



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche



الجامعة الجزائرية للدراسات والبحوث  
FSESV  
FACULTÉ DES SCIENCES EXACTES ET DE LA VIE  
47 000 TEBESSA - ALGERIE

Scientifique

Université Larbi Tébessi

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

Département des Sciences de la matière

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

En : Sciences de la matière

Spécialité : Chimie produite naturelle

---

Evaluation de l'ajout de dérive naturel dans le bain  
d'électrodéposition de zinc d'un acier

---

Par :

HALFAYA Rima

HADJAR Hiba

Devant le jury :

BELGHIT Chafik

MCB

Université de Tébessa

HANINI Karima

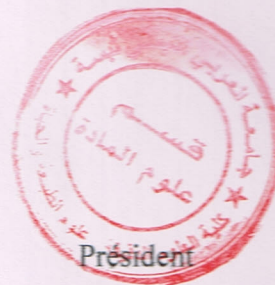
MCB

Université de Tébessa

EL HASSASNA Souhir

MAA

Université de Tébessa



Président

Rapporteur

Examinateur

Date de soutenance : 23/06



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique



Université Larbi Tébessi

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

Département des Sciences de la matière

## MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

**En :** Sciences de la matière

**Spécialité :** Chimie produite naturelle

---

**Evaluation de l'ajout de dérive naturel dans le bain  
d'électrodéposition de zinc d'un acier**

---

Par :

**HALFAYA Rima**

**HADJAR Hiba**

Devant le jury :

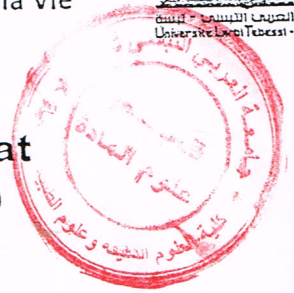
BELGHIT Chafik	MCB	Université de Tébessa	Président
HANINI Karima	MCB	Université de Tébessa	Rapporteur
EL HASSASNA Souhir	MAA	Université de Tébessa	Examineur

Date de soutenance : 23/06/2021



## Déclaration sur l'honneur de non-plagiat

(à joindre obligatoirement au mémoire, remplie et signée)



Je soussigné(e),

Nom, Prénom : *Hadjara Rima / HADJAR HEBA*

Régulièrement inscrit(e) en Master au département : *Science de la matière*

N° de carte d'étudiant : *15 15 3403875 / 161634019745*

Année universitaire : *2020/2021*

Domaine : *Science de la matière*

Fillière : *chimie*

Spécialité : *chimie produits naturels*

Intitulé du mémoire : *Evaluation de l'ajout de dérivé naturel dans le bain d'électrodeposition*

Atteste que mon mémoire est un travail original et que toutes les sources utilisées ont été indiquées dans leur totalité. Je certifie également que je n'ai 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 :

L'étudiant sera convoqué 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'exclusion définitive.

Fait à Tébessa, le : *15/07/2021*

Signature de l'étudiant(e) :





## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Ma mère, qui ouvré ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.*

*Et mon père qui me donnent l'espoir pour continuer ma voie de la réussite, et qui sacrifient par tout pour céder à mes demandes que Dieu vous garde pour moi.*

*Ma deuxième mère (Tata)*

*Mes chers frères, Mes chères Sœurs*

*Mes nièces et neveux : Islem-Issraa-Wissem-Tassnim-Bidjed-Seif-Nizar*

*Dédicace spéciale pour mon âme Farah « Moufida » la raison de ma joie, de mon bonheur et de mon rire, l'amour de mon cœur et le compagnon de ma vie. Merci d'être dans ma vie.*

*A ma chère sœur et mon binôme, merci pour toutes les journées qui nous ont réunis, pour tous mes moments avec vous, et pour toutes les joies et les peines que nous avons eues ensemble. Merci d'être dans ma vie.*

*Mes amies : Assia, Jiji, Rawnak, Salsabil, Imen, pour tous les sentiments et les moments qu'on a partagés*

*Et bien sûr à tous mes camarades de la 2<sup>ème</sup> année*

*Rima*



*Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mon seul et unique abri d'enfance, à celle qui n'a jamais cessé de me lancer l'appel  
d'amour et tendresse, de me soutenir  
dans les moments difficiles, la plus proche de mon cœur ma mère Wafa.*

*A mon père Ridha Que j'admire beaucoup, qui m'a toujours aidé dans ma vie et qui  
n'a jamais cessés de m'encourager*

*et de me soutenir tout au long de mes études, que dieu le garde en bonne santé.*

*A chers frères Anesse et Abdelmalek.*

*A mes grands-pères.*

*A ma grande mère.*

*A L'âme de ma grand-mère qui nous a quitté.*

*A toute ma familles Hadjar et Hamedi sans exception.*

*A mes chères sœurs alia yasmine et hanouna.*

*A Mon binôme Rima merci d'être la seule qui a pu me supporter 365 jours par ans,  
merci d'être ma confidente mon exutoire, de me comprendre en un regard. Sans toi,  
je suis perdue plus qu'une sœur.*

*Mes amies : Assia, Rawnak, Jiji, Salsabil, Imen pour tous les sentiments et les  
moments qu'on a partagés.*

*Et bien sûr à tous mes camarades de la 2<sup>ème</sup> année master chimie*

*Hiba*



## **Remerciements**

*Nous remercions Allah le Tout Puissant de nous avoir aidées et donné la volonté et la Santé pour terminer ce travail.*

*Ce travail a été proposé par **Dr. HANINI Karima** Maitre De conférence au département Science de la matière de la faculté des SNV Université de Tébessa, nous tenons à lui exprimée notre profonde gratitude pour ses encouragements, ses conseils et sa disponibilité sans limite, qui ont contribués à notre formation et qui nous a permis de mener à bince travail.*

*Merci **Dr. BELGHIT Chafik** qui nous fait le plaisir de présider le jury.*

*Merci **Dr. EL HSSASNA Souhir** qui nous fait le plaisir d'examiner ce travail.*

*Que ce mémoire soit l'occasion d'exprimer nos s'incères  
Remerciements à toutes les personnes des laboratoires qui ont  
Contribués de loin ou de près surtout : monsieur **Rafik**  
Nos s'sincères remerciements à Docteur **Sameh BOUDIBA.**, Professeur **Merzoug**  
**BENAHMED.***

من أجل حماية الفولاذ، غالباً ما يكون معدن الزنك هو الاختيار الأمثل اقتصادياً في عملية التغليف الكهربائي. ولذلك تم تحسين جودة راسب الزنك باستخدام الإضافات العضوية في حمام التغليف الكهربائي لتحقيق خصائص هيكلية ومورفولوجية أفضل.

لهذا الغرض، تم فحص أداء مستخلصات الشندر بشكل تجريبي كمضافات جديدة للتغليف الكهربائي صديقة للبيئة بواسطة التيار المستمر في معلمات تشغيل محددة جيداً وتم تقييم جودة ترسبات الزنك باستخدام اختبار الالتصاق وحسابات سمك الطبقة المترسبة والمجهر البصري المستقطب.

من ناحية أخرى، تم تقييم مقاومة التآكل للركيزة المغلفة بواسطة قياسات فقدان الوزن والقياسات الكهروكيميائية. حيث أظهرت النتائج المتحصل عليها أن عملية الترسيب الكهربائي كانت حساسة لتغير تركيز المادة المضافة ونوع المستخلص، بالإضافة إلى ذلك، أظهرت هذه النتائج أن العينات المغلفة بوجود المستخلصات كانت أكثر مقاومة للتآكل من العينات المغلفة في حالة عدم وجودها.

**الكلمات المفتاحية:** التآكل، التغليف الكهربائي، التغليف، مضاف.

Pour protéger l'acier de la corrosion, le zinc est souvent le métal de choix le plus économique dans le processus d'électrodéposition.

La qualité des dépôts de zinc est améliorée en utilisant des additifs organiques dans le bain d'électrodéposition pour obtenir de meilleures propriétés structurales et morphologiques.

Dans ce but, la performance des extraits de *Beta vulgaris L* a été étudiée expérimentalement en tant que nouveaux additifs d'électrodéposition écologiques en utilisant une alimentation en courant continu (DC) à des paramètres de fonctionnement bien définis.

La qualité du dépôt de zinc a été évaluée à l'aide d'un test d'adhésion, des calculs de l'épaisseur de la couche déposée et d'un microscope optique polarisant.

De l'autre côté, la résistance à la corrosion du substrat plaqué a été évaluée par des mesures gravimétriques et des mesures électrochimiques.

Les résultats obtenus ont révélé que le processus d'électrodéposition était sensible à la variation de la concentration de l'additif et du type d'extrait.

De plus, ces résultats ont montré que les substrats revêtus en présence d'extraits étaient plus résistants à la corrosion que les substrats revêtus en leur absence.

**Mots clés :** Corrosion, Électrodéposition, Revêtement, Additif.



To protect steel from corrosion, zinc is often the most economical metal for electroplating

The quality of zinc deposits is improved by using organic additives in the plating bath to achieve better structural and morphological properties.

For this purpose, the performance of Beta vulgaris L extracts were experimentally investigated as new environmentally friendly electrodeposition additives using direct current (DC) power at well-defined operating parameters.

The quality of the zinc deposit was evaluated using an adhesion test, deposited layer thickness calculations and a polarizing optical microscope.

On the other hand, the corrosion resistance of the plated substrate was evaluated by gravimetric and electrochemical measurements.

The obtained results revealed that the electrodeposition process was sensitive to the variation of the additive concentration and the extract type.

Furthermore, these results showed that substrates coated in the presence of extracts were more resistant to corrosion than substrates coated in their absence.

**Key words:** Corrosion, Electroplating, Coating, Additive.

# **Sommaire**

ملخص

Résumé

Abstract

LISTES DES FIGURES

LISTES DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I : SYNTHESE BILIOGRAPHIQUE

PARTIE I : GENERALITES SUR CORROSION 3

I. 1. Introduction 3

I. 2. Définition 3

I. 3. Modes de corrosion 3

I. 3. 1. Corrosion chimique (sèche) 3

I. 3. 2. Corrosion électrochimique (humide) 3

I. 3. 3. Corrosion bactérienne (biochimique) 4

I. 4. Cause de corrosion 4

I. 5. Morphologie de corrosion 5

I. 5. 1. Corrosion généralisée 5

I. 5. 2. Corrosion localisée 6

I. 6. 1. Facteurs du milieu corrosif 9

I. 6. 2. Facteurs métallurgiques 9

I. 6. 3. Facteurs définissant les conditions d'emploi 9

I. 6. 4. Facteurs dépendant du temps 9

I. 7. Réaction de corrosion 10

I. 8. Paramètres influencent sur vitesse de corrosion 10

I. 8. 1. pH du milieu 10

I. 8. 2. Effet de la température 10

I. 8. 3. Régime hydrodynamique 11

I. 8. 4. Salinité 11

I. 9. Protection et lutte contre corrosion 11

I. 9. 1. Prévention par une forme adaptée des pièces 11

I. 9. 2. Prévention par un choix judicieux des matériaux 12

I. 9. 3. Protection par inhibiteurs 13

I. 9. 4. Protection électrochimique 13

---

I. 9. 5. Protection par revêtement	13
<b>PARTIE II : ÉLECTRODEPOSITION</b>	15
II. 1. Introduction	15
II. 2. Définition	15
II. 3. Principe d'électrodéposition	15
II. 4. Cinétique de l'électrodéposition	16
II. 5. Mécanisme d'électrodéposition	17
II. 5. 1. Transfert de masse	17
II. 5. 2. Transfert de charge	17
II. 6. Types de revêtement électrolytique	18
II. 7. Paramètres d'un dépôt électrolytique	18
II.7.1. Paramètres de fonctionnement	18
II. 7. 2. Paramètres de bain	19
a) La diminution du pH peut provoquer	19
b) L'augmentation du pH peut conduire	20
II. 8. Additifs à base de plantes	21
II. 9. Applications pratiques d'électrodéposition	21
<b>CHAPITRE II : METHODES ET MATERIELS</b>	
II. 1. Matériel végétal	24
II. 1. 1. Définition de betterave ( <i>Beta vulgaris L</i> )	24
II. 1. 2 Extraction de betterave	24
II. 2. Elaboration de dépôts	25
II. 2. 1. Produits chimiques	25
II. 2. 2 Matériels utilisés	27
II. 3. Matériaux	28
II. 3. 1. Substrat utilisé	28
II. 3. 2. Plaques de zinc	29
II. 4. Bain électrolytique	29
II. 5. Dispositif d'électrodéposition	29
II. 6. Méthodes d'électrodépositions	29
II. 1. Étude gravimétrique	30
II. 2. Techniques électrochimiques	31
II. 2. 1. Suivi du potentiel en circuit ouvert (O.C.P)	31

II. 2. 2. Courbes de polarisation	31
II. 2. 3. Spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE)	32
II. 3. Épaisseur de revêtement	33
II. 4. Adhérence	33
II. 5. Microscope optique	34
<b>CHAPITRE III : RESULTAT ET DISCUSSION</b>	
III. 1. Qualité de la couche de zinc déposée	35
III. 1. 1. Test d'adhérence de dépôt	35
III. 1. 2. Mesure de l'épaisseur de dépôt	35
III. 2. Etude électrochimique	37
III. 2. 1. Mésures de polarisation potentiodynamique	37
III. 2. 2. Spectroscopie d'impédance électrochimique (S.I.E)	41
III. 3. Étude gravimétrique	44
III. 4. Morphologie de surface	45
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	50
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE</b>	52

**LISTE DES FIGURES**  
**CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE**

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Figure I.1</b>	Corrosion humide d'un métal bivalent M dans un électrolyte qui contient l'oxygène.	4
<b>Figure I.2</b>	a) : Corrosion généralisée. b) : Corrosion généralisée d'une pièce en acier dans un échangeur.	5
<b>Figure I.3</b>	Corrosion intergranulaire.	6
<b>Figure I.4</b>	Corrosion par piqûre dans les tuyaux en acier doux.	6
<b>Figure I.5</b>	Corrosion par érosion.	7
<b>Figure I.6</b>	Corrosion sous contrainte (C.S.C).	8
<b>Figure I.7</b>	Exemple de prévention par une forme géométrique adaptée des pièces.	11
<b>Figure I.8</b>	Schéma de classement des inhibiteurs de corrosion.	12
<b>Figure I.9</b>	Schéma de montage d'une cellule d'électrodéposition.	15
<b>Figure I.10</b>	Equipements agricoles et accessoires de jardinage.	20
<b>Figure I.11</b>	Pièces automobiles panneaux de circuits.	21
<b>Figure I.12</b>	Boucles d'attaches et les bijoux.	21

**CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES**

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Figure II.1</b>	<i>Beta vulgaris L.</i>	24
<b>Figure II.2</b>	Chlorure de zinc (Photo personnelle 2021).	25
<b>Figure II.3</b>	Acide borique (Photo personnelle 2021).	25
<b>Figure II.4</b>	Chlorure de potassium (Photo personnelle 2021).	26
<b>Figure II.5</b>	Extrait d'acétate d'éthyle (Photo personnelle 2021).	26
<b>Figure II.6</b>	Extrait de dichlorométhane (Photo personnelle 2021).	26
<b>Figure II.7</b>	Extrait de butanolique (Photo personnelle 2021).	27
<b>Figure II.8</b>	Extrait méthanolique (Photo personnelle 2021).	27
<b>Figure II.9</b>	Générateur de courant.	27
<b>Figure II.10</b>	Agitateur magnétique.	28

<b>Figure II.11</b>	Balance analytique.	28
<b>Figure II.12</b>	Plaque de zinc.	29
<b>Figure II.13</b>	Montage d'électrodéposition (Photo personnelle 2021).	30
<b>Figure II.14</b>	Photographie du dispositif de mesures électrochimiques (Photo personnelle 2021).	33
<b>Figure II.15</b>	Microscope optique LEICA DMLP (Photo personnelle 2021).	34

### CHAPITRE III : RESULTAT ET DISCUSSION

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Figure III.1</b>	Courbes de Polarisation potentiodynamique pour l'acier dans l'eau de mer, sans et avec l'ajout, des extraits de « <i>Beta vulgaris L</i> »	37
<b>Figure III.2</b>	Tracés d'impédance électrochimique de l'acier à différentes concentrations à. Sans et avec l'ajout, des extraits de « <i>Beta vulgaris L</i> ».	41
<b>Figure III.3</b>	Variation du taux de corrosion en fonction du temps d'exposition pour des échantillons d'acier doux non revêtu et revêtu sans et avec les extraits de <i>Beta Vulgaris L</i> .	46

## LISTES DES TABLEAUX

### CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Type de revêtement	13

### CHAPITRE III : RESULTAT ET DISCUSSION

Tableau	Titre	Page
Tableau III.1	L'adhérence, la masse, l'épaisseur de la couche de zinc déposée lors de l'utilisation en absence et en présence des extraits de « Beta vulgaris L » comme additifs.	35
Tableau III.2	Paramètres de polarisation pour la corrosion de l'acier dans l'eau de mer contenant différentes concentrations des extraits de « Beta vulgaris L ».	40
Tableau III.3	Paramètres impédancemétriques de la corrosion de l'acier dans sans et avec addition de différentes concentrations des extraits « Beta vulgaris L ».	43
Tableau III.4	Les valeurs de la vitesse de corrosion en absence et en présence des extraits de « Beta vulgaris L » testés séparément comme additifs dans les bains de zingage.	43
Tableau 5	Morphologie de surface d'acier non revêtus.	44
Tableau III.6	Morphologie de surface d'acier revêtus de différentes concentrations de EBBV.	45
Tableau III.7	Morphologie de surface d'acier revêtus de différentes concentrations de EDBV.	46
Tableau III.8	Morphologie de surface d'acier revêtus de différentes concentrations de EABV.	47
Tableau III.9	Morphologie de surface d'acier revêtus de différentes concentrations de EMBV.	49



# **Introduction générale**

Dans l'industrie, l'utilisation des aciers comme matériaux de construction est très importante. De plus, le coût compétitif de l'acier est aussi un facteur important qui supporte son utilisation, et ce, au détriment d'autres métaux tels l'aluminium ou l'acier inoxydable. Cependant, les aciers soumis à varié de formes de dégradation due à la corrosion. Il arrive donc souvent que des infrastructures en acier subissent des pertes de leurs propriétés mécaniques initiales, perte de l'épaisseur, perforation du métal, etc...ce qui peut avoir des conséquences catastrophiques [1] :

- Les pertes directes : remplacements des matériaux corrodés et des équipements dégradés par la corrosion,
- Les pertes indirectes : réparations, pertes de production,
- Les mesures de protection : utilisation de matériaux plus chers résistant à la corrosion, de revêtements et de protection cathodique,
- Les mesures de prévention : surdimensionnement des structures porteuses, inspections, entretiens.

En général, la corrosion est un problème titulaire en raison de son caractère dérobé et insidieux. Dans les pays industrialisés, les coûts de la corrosion représentent trois à quatre pour-cent du produit national brut [2].

La protection contre la corrosion compte sur plusieurs méthodes différentes, comme exemple : le choix judicieux des matériaux, la forme adaptée des pièces, l'ajout d'inhibiteurs, la protection électrochimique, l'utilisation de revêtements [3].

La nécessité de protéger de la corrosion, de prolonger la durée de vie et d'améliorer l'aspect esthétique et l'importance des produits métalliques a continué à susciter l'intérêt de la recherche scientifique pour l'électrodéposition.

Alors que l'électrodéposition est un processus dans lequel une différence de potentiel est appliquée à une électrode en contact avec un électrolyte provoquant à un transfert électronique entre l'électrode et une espèce ionique dans un électrolyte et la déposition ultérieure des atomes de cette espèce sur l'électrode.

Dans ce contexte, l'étude présente a eu comme objectif l'évaluation des extraits de la plante « Beta vulgaris L » avec différentes concentrations comme additifs dans les bains de zingage d'un acier doux.

Ce travail est subdivisé en trois chapitres précédés d'une introduction générale :

- Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique de la corrosion dans la première partie et d'électrodéposition dans la seconde partie en général.

▪ Le deuxième chapitre présente les procédés expérimentaux de notre travail, où on décrit les méthodes d'obtention des différents extraits de « *Beta vulgaris L* » : extrait dichlorure de méthylène *Beta vulgaris L* (EDBV), extrait acétate d'éthyle *Beta vulgaris L* (EABV), extrait butanolique *Beta vulgaris L* (EBBV), extrait méthanolique *Beta vulgaris L* (EMBV). En outre, les différentes méthodes électrochimiques et méthode non électrochimiques employées pour l'évaluation de ces extraits.

▪ Le troisième chapitre de ce mémoire est donc consacré à l'interprétation et à la discussion de tous les résultats obtenus sur l'effet de l'ajout d'extraits comme additifs dans les bains électrolytiques de zinc, sur la qualité des dépôts de zinc d'une part, et d'autre part, sur la résistance de dépôt de zinc contre la corrosion

Et à la fin une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus.

# **Chapitre I**

## **Synthèse bibliographique**

## **PARTIE I : GENERALITES SUR LA CORROSION**

### **I. 1. Introduction**

Les métaux sont caractérisés par une gamme de propriétés bénéfiques telles qu'une bonne ductilité, la résistance aux températures élevées, et une bonne conductivité et thermiques...etc. Comme toutes substances, ces métaux ont des défauts telles que l'instabilités quand ils touchent de l'air et de l'eau, ce qui réduit leur résistance et leur durabilité à la corrosion.

Toutefois, afin d'exécuter leur travail mieux et bien pendant la durée prévue, des techniques appropriées de protection contre la corrosion sont utilisées. L'utilisation de nouveaux matériaux corrosifs a fait l'objet de nombreuses recherches au cours des autres années [4].

### **I. 2. Définition**

Le terme « corrosion » vient du latin « corroder » qui signifie ronger et attaquer. Selon NACE (National Association of Corrosion Engineers), la corrosion est la dégradation du matériau, généralement métallique, qui résulte d'interaction avec son environnement agressif. C'est-à-dire soit un environnement gazeux (oxygène de l'air par exemple), soit un environnement liquide (eau de mer par exemple) [5].

### **I. 3. Modes de corrosion**

Le phénomène de corrosion se développe en fonction de la nature de l'environnant avec lequel le matériau interagit. La corrosion peut être classée en trois grandes catégories : corrosion chimique, électrochimique et bactérienne[6, 7].

#### **I. 3. 1. Corrosion chimique (sèche)**

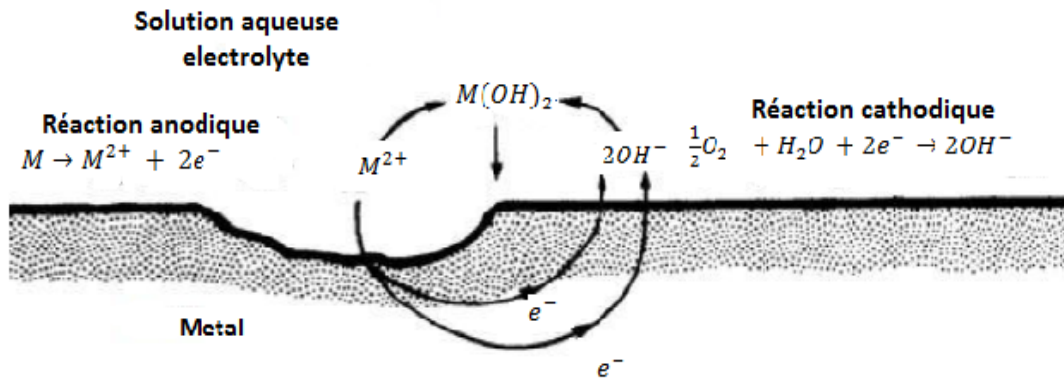
Se produit parce que le métal interagit avec les gaz secs et les fluides isolants sans l'apparition d'un courant électrique. (Tels que la corrosion des conduites de transport de gaz, l'usure des soupapes d'échappement dans les moteurs à combustion interne, les tuyaux d'échappement).

#### **I. 3. 2. Corrosion électrochimique (humide)**

La corrosion électrochimique, appelée encore corrosion humide, c'est le genre le plus dominante et le plus importante. Elle réside essentiellement dans l'oxydation du métal sous

forme d'ions ou d'oxydes, et se traduit par des transferts électroniques entre un métal et une solution électrolytique à son contact (circulation d'un courant électrique).

Dans la corrosion électrochimique, la réaction cathodique et la réaction anodique sont indissociables :



**Figure I.1:** Corrosion humide d'un métal bivalent M dans un électrolyte qui contient l'oxygène.

### I. 3. 3. Corrosion bactérienne (biochimique)

Les activités microbiennes qui produisent des sulfures, des acides organiques ou inorganiques, qui sont les principaux moteurs de la bio-condeance. Ce type de corrosion est préféré par les eaux stagnantes, le sol et les produits biologique.

### **I. 4. Cause de corrosion**

Les conditions environnementales influent sur les taux de corrosion et la propagation. En présence d'humidité, les métaux se corrodent beaucoup plus rapidement qu'ils ne le feraient dans des conditions sèches. Un environnement corrosif se caractérise par un ou plusieurs éléments suivants :

- Humidité.
- Températures extrêmes.
- Humidité de surface.
- Particules en suspension dans l'air.
- Sel.

Les causes de la corrosion sont complexes et varient selon les industries. Voici quelques exemples propres à des industries spécifiques [8].

- Dans la construction, la corrosion est causée par l'exposition des métaux aux éléments externes et des températures maximales.

- L'exploitation minière souterraine se caractérise par un environnement d'eau acide (souvent riche en chlorures et en sulfates), ainsi que par une humidité et des températures élevées.
- Dans l'industrie forestière, la corrosion se produit fréquemment dans les endroits éloignés : l'équipement stationné sur l'herbe ou sur le sol est exposé à une grande quantité d'humidité la nuit. Cela risque de corroder les systèmes mécaniques et les composants intégrés.

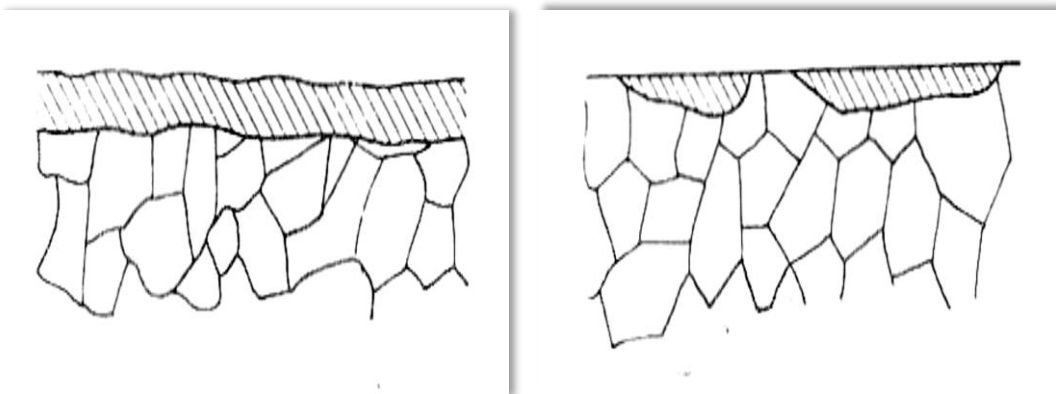
## I. 5. Morphologie de corrosion

La morphologie de la corrosion est classée selon sa nature, la composition chimique de l'environnement, les propriétés électrochimiques et la température. Les principales morphologies de la corrosion sont regroupées en deux grandes familles : la corrosion généralisée et la corrosion localisée [9].

### I. 5. 1. Corrosion généralisée

C'est la forme de corrosion la plus rencontrée dans la pratique, mais c'est l'aspect aussi le moins dangereux, car le métal est attaqué sur toute la surface et avec la même vitesse de corrosion. Les causes peuvent être chimiques, électrochimiques ou aussi mécaniques.

L'attaque de la surface sera très importante si cette dernière est rugueuse. A l'échelle macroscopique on ne distingue pas les lieux cathodiques des lieux anodiques, la surface entière du métal est simultanément cathode et anode (Fig. I.2.a). La corrosion non généralisée est celle qui n'est pas distribuée sur toute la surface (Fig. I.2.b). La corrosion généralisée peut être évitée par l'utilisation d'un revêtement ou par l'addition d'inhibiteur de corrosion ou encore par l'application de la protection cathodique.



**Figure I.2** a) : Corrosion généralisée b) : Corrosion généralisée d'une pièce en acier dans un échangeur.

### I. 5. 2. Corrosion localisée

C'est une corrosion qui se déroule en un lieu spécifiquement anodique d'une surface ou d'une structure métallique. Elles diffèrent de la corrosion généralisée par la distinction claire des endroits anodiques et cathodique.

En pratique la corrosion localisée provient d'une hétérogénéité du matériau ou de l'environnement et souvent elle pose beaucoup de problèmes. Donc c'est la forme de corrosion le plus dangereux car l'attaque se fait en certains endroits de la surface du métal.

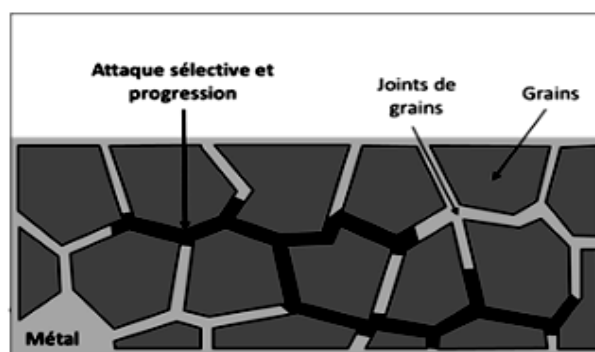
La perte de masse est relativement faible, mais ce type de corrosion est dangereux dans le cas par exemple de perforation de conduite ou de récipient [10].

- Les différents types de la corrosion localisée sont [11, 12]:

#### **I. 5. 2. 1. Corrosion intergranulaire**

C'est une attaque sélective aux joints de grains, souvent, il s'agit de phases qui ont précipitées lors d'un traitement thermique. Donc le produit de corrosion se trouve aux joints de grains.

L'attaque du métal s'effectue en profondeur, le long des joints de grains, ce qui conduit à une microfissure, alors la surface ne présente aucune altération. La perte du métal est insignifiante, mais les caractéristiques sont sensiblement affectées, le métal peut se rompre sous un effort très faible.



**Figure I.3 :** Corrosion intergranulaire.

#### **I. 5. 2. 2. Corrosion par piqûres**

C'est un caractère de corrosion localisée (Fig. I.4), qui se traduit à la surface du métal par la formation de trous étroits, et qui peuvent progresser rapidement en profondeur.



L'origine des piqûres est liée à la présence d'hétérogénéité, qui en surface, détermine la formation de piles locales.

Bien que la quantité du métal corrodé soit faible, ce type de corrosion est très dangereux car il se produit en profondeur et peut conduire à la perforation des tôles même épaisses. Un exemple de corrosion par piqûre dans les tuyaux en acier doux est présenté à la Figure (I.4) [13].

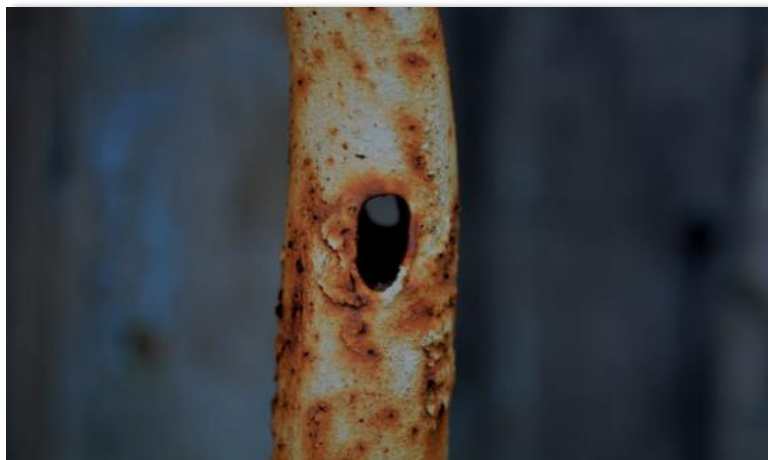


**Figure I.4:** Corrosion par piqûre dans les tuyaux en acier doux.

### I. 5. 2. 3. Corrosion par érosion

Elle est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de matière. Elle a souvent lieu sur des métaux exposés à l'écoulement rapide de fluide (Fig.I.5).

Lorsque les produits de corrosion forment un dépôt adhérent et continu à la surface du métal, la vitesse de corrosion est généralement diminuée si cette dernière est éliminée en certains points, par abrasion du métal due à l'écoulement du liquide ou particules solides. Il y a donc accélération de la corrosion.



**Figure I.5 :** Corrosion par érosion.

#### I. 5. 2. 4. Corrosion sous contrainte (C.S.C)

Il s'agit d'un caractère de corrosion tout à fait général qui se produit sous l'action commune d'une contrainte mécanique et d'un milieu corrosif (Fig. I.6). En l'absence de la contrainte, le phénomène ne se produit pas.

La C.S.C se manifeste sous la forme de fissures qui peuvent être intergranulaires, soit trans granulaires. Les contraintes peuvent être, d'origine interne, provenant des opérations de mises en forme et des traitements thermiques, ou d'origine externe, qui résultent des conditions d'utilisation.



**Figure I.6 :** corrosion sous contrainte (C.S.C).

#### I. 5. 2. 5. Corrosion caverneuse

En général, la corrosion caverneuse résulte de l'hétérogénéité des propriétés physiques ou chimiques du milieu corrosif, ce qui conduit à la formation d'un couple et par conséquent à la formation d'une pile : le cas le plus fréquent de ce type est celui de la corrosion par aération différentielle.

#### I. 5. 2. 6. Corrosion fatigue

La corrosion fatigue se distingue de la C.S.C par le fait que les contraintes appliquées ne sont plus statiques, mais cyclique (efforts périodique alternes).

#### I. 5. 2. 7. Corrosion galvanique

Appelée aussi corrosion bimétallique, elle est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux et la dégradation du métal le moins résistant s'intensifie.

**I. 5. 2. 8. Corrosion sélective**

C'est l'oxydation d'une corp de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique perméable.

**I. 6. Facteurs de corrosion**

La résistance à la corrosion d'un matériau n'est pas une propriété immanente. Elle dépend à la fois des respectifs du matériau et de celles du milieu. En plus de ces facteurs, les conditions d'emploi et la durée d'exploitation ont un rôle dominant sur les phénomènes de corrosion. Et ils peuvent être classés en quatre groupes principaux tels que [4]:

**I. 6. 1. Facteurs du milieu corrosif**

- Concentration du réactif.
- Tenure en oxygène.
- pH du milieu.
- Température.
- Pression.

**I. 6. 2. Facteurs métallurgiques**

- Composition de l'alliage.
- Procédés d'élaboration.
- Impureté.
- Traitement thermique.
- Traitement mécanique.

**I. 6. 3. Facteurs définissant les conditions d'emploi**

- Etat de surface.
- Forme des pièces.
- Emploi d'inhibiteur.
- Procédés d'assemblage.

**I. 6. 4. Facteurs dépendant du temps**

- Vieillessement.
- Tensions mécaniques.

- Modification des revêtements protecteurs.

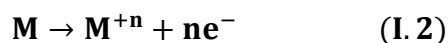
### I. 7. Réaction de corrosion

La corrosion des métaux est due à une réaction d'oxydoréduction irréversible entre le métal et un agent oxydant contenu dans l'environnement. L'oxydation du métal implique la réduction de l'agent oxydant selon la réaction [14].



Ces mécanismes résultent d'un ensemble de réactions qui se produisent à l'interface métal solution et qui mettent en jeu des électrons et des espèces chimiques. Ces réactions électrochimiques peuvent être décrites de la façon simplifiée suivante [15].

- Réaction anodique de dissolution du métal (M)



- Réaction cathodique de réduction d'une espèce de l'électrolyte (Ox)



### I. 8. Paramètres influencent sur vitesse de corrosion

Il existe plusieurs exemples. Parmi eux :

#### I. 8. 1. pH du milieu

De nombreuses réactions chimiques ou électrochimiques, intervenant dans le phénomène de corrosion, dépendent du pH de la solution.

Une forte concentration en protons dans la solution augmente l'agressivité du milieu, ce qui modifie les équilibres des réactions chimiques et électrochimiques. La corrosion augmente avec la diminution du pH du milieu [16].

#### I. 8. 2. Effet de la température

Généralement, l'augmentation de la température accélère les phénomènes de corrosion, car elle diminue les domaines de stabilité des métaux et accélère les cinétiques de réactions et de transport.

L'importance de son influence diffère cependant en fonction du milieu corrosif dans lequel se trouve le matériau.

### **I. 8. 3. Régime hydrodynamique**

Le transport des réactifs vers l'interface et des produits de réaction l'électrolyte est de nature modifier la cinétique des réactions électrochimiques en changeant la concentration des espèces et donc le potentiel d'équilibre.

Les conditions hydrodynamiques fixent les vitesses de réactions en contrôlant le transport de matière par établissement d'une couche limite de diffusion des espèces, appelée couche de Nernst, ce qui explique l'importance de l'agitation de l'électrolyte lors des essais de corrosion en laboratoire [17, 18].

### **I. 8. 4. Salinité**

Les chlorures sont des ions agressifs, souvent à l'origine de corrosion localisée, leur présence en solution s'accompagne d'effets complémentaires, d'une part, leur concentration locale induit une acidification du milieu et d'autre part, la salinité a une influence sur la conductivité du milieu.

## **I. 9. Protection et lutte contre corrosion**

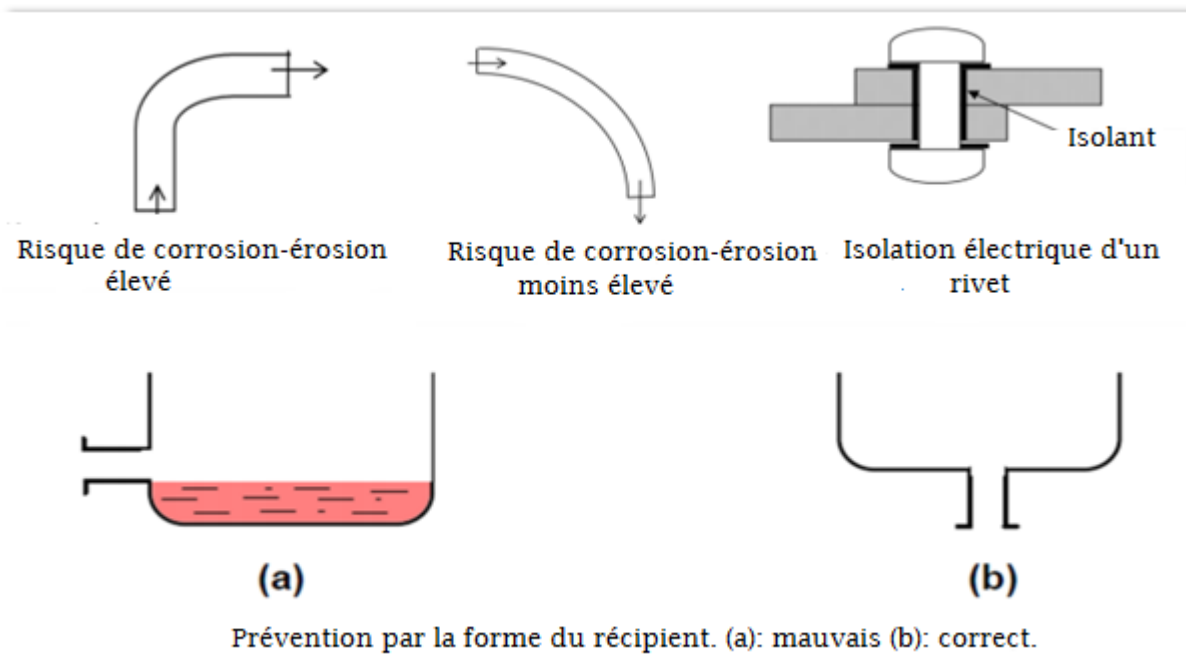
Devant la complexité des mécanismes de corrosion, on trouve un ensemble de mesures permettant de lutter contre la corrosion, mais le choix optimal d'une solution de protection reste difficile. Néanmoins, la majorité des actions entreprises sont localisées autour de cinq axes principaux. La lutte contre la corrosion englobe plusieurs méthodes [17].

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

### **I. 9. 1. Prévention par une forme adaptée des pièces**

Il est possible de diminuer les risques de corrosion en donnant aux objets une forme adaptée aux conditions d'utilisation, et ainsi d'influencer notablement leur durée de vie. Nous aborderons ici quelques solutions types couramment employées pour limiter les risques en fonction du type de corrosion à redouter. Voici quelques recommandations [19]:

- Dans le cas des pièces en contact avec un liquide (eau, etc.) il faut prévoir un bon drainage pour éviter le problème d'accumulation (toitures métalliques, récipients métalliques, etc.).
- Faciliter l'écoulement des fluides dans les conduites pour éviter le risque de corrosion érosion et corrosion par cavitation,
- Choix adapté des matériaux en contact pour éviter le risque de la corrosion galvanique (Attaque du métal le moins noble) ou séparation des différents métaux par des isolants électriques.



**Figure I.7** : Exemple de prévention par une forme géométrique adaptée des pièces.

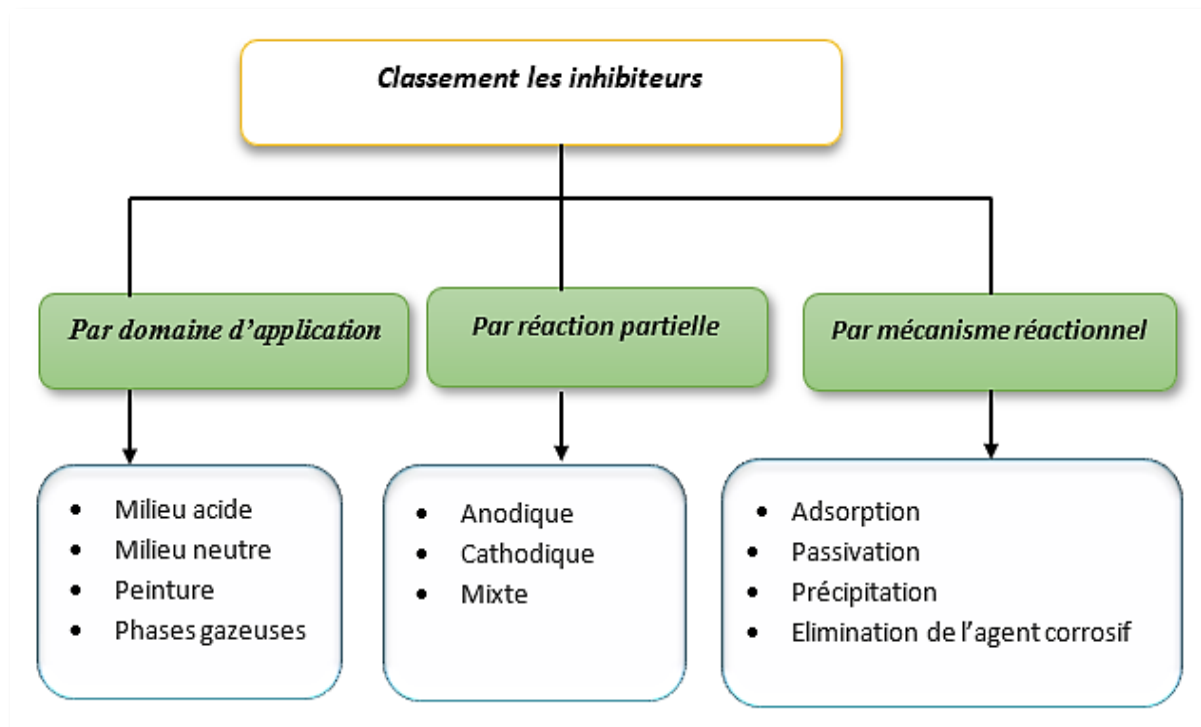
### I. 9. 2. Prévention par un choix judicieux des matériaux.

Le choix du matériau doit spécialement tenir en compte de l'influence indésirable et des conditions de fonctionnement. Il n'existe pas de métaux ou alliages qui ont une résistance absolue à la corrosion, mais on connaît uniquement des matériaux résistant à la corrosion dans certains milieux agressifs [20].

Le comportement à la corrosion n'est qu'un critère parmi d'autres dans le choix des matériaux, bien qu'il s'avère souvent, déterminant. La résistance à la corrosion est une propriété du système métal-milieu et non du métal seul.

### I. 9. 3. Protection par inhibiteurs

Un inhibiteur est une substance chimique que l'on ajoute en petite quantité au milieu pour diminuer la vitesse de corrosion du matériau métallique à protéger [21]. Leur domaine d'utilisation recouvre les milieux acides, la vapeur, et les eaux de refroidissement. Les inhibiteurs peuvent être classés de plusieurs façons (Figure I.8) [22].



**Figure I.8:** Schéma de classement des inhibiteurs de corrosion.

### I. 9. 4. Protection électrochimique

La corrosion électrochimique d'un métal est le résultat du passage d'un courant anodique dans les piles locales. Pour supprimer le phénomène de corrosion [3], il faut porter le métal à un potentiel pour lequel l'intensité de la réaction élémentaire anodique est nulle ou très faible. On distingue deux méthodes de protection [23]:

- Protection cathodique.
- Protection anodique.

### I. 9. 5. Protection par revêtements

Un revêtement joue un rôle de barrière physique qui isole le métal du milieu corrosif et prévient, en théorie, le passage des agents promoteurs de la corrosion (eau, ions, agents chimiques...). Le choix des matériaux constitutifs des revêtements et la qualité de l'application

jouent un rôle essentiel dans la réussite de ce type de protection. Ils peuvent être métalliques ou non métalliques (Tableau I.1) [19].

Revêtements métalliques	Revêtements non métalliques	
	Organiques	Inorganiques
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chrome.</li> <li>• Zinc.</li> <li>• Cadmium.</li> <li>• Nickel.</li> <li>• Argent.</li> <li>• Or.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peinture</li> <li>• Vernis.</li> <li>• Laques.</li> <li>• Résinés.</li> <li>• Graisses</li> <li>• Cires.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Couches de conversion.</li> <li>▪ Couches étrangères au substrat.</li> </ul>

**Tableau I.1 :** Types de revêtements.

#### I. 9. 5. 1. Revêtements métalliques

Les revêtements métalliques sont couramment employés pour protéger l'acier, notamment contre la corrosion atmosphérique. On peut aussi les appliquer sur d'autres substrats comme le cuivre et ou le laiton, outre leur effet anti-corrosion, remplissent souvent une fonction décorative comme c'est le cas par exemple pour les revêtements de chrome [20].

Selon leur comportement à la corrosion par rapport au substrat, on distingue deux types de revêtements métalliques [24].

- Revêtements anodiques.
- Revêtements cathodiques.

#### I. 9. 5. 2. Revêtements non métalliques

Les revêtements organiques forment une barrière plus au moins imperméable entre le métal et le milieu électrolytique. Ils sont classés en trois familles [25]:

- Les revêtements en bitume (protection des structures enterrées),
- Les revêtements polymériques,
- Les Peintures et vernis.



## PARTIE II : ÉLECTRODEPOSITION

### **II. 1. Introduction**

Parmi les moyens de protection anticorrosion des aciers, le changement de l'interface métal-solution par élaboration d'un revêtement protecteur métallique ou organique, a généralement été et resté encore une solution retenue pour de nombreuses applications. Le choix d'un matériau protecteur dépend de ses propriétés physicochimiques et essentiellement de sa tenue à la corrosion. L'adhérence, l'uniformité, l'épaisseur et la porosité sont les caractéristiques les plus importantes d'un revêtement métallique [26].

Ces dernières années, l'électrodéposition est de plus en plus utilisée car elle présente certains avantages. Elle est plus économique de point de vue matériaux et équipement. Elle est aussi simple à utiliser et permet de réaliser de grandes surfaces de formes géométriques complexes. C'est aussi une technique adaptable à l'industrie. L'électrodéposition des métaux sur différents substrats a été largement étudiée [22].

### **II. 2. Définition**

L'électrodéposition est une méthode électrochimique pour former des films sous forme d'oxydes [27]. Il est également considéré comme une application industrielle à grande échelle pour le dépôt de métaux ou d'alliages métalliques avec des applications allant du traitement anticorrosion sur de grandes surfaces (comme électrodéposition de zinc en acier) aux industries électroniques (dépôt de cuivre sur feuille, têtes magnétiques, etc.) [1].

### **II. 3. Principe d'électrodéposition**

Le but de l'électrodéposition est d'appliquer une couche insignifiante sur un métal pour donner à cette surface les propriétés voulues : esthétique, électrique [21].

Le principe de l'électrodéposition est basé sur une électrolyse, il s'agit de réactions redox qui ne sont pas continuées, mais qui sont déclenchées par une source de courant externe.



Cette méthode électrochimique est opérée habituellement à partir des bains de galvanoplastie traditionnels. Le bain d'électrolyse constitue la plupart du temps, l'élément

critique de la cellule. Il comporte le sel métallique adapté (des sulfates, des chlorures ou d'autres sels).

Le substrat (électrode de travail) sur lequel doit se réaliser le dépôt constitue la cathode d'un montage électrolytique, l'électrolyte dans lequel il baigne contenant des ions métalliques  $M^{n+}$  de charge positive. La polarisation des électrodes va provoquer une migration de ces ions vers la cathode, c'est-à-dire le substrat. L'ion métallique est neutralisé par les électrons fournis par la cathode et se dépose sur celle-ci sous forme de métal  $M$  suivant la réaction (I.4).

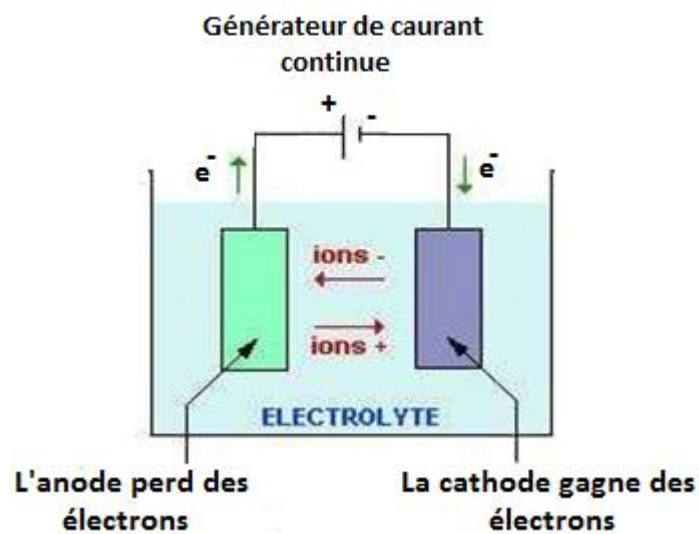


Figure I.9 : Schéma de montage d'une cellule d'électrodéposition.

#### II. 4. Cinétique de l'électrodéposition

Pour effectuer une électrodéposition, le substrat est installé à la cathode d'une cellule d'électrolyse qui renferme un électrolyte contenant les ions du métal à déposer, et selon les cas, un sel porteur, un agent tampon, ou des additifs.

Le générateur admet de faire circuler un courant entre les deux électrodes dont le potentiel diffère de leur potentiel d'équilibre [28].

L'électrolyte est choisi en fonction du dépôt exigé. La couche obtenue des caractéristiques précises qui dépendent des différents paramètres du mécanisme électrolytique [29]. Dont la résistance à la corrosion, l'aspect (mat, semi-brillant, brillant.), les propriétés optiques, la soudabilité, conductibilité, la dureté, la ductilité, et au frottement.

## II. 5. Mécanisme d'électrodéposition

Dès lors que l'on modifie l'équilibre établi par la relation (I.4) dans le sens 1, soit en polarisant l'électrode soit en appliquant un courant d'électrolyse, les ions métalliques sont réduits et le métal se dépose sur la cathode. Ce processus, appelé électro cristallisation, se déroule en trois étapes : transfert de masse, transfert de charge et cristallisation.

### II. 5. 1. Transfert de masse

Lors de la formation du dépôt métallique, les ions présents dans la solution se déplacent : c'est le transfert de masse. La mobilité ionique responsable du passage du courant est constituée elle-même de plusieurs phénomènes qui coexistent.

#### II. 5. 1. 1. Migration

Les ions se déplacent sous l'effet du champ électrique produit par le gradient de potentiel existant entre les électrodes.

#### II. 5. 1. 2. Diffusion

Les ions se déplacent également en raison du gradient de concentration entre l'interface électrode-électrolyte et le sein de la solution. Ce gradient résulte de la consommation de l'espèce ionique métallique, dite espèce électro active, à la cathode.

#### II. 5. 1. 3. Convection

Elle résulte du mouvement hydrodynamique du fluide produit par une agitation mécanique, thermique.

### II. 5. 2. Transfert de charge

Les théories actuelles sur la formation des dépôts confirment le processus dit de neutralisation. En effet, il a été remarqué que le centre de l'ion positif se trouve lors de cette réaction située à plusieurs angströms du réseau cristallin. Au cours du transfert de charge, il ne se formerait pas d'atomes proprement dits.

En fait, on schématise le mécanisme de transfert de charge à l'interface électrode-solution comme suit :  $Mn^+ + ne^- \rightarrow M$  (Adsorbé à la surface). M ne représente peut-être pas un atome, on le désigne sous le nom d'Addison, par abréviation d'ion adsorbé [30].

## II. 6. Types de revêtement électrolytique

- Revêtements protecteurs qui sont usés essentiellement pour la protection du métal de base, généralement du fer et de l'acier par le Zn.
- Revêtements décoratifs qui sont appliqués pour améliorer l'aspect de la surface (couleur, brillance, douceur).
- Revêtements protecteurs décoratifs qui sont utilisés principalement pour conférer une apparence attrayante à certaines qualités protectrices, par exemple *Ni* et *Cu – Ni – Cr* sur l'acier [31].

## II. 7. Paramètres d'un dépôt électrolytique

Des différents paramètres influents sur la qualité de dépôt, on cite :

### II.7.1. Paramètres de fonctionnement

#### II. 7. 1. 1. Influence de la température

L'influence de la température sur l'électrolyse et le dépôt en général peut être affichée par son augmentation qui conduit aux effets suivants :

- Une augmentation de l'écoulement de matière (mobilité des ions électro-actifs se présentant à la cathode), qui est dû à la diminution de la viscosité du milieu.
- Une augmentation de la vitesse de formation de dépôt.
- Une augmentation exagérée de la température peut former des microcristaux sur le dépôt en obtenant des structures plus grossières à la surface du substrat.
- L'intérêt principal d'une élévation de la température est l'augmentation de la vitesse de dépôt.

#### II. 7. 1. 2. Influence de la concentration de la solution

Les bains doivent contenir principalement un/ou deux sels précurseurs qui fournissent l'élément à déposer, en présence des additifs.

Les bains avec des concentrations faibles en élément à électro déposer entraînent une augmentation de la surtension, ce qui produit la formation de dépôts sous forme de couche minces avec une structure fine, par contre les bains avec des concentrations élevées dépassant une limite déterminée, le dépôt devient pulvérulent et sa vitesse de déposition diminue. Donc, il est

nécessaire de réaliser des essais de dépôts avec différentes concentrations de l'élément à déposer, afin d'optimiser la quantité du sel précurseur dans le bain d'électrolyse [32, 33].

### **II. 7. 1. 3. Agitation de l'électrolyte**

L'agitation du bain a pour but :

- De provoquer le départ des bulles de gaz qui se constituent sur le dépôt et qui sont la source de piqûre.
- D'augmenter l'intensité limite anodique ou cathodique, afin de faciliter la diffusion des espèces électro-actives vers les électrodes et donc, d'éliminer le gradient de concentration et d'uniformiser la polarisation des électrodes dans le bain [34].

### **II. 7. 1. 4. Influence de la densité de courant**

La densité de courant est en fonction du volume de la pièce à revêtir, elle présente une influence très marquée sur la qualité du dépôt de sorte que :

- Une propagation de la densité de courant favorise le phénomène de germination au dépend du phénomène de croissance ce qui conduit à une structure plus fine de l'élément à déposer.
- Au-delà d'une limite de densité de courant, les dépôts deviennent spongieux ou capiteux et même il peut y avoir des dépôts brûlés.
- Une densité de courant trop faible, favorise la formation d'un dépôt mat à cause de la présence des gros cristaux [35].

## **II. 7. 2. Paramètres de bain**

### **II. 7. 2. 1. Influence du pH**

La stabilité du pH dans le bain électrolytique joue un rôle très important, tandis que sa diminution ou son augmentation s'affecte sur la qualité du dépôt :

#### **a) La diminution du pH peut provoquer**

- La fragilisation par l'hydrogène ; étant donné que les potentiels d'équilibres sont en générale négatifs et qui ne peuvent être déposés sur la surface de la cathode sans libération d'hydrogène ( $H_2$ ). Cette fragilisation est causée par l'interaction avec les perturbations dans le

réseau, les atomes d'hydrogène entraînent une diminution importante de la capacité de déformation du métal (plus doux).

- Il est extrêmement important de respecter les conditions d'électrolyse prévues afin de contrer les effets invisibles mais néfastes de la fragilisation par l'hydrogène (rupture soudaine des matériaux).

- Une diminution du rendement de courant.
- Diminution de l'épaisseur de dépôt.

#### **b) L'augmentation du pH peut conduire à :**

- La déposition des sels hydroxydes sur la cathode.
- Un dépôt mat.
- Pour éviter ces inconvénients ; l'ajout d'un sel tampon (exemple : l'acide borique) aux bains électrolytiques est indispensable pour maintenir un pH constant et d'avoir une meilleure qualité de dépôt [32, 33].

#### **II. 7. 2. 2. Influence des additifs**

Plusieurs caractères d'additifs sont utilisés dans la préparation des bains électrolytiques et qui ont pour objectif d'améliorer la qualité des dépôts, parmi lesquelles on a [36, 37]:

**a) Additifs organiques et minéraux** : Tout l'art d'obtenir un bain approprié réside dans le fait d'ajouter en faible concentration des additifs qui sont très souvent de nature organique et qui ont des rôles déterminants. En général, ils interviennent en favorisant ou en bloquant la réduction des espèces électroactive et permettent de maîtriser la qualité du dépôt en fournissant des propriétés marquées [32, 38] :

- **La brillance** : Les additifs agissent au niveau de la microrugosité du dépôt et empêche l'apparition des piqûres. Le mécanisme et leur mode d'action ne sont pas encore très connus.

- **L'adhérence** : Grâce aux additifs, on tente d'empêcher la fragilisation du dépôt par l'accélération de dégagement des bulles d'hydrogène de la surface.

**b) Les sels conducteurs** : Sont des composés ioniques fortement dissociés, qui ne participent pas aux réactions qui se déroulent à la surface des électrodes. Ils ont pour rôle d'élever la conductivité de la solution, donc augmenter la mobilité des ions présents dans le milieu qui influe sur le pouvoir de répartition et le pouvoir couvrant du dépôt.

**c) Les sels tampons** : Permettent de maintenir le pH constant du bain et surtout dans le film cathodique. Sans ces composés la réduction des protons  $H^+$  est très favorisée par l'augmentation de la densité de courant et de l'acidité du bain, ce qui se traduit par une élévation du pH dans le film cathodique et à la formation d'hydroxyde [32].

## II. 8. Additifs à base de plantes

De nombreux additifs sont utilisés aujourd'hui dans les bains électrolytiques. Mais, la plupart de ces substances sont toxiques pour l'être humain et néfastes pour l'environnement, comme exemple le furfurale et la thio-urée qui sont des additifs très toxiques utilisé dans les bains de zingage [39]. Par conséquent, de nombreuses études ont été menées dans le but de trouver un moyen de remplacer ces produits synthétiques par d'autre respectueux de l'environnement. D'après ces études, les additifs d'origine naturelle présentent de bonne qualité de dépôt et de résistance à la corrosion [38].

## II. 9. Applications pratiques d'électrodéposition

- Equipements agricoles et accessoires de jardinage.



**Figure I.10** : Equipements agricoles et accessoires de jardinage.

- Pièces détachées.

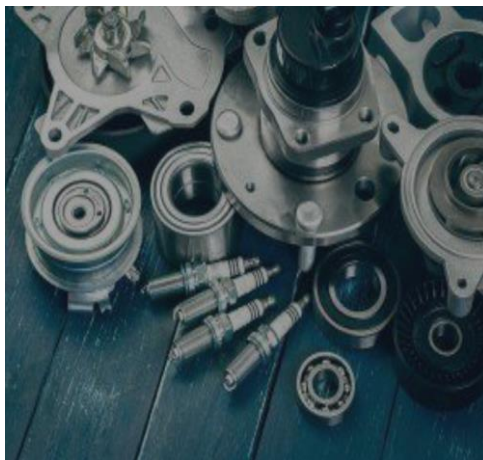


Figure I. 11 : Pièces détachées.

- Boucles d'oreilles.



Figure I.12 : Boucles d'oreilles.



# **CHAPITRE II**

## **MATERIELS ET METHODES**

---

Dans ce chapitre on va présenter le dispositif expérimental, la procédure expérimentale (Bains d'électrodéposition, conditions opératoires... etc.) aussi que méthodes expérimentales pour estimer le taux de corrosion et la nature des mécanismes qui interviennent au cours de la dissolution d'un métal (méthode gravimétrique, méthodes électrochimiques).

---

## II. MATÉRIELS

### II. 1. Matériel végétal

#### II. 1. 1. Définition de betterave (*Beta vulgaris* L)

La catégorie de betterave (*Beta vulgaris* L). Issu à la famille des Quenopodiaceae, et est situé dans certains pays d'Europe et d'Afrique du Nord, où elle est cultivée à des températures modérées à froides (10-20 ° C), il est utilisé ses racines comme nourriture et comme source de coloration (les racines sont habituellement cuites pour être consommées en salade). Les extraits obtenus à partir des racines de betteraves rouges ont des caractéristiques anticancéreuses, détoxifiantes et toniques[40, 41].



**Figure II.1:** *Beta vulgaris* L.

#### II. 1. 2 Extraction de betterave

5kg de *Beta vulgaris* L sont coupée en petits morceaux puis séchées. Elles sont ensuite extraites par macération dans le méthanol pure pendant 24 heures. Après trois extractions successives avec le méthanol, le filtrat est filtré sur du papier filtre puis soumis à une évaporation à basse pression à 40°C, jusqu'à l'obtention d'un résidu. Ce final est repris par de l'eau bouillante pendant 24 heures. Le mélange filtré est subit à une série d'extraction liquide – liquide avec plusieurs solvants qui ont des polarités différentes (dichlorométhane, acétate d'éthyle, et n-butanol). A la fin les phases organiques sont récupérées, les trois fractions sont soumises à une concentration à basse pression en utilisant un évaporateur rotatif pour obtenir

les extraits voulus. Les extraits obtenus sont dénommés selon le solvant qui a permis leur séparation.

## II. 2. Elaboration de dépôts

### II. 2. 1. Produits chimiques

- Acide chlorhydrique (HCl).
- Acétone (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O).
- Chlorure de zinc (ZnCl<sub>2</sub>).



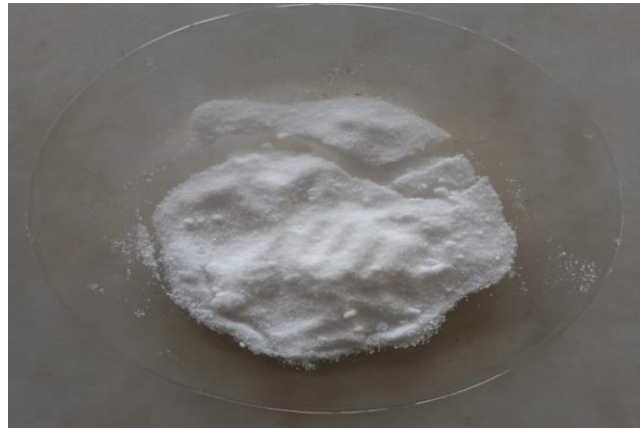
**Figure II.2:** Chlorure de zinc (Photo personnelle 2021).

- Acide borique (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>).



**Figure II.3:** Acide borique (Photo personnelle 2021).

- Chlorure de potassium (KCl).



**Figure II.4 :** Chlorure de potassium (Photo personnelle 2021).

- Extrait d'acétate d'éthyle



**Figure II.5:** Extrait d'acétate d'éthyle (Photo personnelle 2021).

- Extrait de dichlorométhane.



**Figure II.6:** Extrait de dichlorométhane (Photo personnelle 2021).

- Extrait butanolique.



**Figure II.7:** Extrait de butanoique (Photo personnelle 2021).

- Extrait méthanolique.



**Figure II.8:** Extrait méthanolique (Photo personnelle 2021).

## II. 2. 2 Matériels utilisés

- Générateur de courant (model PS-303D)



**Figure II.9:** Générateur de courant

- Agitateur magnétique.



**Figure II.10:** Agitateur magnétique.

- Balance analytique.



**Figure. II.11:** Balance analytique.

## II. 3. MATERIAUX

### II. 3. 1. Substrat utilisé

Des plaques de 2 cm x 4 cm x 0.1 cm de dimension ont été recouvertes de résine époxy en laissant une seule surface d'exposition. Les plaques ont été marquées à une extrémité de 2 cm de long pour l'électrodéposition du zinc. Avant chaque expérience, les surfaces de tous les échantillons étaient abrasées mécaniquement à l'aide de différents types de papier émeri au carbure de silicium, nettoyées à l'acétone, puis rincées à l'eau distillée pour être séchés.

### II. 3. 2. Plaques de zinc



**Figure II. 12 :** Plaque de zinc.

### **II. 4. Bain électrolytique**

Le bain électrolytique est un mélange complexe d'espèces solubles du métal déposer, d'électrolyte et de différents additifs permettant d'obtenir les propriétés et les caractéristiques désirées.

La solution pour le revêtement était un mélange de  $ZnCl_2$  (64g/l), KCl (200g/l),  $H_3BO_3$  (20g/l) et différentes concentrations d'extraits de *Beta vulgaris L* (0.2 g/l à 2 g/l).

### **II. 5. Dispositif d'électrodéposition**

Le dispositif expérimental utilisé pour le revêtement électrolytique est composé de trois parties essentielles à savoir :

- Une source de courant (générateur de courant continu).
- Une cellule d'électrolyse, un b cher de 200 ml de volume qui contient deux électrodes, une elle constitue l'anode qui est le zinc, et l'autre constitue la cathode qui est l'acier.
- Agitateur magnétique.

### **II. 6. Méthodes d'electrod positions**

L'electrod position du zinc sur l'acier a été réalisée en immergeant partiellement l'échantillon d'acier et l'électrode de zinc dans la solution de placage. L'échantillon d'acier a été connecté au côté négatif d'un fournisseur de courant continu 0.08A tandis que l'électrodes de zinc ont également été connectées avec un fil au côté positif. Les solutions de placage ont été placées à tour de rôle dans le b cher et leur pH (3 à 4) respectif a été obtenu en ajustant la

solution d'origine avec de l'acide chlorhydrique. Les temps de placage utilisés pour chaque cellule bain étaient de 30 min et sous agitation degré de 1.

A chaque concentration, l'acier est revêtu en 30 minutes. Après chaque expérience de revêtement, l'échantillon est prélevé, rincé à l'eau distillée, séché à l'air, puis stocké.



**Figure II. 13 :** Montage d'électrodéposition (Photo personnelle 2021).

## II. MÉTHODES

### **II. 1. Étude gravimétrique**

C'est l'une des méthodes les plus anciennes utilisées pour étudier la vitesse et le taux de corrosion, même l'efficacité inhibitrice d'inhibiteur.

Son principe est basé sur les calculs de perte de masse  $\Delta m$  par rapport à la surface exposé  $S$  pendant un temps désiré dans une solution agressive (eau de mer) a été utilisée pour évaluer la corrosion. Avec différentes concentrations des extraits examinés.

La résistance à la corrosion de l'acier galvanisé a été testée dans l'eau de mer par gravimétrie.

La vitesse de la corrosion est calculée par la relation suivante [42] :

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

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

Où :

$m_1$ : Masse de l'échantillon avant l'essai en mg.

$m_2$ : Masse de l'échantillon après l'essai en mg.



S: Surface de l'échantillon en (cm<sup>2</sup>).

t : Temps d'immersion d'échantillon dans la solution en (h).

$V_{\text{corr}}$ : Vitesse de corrosion (mg .cm<sup>-2</sup> . h<sup>-1</sup>).

L'efficacité inhibitrice est donnée par la relation suivante [15] :

$$EI\% = \frac{V_{\text{corr}}^0 - V_{\text{corr}}^{\text{add}}}{V_{\text{corr}}^0} \quad (\text{II. 3})$$

Où  $V_{\text{corr}}^0$  et  $V_{\text{corr}}^{\text{add}}$  représentent respectivement les vitesses de corrosion en absence et en présence de l'additif testé.

## II. 2. Techniques électrochimiques

### II. 2. 1. Suivi du potentiel en circuit ouvert (O.C.P)

Cette technique simple apporte des informations initiales sur la nature des processus se produisant à l'interface métal/électrolyte.

Il est référé par rapport à une électrode au calomel saturé.  $E_{\text{corr}}$  est un indicateur qualitatif de l'état de corrosion d'un substrat métallique dans un milieu électrolytique. Cette mesure permet également de connaître la durée d'immersion minimale nécessaire à l'établissement d'un état stationnaire indispensable pour le tracé des courbes de polarisation, et des diagrammes d'impédance électrochimique.

### II. 2. 2. Courbes de polarisation

Un métal plongé dans un milieu électrolytique quelconque tend à se dissoudre et à se charger électriquement avec création d'une double couche électrochimique assimilable à un condensateur électrique. Au bout d'un temps suffisamment long pour qu'un régime stationnaire soit établi, l'électrode métallique prend par rapport à la solution un potentiel, appelée potentiel de corrosion ( $E_{\text{corr}}$ ).

Les courbes intensité-potentiel  $E = f(I)$  ou  $I = f(E)$  ainsi obtenues constituent les courbes de polarisation.

Cette méthode permet aussi de déterminer d'une façon précise les paramètres électrochimiques d'un métal au contact d'un électrolyte à savoir : la vitesse instantanée de corrosion ( $i_{\text{corr}}$ ), le potentiel de corrosion ( $E_{\text{corr}}$ ), les pentes de Tafel, la résistance de polarisation ( $R_p$ ), les courants limites de diffusion. Elle donne des mesures rapides et sa mise

en œuvre est relativement simple. La description détaillée du mode de détermination de  $i_{\text{corr}}$  et  $E_{\text{corr}}$  a été présentée par A. CARPANI et al [43].

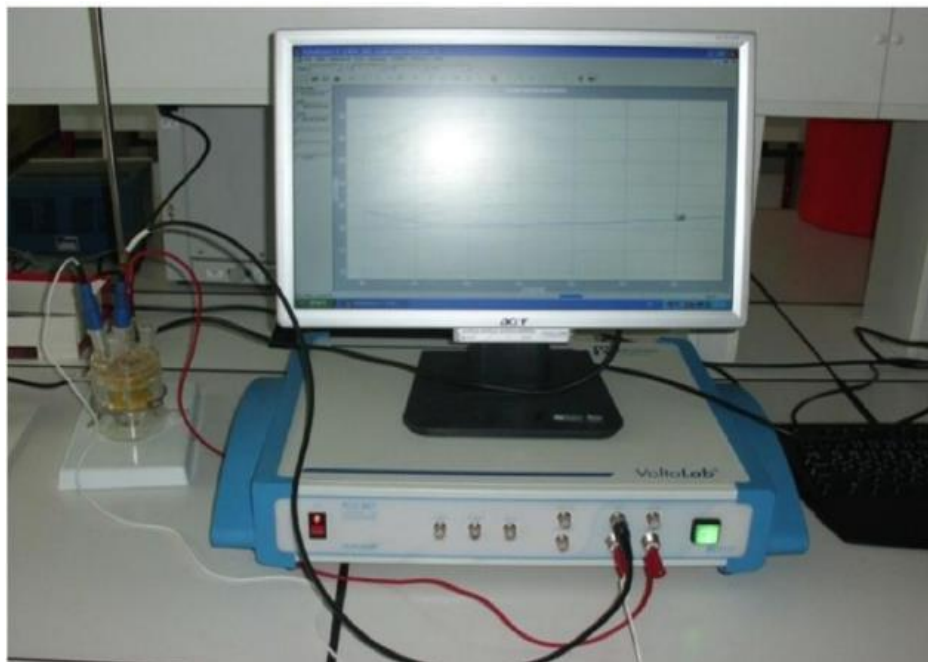
### **II. 2. 3. Spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE)**

La Spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) est une méthode traduisant la fonction de transfert expérimentale reliant l'intensité du courant, traversant une interface donnée, à la différence de potentiel correspondant. Elle permet de séparer et/ou d'identifier les contributions des différents phénomènes chimiques et électrochimiques élémentaires se déroulant à l'interface métal-solution, notamment par leur temps de relaxation. Les phénomènes rapides se produisent à hautes fréquences tandis que les phénomènes lents ont lieu à basses fréquences. Cette technique d'analyse est largement répandue dans différents secteurs de recherche notamment en génie électrique, électrochimie, micro-électronique, industrie pharmaceutique.

Dans le présent travail, Les essais électrochimiques ont été réalisés à l'aide d'un potentiostat Radiomètre PGZ301 avec un logiciel Volta Master 4, dans une cellule classique (en verre pyrex d'une contenance de 200 ml) à trois électrodes, une électrode de travail (acier doux), une électrode de référence au calomel saturé (ECS) couplée à un capillaire fin (capillaire de Luggin) dont l'extrémité est placée près de l'électrode de travail afin de minimiser la contribution ohmique, et une contre-électrode inerte chimiquement (en platine).

Avant chaque expérience, la cellule a été nettoyée à l'acétone, rincée à l'eau distillée et séchée avec du papier absorbant. Le système a été connecté à un ordinateur. Avant la mesure, l'électrode de travail est plongée dans la solution d'essai au potentiel en circuit ouvert pendant 30 min. Pour atteindre un état stable. (Figure II.14).

Pour tracer les courbes, traiter et analyser les mesures électrochimiques, tous les résultats sont transférés du logiciel Volta Master 4 à ORIGIN 6.0 (logiciel de traitement et d'analyse de données scientifiques).



**Figure II. 14 :** Photographie du dispositif de mesures électrochimiques (Photo personnelle 2021).

### II. 3. Épaisseur de revêtement

Pour la mesure de l'épaisseur de la couche de Zn déposée, plusieurs méthodes peuvent être employées telles que les méthodes microscopiques, les méthodes coulométriques, les courants de Foucault, les techniques de fluorescence X, la méthode des îlots, la méthode optipulse, etc.

Dans notre étude, les valeurs de l'épaisseur ont été calculées à partir de l'équation régie par la loi d'électrolyse de Faraday.

### II. 4. Adhérence

La méthode ASTM D3359 (ASTM, 2002) a été appliquée pour examiner l'adhérence du revêtement de zinc au substrat. Cette méthode est macroscopique et plus qualitative, basée sur une gravure de lettre «X » sur le film, et un ruban adhésif fixé a été appliqué sur le sculpté et fortement enlevé.

## II. 5. Microscope optique

Les observations optiques de surface de métal ont été réalisées avec un microscope optique LEICA DMLP permettant des grossissements de 4 à 50 fois. Un capteur numérique monté sur ce microscope permet de visualiser les différentes microstructures de nos pièces.

L'avantage du microscope optique, outre sa grande facilité d'utilisation, est de permettre l'observation de grandes surfaces et de réunir ainsi une information complète sur l'aspect de la surface observée.



**Figure II. 15 :** Microscope optique LEICA DMLP (Photo personnelle 2021).

# **CHAPITRE III**

## **RESULTATS ET DISCUSSION**

---

Dans ce chapitre, les extraits de plante Beta vulgaris L sont évalués comme additifs dans les bains d'électrodéposition. Pour cette étude, nous avons choisi deux méthodes différentes en milieu marin

---

### III. ÉTUDE DE L'EFFET DES EXTRAITS DE « Beta vulgaris L » COMME ADDITIFS DANS LES BAINS DE ZINGAGE DE L'ACIER

#### III. 1. Qualité de la couche de zinc déposée

Grâce à des facteurs de dépôt tels que l'adhérence et l'épaisseur. La qualité du zinc électrodéposé sur l'acier a été évaluée.

##### III. 1. 1. Test d'adhérence de dépôt

La qualité d'adhérence des différents dépôts électrodéposés dans ce travail a été vérifiée par la méthode ASTM D3359. Pour le test d'adhérence, un "X" a été gravé sur le dépôt et un scotch adhésif attaché a été appliqué aux échantillons puis retiré fortement. Ce test est macroscopique et plus qualitatif.

##### III. 1. 2. Mesure de l'épaisseur de dépôt

Après mesuré la masse de dépôt, nous avons calculé l'épaisseur selon la loi de Faraday

$$e = \frac{m}{\rho * s} * 1000 \quad (\text{III. 1})$$

Où : La constante 10000 est utilisée pour convertir l'unité cm en  $\mu\text{m}$ .

e : épaisseur du dépôt (cm).

$\rho$  : masse volumique de dépôt ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

S : surface soumise au test ( $\text{cm}^2$ )

m : masse de dépôt (g).

Les valeurs de la masse, l'épaisseur et l'adhérence de dépôt de zinc déposée sont représentées dans le tableau (III.1).

	C (g/l)	Adhésion	m (g)	e ( $\mu\text{m}$ )
Sans extrait	0	++	0.055	19.63

EBBV										
c (g/l)	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
Adhésion	+++	+++	++	+++	++	++	++	+++	+++	+++
m (g)	0.06	0.059	0.056	0.063	0.046	0.051	0.044	0.052	0.048	0.053
e ( $\mu\text{m}$ )	21.34	21.06	19.91	22.31	16.44	18.18	15.61	18.7	17.22	18.67

EABV										
c (g/l)	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
Adhésion	++	+++	+++	++	+++	++	+++	+++	+++	+++
m (g)	0.051	0.044	159	0.051	0.066	0.059	0.051	0.059	0.04	0.062
e (µm)	17.8	15.61	55.86	18.53	23.37	20.82	18.17	19.37	17.35	22.04

EDBV										
c (g/l)	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
Adhésion	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
m (g)	0.057	0.045	0.065	0.046	0.084	0.05	0.054	0.054	0.062	0.061
e (µm)	20.15	16.07	23.14	16.36	29.75	17.75	19.09	19.28	2202	21.47

EMBV										
c (g/l)	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
Adhésion	+++	+++	+++	++	+++	+++	++	++	+++	+++
m (g)	0.058	0.060	0.055	0.051	0.058	0.061	0.046	0.051	0.061	0.064
e (µm)	20.45	21.47	19.52	18.08	20.45	21.47	16.17	18.08	21.47	22.60

Où : + L'adhérence est faible, ++ L'adhérence est forte, +++ L'adhérence est très forte.

**Tableau III.1** : L'adhérence, la masse, l'épaisseur de la couche de zinc déposée lors de l'utilisation en absence et en présence des extraits de « *Beta Vulgaris L* » comme additifs.

Via le tableau III.1 et selon la réglementation ASTM D 523 et NF EN ISO 2813 [44, 45], nous avons observé que les dépôts obtenus avec l'addition des extraits étaient mats. De plus, toutes les épaisseurs mesurées étaient conformes aux normes ASTM A879 et ASTM B633, sauf concentration 0.6g/l de EABV. On note également un dérèglement de la masse déposée, de l'épaisseur et de l'adhérence en tous les extraits et atteignent leurs valeurs maximums en EABV, EBBV, EDBV et EMBV de (1g/l), (0.8g/l), (1g/l) et (2g/l) respectivement. Cela indique que le meilleur dépôt (nucléation et croissance) se trouve dans ces concentrations. Cela est lié peut être à deux considérations, soit l'adsorption des additifs 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 électroactive 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 [46].

### III. 2. Etude électrochimique

#### III. 2. 1. Mesures de polarisation potentiodynamique

Les mesures de polarisation ont été effectuées dans l'eau de mer avec des échantillons revêtus comme électrode de travail en utilisant l'équipement mentionné ci-dessus. Les mesures ont été effectuées dans la gamme de potentiel  $\pm 250$  mV à une vitesse de balayage de 1 mV/sec.

Les paramètres électrochimiques telles que  $E_{\text{corr}}$ ,  $\beta_a$ ,  $\beta_c$ ,  $R_p$ ,  $V_{\text{corr}}$  et  $P$  a été calculée selon l'équation (III.1), et sont regroupées dans le tableau III.2.

$$P = \frac{R_{ps}}{R_p} 10^{\frac{\Delta E_{\text{corr}}}{\beta_a}} \quad (\text{III.2})$$

$$\text{Avec} \quad \Delta E_{\text{corr}} = E_{\text{corr}} - E_{\text{corrFe}} \quad (\text{III.3})$$

Où

$R_{ps}$  : la résistance de polarisation du substrat revêtus en absences des extraits ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ).

$R_p$  : la résistance de polarisation des substrats revêtus en présences des extraits ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ).

$\beta_a$  et  $\beta_c$  : sont respectivement le coefficient de Tafel anodique et cathodique ( $\text{mVDec}^{-1}$ ).

$V_{\text{corr}}$  : la vitesse de corrosion ( $\text{mm/y}$ ).

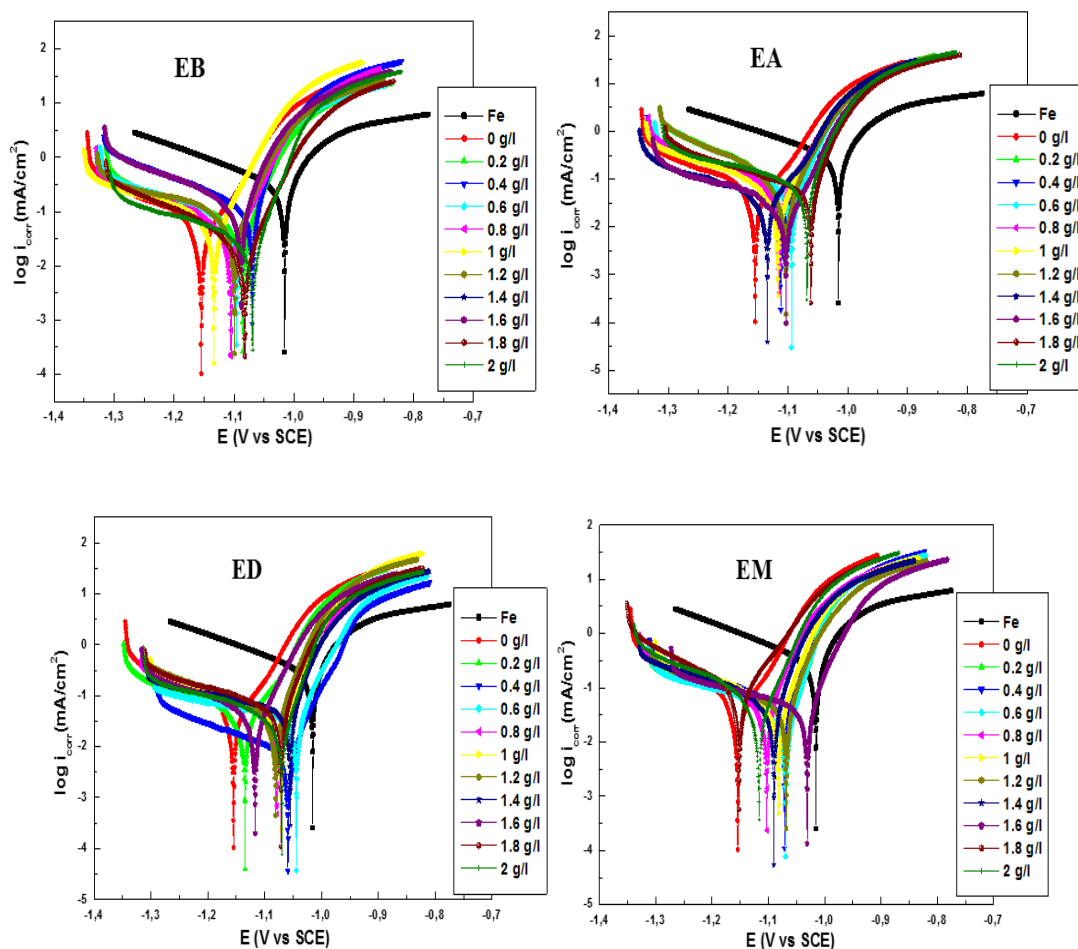
$E_{\text{corr}}$  : le potentiel de corrosion (V/SCE).

$P$  : la porosité (%).

$i_{\text{corr}}$  : la densité de courant ( $\text{mAcm}^{-2}$ ).

La Figure III.1. Montre les courbes de polarisation de Tafel anodique et cathodique de l'acier déposé électro statiquement, sans et en ajoutant différentes concentrations d'extraits.





**Figure III.1 :** Courbes de Polarisation potentiodynamique pour l'acier dans l'eau de mer, sans et avec l'ajout, des extraits de « Beta vulgaris L »

D'après la Figure III.1 et le tableau III.1, on constate que l'addition d'additifs donne lieu à des diminutions importantes des densités de courant ainsi que la vitesse de corrosion par rapport à l'échantillon obtenu sans additifs. Cela indique que les extraits étudiés ont fortement modifié la qualité du dépôt produisant des revêtements plus résistants à la corrosion particulièrement EDBV.

On distingue aussi, que les potentiels d'abandon des substrats revêtus obtenus en présence des extraits étaient plus cathodiques par rapport aux potentiels de dépôts obtenus en l'absence d'additifs.

Néanmoins, la dépendance de la densité du courant de corrosion et la concentration d'additif dans le bain d'électrodéposition n'était pas linéaire, probablement du fait que dans chaque procédé d'électrodéposition, il existe une concentration d'additif optimale par laquelle la qualité de dépôt est la meilleure [47].

	C(g/l)	-E <sub>corr</sub> (V/SCE)	i <sub>corr</sub> (mAcm <sup>-2</sup> )	β <sub>a</sub> (mVDec <sup>-1</sup> )	-β <sub>c</sub> (mVDec <sup>-1</sup> )	V <sub>corr</sub> (mm/y)	R <sub>P</sub> (Ω.cm <sup>2</sup> )	P (%)	E (%)
Fe	/	1015.5	0.3235	95.4	264.8	3.783	62.2	/	/
SE	0	1153.6	0.1978	144.3	292.9	2.313	193.32	0.0355	/
EBBV	0.2	1085.2	0.0662	56.1	294.3	0.7748	379.48	0.0094	66.53
	0.4	1069.2	0.1035	108.4	217.2	1.211	140.88	0.14	47.67
	0,6	1095.8	0.0720	69.2	281.4	0.8426	319.38	0.0134	63.60
	0,8	1105.1	0.0626	47	293.2	0.7322	491.67	0.0015	68.35
	1	1133.7	0.0323	47.9	179.9	0.3776	314.35	0.0006	83.35
	1.2	1098.9	0.0960	56.5	382.1	1.123	313.46	0.0067	51.47
	1.4	1087.7	0.1057	130.2	197.8	1.236	154.18	0.1137	46.56
	1.6	1081.7	0.0228	63.1	179.5	0.2669	996.67	0.0056	88.47
	1.8	1069	0.0355	35.8	352.4	0.4149	693.99	0.0029	82.47
	2	1068	0.0957	44.1	405.6	1.119	244.49	0.0164	51.61

	C(g/l)	-E <sub>corr</sub> (V/SCE)	i <sub>corr</sub> (mAcm <sup>-2</sup> )	β <sub>a</sub> (mVDec <sup>-1</sup> )	-β <sub>c</sub> (mVDec <sup>-1</sup> )	V <sub>corr</sub> (mm/y)	R <sub>P</sub> (Ω.cm <sup>2</sup> )	P (%)	E (%)
Fe	/	1015.5	0.3235	95.4	264.8	3.783	62.2	/	/
SE	0	1153.6	0.1978	144.3	292.9	2.313	193.32	0.0355	/
EABV	0.2	1103.7	0.0839	56.5	174.1	0.9811	470.87	0.0036	57.58
	0.4	1112.1	0.0474	63.5	178.9	0.5547	498.31	0.0037	76.03
	0.6	1093.5	0.0869	52.6	313.7	1.016	305.45	0.0067	56.07
	0.8	1114.5	0.0748	57.1	238.9	0.875	338.75	0.0034	62.18
	1	1116.7	0.0536	60.2	202.1	0.6269	476.7	0.0027	72.90
	1.2	1103.7	0.0906	52.5	182.8	1.06	470.87	0.0028	54.19
	1.4	1134.2	0.0218	57.2	233.2	0.2544	540.67	0.0009	88.97
	1.6	1103	0.0255	48.9	196	0.2988	813.45	0.0012	87.10
	1.8	1061.4	0.0493	34	234.9	0.5763	233.33	0.01	75.07
	2	1068	0.0668	79.2	277.9	0.7814	244.49	0.05	66.22

	C(g/l)	$-E_{corr}$ (V/SCE)	$i_{corr}$ (mAcm <sup>-2</sup> )	$\beta_a$ (mVDec <sup>-1</sup> )	$-\beta_c$ (mVDec <sup>-1</sup> )	$V_{corr}$ (mm/y)	$R_p$ ( $\Omega$ .cm <sup>2</sup> )	P (%)	E (%)
SE	0	1153.6	0.1978	144,3	292,9	2.313	19.32	0.0355	/
EDBV	0,2	1134.2	0,011	46,6	143.4	0.1287	540.67	0.0003	94.43
	0.4	1058.9	0.0041	37.8	181	0.04842	2210	0.0023	97.92
	0.6	1044	0.0167	31.5	272.4	0.1954	486.39	0.0161	91.55
	0.8	1078.3	0.0522	67.3	377.7	0.6105	398.46	0.0183	73.60
	1	1071,1	0.0130	22.6	163.6	0.1518	388.81	0.0007	93.43
	1.2	1080.6	0.0215	34.3	175.4	0.2517	486.49	0.0016	89.13
	1.4	1055.2	0.0173	22.9	226.5	0.2028	307.34	0.0023	91.25
	1.6	1116.7	0.0205	44	164.8	0.2393	536.65	0.0361	89.63
	1.8	1071.3	0.0279	33.6	210.4	0.3258	347.33	0.0044	85.89
	2	1069.5	0.0117	30.3	183	0.1373	596.15	0.0020	94.08

	C(g/l)	$-E_{corr}$ (V/SCE)	$i_{corr}$ (mAcm <sup>-2</sup> )	$\beta_a$ (mVDec <sup>-1</sup> )	$-\beta_c$ (mVDec <sup>-1</sup> )	$V_{corr}$ (mm/y)	$R_p$ ( $\Omega$ .cm <sup>2</sup> )	P (%)	E (%)
SE	0	1153.6	0,1978	144.3	292.9	2,313	193.32	0.0355	/
EMBV	0.2	1069.5	0.0128	31.2	187,4	0.1498	596.15	0.0020	93.52
	0.4	1071.3	0.0302	35.5	218.4	0.3535	347.33	0.0047	84.73
	0.6	1069.5	0.0124	30.9	186	0.1452	596.15	0.0018	93.73
	0.8	1103	0.0315	40.7	196.8	0.3682	402.07	0.0010	84.07
	1	1081.8	0.0291	39.7	196.8	0.3399	410.27	0.0032	85.28
	1.2	1068.3	0.0173	28.4	188.8	0.2023	336.3	0.0026	91.25
	1.4	1089.9	0.0164	25.5	170.7	0.1917	385.38	0.0001	91.70
	1.6	1030.9	0.0201	32.1	241.3	0.2353	387.37	0.0522	89.83
	1.8	1151.8	0.0833	772	180	0.9745	229.02	0.0046	57.88
	2	1116.7	0.0536	60.2	202.1	0.6269	476.7	0.0027	72.90

**Tableau III.2:** Paramètres de polarisation pour la corrosion de l'acier dans l'eau de mer contenant différentes concentrations des extraits de « Beta vulgaris L ».

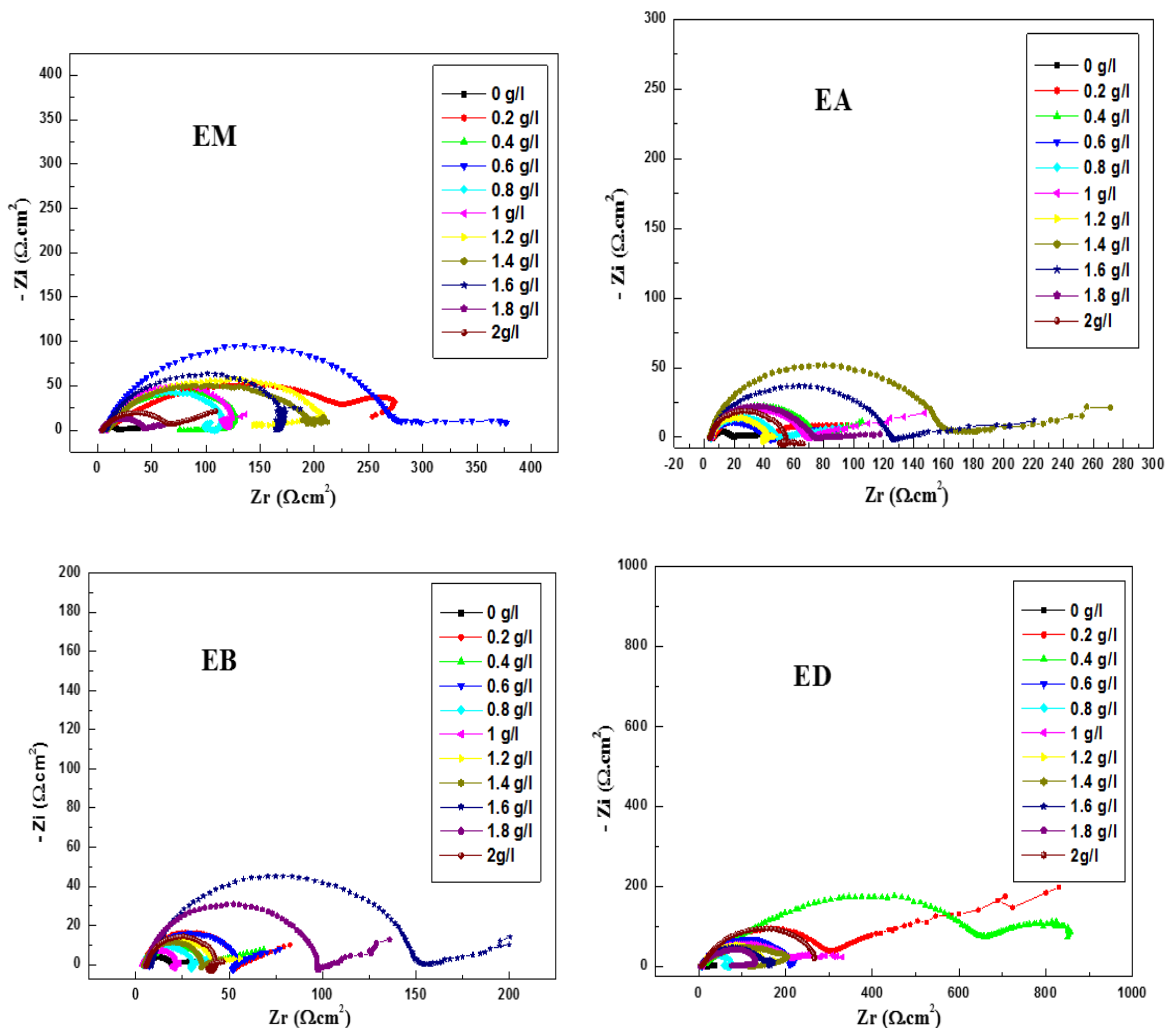
L'efficacité maximale d'inhibition qui a été obtenue à la concentration critique des extraits est de :

- ✓ 88.47 % en présence de 1.6 g/l de l'EBBV.
- ✓ 88.97 % en présence de 1.4g/l de l'EABV.
- ✓ 97.92 % en présence de 0.4g/l de l'EDBV.
- ✓ 93.73 % en présence de 0.6g/l de l'EMBV.

**III. 2. 2. Spectroscopie d'impédance électrochimique (S.I.E)**

Les diagrammes d'impédance de Nyquist (Figure III.2) de l'acier en milieu marin en présence et en absence de différentes concentrations des extraits « *Beta vulgaris L* » sont tracés dans les mêmes conditions que précédemment.

Les valeurs des paramètres électrochimiques obtenues par S.I.E sont rassemblés dans le tableau III.3.



**Figure III.2 :** Tracés d'impédance électrochimique de l'acier à différentes concentrations à. Sans et avec l'ajout, des extraits de « *Beta vulgaris L* ».

Les spectres d'impédance de Nyquist de l'électrodéposition de zinc, sans et avec l'ajout de différentes concentrations des extraits dans les électrolytes, sont présentés dans la Figure (III.2).

Deux boucles ont été observées pour tous les spectres ;

La première boucle à haute fréquence relative au spectre relevé lors du revêtement sans l'ajout d'additifs, est attribuée à la relaxation de la capacité de la double couche autour de  $295.4 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ , en parallèle avec la résistance de transfert de charge,  $R_t$ , inversement proportionnelle à la vitesse de dépôt. En revanche les premières boucles aux hautes fréquences relatives aux spectres relevés lors du revêtement des substrats avec l'ajout d'additifs, ont été attribuée à la réponse de la résistance de transfert de charge, dont les valeurs de capacité sont bien inférieures à celle obtenue sans additifs [48].

Cependant, en absence et en présence d'additifs, la seconde boucle aux fréquences intermédiaires a été attribuée à la décharge des ions de zinc. De plus, la portion linéaire est également remarquée au début de la dernière boucle. Ces observations ne sont pas caractéristiques d'un phénomène de diffusion dans la solution mais peuvent résulter d'une diffusion à travers une couche mince formée en surface par adsorption additive.

L'effet additif peut encore être démontré par les diamètres des boucles capacitives qui est très différent sans et avec les additifs (le diamètre de la boucle en absence d'additif est beaucoup plus petit comparé à ceux prélevés en présences d'additifs). Pour modéliser les diagrammes d'impédance, il a été pris en compte que les boucles résultantes sont des demi-cercles aplatis. Les écarts par rapport à une forme circulaire parfaite sont souvent liés à la dispersion fréquentielle de l'impédance interfaciale, résultant d'un manque d'homogénéité de surface des électrodes, dû à la rugosité ou à des phénomènes interfaciaux [49].

	C (g/l)	$R_{tc}$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	C ( $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ )	E (%)
Sans extrait	0	16.87	295.4	/

<b>EABV</b>										
<b>C(g/l)</b>	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
<b>R<sub>tc</sub>(Ω.cm<sup>2</sup>)</b>	39.52	69.38	38.42	44.48	61.51	36.08	152.8	118.5	65.61	50.3
<b>C(μF/cm<sup>2</sup>)</b>	104.7	194.8	153.1	207.1	137	86.63	154.7	130.6	140.6	64.17
<b>E (%)</b>	57.31	75.68	56.09	62.07	72.57	53.24	88.95	85.76	74.29	66.46

<b>EBBV</b>										
<b>C (g/l)</b>	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
<b>R<sub>tc</sub>(Ω.cm<sup>2</sup>)</b>	49.7	31.61	46.28	53.49	105.4	34.65	31.24	140.9	91.49	35.59
<b>C(μF/cm<sup>2</sup>)</b>	136.4	113.8	104.3	217.7	309.1	80.36	149.1	127.5	108.5	76.49
<b>E (%)</b>	66.05	46.63	63.55	68.46	83.99	51.31	45.99	88.02	81.02	52.6

<b>EDBV</b>										
<b>C (g/l)</b>	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
<b>R<sub>tc</sub>(Ω.cm<sup>2</sup>)</b>	302.5	733.8	206.1	62.97	271	155	200.9	159.8	123.1	298.4
<b>C(μF/cm<sup>2</sup>)</b>	34.66	7.19	27.15	42.92	33.74	52.1.2	52.14	109.9	39.52	131.1
<b>E (%)</b>	94.142	97.7	91.81	73.21	93.77	89.11	91.6	89.44	86.29	94.34

<b>EMBV</b>										
<b>C (g/l)</b>	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
<b>R<sub>tc</sub>(Ω.cm<sup>2</sup>)</b>	256.8	113.6	275.3	103.1	115	191.7	200.7	163.1	40.09	62.7
<b>C(μF/cm<sup>2</sup>)</b>	28.22	24.28	45.49	40.69	51.58	26.45	21.18	43.7	146.4	479.1
<b>E (%)</b>	93.43	85.15	93.87	83.63	85.33	91.12	91.59	89.65	57.92	73.09

**Tableau III.3** : Paramètres impédancemétriques de la corrosion de l'acier dans sans et avec addition de différentes concentrations des extraits « Beta vulgaris L ».

L'efficacité maximale d'inhibition qui a été obtenue à la concentration critique des extraits est de :

- ✓ 88.02 % en présence de 1.6 g/l de l'EBBV.
- ✓ 88.95 % en présence de 1.4g/l de l'EABV.
- ✓ 97.70 % en présence de 0.4g/l de l'EDBV.
- ✓ 93.87 % en présence de 0.6g/l de l'EMBV.

Ces résultats sont en bonne concordance avec ceux obtenu par celle des courbes de polarisation.

### III. 3. Étude gravimétrique

Pour connaître l'effet de la concentration d'extraits sur la vitesse de corrosion, nous avons évalué le taux de corrosion à partir de mesures de perte de poids, c'est une technique permettant d'étudier l'inhibition de la corrosion des échantillons d'acier.

Chaque échantillon a été pesé et immergé à 1 cm dans un milieu marin (milieu corrosif). Contenant différentes concentrations d'additifs, Les mesures sont collectées tous les cinq jours pendant un mois, à la température ambiante.

Pour déterminer le taux de corrosion on applique la formule suivante :

$$V_{\text{corr}} = \frac{\Delta m}{S \cdot t} \quad (\text{III.4})$$

Avec  $\Delta m = m_2 - m_1$  (III.5)

$V_{\text{corr}}$ : Vitesse de corrosion ( $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ).

$m_1$  : Masse de l'échantillon avant l'essai en (mg).

$m_2$  : Masse de l'échantillon après l'essai en (mg).

$S$  : Surface de l'échantillon en ( $\text{cm}^2$ ).

$t$  : Temps d'immersion d'échantillon dans la solution en (h).

Les tableaux (III.4) représenté les valeurs de la vitesse de corrosion en absence et en présence des extraits de « Beta Vulgaris L » testés séparément comme additifs dans les bains de zingage.

$V_{\text{corr}}$ ( $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	5 jours	10 jours	15 jours	20 jours
Sans extrait	0.1026	0.0716	0.0696	0.0586

#### EDBV

C(g/l)	$V_{\text{corr}}$ ( $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )									
	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
5 Jours	0.0684	0.0499	0.0632	0.0677	0.0618	0.0566	0.0644	0.0608	0.0704	0.0618
10 Jours	0.0609	0.0454	0.0621	0.0622	0.06	0.0482	0.0615	0.0569	0.0699	0.0566
15 Jours	0.0544	0.0355	0.0599	0.0542	0.05	0.0455	0.0502	0.0469	0.0588	0.0455
20 Jours	0.0423	0.0235	0.0494	0.0465	0.0442	0.0433	0.0428	0.0422	0.0498	0.0433

**EABV**

C(g/l)	$V_{\text{corr}} \text{ (mg.cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$									
	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
<b>5 Jours</b>	0.0784	0.0704	0.0718	0.0677	0.0618	0.0632	0.0608	0.0644	0.0666	0.0642
<b>10 Jours</b>	0.0709	0.0699	0.0666	0.0622	0.06	0.0621	0.0569	0.0615	0.0582	0.0654
<b>15 Jours</b>	0.0644	0.0588	0.0555	0.0542	0.05	0.0599	0.0469	0.0502	0.0493	0.0555
<b>20 Jours</b>	0.0523	0.0498	0.0476	0.0465	0.0442	0.0494	0.0322	0.0428	0.04	0.0455

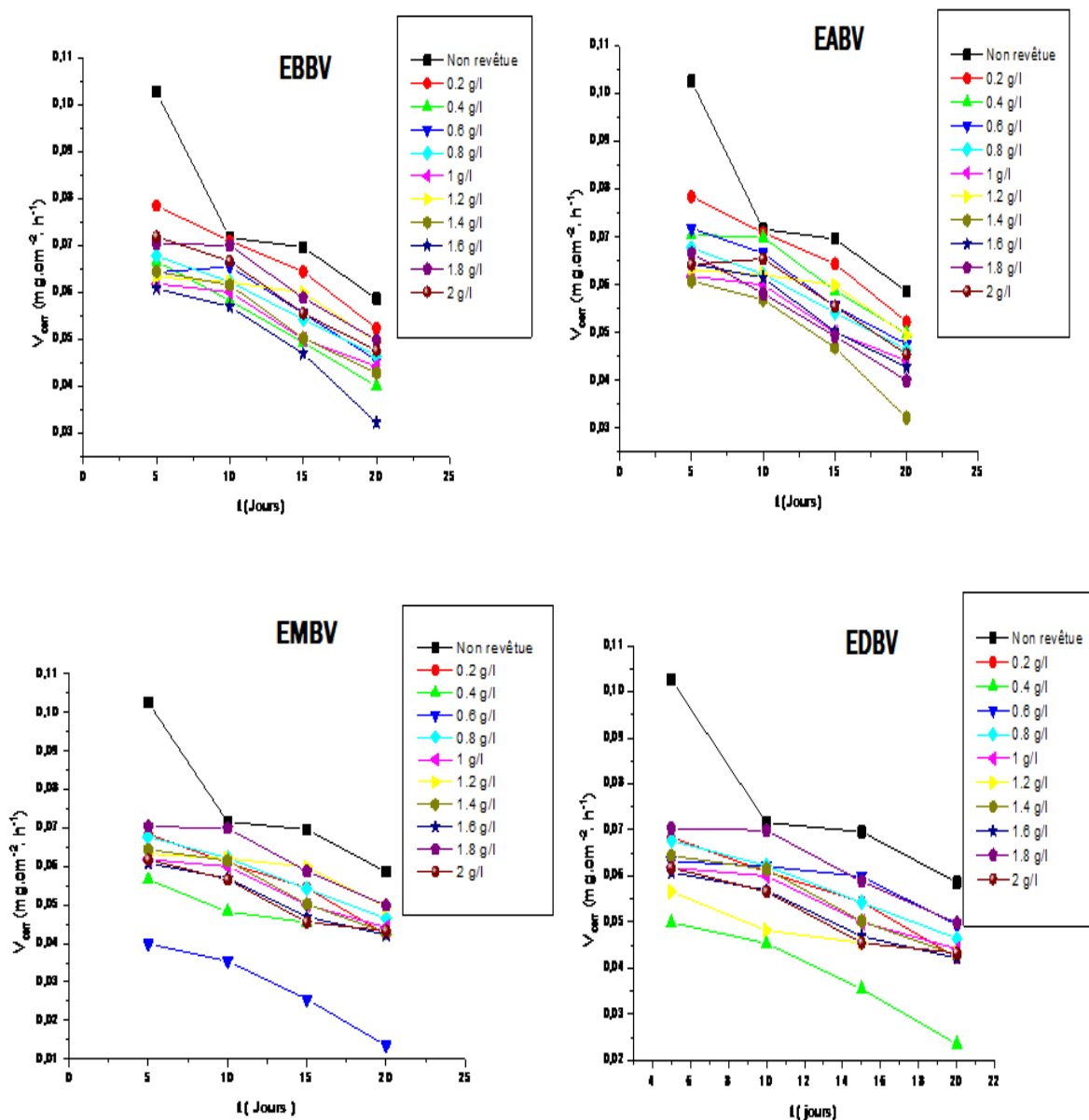
**EBBV**

C (g/l)	$V_{\text{corr}} \text{ (mg.cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$									
	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
<b>5 jours</b>	0.0784	0.0666	0.0642	0.0677	0.0618	0.0632	0.0644	0.0608	0.0704	0.0718
<b>10 jours</b>	0.0709	0.0582	0.0654	0.0622	0.06	0.0621	0.0615	0.0569	0.0699	0.0666
<b>15 jours</b>	0.0644	0.0493	0.0555	0.0542	0.05	0.0599	0.0502	0.0469	0.0588	0.0555
<b>20 jours</b>	0.0523	0.04	0.0455	0.0465	0.0442	0.0494	0.0428	0.0322	0.0498	0.0476

**EMBV**

C (g/l)	$V_{\text{corr}} \text{ (mg.cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$									
	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
<b>5 Jours</b>	0.0684	0.0566	0.0399	0.0677	0.0618	0.0632	0.0644	0.0608	0.0704	0.0618
<b>10 Jours</b>	0.0609	0.0482	0.0354	0.0622	0.06	0.0621	0.0615	0.0569	0.0699	0.0566
<b>15 Jours</b>	0.0544	0.0455	0.0255	0.0542	0.05	0.0599	0.0502	0.0469	0.0588	0.0455
<b>20 Jours</b>	0.0423	0.0433	0.0135	0.0465	0.0442	0.0494	0.0428	0.0422	0.0498	0.0433





**Figure III.3 :** Variation du taux de corrosion en fonction du temps d'exposition pour des échantillons d'acier doux non revêtu et revêtu sans et avec les extraits de Beta Vulgaris L.

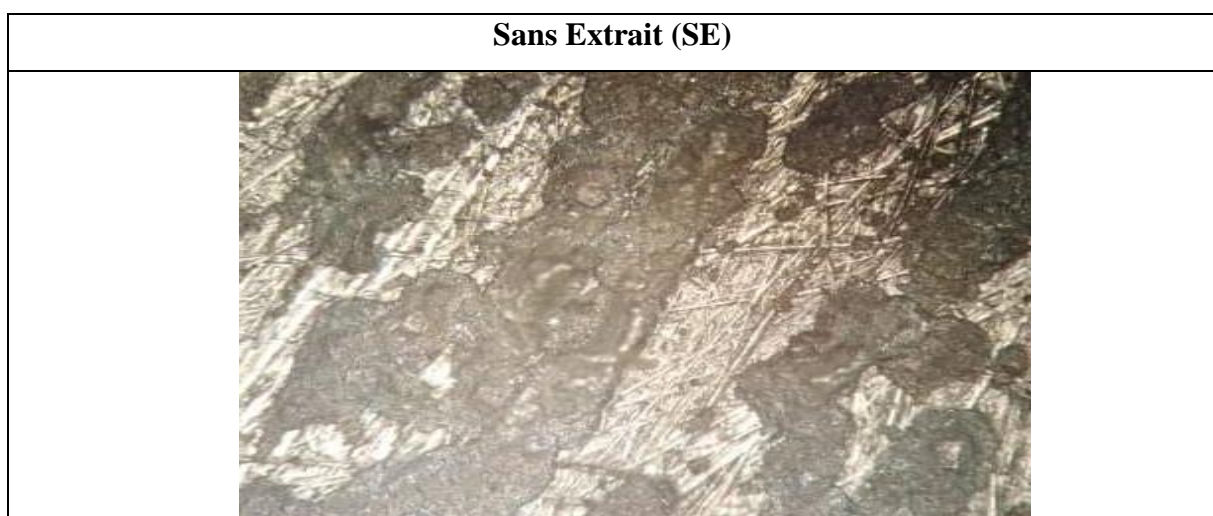
La Figure III.3 montre les courbes de vitesse de corrosion de l'acier doux en l'absence et en présence de diverses concentrations d'extraits de Beta Vulgaris l utilisés comme additifs lors de leur immersion dans l'eau de mer pendant vingt jours.

L'examen des tableaux (III.4) a montré une meilleure résistance à la corrosion pour tous les échantillons revêtus en présence des extraits testés en tant qu'additifs par rapport à celui revêtu en leur absence. D'autre part, l'échantillon revêtu sans additifs a enregistré une valeur de taux de corrosion de  $0.0586 (mg/cm^2 h^{-1})$ , tandis que ces valeurs étaient dans la gamme de  $0.0523$  à  $0,0135 (mg.cm^{-2}h^{-1})$  pour tous les échantillons revêtus en présence des additifs. Pour











les échantillons électrodéposés en présence EDBV, les valeurs étaient inférieures à celles obtenues en présence des autres extraits. Ces constatations sont en bon accord avec celles obtenues à partir de la polarisation potentiodynamique et EIS.

#### III. 4. Morphologie de surface











Afin de confirmer les résultats obtenus ci-dessus, nous avons utilisé la microscopie optique polarisante. Les tableaux (III.5), (III.6), (III.7), (III.8), (III.9) montrent des images de la morphologie de surface d'acier non revêtu, et revêtus avec différentes concentrations d'extraits de « beta vulgaris L » SE, EBBV, EDBV, EADBV, EMBV respectivement.













On constate que la surface revêtue sans additifs n'est généralement pas recouverte, rugueuse et surface contient plus de pores, par rapport à la recouverte

EBBV			
C (g/l)			
0.2		0.4	
0.6		0.8	
1		1.2	
1.4		1.6	
1.8		2	









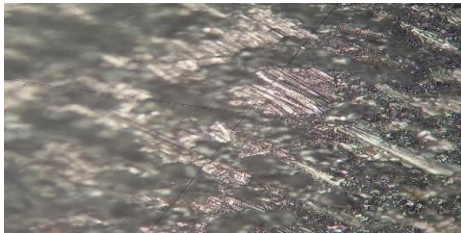
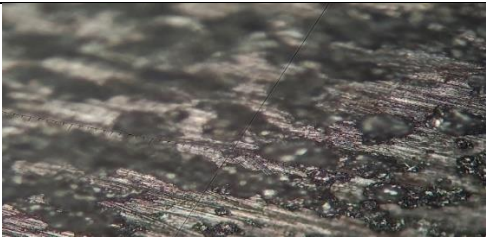
On note d'après le tableau (III.6) que la surface est en général recouverte, lisse sans de pores, par rapport à la surface recouverte sans additifs en particulier le substrat revêtu en présence de 1.6g/l de l'EBBV.

EDBV			
C(g/l)			
0.2		0.4	
0.6		0.8	
1		1.2	
1.4		1.6	
1.8		2	

On note d'après le tableau (III.6) que la surface est en général recouverte, lisse sans de pores, par rapport à la surface recouverte sans additifs en particulier le substrat revêtu en présence de 0.4g/l de l'EDBV.

EABV			
C(g/l)			
0.2		0.4	
0.6		0.8	
1		1.2	
1.4		1.6	
1.8		2	

On note d'après le tableau (III.7) que la surface est en général recouverte, lisse sans de pores, à l'exception de la concentration (0,2g/l) par rapport à la surface recouverte sans additifs en particulier le substrat revêtu en présence de 1.4g/l de l'ABBV.

EMBV			
C(g/l)			
0.2		0.4	
0.6		0.8	
1		1.2	
1.4		1.6	
1.8		2	

On note d'après le tableau (III.8) que la surface est en général recouverte, lisse avec plus de pores, à l'exception de la concentration (1.2g/l) par rapport à la surface recouverte sans additifs en particulier le substrat revêtu en présence de 0.6g/l de l'EMBV.

D'après les résultats notés dans les tableaux (III.6), (III.7), (III.8) et (III.9), il a observé que le substrat revêtu dans un bain de zingage par rapport le substrat non revêtu. Elle était généralement lisse et bien recouverte avec moins de pores à celle recouverte, à l'exception d'une concentration de 1,2 (g/L) d'extrait EMBV lisse et sans pores.

Grâce aux résultats de l'évaluation détaillée précédemment, en termes de meilleures valeurs d'adhérence, étude électrochimique et gravimétrique, de masse de dépôt et d'épaisseur de la couche de dépôt de zinc, l'EDBV est meilleur par rapport aux autres extraits.

# **Conclusion générale**



Nos travaux ont porté sur l'évaluation des effets d'extraits de la plante (*Beta vulgaris L*) de la famille Quenopodiaceae comme additifs naturels dans les bains de zingage d'acier doux.

Tout ce travail combine la méthode gravimétrique et les méthodes électrochimiques, en plus études sont appuyées par des méthodes de caractérisation de la surface, telle que la microscopie optique polarisant.

Cette étude accomplie a générée les résultats ci- dessous :

✚ Les résultats de l'électrodéposition ont montré que tous les extraits peuvent être utilisés comme additifs mouillants et nivelant.

✚ Les échantillons revêtus en présence de différentes concentrations d'extraits de *Beta Vulgaris L* en particulier l'EDBV et à 0.6 g/l d'EMBV, présentent une résistance à la corrosion plus élevée que celui revêtu en leurs absences.

# **Références bibliographiques**

1. Bensabra, D.H., Cours de corrosion et protection des métaux. Université de Jijel, 2016: p. 3-4.
2. Latanision, R., Current and projected impact of corrosion science and engineering. *Materials performance*, 1987. **26**(10): p. 9-16.
3. Harzallah, W., Préparation et Caractérisation de Dépôts Composites Electrodeposités en Présence d’Inhibiteurs Organiques, 2006, Université Mohamed Khider-Biskra.
4. Landolt, D., Corrosion et chimie de surfaces des métaux. Vol. 12. 2003: PPUR presses polytechniques.
5. Norman, E., Nace Glossary of Corrosion Terms. *Materials Protection*, 1965. **4**(1): p. 79.
6. Talbot, D. and J. Talbot, Corrosion science and technology. 2018: CRC press.
7. Retima, R., Etude de l’effet de la densité de courant sur les dépôts de Nickel élaborés par voie électrolytique, 2016.
8. Benkhoul, H. and T. Barka, Méthodes de protection contre la corrosion, 2020, Université M’sila.
9. Abderrahman, M., Influence de la température et de l'agitation du liquide de refroidissement sur la tenue à la corrosion des alliages d'aluminium utilisés dans l'industrie automobile.
10. Asworth, V., et al., A Short Introduction to Corrosion and its Control Corrosion of Metals and its Prevention. *Corrosion & Protection/BM.*, 2012.
11. Sersa A, F.A., Etude de l’efficacité de deux inhibiteurs de la corrosion d’un acier x70.
12. Popov, B.N., Corrosion engineering: principles and solved problems. 2015: Elsevier.
13. Bensaha, A., Etude d’inhibition de la corrosion du fer en milieu acide par l’extrait de periploca, 2020, ghardaya
14. Benaissa, A., L'effet de densité du courant sur l'électrodéposition d'un dépôt composite Zinc-Cobalt.
15. Boumeguet, F., R. Aitout, and D. Iabbassen, Etude de l’inhibition de la corrosion de zinc dans l’acide chlorhydrique par l’extrait de la plante d’Ortie, Université Abderrahmane Mira.
16. Popova, A., et al., Frequency dispersion of the interfacial impedance at mild steel corrosion in acid media in the presence of benzimidazole derivatives. *Langmuir*, 1996. **12**(8): p. 2083-2089.

## Références bibliographiques

---

17. Popova, A., et al., AC and DC study of the temperature effect on mild steel corrosion in acid media in the presence of benzimidazole derivatives. *Corrosion science*, 2003. **45**(1): p. 33-58.
18. Bensabra, H., Cours de corrosion et protection des métaux. Université de Jijel, 2016: p. 3-4.
19. Nouicer, E. and M. Khireddine, Comportement électrochimique et propriétés mécaniques de l'alliage de Titane Ti6Al4V. Effet des traitements de surface, 2009, Constantine: Université Mentouri Constantine.
20. Zarour, M., Elaboration et caractérisation des dépôts composites Cu/WC électrodéposés.
21. ZAKIA, F., Electrodeposition des métaux (Fe, Ni, Mo, Co...) sur silicium et silicium poreux, 2013, Thèse de Doctorat, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen.
22. Bouzidi, B., DEPOT PAR ELECTRODEPOSITION ET CARACTERISATION DE MATERIAUX DESTINES A LA FABRICATION DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES A BASE DE COUCHES MINCES, 2018.
23. Mekkaoui, A., Élaboration et Caractérisation des revêtements de Nickel Déposés Par Voie Electronique.
24. Hélie, M., Matériaux métalliques–Phénomènes de corrosion. Cours CEA/IUP Génie des Matériaux, Université d'Evry, 2005.
25. Nathan, C., Corrosion inhibitors. C. C. Nathan, Editor, published 1973 by NACE, 260, 1973.
26. Oberle, R., et al., Processing and hardness of electrodeposited Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites. *Applied physics letters*, 1995. **66**(1): p. 19-21.
27. Touri, F., Élaboration par voie électrochimique et caractérisation structurale et morphologique des films minces à base d'oxydes et d'alliages de zin, 2018.
28. Daufin , G. and J. Talbot Etude de quelques problèmes de corrosion dans l'industrie laitière. Première partie. Généralités sur la corrosion des métaux et alliages. *Le Lait*, 1971. **51**(507): p. 375-398.
29. Rezgui , M., Etude de l'effet du pH sur les dépôts électrolytiques à base de nickel par voie électrochimique renforcés par des particules solides en TiO<sub>2</sub>.
30. Tebbakh, S., ETUDE DE LA CINÉTIQUE D'ELECTRODEPOSITION DES FILMS D'ALLIAGES Co-Ni DANS UNE SOLUTION DE CHLORURE, 2018.
31. Djaghout , I., Etude de mécanisme d'action des brillanters sur le dépôt électrolytique de nickel, 2010.

## Références bibliographiques

---

32. Sadeli, F., R. Younes, and S. Mazit, Influence des paramètres de dépôt de cuivre par électrolyse, 2020, université Abderahmene Mira. Bejaia.
33. Derabla, T., Etude de l'effet de différents paramètres Physico-chimiques d'électrolyse en vue de la préparation de revêtements électrolytiques de chrome à partir des bains de chrome trivalent, 2012.
34. Tajima, K., et al., Electropolishing of CP titanium and its alloys in an alcoholic solution-based electrolyte. *Dental materials journal*, 2008. **27**(2): p. 258-265.
35. Hamada, A., Optimisation de la procédure d'électrodéposition des revêtements anti-corrosifs nickel-alumine réalisés sur des substrats en acier, 2017, Université de Batna 2.
36. Rezgui , I., Résistance à la Corrosion des Dépôts Composites nickel-alumine en Présence d'Additifs, 2010, Université de Batna 2.
37. Medjani, H., Influence de certains additifs organiques sur les caractéristiques d'un revêtement à base de zinc élaboré par voie électrochimique" application:" Evaluation de la résistance à la corrosion dans un milieu NaCl à 3% en poids", 2018, UMMTO.
38. Meudre, C., Obtention de revêtements électrochimiques de bronze en milieu acide avec ajout d'additifs organique à base de gélatine, 2015, Université de Franche-Comté.
39. Mekkaoui, A., ELECTRODEPOSITION ET CARACTERISATION DES COUCHES MINCES NANOSTRUCTUREES A BASE D'OXYDES, 2018, Université Mohamed Khider-Biskra.
40. Européen, R., Règlement (UE) no 1169/2011 du parlement européen et du conseil du 25 octobre 2011 concernant l'information de s consommateurs sur les denrées alimentaires. *Journal Officiel de l'Union Européenne L*, 2011. **304**: p. 18-63.
41. Mroczek, A., et al., Triterpene saponin content in the roots of red beet (*Beta vulgaris* L.) cultivars. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2012. **60**(50): p. 12397-12402.
42. Kertit, S., K. Bekkouch, and B. Hammouti, Inhibition de la corrosion d'un acier au carbone en milieu H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 2M par des composés organiques de type «tetrazole». *Revue de métallurgie*, 1998. **95**(2): p. 251-257.
43. FC, E., Proceedings [of The] 4th European Symposium on Corrosion Inhibitors: 82th Manifestation of the European Federation of Corrosion, Ferrara (Italy), 15th-19th September 1975. 1975: Università degli studi di Ferrara.
44. ASTM, D., 523-89, Standard Test Method for Specular Gloss. ASTM International, 1999.

## Références bibliographiques

---

45. Standardization, I., iso 2813: Paints and Varnishes--Determination of Gloss Value at 20 Degrees, 60 Degrees and 85 Degrees. International Organization for Standardization, 2014.
46. Youssef, K., C. Koch, and P. Fedkiw, Influence of additives and pulse electrodeposition parameters on production of nanocrystalline zinc from zinc chloride electrolytes. *Journal of the Electrochemical Society*, 2004. **151**(2): p. C103.
47. Muresan, L. and S. Varvara, Leveling and brightening mechanisms in metal electrodeposition. *Metal Electrodeposition*, 2005: p. 1-45.
48. Dahmani, K., et al., Environmental Cinnamon Extracts Effect on Electrodeposition of Copper in an Acidic Bath. *Portugaliae Electrochimica Acta*, 2018. **36**(2): p. 119-131.
49. Bouyanzer, A., B. Hammouti, and L. Majidi, Pennyroyal oil from *Mentha pulegium* as corrosion inhibitor for steel in 1 M HCl. *Materials Letters*, 2006. **60**(23): p. 2840-2843.