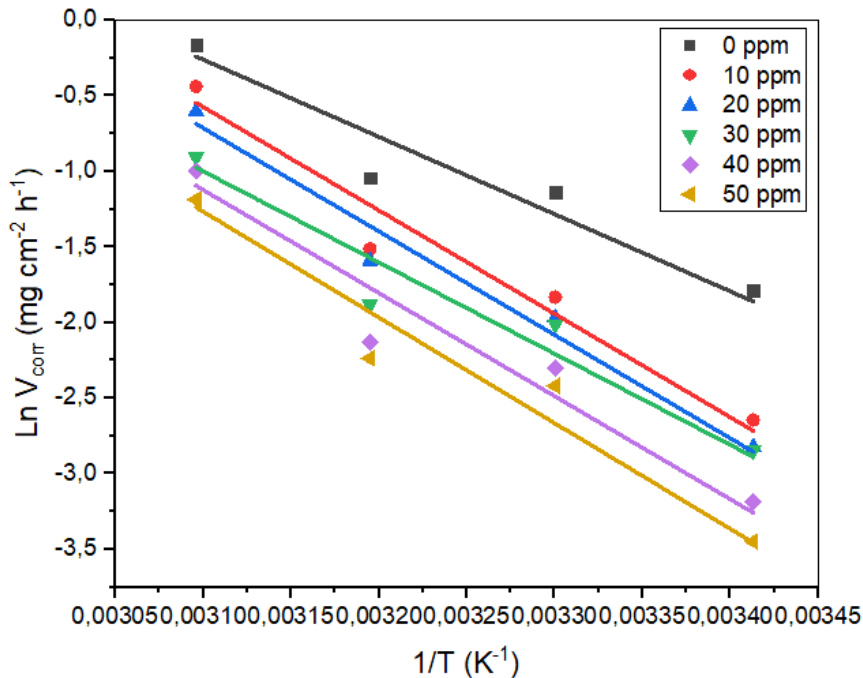


Figure 23 : Tracé d'Arrhenius de  $\ln V_{corr}$  en fonction de  $1/T$  en absence et présence d'EBTL

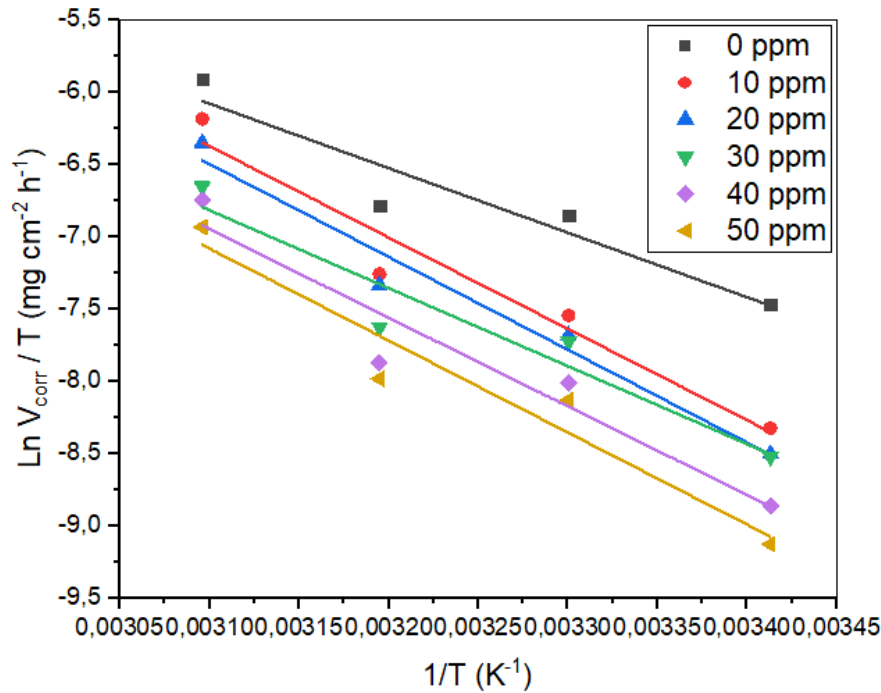


Figure 24 : Tracé d'Arrhenius de  $\ln V_{\text{corr}}/T$  en fonction de  $1/T$  en absence et présence d'EBTL

Tableau 11 : Paramètres d'activation pour l'acier au carbone dans HCl 1 M pour différentes concentrations d'EBTL

$C$ (ppm)	$E_a$ ( $\text{kJmol}^{-1}$ )	$\Delta H_a$ ( $\text{kJmol}^{-1}$ )	$\Delta S_a$ ( $\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
0	42.50	37,14	-152,08
10	56.89	52,59	-106,62
20	56.88	53,46	-104,97
30	50.15	44,87	-134,25
40	56.73	51,02	-116,28
50	58.17	52,95	-111,40

Les valeurs de  $\Delta E_a$  énumérées dans le tableau 11 étaient plus élevées en présence d'extrait qu'en leur absence, ce qui indique une action inhibitrice de l'extrait par l'augmentation de la barrière énergétique du processus de corrosion, soulignant ainsi l'adsorption physique [114].



Le signe positif de  $\Delta H_a^\circ$  donne une réflexion de la nature endothermique du processus de dissolution de l'acier **A283 Gr-C** indiquant que la dissolution de l'acier a été difficile lorsque la température augmentait [94, 115, 116].

Les valeurs de  $\Delta S_a$  sont négatives et augmentent en présence d'extrait, ceci peut être expliqué par une augmentation du désordre des molécules d'extrait qui se stabilisent lors de la formation du complexe métal/espèces adsorbées [117, 118].

### III. A. 3. Etude électrochimique

Les essais électrochimiques ont été réalisés à l'aide d'un potentiostat Radiometer PGZ301 avec un logiciel Volta Master 4, à l'aide d'une cellule classique en verre pyrex à trois électrodes. L'électrode de travail est le substrat sujet d'étude (acier A283 Gr-C), électrode auxiliaire en platine et une électrode au calomel Hg / Hg<sub>2</sub> Cl<sub>2</sub> / KCl saturé (ECS) comme électrode de référence. Avant chaque expérience, l'électrode de travail subit un prétraitement avec le papier abrasif de granulométrie décroissante, dégréssé puis rincé à l'eau distillée. Le système a été connecté à un ordinateur.

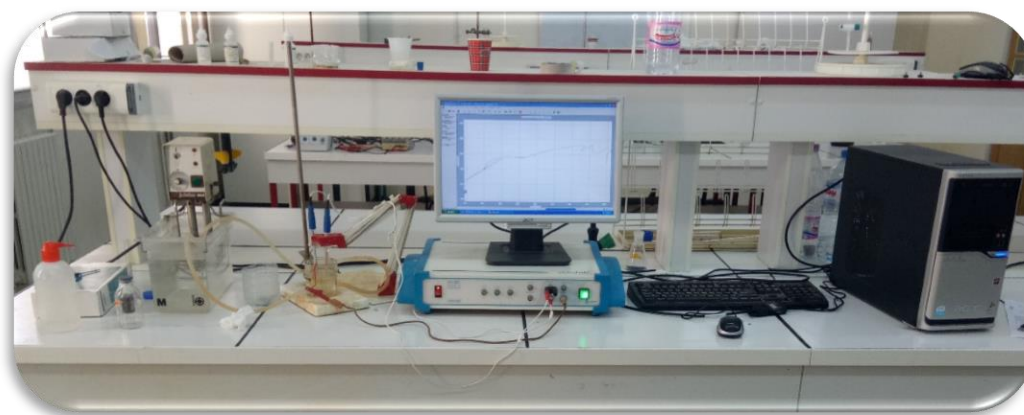


Figure 25 : Dispositif des mesures électrochimiques

Pour le tracer des courbes, le traitement et l'analyser des résultats, tous les données sont transférées du logiciel Volta Master 4 à OriginPro 2018 (logiciel de traitement et d'analyse des données scientifiques).

#### III. A. 3. 1. Evolution du potentiel à circuit ouvert (OCP)

Avant toutes mesures électrochimiques, il est recommandé d'immerger l'électrode de travail dans la solution électrolytique sans et avec l'ajout d'extrait, pendant une durée de 60 min. Durant cette période, les valeurs du potentiel sont mesurées à chaque instant et la courbe

traduisant l'évolution du potentiel à circuit ouvert sera tracée. Cela permet d'obtenir un potentiel relativement stable qui servira comme donnée essentiel pour le tracé des courbes de polarisation et les diagrammes d'impédance électrochimique.

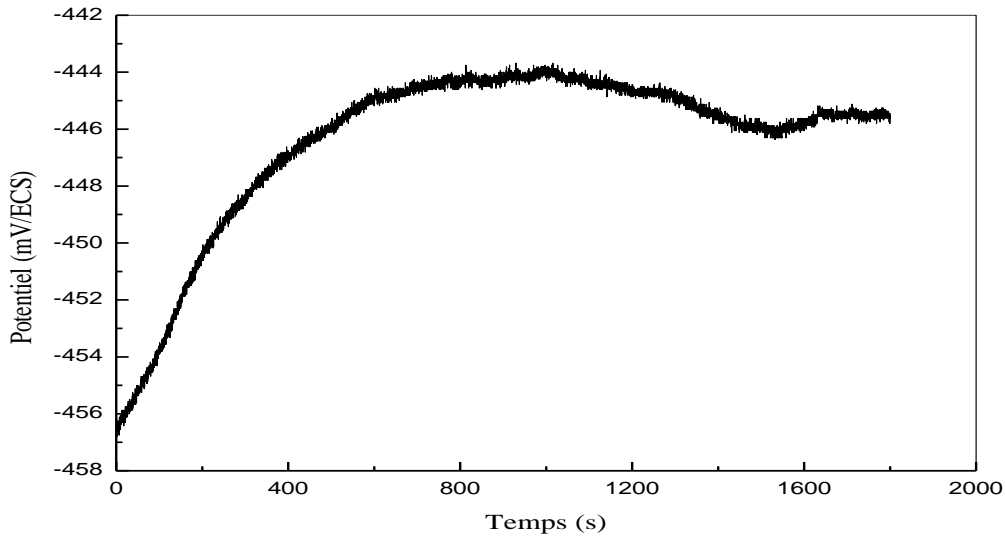


Figure 26 : Evolution du potentiel de corrosion de l'acier A283 Gr-C dans la solution à 1M HCl

### III. A. 3. 2. Les courbes de polarisations (LPR)

Les courbes de polarisation potentiodynamique ont été enregistrées avec une vitesse de balayage de 2 mV / s dans une gamme de potentiel de ± 250 mV par rapport à E<sub>OCP</sub>.

Les valeurs de l'efficacité d'inhibition (IE %) ont été dérivées de la densité du courant de corrosion  $i_{corr}$  à partir de l'équation suivante [119] :

$$EI = \frac{i_{corr} - i'_{corr}}{i_{corr}} \times 100 \dots\dots\dots(III.12)$$

$i_{corr}$  et  $i'_{corr}$  représentent respectivement les valeurs de densité du courant de corrosion en absence et en présence d'inhibiteur.

La figure 27 présente le tracé des courbes de polarisation en absence et en présence des différentes concentrations de l'extrait dans la solution 1M HCl à 20 °C.

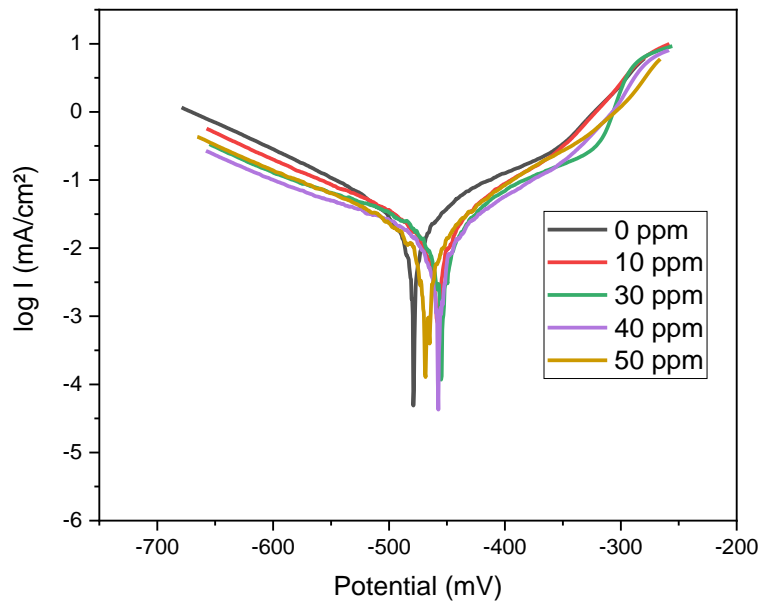


Figure 27: Courbes de polarisation de l'acier A283 Gr-C dans la solution à 1M HCl en présence des différentes concentrations d'extrait

Les paramètres cinétiques obtenus des courbes de polarisation sont regroupés dans le tableau 12.

Tableau 12 : Paramètres de polarisation pour la corrosion de l'acier A283 Gr-C dans la solution à 1M HCl en présence des différentes concentrations d'extrait

$C$ (ppm)	$-E_{corr}$ (mV/SCE)	$i_{corr}$ (mA.cm <sup>-2</sup> )	$\beta_a$ (mV.Dec <sup>-1</sup> )	$-\beta_c$ (mV.Dec <sup>-1</sup> )	EI (%)
0	478.6	0.0343	139.2	130.9	-
10	457.9	0.0142	67.7	124.6	58.60
20	467.1	0.0115	89.1	113	66.47
30	455	0.0092	87.4	128	73.17
40	457.8	0.0077	77.3	129.9	77.55
50	466.3	0.0124	88.1	129.2	63.84

L'observation de la figure 27 et l'examen des résultats regroupés dans le tableau 12 montrent que :

- ✓ L'action d'inhibiteur se traduit par une diminution des courants de corrosion. Ce résultat montre que l'addition d'extrait réduit la dissolution anodique du l'acier et retarde l'évolution de la décharge des ions H<sup>+</sup> [120].
- ✓ Les valeurs de  $\beta_a$  et  $\beta_c$  ne varient pas d'une manière régulière, ce qui indique

que le mode d'action est de type mixte c'est-à-dire que cet extrait inhibe les deux réactions anodique et cathodique (modification de la branche anodique et de la branche cathodique des courbes de polarisation) [121].

- ✓ Le potentiel de corrosion varie en fonction de la concentration d'extrait, modifiant à la fois la branche anodique et cathodique, les valeurs de  $E_{corr}$  n'est pas modifié d'une valeur supérieure à 85 mV en ajoutant l'extrait dans la solution, cela aussi peut donner une indication sur le caractère mixte de ce extrait [112, 122].
- ✓ L'efficacité inhibitrice augmente avec la concentration de l'extrait, cela est dû à l'adsorption des molécules contenues dans l'extrait à la surface de l'acier [42].

### III. A. 3. 3. Spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE)

Les performances inhibitrices avec et sans l'ajout **EBTL** sont également étudiées par méthode d'impédance électrochimique à 20 °C pour diverses concentrations dans 1 M HCl pour l'acier A283 Gr-C. Les courbes de Nyquist sont présentées dans la Figure 28, et leurs paramètres connexes sont mentionnés dans le Tableau 13. Comme montré dans les graphiques de Nyquist, les spectres d'impédance sont apparus comme une seule boucle capacitive à des fréquences plus élevées et leur diamètre augmente avec l'augmentation de la concentration, suggérant que le processus de corrosion est contrôlé par le processus de transfert de charge et que l'adsorption de **EBTL** sur la surface de l'acier a formé un film inhibiteur de résistance [119, 123]. Ces boucles ne sont pas des demi-cercles parfaits qui peuvent être attribués à l'inhomogénéité et à la rugosité de la surface de l'acier [124].

**Tableau 13** : Paramètres d'impédance et valeurs d'efficacité d'inhibition de l'acier A283 Gr-C dans la solution à 1M HCl en présence des différentes concentrations d'extrait

$C$ (ppm)	$R_{tc}$ ( $\Omega \cdot cm^2$ )	$C_{dc}$ ( $\mu F \cdot cm^{-2}$ )	$EI$ (%)
0	732.9	68.61	-
10	1538	46.34	52.34

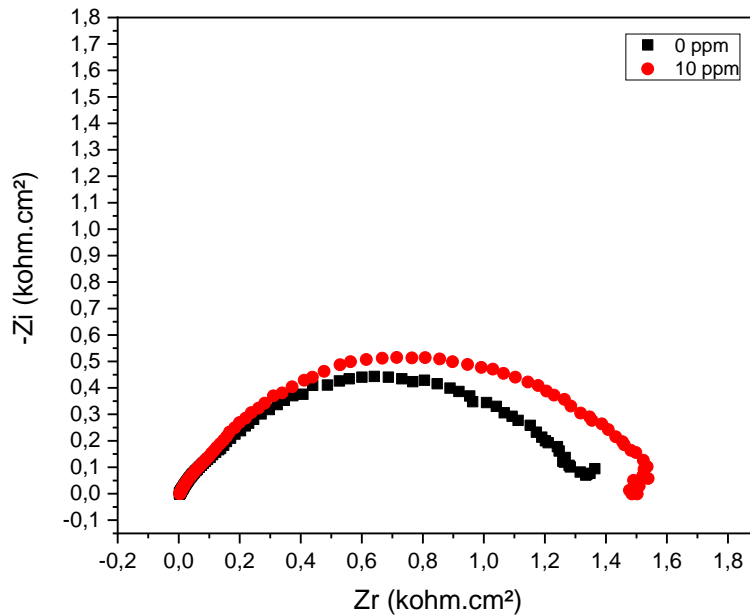


Figure 28 : Impédance électrochimique de l'acier A283 Gr-C dans la solution à 1M HCl en absence et en présence d'extrait

L'examen de la figure 28 et le tableau 13 montrent que :

- ✓ Ces diagrammes d'impédance ne sont pas des demi-cercles parfaits, phénomènes attribués à la dispersion en fréquence de l'impédance interfaciale [125-128], généralement due à l'hétérogénéité de la surface de l'électrode. Cette hétérogénéité peut résulter de la rugosité, des impuretés, des dislocations, de l'adsorption de l'inhibiteur et de la formation de couches poreuses [129-131].
- ✓ L'efficacité inhibitrice calculée à partir des valeurs de la résistance de transfert de charge croît avec la concentration en inhibiteur et atteint une valeur de 52.34 % en présence d'une concentration de 10 ppm d'extrait, cela est dû à l'adsorption des molécules contenues dans l'extrait à la surface de l'acier [119].
- ✓ D'après les paramètres obtenus, nous constatons que l'addition de l'inhibiteur diminue la valeur de la capacité double couche  $C_{dc}$  et augmentent celle de la résistance de transfert de charges. La diminution de la valeur de  $C_{dc}$  peut être attribuée à l'adsorption des molécules de l'inhibiteur à la surface de l'acier formant une couche protectrice [1, 132].

---

## B. Électrodéposition

---

### III. B. 1. Conditions expérimentales

Toutes les expériences ont été effectuées dans un milieu aéré, sous agitation douce pour assurer une solution uniforme. Les autres conditions de fonctionnement étaient les suivantes : pH de la solution 5 ; température ambiante ; courant continu de 0,05A ; temps d'électrodéposition 30 min. La plaque de zinc représentait la partie anodique, tandis que l'échantillon d'acier représentait la partie cathodique laissant une distance de 1 cm entre eux. Pour déterminer la masse du zinc expérimentalement déposé, les échantillons ont été pesés avant et après chaque expérience. À la fin de l'électrodéposition, les échantillons ont été retirés du bain, nettoyés à l'aide de l'eau distillée et séchés à l'air [9, 81, 133-137].

### III. B. 2. Qualité de la couche de zinc déposée

La brillance et la qualité des dépôts de zinc en présence d'additif a été visualisée à l'œil nu par rapport à celle en absence d'additif. Pour le test d'adhérence, un "X" a été gravé sur le film ensuite un scotch adhésif attaché a été appliqué sur le "X" puis retiré fortement. Ce test est macroscopique et plus qualitatif [9].

### III. B. 3. Calcul de l'épaisseur

Les épaisseurs des dépôts électrodéposés comme l'ensemble des revêtements de surface peuvent être mesurés par la méthode pondérale selon l'équation suivante :

$$e = \frac{m}{\rho S} \dots\dots\dots(III.13)$$

Où

$e$  (cm) : épaisseur du dépôt

$\rho$  (g / cm<sup>3</sup>) : masse volumique de dépôt

$S$  (cm<sup>2</sup>) : surface de dépôt.

$m$  (g) : masse de dépôt.

$m_{\text{dépot}} = \Delta m = m_f - m_i$

$m_f$  (g) : la masse de l'échantillon après revêtement.

$m_i$  (g) : la masse de l'échantillon avant revêtement [138].

Les valeurs de la masse et l'épaisseur, la brillance et l'adhérence de la couche de zinc déposée sont représentées dans le tableau 14.

**Tableau 14 :** L'adhérence, la masse, l'épaisseur, la brillance de la couche de zinc déposée lors de l'utilisation d'extrait de *Turgenia latifolia* comme additif

C additif (g/l)	Masse déposée (g)	Adhésion	Épaisseur (cm)	Qualité de dépôt
0	0.064	++	0.00181	Moins lisse et semi brillant
1	0.0541	++	0.00172	Lisse et semi brillant
1.2	0.0483	++	0.00180	Lisse et matte
1.4	0.0403	++	0.00128	Lisse et matte
1.6	0.0598	-	0.00237	Lisse et semi brillant

Où : - l'adhérence est faible, + l'adhérence est forte, ++ l'adhérence est très forte.

D'après le tableau 14 nous pouvons tirer les constatations suivantes :

- ✓ Selon la réglementation ASTM D 523 et DIN EN ISO 2813 [139, 140], nous avons observé que les dépôts obtenus avec l'addition d'extrait étaient mates, sauf pour les concentrations de 1 g/l et 1.6 g/l qui étaient semi brillants.
- ✓ Pour toutes les concentrations de l'extrait l'adhérence était très forte, sauf pour la concentration de 1.6 g/l qui était faible.
- ✓ La masse et l'épaisseur de la couche du zinc diminue au fur et à mesure que la concentration d'additif augmente. Cela peut être expliqué par deux hypothèses, soit l'adsorption d'additif sur la surface conduisant à un recouvrement partiel de l'acier, bloquant ainsi les sites actifs et entraînant une diminution de la vitesse de nucléation ; soit l'additif va se complexer avec l'une des espèces électroactives en solution, donc l'étape de dissociation du complexe introduit une nouvelle constante cinétique avant la réaction d'oxydoréduction de l'espèce électroactive à la surface de l'électrode [9, 141].

A blue graphic resembling a scroll, with a white border and a dark blue shadow. The text is centered on the scroll.

*CONCLUSION  
GÉNÉRALE*



## Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est de proposer de nouvelles voies d'inhibition de la corrosion de l'acier **A283 Gr-C** destiné pour la fabrication des réservoirs de stockage des hydrocarbures, en vue de remplacer l'utilisation des composés cancérigènes pour l'homme et toxiques pour l'environnement. Le but de l'étude est de pouvoir remplacer ces composés dangereux par des inhibiteurs verts tels que l'extrait butanolique de la plante *Turgenia latifolia*.

A l'issue de cette étude, l'extrait butanolique de la plante *Turgenia latifolia* pu être évalué et les différents résultats obtenus ont permis de dégager les conclusions suivantes :

- ✓ Une bonne concordance entre les résultats obtenus par les mesures gravimétriques et les mesures électrochimiques.
- ✓ L'augmentation de la température conduit généralement à une diminution de l'efficacité inhibitrice d'extrait testé.
- ✓ Les paramètres thermodynamiques indiquent que l'adsorption de cet inhibiteur se fait spontanément sur la surface de l'acier selon un mécanisme de physisorption suivant l'isotherme de Langmuir.
- ✓ L'extrait butanolique comme étant un inhibiteur de corrosion ayant un caractère mixte, ils se comportent à la fois anodiques et cathodiques.
- ✓ L'addition de cet inhibiteur dans le milieu HCl 1M augmente la résistance de transfert de charge, tandis qu'elle réduit la capacité de la double couche. Ce résultat est attribué à l'augmentation de l'épaisseur de la double couche électrique dû à l'adsorption des molécules de ces inhibiteurs.
- ✓ Les résultats de l'électrodéposition ont montré que l'extrait peut être utilisé comme additif dans le bain électrolytique, l'addition de ce dernier provoque une amélioration de la qualité de dépôt.

On peut toutefois conclure en affirmant que l'extrait de la plante testé pour inhiber l'acier au carbone dans le milieu acide, possède une bonne propriété inhibitrice et peut être utilisé comme un inhibiteur de corrosion.

---

## Perspectives

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

- Tester les autres extraits restant de cette plante et d'autres plantes pour avoir une efficacité meilleure.
- L'influence du temps d'immersion sur le pouvoir protecteur de *Turgenia latifolia* dans les mêmes concentrations de l'électrolyte.
- L'étude peut être étendue pour analyser l'effet de l'extrait comme inhibiteur dans d'autres médias corrosifs, et sur d'autres types d'aciers.
- Evaluation de la corrosion des plaques revêtues de zinc par les méthodes électrochimiques et gravimétrique.

## *Références bibliographiques*

- [1] M. Faustin, Étude 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), Université des Antilles et de la Guyane, Thèse de doctorat (2013).
- [2] I. Bouali, Étude d'inhibiteurs de corrosion métallique à base d'orthophosphates de zirconium lamellaires fonctionnalisés: synthèse, caractérisations et applications, Université de Lorraine, Thèse de doctorat (2018).
- [3] D.B. Hmamou, R. Salghi, A. Zarrouk, H. Zarrok, R. Touzani, B. Hammouti, A. El Assyry, Investigation of corrosion inhibition of carbon steel in 0.5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> by new bipyrazole derivative using experimental and theoretical approaches, *Journal of environmental chemical engineering* 3 (2015) 2031-2041.
- [4] K. Ramya, R. Mohan, K. Anupama, A. Joseph, Electrochemical and theoretical studies on the synergistic interaction and corrosion inhibition of alkyl benzimidazoles and thiosemicarbazide pair on mild steel in hydrochloric acid, *Materials Chemistry and Physics* 149 (2015) 632-647.
- [5] K. Hanini, B. Merzoug, S. Boudiba, I. Selatnia, H. Laouer, S. Akkal, Influence of different polyphenol extracts of *Taxus baccata* on the corrosion process and their effect as additives in electrodeposition, *Sustainable Chemistry and Pharmacy* 14 (2019) 100189. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2019.100189>.
- [6] T. Gu, Z. Chen, X. Jiang, L. Zhou, Y. Liao, M. Duan, H. Wang, Q. Pu, Synthesis and inhibition of N-alkyl-2-(4-hydroxybut-2-ynyl) pyridinium bromide for mild steel in acid solution: Box–Behnken design optimization and mechanism probe, *Corrosion Science* 90 (2015) 118-132.
- [7] M. Znini, Essential oil of *Salvia aucheri mesatlantica* as a green inhibitor for the corrosion of steel in 0.5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, *Arabian Journal of Chemistry* 5 (2010) 467-474.
- [8] H. Bentrach, Corrosion des ouvrages pétroliers: Utilisation de la gomme arabique comme inhibiteur environnemental pour l'acier API 5L X42, Université de Biskra, Thèse de doctorat (2015).
- [9] K. Hanini, Inhibition de la corrosion d'un acier au carbone par les plantes *Taxus baccata* et *Cedrus atlantica* et leurs utilisation comme additifs dans les bains d'électrodéposition, Université de Tébessa, Thèse de doctorat (2020).

- [10] H.B. Ladouani, Inhibition de la corrosion du cuivre en milieu acide par les dérivés de dithioacétal de cétène, Université Mentouri de Constantine, Mémoire de magister (2011).
- [11] D. Landolt, Traité des matériaux, Corrosion et chimie de surfaces des métaux, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne 12 (1993) 260-266.
- [12] NACE Glossary of corrosion Terms. Materials Protection.
- [13] N.E. Hammer, NACE Glossary of Corrosion Terms, Mat. Pro (1965).
- [14] G. Béranger, H. Mazille, Corrosion et anticorrosion, pratique industrielle, Edition Technique et Documentation, Lavoisier, Paris (2002) 303.
- [15] S. Saadoune, Synthèse et caractérisation d'inhibiteurs bi-fonctionnels: application à la corrosion des aciers de construction, Université Ferhat Abbas-Sétif, Mémoire de magister (2010).
- [16] D.E. Talbot, J.D. Talbot, Corrosion science and technology, CRC press(2018).
- [17] G. Daufin, J. Talbot, Etude de quelques problèmes de corrosion dans l'industrie laitière. Première partie. Généralités sur la corrosion des métaux et alliages, Le Lait 51(507) (1971) 375-398.
- [18] R. Marchal, Rôle des bactéries sulfurogènes dans la corrosion du fer, Oil & Gas Science and Technology 54(5) (1999) 649-659.
- [19] S. Bensaada, M.T. Bouziane, F. Mohammedi, B. Zergui, A. Bouras, Effet des inhibiteurs de corrosion  $ZnCl_2$ ,  $Na_2MoO_4$  ET  $ZnCl_2 + Na_2MoO_4$  sur le comportement de l'acier pour armature a beton en milieu oxydant NaCl, LARHYSS Journal (2013) 49-60.
- [20] R.R. Pierre, Corrosion Engineering-Principles and Practice, (2008).
- [21] D.E.J. Talbot, J.D.R. Talbot, Corrosion science and technology, CRC press(2007).
- [22] P.K. Whitcraft, Fundamentals of metallic corrosion, Corrosion technology-New York and Basel 11 (1996) 1-22.
- [23] V.S. Sastri, Green corrosion inhibitors: theory and practice, John Wiley & Sons(2012).
- [24] F. Dabosi, G. Beranger, B. Baroux, Corrosion localisée, EDP Sciences(2012).
- [25] D. Landolt, Corrosion et chimie de surfaces des métaux, PPUR presses polytechniques(2003).
- [26] G. Palanisamy, Corrosion Inhibitors, Intechope(2019).
- [27] S. Audisio, Le Livre multimédia de la corrosion, INSA Valor, Villeurbanne (1998).
- [28] L. Lazzari, M. Pedferri, Corrosion Science and Engineering, (2018).
- [29] G. Béranger, H. Mazille, Les facteurs de la corrosion, Prévention et lutte contre la corrosion: une approche scientifique et technique (2004) 19.
- [30] J. Bénard, A. Michel, J. Philibert, Métallurgie générale, Masson(1984).

- [31] H. Marmi, Amélioration de la résistance à la corrosion électrochimique des aciers par utilisation des inhibiteurs, Université Mohamed Khider-Biskra, Thèse de doctorat (2017).
- [32] F. Constantin, Etude de l'efficacité d'inhibiteurs de corrosion utilisés dans les liquides de refroidissement, Université de Pitești-Roumanie, Thèse de doctorat (2011).
- [33] J. Berer, A. Michel, J. Philibert, J. Talbot, Métallurgie générale, 2ème édition, Ed, (1984).
- [34] ISO8044, Corrosion des métaux et alliages — Termes principaux et définitions, Norme internationale, Imprimé en Suisse, (1999).
- [35] E.F. Corrosion, Proceedings [of the] 4th European Symposium on Corrosion Inhibitors: 82th manifestation of the European Federation of Corrosion, Ferrara (Italy), 15th-19th September 1975, (1975).
- [36] G. Gopalakrishnan, B. Banumathi, G. Suresh, Evaluation of the antifungal activity of natural xanthenes from *Garcinia mangostana* and their synthetic derivatives, *Journal of natural products* 60(5) (1997) 519-524.
- [37] S. Megalai, Y. Manjula, K. Manonmani, N. Kavitha, N. Baby, Metronidazole: A Corrosion Inhibitor for Mild Steel in Aqueous Environment, *Portugaliae Electrochimica Acta* 30(6) (2012) 395-403.
- [38] A.K. Satapathy, G. Gunasekaran, S.C. Sahoo, A. Kumar, P.V. Rodrigues, Corrosion inhibition by *Justicia gendarussa* plant extract in hydrochloric acid solution, *Corros. Sci.* 51(12) (2009) 2848-2856.
- [39] O. Krim, M. Bouachrine, B. Hammouti, A. Elidrissi, M. Hamidi, 2,5-Difuryl-N-Methylpyrrole as Corrosion Inhibitor for Steel in 1 M HCl, *Portugaliae Electrochim. Acta.* 26(3) (2008) 283-289.
- [40] L. Garverick, Corrosion in the petrochemical industry, ASM international(1994).
- [41] P.B. Raja, A.K. Qureshi, A.A. Rahim, H. Osman, K. Awang, Neolamarckia cadamba alkaloids as eco-friendly corrosion inhibitors for mild steel in 1 M HCl media, *Corros. Sci.* 69 (2013) 292-301.
- [42] N. Djeddi, M. Benahmed, S. Akkal, H. Laouer, E. Makhloufi, N. Gherraf, Study on methylene dichloride and butanolic extracts of *Reutera lutea* (Desf.) Maire (Apiaceae) as effective corrosion inhibitions for carbon steel in HCl solution, *Research on Chemical Intermediates* 41(7) (2015) 4595-4616.
- [43] M. Benahmed, M. Lafhal, H. Laouer, S. Akkal, Inhibition of the corrosion of carbon steel in acid solution by the extract of *Limonium thouinii* (Plumbaginaceae), *Advances in Environmental Biology* (2012) 4052-4057.

- [44] A. Hamdy, N.S. El-Gendy, Thermodynamic, adsorption and electrochemical studies for corrosion inhibition of carbon steel by henna extract in acid medium, *Egypt. J. Pet.* 22(1) (2013) 17-25.
- [45] X. Li, S. Deng, H. Fu, Inhibition of the corrosion of steel in HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions by bamboo leaf extract, *Corros. Sci.* 62 (2012) 163-175.
- [46] Y. El-Ouadi, A. Bouyanzer, L. Majidi, J. Paolini, J.M. Desjobert, J. Costa, A. Chetouani, B. Hammouti, S. Jodeh, I. Warad, Y. Mabkhot, T. Ben-Hadda, Evaluation of Pelargonium extract and oil as eco-friendly corrosion inhibitor for steel in acidic chloride solutions and pharmacological properties, *Res Chem Intermed* 41(10) (2015) 7125-7149.
- [47] M. Faustin, A. Maciuk, P. Salvin, C. Roos, M. Lebrini, Corrosion inhibition of C38 steel by alkaloids extract of *Geissospermum laeve* in 1M hydrochloric acid: Electrochemical and phytochemical studies, *Corros. Sci.* 92 (2015) 287-300.
- [48] P. Bommersbach, Evolution des propriétés d'un film inhibiteur de corrosion sous l'influence de la température et des conditions hydrodynamiques, Université de Toulouse France, Thèse de doctorat (2005).
- [49] L. Antropov, Introduction The aim of the paper is:(i) to consider a new method of study of the inhibitors of metallic corrosion; and (ii) to discuss some salient points of a new method of protection of metals from, First International Congress on Metallic Corrosion: London, 10-15 April, 1961, Butterworths, (1962).
- [50] A. Fouda, A. Mohamed, H. Mostafa, Inhibition of corrosion of copper in nitric acid solution by some arylmethylene cyanothioacetamide derivatives, *Journal de Chimie Physique et de Physico-Chimie Biologique* 95(1) (1998) 45-55.
- [51] N. Bouziane, Elimination du 2-mercaptobenzothiazole par voie photochimique et par adsorption sur la bentonite et le charbon actif en poudre, Université Mentouri de Constantine, Mémoire de magister (2007).
- [52] R. Kecili, C.M. Hussain, Mechanism of Adsorption on Nanomaterials, Elsevier 2018.
- [53] S. Umoren, U. Eduok, M. Solomon, A. Udoh, Corrosion inhibition by leaves and stem extracts of *Sida acuta* for mild steel in 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions investigated by chemical and spectroscopic techniques, *Arabian journal of chemistry* 9 (2016) S209-S224.
- [54] S. Martinez, I. Stern, Thermodynamic characterization of metal dissolution and inhibitor adsorption processes in the low carbon steel/mimosa tannin/sulfuric acid system, *Applied Surface Science* 199(1-4) (2002) 83-89.

- [55] D. Benmessaoud Left, M. Zertoubi, A. Irhzo, M. Azzi, Revue: Huiles et extraits de plantes comme inhibiteurs de corrosion pour différents métaux et alliages dans le milieu acide chlorhydrique, *J. Mater. Environ. Sci* 4(6) (2013) 855-866.
- [56] D. Landolt, *Traité des matériaux: corrosion et chimie de surfaces des métaux*, Presses universitaires et polytechniques romaines(1993).
- [57] M.F. Sawalha, J.R. Peralta-Videa, J. Romero-González, M. Duarte-Gardea, J.L. Gardea-Torresdey, Thermodynamic and isotherm studies of the biosorption of Cu (II), Pb (II), and Zn (II) by leaves of saltbush (*Atriplex canescens*), *The Journal of Chemical Thermodynamics* 39(3) (2007) 488-492.
- [58] F.M. Donahue, K. Nobe, Theory of organic corrosion inhibitors adsorption and linear free energy relationships, *Journal of the Electrochemical Society* 112(9) (1965) 886.
- [59] H. Derfouf Talbi, Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier au carbone (XC38) par l'extrait aqueux de plantes sahariennes dans le milieu acide chlorhydrique 1M, Université de Tlemcen, Thèse de doctorat (2019).
- [60] J.T. Tuaweri, Zinc and zinc alloy composite coatings for corrosion protection and wear resistance, Université de Loughborough, Thèse de doctorat (2005).
- [61] F. Zakia, Electrodeposition des métaux (Fe, Ni, Mo, Co...) sur silicium et silicium poreux, Université de Tlemcen, Thèse de Doctorat (2013).
- [62] C. Léger, L'électrodeposition en cellule mince sous l'oeil d'un interféromètre: une étude expérimentale et théorique de processus limités par la diffusion, Université de Bordeaux 1, Thèse de doctorat (1999).
- [63] J.G. Bearss, C. Chan, W.L. Meyer, Compound bore nozzle for ink jet printhead and method of manufacture, Google Patents, (1987).
- [64] H. Belbah, Étude de l'effet des polyphénols du *Daphne gnidium* L. sur les propriétés des dépôts électrolytiques de nickel, Université de Guelma, Thèse de doctorat (2018).
- [65] L. Mentar, Effets des additifs organiques sur les propriétés de films minces granulaires de Co-Cu, Université Ferhat Abbas-Sétif, Thése de doctorat (2018).
- [66] K.J. Vetter, *Elektrochemische kinetik*, Springer-Verlag(2013).
- [67] I. Djaghout, Etude de l'influence des additifs organiques sur les proprietes des depots electrolytiques de nickel, Université de Guelma, Thèse de doctorat (2016).
- [68] A. Godon, Relations Structure/Composition/Propriétés de revêtements électrodéposés de nickel de taille de grain nanométrique, Université de La Rochelle Thèse de doctorat (2010).
- [69] J. Amblard, G. Maurin, R. Wiart, Electrocrystallisation-Aspects fondamentaux, *Techniques de l'Ingénieur D 906* (1976).

- [70] L. Lacourcelle, Revêtement métalliques par voie électrolytique, J Techniques de l'ingénieur (1973).
- [71] A. Linda, Etude cinétique de l'électrodéposition d'un alliage Zn-Co en milieu acide, Université Badji Mokhtar Annaba, Mémoire de master (2016).
- [72] L. Oniciu, L. Mureşan, Some fundamental aspects of levelling and brightening in metal electrodeposition, Journal of applied electrochemistry 21(7) (1991) 565-574.
- [73] T.C. Franklin, Some mechanisms of the action of additives in electrodeposition processes, Plat Surf Finish 81(4) (1994) 62-67.
- [74] J.H. Arts, H. Muijser, M.J. Appel, C.F. Kuper, J.G. Bessems, R.A. Woutersen, Subacute (28-day) toxicity of furfural in Fischer 344 rats: a comparison of the oral and inhalation route, Food and chemical toxicology 42(9) (2004) 1389-1399.
- [75] G.D. Gupta, A. Misra, D.K. Agarwal, Inhalation toxicity of furfural vapours: an assessment of biochemical response in rat lungs, Journal of Applied Toxicology 11(5) (1991) 343-347.
- [76] P.B. Smith, C. Crespi, Thiourea toxicity in mouse C3H/10T12 cells expressing human flavin-dependent monooxygenase 3, Biochemical pharmacology 63(11) (2002) 1941-1948.
- [77] S.H. Dieke, C.P. Richter, Acute toxicity of thiourea to rats in relation to age, diet, strain and species variation, Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics 83(3) (1945) 195-202.
- [78] Y.D. Gamburg, G. Zangari, Theory and practice of metal electrodeposition, Springer Science & Business Media(2011).
- [79] A. Habchi, Etude de l'effet de la température sur la corrosion de l'acier XC52 en présence du sulfarlem et leur sel correspondant dans un milieu H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 20%, Université Kasdi Merbah Ouargla, Mémoire de master (2013).
- [80] ASTM-International, ASTM G31-72. Annual Book of ASTM Standards, Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals, West Conshohocken, USA (2004).
- [81] C. Loto, A. Olofinjana, J. Oniso, Effect of Allium Cepa (Onion) Extract Additive on the Morphology of Zinc Electroplated Mild Steel in Acid Chloride Solution, Canadian Journal of Pure and Applied Sciences 9(1) (2015) 3267-3277.
- [82] M. Lefahal, Etude phytochimique, biologique et activité anticorrosion de trois plantes médicinales Algériennes appartenant aux familles Plumbaginaceae, Tamaricaceae et Apiaceae, Université de Constantine 1, Thèse de doctorat (2014).
- [83] S.R. Downie, D.S. Katz-Downie, K. Spalik, A phylogeny of Apiaceae tribe Scandiceae: evidence from nuclear ribosomal DNA internal transcribed spacer sequences, J American Journal of Botany 87(1) (2000) 76-95.



- [84] V.H. Heywood, Les plantes à fleurs: 306 familles de la flore mondiale, Nathan(1996).
- [85] M. Benahmed, Contribution à l'étude phytochimique de deux plantes de la famille de deux Apiaceae, Université Mentouri Constantine, Thèse de doctorat (2009).
- [86] J.P. Vaucher, Histoire physiologique des plantes d'Europe, Marc Aurel Frères(1841).
- [87] J.A. Battandier, Flore de l'Algérie: Dicotylédones, Adolphe Jourdan(1888).
- [88] M. Benahmed, S. Akkal, S. Louaar, H. Laouer, H. Duddeck, A new furanocoumarin glycoside from *Carum montanum* (Apiaceae), *Biochemical systematics and ecology* 34(8) (2006) 645-647.
- [89] M. Benahmed, S. Akkal, A. Elomri, H. Laouer, P. Vérité, E. Seguin, Constituents from *Bupleurum montanum* (Coss. & Dur.)(Apiaceae), *Arabian Journal of Chemistry* 7(6) (2014) 1065-1069.
- [90] M. Bilel, Synthèse des inhibiteurs contre la corrosion des aciers, Université Mentouri-Constantine, Mémoire de magister (2011).
- [91] A. Singh, K. Ansari, J. Haque, P. Dohare, H. Lgaz, R. Salghi, M. Quraishi, Effect of electron donating functional groups on corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid: Experimental and quantum chemical study, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 82 (2018) 233-251.
- [92] A. El-Yaktini, A. Lachiri, M. El-Faydy, F. Benhiba, H. Zarrok, M. El-Azzouzi, Practical and Theoretical Study on the Inhibitory Influences of New Azomethine Derivatives Containing an 8-Hydroxyquinoline Moiety for the Corrosion of Carbon Steel in 1 M HCl, *Oriental Journal of Chemistry* 34(6) (2018) 3016-3029.
- [93] M.P. Desimone, G. Gordillo, S.N. Simison, The effect of temperature and concentration on the corrosion inhibition mechanism of an amphiphilic amido-amine in CO<sub>2</sub> saturated solution, *Corros. Sci.* 53(12) (2011) 4033-4043.
- [94] M.A. Quraishi, A. Singh, V.K. Singh, D.K. Yadav, A.K. Singh, Green approach to corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid and sulphuric acid solutions by the extract of *Murraya koenigii leaves*, *Mater. Chem. Phys.* 122(1) (2010) 114-122.
- [95] M. Ameer, A. Fekry, Inhibition effect of newly synthesized heterocyclic organic molecules on corrosion of steel in alkaline medium containing chloride, *International journal of hydrogen energy* 35(20) (2010) 11387-11396.
- [96] S. Refaey, F. Taha, A.A. El-Malak, Inhibition of stainless steel pitting corrosion in acidic medium by 2-mercaptobenzoxazole, *Applied Surface Science* 236(1-4) (2004) 175-185.
- [97] X. Li, S. Deng, H. Fu, Synergism between red tetrazolium and uracil on the corrosion of cold rolled steel in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution, *Corrosion Science* 51(6) (2009) 1344-1355.

- [98] M. Migahed, E. Azzam, S. Morsy, Electrochemical behaviour of carbon steel in acid chloride solution in the presence of dodecyl cysteine hydrochloride self-assembled on gold nanoparticles, *Corrosion Science* 51(8) (2009) 1636-1644.
- [99] A. Kalla, M. Benahmed, N. Djeddi, S. Akkal, H. Laouer, Corrosion inhibition of carbon steel in 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution by *Thapsia villosa* extracts, *International Journal of Industrial Chemistry* 7(4) (2016) 419-429.
- [100] M. Deyab, S.A. El-Rehim, Effect of succinic acid on carbon steel corrosion in produced water of crude oil, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 45(3) (2014) 1065-1072.
- [101] M. Benahmed, N. Djeddi, S. Akkal, H. Laouar, *Saccocalyx satureioides* as corrosion inhibitor for carbon steel in acid solution, *International Journal of Industrial Chemistry* 7(2) (2016) 109-120.
- [102] C.P. Kumar, K. Mohana, H. Muralidhara, Electrochemical and thermodynamic studies to evaluate the inhibition effect of synthesized piperidine derivatives on the corrosion of mild steel in acidic medium, *Ionics* 21(1) (2015) 263-281.
- [103] S. Hejazi, S. Mohajernia, M.H. Moayed, A. Davoodi, M. Rahimizadeh, M. Momeni, A. Eslami, A. Shiri, A. Kosari, Electrochemical and quantum chemical study of Thiazolo-pyrimidine derivatives as corrosion inhibitors on mild steel in 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 25 (2015) 112-121.
- [104] I. Ahamad, R. Prasad, M. Quraishi, Adsorption and inhibitive properties of some new Mannich bases of Isatin derivatives on corrosion of mild steel in acidic media, *Corrosion Science* 52(4) (2010) 1472-1481.
- [105] A.K. Singh, M. Quraishi, Effect of Cefazolin on the corrosion of mild steel in HCl solution, *Corrosion Science* 52(1) (2010) 152-160.
- [106] I. Naqvi, A. Saleemi, S. Naveed, Cefixime: a drug as efficient corrosion inhibitor for mild steel in acidic media. Electrochemical and thermodynamic studies, *Int. J. Electrochem. Sci* 6(1) (2011) 146-161.
- [107] M. Lebrini, F. Robert, A. Lecante, C. Roos, Corrosion inhibition of C38 steel in 1 M hydrochloric acid medium by alkaloids extract from *Oxandra asbeckii* plant, *Corrosion Science* 53(2) (2011) 687-695.
- [108] A. Fouda, Y. Abdallah, G. Elawady, R. Ahmed, *Zygophyllum coccineum* L. Extract as green corrosion inhibitor for copper in 1 M HNO<sub>3</sub> Solutions, *International Journal* 2(11) (2014) 517-531.

- [109] F. Bentiss, M. Lebrini, M. Lagrenée, Thermodynamic characterization of metal dissolution and inhibitor adsorption processes in mild steel/2, 5-bis (n-thienyl)-1, 3, 4-thiadiazoles/hydrochloric acid system, *Corrosion Science* 47(12) (2005) 2915-2931.
- [110] M. Pitchaipillai, K. Raj, J. Balasubramanian, P. Periakaruppan, Benevolent behavior of *Kleinia grandiflora* leaf extract as a green corrosion inhibitor for mild steel in sulfuric acid solution, *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials* 21(11) (2014) 1083-1095.
- [111] C.M. Goulart, A. Esteves-Souza, C.A. Martinez-Huitle, C.J.F. Rodrigues, M.A.M. Maciel, A. Echevarria, Experimental and theoretical evaluation of semicarbazones and thiosemicarbazones as organic corrosion inhibitors, *Corrosion Science* 67 (2013) 281-291.
- [112] J.C. Da Rocha, J.A.d.C.P. Gomes, E. D'Elia, Corrosion inhibition of carbon steel in hydrochloric acid solution by fruit peel aqueous extracts, *Corrosion Science* 52(7) (2010) 2341-2348.
- [113] P.M. Krishnegowda, V.T. Venkatesha, P.K.M. Krishnegowda, S.B.J.I. Shivayogiraju, E.C. Research, *Acalypha torta* leaf extract as green corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid solution, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 52(2) (2013) 722-728.
- [114] M. Solomon, S. Umoren, I. Udosoro, A. Udoh, Inhibitive and adsorption behaviour of carboxymethyl cellulose on mild steel corrosion in sulphuric acid solution, *Corrosion science* 52(4) (2010) 1317-1325.
- [115] G. Hodaifa, J.M. Ochando-Pulido, S.B.D. Alami, S. Rodriguez-Vives, A. Martinez-Ferez, Kinetic and thermodynamic parameters of iron adsorption onto olive stones, *Ind. Crop. Prod.* 49 (2013) 526-534.
- [116] M.A. Deyab, S.S.A. El-Rehim, Effect of succinic acid on carbon steel corrosion in produced water of crude oil, *J Taiwan Inst. Chem. Eng* (2013).
- [117] M. Lebrini, F. Robert, P. Blandinières, C. Roos, Corrosion inhibition by *Isertia coccinea* plant extract in hydrochloric acid solution, *Int. J. Electrochem. Sci* 6(7) (2011) 2443-2460.
- [118] A. Singh, S. Mohapatra, B. Pani, Corrosion inhibition effect of Aloe Vera gel: gravimetric and electrochemical study, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 33 (2016) 288-297.
- [119] M. Benahmed, I. Selatnia, N. Djeddi, S. Akkal, H. Laouer, Adsorption and Corrosion Inhibition Properties of Butanolic Extract of *Elaeoselinum thapsioides* and Its Synergistic Effect with *Reutera lutea* (Desf.) Maires (Apiaceae) on A283 carbon Steel in Hydrochloric Acid Solution, *Chemistry Africa* 3(1) (2019) 251-261.

- [120] C. Gabrielli, *Traité analyse et caractérisation*, Techniques d'ingénieur, CNRS - Université pierre Marie Curie, Paris (2002).
- [121] K.P.V. Kumar, M.S.N. Pillai, G.R. Thusnavis, Seed Extract of *P sidium guajava* as Ecofriendly Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in Hydrochloric Acid medium, *J. Mater. Sci. Technol.* 27(12) (2011) 1143-1149.
- [122] M. Bobina, A. Kellenberger, J.-P. Millet, C. Muntean, N. Vaszilcsin, Corrosion resistance of carbon steel in weak acid solutions in the presence of L-histidine as corrosion inhibitor, *Corros. Sci.* 69 (2013) 389-395.
- [123] I. Selatnia, A. Sid, M. Benahmed, T. Ozturk, N. Gherraf, Synthesis and Characterization of a Bis-Pyrazoline Derivative as Corrosion Inhibitor for A283 Carbon Steel in 1M HCl: Electrochemical, Surface, DFT and MD Simulation Studies, *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces* 54(6) (2018) 1182-1193.
- [124] H. Lgaz, K.S. Bhat, R. Salghi, S. Jodeh, M. Algarra, B. Hammouti, I.H. Ali, A.J.J.o.M.L. Essamri, Insights into corrosion inhibition behavior of three chalcone derivatives for mild steel in hydrochloric acid solution, *Journal of Molecular Liquids* 238 (2017) 71-83.
- [125] S. Martinez, M. Metikoš-Huković, A nonlinear kinetic model introduced for the corrosion inhibitive properties of some organic inhibitors, *Journal of Applied Electrochemistry* 33(12) (2003) 1137-1142.
- [126] M. Elayyachy, A. El Idrissi, B. Hammouti, New thio-compounds as corrosion inhibitor for steel in 1 M HCl, *Corrosion Science* 48(9) (2006) 2470-2479.
- [127] F. Mansfeld, Recording and analysis of AC impedance data for corrosion studies, *Corrosion* 37(5) (1981) 301-307.
- [128] E. McCafferty, On the determination of distributed double-layer capacitances from Cole-Cole plots, *Corrosion Science* 39(2) (1997) 243-254.
- [129] A. Ghazoui, N. Benchat, F. El-Hajjaji, M. Taleb, Z. Rais, R. Saddik, A. Elaatioui, B. Hammouti, The study of the effect of ethyl (6-methyl-3-oxopyridazin-2-yl) acetate on mild steel corrosion in 1M HCl, *Journal of Alloys and Compounds* 693 (2017) 510-517.
- [130] A. Yurt, S. Ulutas, H. Dal, Electrochemical and theoretical investigation on the corrosion of aluminium in acidic solution containing some Schiff bases, *Applied Surface Science* 253(2) (2006) 919-925.
- [131] X. Zheng, S. Zhang, M. Gong, W. Li, Experimental and theoretical study on the corrosion inhibition of mild steel by 1-octyl-3-methylimidazolium L-prolinate in sulfuric acid solution, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 53(42) (2014) 16349-16358.

- [132] K. Benchekroun, F. Dalard, J.-J. Rameau, A. El Ghazali, Inhibition de la corrosion du fer dans HCL 1 M. Partie II. Etude des propriétés inhibitrices du 2-aminothiophénol et du 2-aminophényl disulfure, par spectroscopie d'impédance, *New Journal of Chemistry* 26(7) (2002) 946-952.
- [133] C. Loto, Influence of Ananas comosus juice extract as additive on the electrodeposition of zinc on mild steel in acid chloride solution, *International Journal of Electrochemical Science* 7 (2012) 10748-10762.
- [134] C. Loto, R. Loto, Effects of Nicotiana Tobaccum extract additive on the quality of electroplating of zinc on mild steel, *Polish Journal of Chemical Technology* 15(1) (2013) 38-45.
- [135] C. Loto, A. Olofinjana, Effect of Saccharum officinarum juice extract additive on the electrodeposition of zinc on mild steel in acid chloride solution, *International Journal of Electrochemical Science* 7 (2012) 9795-9811.
- [136] C. Loto, A. Olofinjana, R. Loto, Effect of Manihot Esculenta C. Leaf Extract Additive on the Zinc Electroplating on Mild Steel in Acid Chloride Solution, *International Journal of Electrochemical Science* 9 (2014) 3746-3759.
- [137] C.A. Loto, Synergism of Saccharum officinarum and Ananas comosus extract additives on the quality of electroplated zinc on mild steel, *Research on Chemical Intermediates* 40(5) (2014) 1799-1813.
- [138] S. Marmi, Comportement à la corrosion des revêtements à base de Nickel et de Chrome sur des substrats de cuivre, Université Mohamed Khider Biskra, Thèse de doctorat (2017).
- [139] D. ASTM, 523-89, Standard Test Method for Specular gloss 6 (1989).
- [140] E. ISO, Paints and varnishes–Determination of gloss value at 20 degrees, 60 degrees and 85 degrees, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland (2014).
- [141] K.M. Youssef, C. Koch, P. Fedkiw, Influence of additives and pulse electrodeposition parameters on production of nanocrystalline zinc from zinc chloride electrolytes, *Journal of The Electrochemical Society* 151(2) (2004) C103.



Université Larbi Tébessi- Tébessa

Faculté des sciences exactes et des sciences de la nature et de la vie

Département ..sciences de la matière.....

Filière : ..chimie.....

Spécialité : ..chimie des produits naturels

Année universitaire 2019/2020



## Formulaire de levée de réserves après soutenance d'un Mémoire de Master

### Données d'identification du candidat (e) :

Nom et prénom du candidat : ..Messoud Zakaria  
..Mansour Adel

Intitulé du Sujet : ..Approche verte et durable pour la protection  
d'un acier au carbone contre la corrosion  
en milieu acide

### Données d'identification du membre de jury :

Nom et prénom : ..Bouguessa Sabrina  
Grade : ..MCA D  
Lieu d'exercice : Université Larbi Tébessi- Tébessa

Vu le procès-verbal de soutenance du mémoire sus cité comportant les réserves suivantes :

.....  
R A S  
.....

Et après constatation des modifications et corrections suivantes :

.....  
R A S  
.....

Je déclare en ma qualité de président de jury de soutenance que le mémoire cité remplit toutes les conditions exigées et permet au candidat de déposer son mémoire en vue de l'obtention de l'attestation de succès.

Le 27/10/2020

Président de jury de soutenance : (Nom/Prénom et signature)

Bouguessa Sabrina





République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Larbi Tébessa - Tébessa  
Faculté des Science Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie



**Déclaration sur l'honneur de non-Plagiat**  
(À joindre obligatoirement au mémoire; Remplie et signée)



Nous soussignons

Nom, prénom: MESSIID, ZAKARIA & HANSEUR, Adel

N° de carte d'étudiant: (1) 34027715 (2) 34020122

Régulièrement inscrits (es) en Master au Département Sciences de la Matière

Année universitaire: 2019/2020

Domaine: Sciences de la matière

Filière: Chimie

Spécialité: chimie des produits naturels

Intitulé du mémoire: Approche verte et durable pour la protection d'un acier au carbone contre la corrosion en milieu acide

Attestons que notre mémoire est un travail original et que toutes les sources utilisées ont été indiquées dans leur totalité. Nous certifions également que nous n'avons ni recopié ni utilisé des idées ou des formulations tirées d'un ouvrage, article, ou mémoire, en version imprimée ou électronique, sans mentionner précisément leur origine et que les citations intégrales sont signalées entre guillemets.

Sanctions en cas de plagiat prouvé:

Les étudiants seront convoqués devant le conseil de discipline, les sanctions prévues selon la gravité du plagiat sont:

- L'annulation du mémoire avec possibilité de le refaire sur un sujet différent.
- L'exclusion d'une année du master.
- L'exclusions définitive.

Fait à Tébessa, le: 26/10/2020

Signature des étudiants(es):

(1):

(2):

المجلس الشعبي البلدي  
بوتقويتى  
البلدية  
2020 12

