

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE CHIMIE

N°:



DOMAINE : Sciences de matière

FILIERE : CHIMIE

OPTION : CHIMIE ORGANIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de  
Master Académique

Présenté par : M<sup>elle</sup> AITSIDHOUM Yasmine

Intitulé

*Contribution à la détermination du pouvoir  
inhibiteur des extraits des plantes vis-à-vis la  
corrosion de l'acier dans un milieu acide 1M*

Soutenu devant le jury composé de :

<b>Dr. A. KHENICHE</b>	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Président
<b>Dr. O. BELHADDAD</b>	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Examineur
<b>Dr. K. BOUCHELOUCHE</b>	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Rapporteur

Année universitaire : 2022 / 2023

# Dédicace

Je dédie ce travail à

Mes chers parents,

Mes adorables sœurs,

Mes amies,

Mes collègues de classe

Et à tous mes professeurs.

# Remerciements

Avant toute chose, nous tenons à exprimer notre gratitude et nos remerciements à Dieu le tout puissant qui nous a donné, le courage et l'ambition afin de pouvoir réaliser ce travail. En espérant qu'il sera utile de porter quelque chose à la science.

Je tiens à remercier, d'abord, ma professeure et encadreuse **M<sup>me</sup> K. BOUCHELOUCHE** pour tous ses efforts, ses précieux conseils, sa gentillesse et ses suggestions durant la rédaction de ce mémoire.

Je remercie **Mr. A. KHENICHE** d'avoir accepté de présider le jury de ce travail.

Je remercie également **M<sup>me</sup> O. BELHADDAD** d'avoir accepté de faire partie de ce jury et d'examiner ce travail.

Je tiens à remercier aussi **Mr. A. Dakhouche** pour m'avoir aidé dans l'accomplissement de ce travail.

Mes remerciements vont également à **Mr A. Harrar** pour son attention et son apport. Je remercie tous les membres du laboratoire de département de chimie pour leurs soutiens et efforts déployés pendant la période de réalisation de ce travail.

Enfin que tous ceux et celles qui ont contribué, de près ou de loin à la réalisation de ce travail, en particulier M. Daoud, qu'ils trouvent ici nos vifs remerciements.

# Table des matières

Résumé .....	i
Liste des abréviations .....	ii
Liste des figures .....	iii
Liste des tableaux .....	v
Introduction générale .....	1

## Chapitre I. Généralités sur la corrosion

I.1. Définition de la corrosion .....	3
I.2. Etude de la corrosion.....	3
I.3. Cout de la corrosion .....	4
I.4. Processus de corrosion .....	5
I.4.1. Corrosion chimique .....	5
I.4.2. Corrosion biologique.....	5
I.4.3. Corrosion électrochimique .....	6
I.5. Les différentes formes de corrosion .....	6
I.5.1. Corrosion uniforme .....	7
I.5.2. Corrosion localisée.....	7
I.6. Facteurs de la corrosion .....	10
I.7. La protection/prévention contre la corrosion .....	10
I.7.1. Modification du design .....	11
I.7.2. Choix des matériaux.....	11
I.7.3. les revêtements .....	11
I.7.4. Protection cathodique (protection électrochimique) .....	12
I.8. Généralité sur les inhibiteurs de la corrosion.....	13
I.8.1. Définition .....	13
I.8.2. Propriétés des inhibiteurs .....	13
I.8.3. Conditions d'utilisation.....	14
I.8.4. Classification des inhibiteurs .....	14
I.8.5. les inhibiteur verts .....	20
I.9. Les méthodes d'évaluation de la corrosion.....	23
I.9.1. Méthode gravimétrique .....	23
I.9.2. Méthodes électrochimiques.....	23

## Chapitre II. Généralités sur les espèces étudiés

II.1. La famille <i>Rosacées</i> .....	27
II.2. La famille <i>Burseraceae</i> .....	28
II.3. Les espèces étudiées.....	28
II.3.1. Généralités sur <i>Prunus armeniaca</i> L (L'abricotier).....	28
II.3.2. Généralité sur <i>Boswellia carterii</i> .....	32

### **Chapitre III. Matériel et méthodes**

III.1. Matériel .....	35
III.1.1. Matériel végétal.....	35
III.1.2. Les électrodes.....	35
III.1.3. L'électrolyte.....	36
III.2. Méthodes.....	36
III.2.1. Préparation des extraits.....	36
III.2.2. Dosage des polyphénols .....	37
III.2.3. Dosage des polysaccharides .....	38
III.2.4. Evaluation de l'activité antioxydante par le teste DPPH .....	39
III.2.5. Test de l'inhibition de la corrosion .....	40
III.2.5.1. Essais gravimétriques.....	40
III.2.5.1. Les courbes de polarisation.....	40
III.2.5.3. Spectroscopie d'impédance électrochimiques .....	41

### **Chapitre IV. Resultats et discussion**

IV.1. Rendements des extractions .....	42
IV.2. Dosage des polyphénols.....	43
IV.3. Dosage des polysaccharides.....	45
IV.4. Test d'activité antioxydante (DPPH).....	46
IV.5. Test de l'inhibition de la corrosion.....	49
IV.5.1. Essais gravimétriques.....	49
IV.5.2. Les courbes de polarisation.....	50
IV.5.3. Spectroscopie d'impédance électrochimiques .....	51
Conclusion générale .....	53
Références bibliographiques .....	54

## ملخص

الهدف الذي وضعناه في هذا العمل هو تسليط الضوء على أهمية المثبطات الخضراء التي لا تمثل فقط الفعالية التثبيطية الجيدة ولكن أيضاً التوافق مع معايير عدم السمية ووفرتها. في هذا السياق، يدور بحثنا حول محورين: أحدهما يركز على التثمين الكيميائي النباتي لكل من *Prunus armeniaca L* و *Boswellia carterii*، والآخر على إظهار النشاط المضاد للتآكل من المستخلصات المختلفة لهذه النباتات.

أظهر التقدير الكمي للسكريات أن *Prunus armeniaca L* و *Boswellia carterii* يقدمان محتويات عالية جداً  $4.52 \pm 993.14$  ميكروغرام / EG و  $3.62 \pm 948.94$  ميكروغرام / EG على التوالي. في حين أن هذه النباتات فقيرة جداً من ناحية البوليفينول مع نسبة تتراوح بين  $0.23 \pm 1.71$  ميكروغرام / EAG،  $2.11 \pm 12.14$  ميكروغرام / EAG.

تمت دراسة قدرة المستخلصات المضادة للأكسدة في المختبر بواسطة طرق DPPH اللونية. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن القدرة المضادة للأكسدة لكلا النوعين متقاربة للغاية مع بعض الاختلافات: يبدو أن مستخلص السكاريد من *Prunus armeniaca L* هو المستخلص الأكثر نشاطاً مع  $IC_{50}$  يساوي  $5.59 \pm 296.15$  مجم / مل، واما في *Boswellia carterii* فان المستخلص الأكثر فاعلية هو المستخلص المائي الكحولي مع  $IC_{50}$  بقيمة  $1.59 \pm 216.56$  مجم / مل. خصص الجزء الثاني من هذا العمل لتقييم القوة المثبطة لمستخلصات السكاريد للنبتين باستخدام تقنية قياس الوزن وطريقتين كهروكيميائيتين هما:

منحنيات الاستقطاب والمقاومة الكهروكيميائية في وسط حمضي (HCl 1M) على تآكل فولاذ X50. أظهر تحليل المنحنيات التي تم الحصول عليها عن طريق الاستقطاب أن قيم الكفاءة المثبطة تزداد مع زيادة وقت الانغماس. تم تسجيل أفضل النتائج عند 72 ساعة في كلا النوعين

سجل في *Prunus armeniaca l* أعلى قيمة بكفاءة  $76.06\%$  بينما سجلت نسبة  $45.92\%$  في *Boswellia carterii*. تم إثبات نفس الشيء باستخدام طريقة قياس الوزن ولكن بكفاءة مثبطة بلغت  $74.71\%$  في *Prunus armeniaca l* و  $69.53\%$  في *Boswellia carterii*

**الكلمات المفتاحية:** *Prunus armeniaca L*، *Boswellia carterii*، نشاط مضاد للتآكل، تأثير مضاد للأكسدة، مثبطات، تآكل، فولاذ، عديد السكاريد، منحنى استقطاب، مقاومة كهروكيميائية.

## Abstract

Our aim in this work is to highlight the value of green inhibitors, which not only offer good inhibitory efficacy but also comply with non-toxicity standards, and their availability. In this context, our research is structured around two axes: one deals with the phytochemical valorization of *Prunus armeniaca L* and *Boswellia carterii*, and the other with the demonstration of the anticorrosive activity of the various extracts of these plants.

Quantitative estimation of polysaccharides revealed that *Prunus armeniaca L* and *Boswellia carterii* have very high contents  $993.14 \pm 4.52 \mu\text{g EG/mg}$  and  $948.94 \pm 3.62 \mu\text{g EG/mg}$  respectively. Whereas these plants are very low in polyphenols, with levels ranging from  $1.71 \pm 0.23 \mu\text{g EAG/mg}$  to  $12.14 \pm 2.11 \mu\text{g EAG/mg}$ .

The in vitro antioxidant capacity of the extracts was studied using DPPH colorimetric methods. The results obtained show that the antioxidant capacity of the two species is very close, with a few differences: the polysaccharide extract of *Prunus armeniaca L* appears to be the more active extract with an IC<sub>50</sub> equal to  $296.15 \pm 5.59 \text{ mg/ml}$ , while in *Boswellia carterii* the most active extract is the hydroalcoholic extract with an IC<sub>50</sub> of  $216.56 \pm 1.59 \text{ mg/ml}$ .

The second part of this work was devoted to assessing the inhibitory power of polysaccharide extracts from the two plants on the corrosion of X50 steel in acid medium (HCl 1M) using a gravimetric method and two electrochemical methods: polarization curves and electrochemical impedance. Analysis of the polarization curves revealed that inhibitory efficacy values increased with increasing immersion time. The best results were recorded at 72 h in both species, with efficiencies of 76.06% in *Prunus armeniaca L* and 45.92% in *Boswellia carterii*. The same was proved with the gravimetric method, but with an inhibitory efficacy of 74.71% in *prunus armenica l* and 69.53% in *boswellia carterii*.

**Keys words:** *Prunus armeniaca*, *Boswellia carterii*, anticorrosive activity, antioxidant activity, inhibitors, corrosion, steel, polysaccharides, polarization curve, electrochemical impedance

## Résumé

L'objectif que nous avons fixé dans ce travail est de mettre en évidence l'intérêt des inhibiteurs verts qui représentent non seulement une bonne efficacité inhibitrice mais aussi une compatibilité aux normes de non toxicité et leurs disponibilités. Dans ce contexte, notre recherche s'articule autour de deux axes : l'un porte sur la valorisation phytochimique de *Prunus armeniaca L* et *Boswellia carterii*, et l'autre sur la mise en évidence de l'activité anticorrosive des différents extraits de ces plantes.

L'estimation quantitative des polysaccharides a révélé que *Prunus armeniaca L* et *Boswellia carterii* présentent des teneurs très élevées  $993.14 \pm 4.52 \mu\text{g EG/mg}$  et  $948.94 \pm 3.62 \mu\text{g EG /mg}$  respectivement. Tandis que ces plantes sont très pauvres aux polyphénols avec des tanneurs variant entre  $1.71 \pm 0.23 \mu\text{g EAG/mg}$  et  $12.14 \pm 2.11 \mu\text{g EAG/mg}$ .

La capacité antioxydante *in vitro* des extraits a été étudiée par des méthodes colorimétriques DPPH. Les résultats obtenus montrent que la capacité antioxydante des deux espèces est très proche avec quelques différences: l'extrait polysaccharidique de *Prunus armeniaca L* semble être l'extrait le plus actif avec une  $\text{IC}_{50}$  égale à  $296.15 \pm 5.59 \text{ mg/ml}$ , autrement en *Boswellia carterii* l'extrait le plus actif est l'extrait hydroalcoolique avec un  $\text{IC}_{50}$  de  $216.56 \pm 1.59 \text{ mg/ml}$ .

La deuxième partie de ce travail a été consacrée à l'évaluation du pouvoir inhibiteur des extraits de polysaccharides des deux plantes sur la corrosion de l'acier X50 en milieu acide (HCl 1M) en utilisant une méthode gravimétrique et deux méthodes électrochimiques qui sont : les courbes de polarisation et l'impédance électrochimique. L'analyse des courbes obtenues par polarisation a révélé que les valeurs de l'efficacité inhibitrice augmentent avec l'augmentation du temps d'immersion. Les meilleurs résultats ont été enregistrés à 72 h dans les deux espèces avec une efficacité de 76.06 % dans *Prunus armeniaca L* et de 45,92 % dans *Boswellia carterii*. La même chose a été prouvée avec la méthode gravimétrique mais avec une efficacité inhibitrice de 74.71 % dans *prunus armenica l* et 69.53% dans *boswellia carterii*.

**Mots clés :** *Prunus armeniaca*, *Boswellia carterii*, activité anticorrosive, activité antioxydante, inhibiteurs, corrosion, acier, polysaccharides, courbe de polarisation, impédance électrochimique.

# Liste des abréviations

<b>CE :</b>	Contre électrode.
<b>ECS :</b>	Une électrode au calomel saturé.
<b>EDéc<sub>G</sub> :</b>	Extrait de décoction de la gomme.
<b>EDéc<sub>L</sub> :</b>	Extrait de décoction de l'olinban.
<b>EHyd<sub>G</sub> :</b>	Extrait hydroalcoolique de la gomme.
<b>EHyd<sub>L</sub> :</b>	Extrait hydroalcoolique de l'olinban.
<b>EInf<sub>G</sub> :</b>	Extrait d'infusion de la gomme.
<b>EInf<sub>L</sub> :</b>	Extrait d'infusion de l'olinban.
<b>EPS<sub>G</sub> :</b>	Extrait de polysaccharides de la gomme.
<b>EPS<sub>L</sub> :</b>	Extrait de polysaccharides de l'olinban.
<b>ER :</b>	Electrodes de référence.
<b>ET :</b>	Electrode de travail.
<b>EAG :</b>	Equivalent d'acide gallique.
<b>EG :</b>	Equivalents de glucose.
<b>E<sub>corr</sub> :</b>	Potentiel de corrosion.
<b>I<sub>corr</sub> :</b>	la densité de courant de corrosion.
<b>IC<sub>50</sub> :</b>	Concentration inhibitrice de 50%.
<b>I% :</b>	Pourcentage de l'activité antiradicalaire.
<b>mg :</b>	Milligramme.
<b>mL :</b>	Millilitre.
<b>mV :</b>	Millivolt.
<b>μA :</b>	Microampère.
<b>μg :</b>	Microgramme.
<b>μL :</b>	Microlitre.
<b>nm :</b>	Nanomètre.
<b>P<sub>ib</sub> :</b>	Le Produit Intérieur Brut.
<b>R<sub>p</sub> :</b>	La résistance de polarisation.
<b>R % :</b>	Rendement d'extraction.
<b>UV :</b>	Ultraviolet.
<b>β<sub>a</sub> :</b>	Coefficient de Tafel anodique.
<b>β<sub>c</sub> :</b>	Coefficient de Tafel cathodique.

# Liste des figures

<b>Figure 1.</b> Types de corrosion : (a) corrosion localisée et (b) corrosion uniforme. ....	7
<b>Figure 2.</b> Les formes de corrosion localisée .....	9
<b>Figure 3.</b> Procédé de revêtement de feuilles de polymère/graphène .....	12
<b>Figure 4.</b> Système de la protection cathodique alimenté par énergie solaire photovoltaïque .....	12
<b>Figure 5.</b> Protection de l'acier au carbone par les inhibiteurs de corrosion.....	13
<b>Figure 6.</b> Un mécanisme proposé pour une physisorption d'un polysaccharide .....	16
<b>Figure 7.</b> Un mécanisme proposé pour une chimisorption d'un polysaccharide .....	17
<b>Figure 8.</b> Structure typique d'un aglycone de polyphénol.....	21
<b>Figure 9.</b> Structure du $\beta$ -glucane dans le polysaccharide de <i>Ganoderma lucidum</i> .....	22
<b>Figure 10.</b> Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel .....	24
<b>Figure 11.</b> Schéma d'un système électrochimique non linéaire soumis à une perturbation sinusoïdale .....	25
<b>Figure 12.</b> Circuit électrique équivalent d'un système électrochimique (Circuit de Randles). ....	25
<b>Figure 13.</b> Représentation schématique d'un diagramme d'impédance de Nyquist d'un système électrochimique. ....	26
<b>Figure 14.</b> Exsudation de gomme de l'abricotier .....	31
<b>Figure 15.</b> Olibane de <i>boswellia carterii</i> .....	34
<b>Figure 16.</b> Gomme d'abricot ( <i>Prunus armeniaca L.</i> ).....	35
<b>Figure 17.</b> Oliban de <i>Boswellia carterii</i> . ....	35
<b>Figure 18.</b> Mécanisme de réduction du radical libre DPPH par un antioxydant .....	39
<b>Figure 19.</b> Montage électrochimique.....	40
<b>Figure 20.</b> Rendements des extraits de <i>Prunus armeniaca</i> et <i>Boswellia carterii</i> exprimés en pourcentage. ....	43
<b>Figure 21.</b> Courbe d'étalonnage d'acide gallique.....	43
<b>Figure 22.</b> La teneur en polyphénols totaux des différents extraits. ....	44
<b>Figure 23.</b> Courbe d'étalonnage du glucose. ....	45
<b>Figure 24.</b> Teneurs en polysaccharides. ....	45
<b>Figure 25.</b> Pourcentage d'inhibition % en fonction de concentrations de différents extraits de <i>Prunus armeniaca L.</i> .....	46

<b>Figure 26.</b> Valeurs d'IC <sub>50</sub> des extraits de <i>Prunus armeniaca</i> . .....	47
<b>Figure 27.</b> Activité inhibitrice du radical DPPH par les extraits de <i>Boswellia carterii</i> . .....	47
<b>Figure 28.</b> Valeurs IC <sub>50</sub> d'extraits pour l'activité piégeant les radicaux libres par la méthode de DPPH des extraits de <i>Boswellia carterii</i> . .....	48
<b>Figure 29.</b> Les valeurs d'efficacité inhibitrice obtenue par l'essai gravimétrique. ....	50
<b>Figure 30.</b> L'efficacité inhibitrice des extraits des polysaccharides de <i>Prunus armeniaca</i> L et <i>Boswellia carterii</i> . .....	51
<b>Figure 31.</b> Circuit équivalent simple .....	52

# Liste des tableaux

<b>Tableau 1.</b> Facteurs de la corrosion.....	10
<b>Tableau 2.</b> Rendement des extraits.....	42
<b>Tableau 3.</b> La teneur en polyphénols ( $\mu\text{g}$ EAG/mg d'extrait) .....	44
<b>Tableau 4.</b> L'évolution des vitesses de corrosion, taux de recouvrement et l'efficacité inhibitrices. .....	49
<b>Tableau 5.</b> Les paramètres électrochimiques et l'efficacité inhibitrice pour les inhibiteurs $\text{PS}_G$ et $\text{PS}_L$ pour la corrosion de l'acier dans $\text{HCl}$ 1M obtenus par les courbes de polarisation. ....	50

# **Introduction Générale**

## **Introduction générale**

La première utilisation des métaux par l'homme pour la fabrication d'objets simples, d'armes et d'ornements remonte à l'âge du bronze [1].

Les métaux peuvent être considérés comme les matériaux d'ingénierie les plus importants. Sur les 90 éléments présents à l'état naturel sur terre, 66 sont des métaux et 7 autres présentent certaines caractéristiques des métaux.

L'identification, la compréhension et l'utilisation des métaux ont connu une véritable explosion grâce à la révolution industrielle et le développement ultérieur de la technologies [2]. Comme l'acier qui est utilisé dans différents secteurs de l'industrie et de l'ingénierie en raison de ses propriétés mécaniques exceptionnelles, de sa facilité d'approvisionnement et, surtout, de son faible coût [3].

Mais les métaux sont susceptibles d'être dégradés par la corrosion [4], Chaque année, elle coûte à la société des milliards de dollars. Elle n'est pas seulement préjudiciable financièrement aux économies, mais elle gaspille également nos ressources naturelles limitées, endommage l'environnement et provoque de nombreuses souffrances humaines. La compréhension de la corrosion pourraient réduire considérablement ces effets néfastes et son coût [5].

La prévention de la corrosion est devenue un domaine de la recherche en raison du besoin croissant de mettre en œuvre des méthodes efficaces et économiques pour réduire son effet.

Il existe de nombreuses méthodes pour minimiser la corrosion : la protection cathodique, l'utilisation d'inhibiteurs, l'utilisation des revêtements anticorrosion [6].

Dans le domaine de la recherche sur la corrosion, la principale approche pratique contre elle est l'utilisation d'inhibiteurs organiques synthétiques [7], Mais leur toxicité est un inconvénient majeur et leur utilisation a donc fait l'objet de critiques sévères [8]. Pour ces raisons, les recherches ont été orientées vers d'autres molécules organiques d'origine végétale (Les extraits de plantes) qui ont un pouvoir inhibiteur de la corrosion.

L'utilisation des produits naturels en tant qu'inhibiteurs de corrosion fait l'objet de nombreuses recherches, principalement en raison du faible coût et de l'aspect écologique de ces produits. Cela remplacera rapidement les inhibiteurs organiques synthétiques, dangereux, et coûteux. Les travaux de recherche ont établi que les extraits de plantes contiennent différents composés organiques ayant des capacités d'inhibition de la corrosion. Ces composés ainsi que ces capacités d'inhibition de la corrosion varient largement en fonction du type d'extrait de plantes [9].

des expériences ont montré l'utilisation réussie de : substances naturelles pour inhiber la corrosion des métaux dans un environnement acide et alcalin, des extraits de *Delonix Regia* ont été utilisés comme inhibiteurs de corrosion pour l'aluminium dans des milieux acides[10], le miel

naturel comme inhibiteur de corrosion pour le cuivre [11] et l'extrait d'opuntia sur l'aluminium [12].

C'est dans ce cadre que nous avons entamé ce travail dans le but d'étudier le pouvoir inhibiteurs des différents extraits naturels sur un acier de type X50 contenant du carbone trempé dans une solution d'HCl de concentration 1M à température ambiante.

Le travail que nous présentons dans ce mémoire est constitué de deux parties qui se terminant par une conclusion :

- La première consiste en un aperçu sur la corrosion, les inhibiteurs de corrosion et les méthodes d'évaluation de la corrosion ainsi qu'une présentation des deux espèces étudiées : *Boswellia carterii* et *Prunus armeniaca L.*
- La deuxième partie est une étude expérimentale, elle-même est présentée en deux volets : Le premier comporte une description brève des méthodes d'extraction, dosage des polyphénols et polysaccharides, l'évaluation de l'activité antioxydant par le radical DPPH, ainsi que les tests de l'activité inhibitrice de la corrosion. Le deuxième résume l'essentiel des résultats obtenus.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur la corrosion**

## Introduction

La plupart des gens connaissent la corrosion sous une forme ou une autre, notamment la rouille d'une clôture en fer et la dégradation de piliers en acier ou d'accessoires de bateaux. Il s'agit notamment des conduites d'eau dans les maisons, où la corrosion attaque principalement de l'intérieur, ainsi que les oléoducs, gazoducs souterrains qui sillonnent notre territoire. On peut donc affirmer sans risque de se tromper que presque tout le monde connaît au moins un peu la corrosion [13].

La corrosion est un phénomène néfaste qui affecte toutes sortes de matériaux (métaux, céramiques, polymères) dans divers environnements (milieux aqueux, atmosphère, hautes températures). Les phénomènes de corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs tels que: la nature et la structure du matériau, les traitements de surface (mécaniques, chimiques, électrochimiques, etc.), l'environnement et ses caractéristiques chimiques, la température, les micro-organismes, le régime hydrodynamique auquel est soumis le matériau et les contraintes qui lui sont imposées [14].

La corrosion est un phénomène indésirable qui détruit l'éclat et la beauté des métaux et réduit leur durée de vie. Le contrôle de ces détériorations des métaux et des alliages est une action coûteuse, et les industries déboursent des sommes énormes pour gérer cette crise.

L'utilisation d'inhibiteurs de corrosion est le moyen le plus raisonnable pour protéger les métaux de la corrosion. Les inhibiteurs de corrosion réduisent le taux de corrosion lorsqu'ils sont ajoutés à l'environnement ou à la solution des métaux [15].

### I.1. Définition de la corrosion

Selon la norme ISO 8044, la corrosion est définie comme une "interaction physico-chimique (généralement de nature électrochimique) entre un métal et son environnement qui entraîne des changements dans les propriétés du métal et qui peut souvent conduire à l'altération de la fonction du métal, de l'environnement ou du système technique dont ils font partie"[16].

Sans environnement chimique, les métaux peuvent se détériorer par des processus physiques (tels que fracture, usure, oxydation par cavitation, etc.) [17].

### I.2. Etude de la corrosion

Pour la grande majorité des gens, la corrosion est synonyme de rouille, un objet de répulsion presque universel. La rouille est, bien sûr, le nom qui a été plus récemment réservé à la corrosion du fer.

Le fer est certainement le plus utilisé, et a dû être l'un des premiers sur lequel de sérieux problèmes de corrosion ont été rencontrés. Les surfaces n'entraient pas facilement dans les anciennes images du monde, même celles peintes par les atomistes, qui admettaient l'existence des vides.

La seule description scientifique ancienne des surfaces se trouve peut-être dans certains passages du grand philosophe romain Pline l'Ancien (23-79 AP. J.-C.), qui a longuement parlé de *ferrum corruptitur*, c'est-à-dire de fer gâté. À son époque, l'Empire romain était devenu la première civilisation du monde.

L'utilisation intensive du fer pour l'armement et d'autres artefacts qui étaient, bien entendu, fortement sujets à la rouille et à la corrosion. Pline a décrit les phénomènes de corrosion qui se produisent à la surface des métaux, ainsi que les remèdes permettant de minimiser les effets de la corrosion. Sa référence à l'utilisation de l'huile comme moyen de protéger les objets en bronze contre la corrosion.

De nombreuses découvertes scientifiques et techniques ont été faites depuis lors et la compréhension générale des mécanismes de corrosion a progressé en même temps. Au début du vingtième siècle, les processus de base de la corrosion du fer et de l'acier étaient relativement bien compris. L'un des premiers manuels modernes sur la prévention et le contrôle de la corrosion a été publié par McGraw-Hill en 1910 [13].

### **I.3. Cout de la corrosion**

Nombreux sont ceux qui pensent que la corrosion est un ennemi universel qui doit être accepté comme un processus inévitable. En réalité, certaines choses peuvent et doivent être faites pour prolonger la durée de vie des structures et des composants métalliques exposés à la corrosion.

Dans un environnement commercial moderne, les entreprises prospères ne peuvent pas tolérer de défaillances majeures dues à la corrosion, en particulier celles qui impliquent des blessures, des décès, des arrêts imprévus et une contamination de l'environnement.

La corrosion peut entraîner des défaillances dans les infrastructures et les machines de l'usine qui sont généralement coûteuses à réparer, coûteuses en termes de produits perdus ou contaminés, coûteuses en termes de dommages environnementaux, et coûteuses en termes de coûts d'exploitation et on termes de sécurité humaine [13].

Selon certaines sources, la corrosion consommerait jusqu'à 300 millions de tonnes par an. D'acier et son coût serait de l'ordre de 2 000 milliards de dollars US par an, soit un peu moins de la moitié des dépenses annuelles de santé [18].

Le coût de la corrosion à l'échelle mondiale peut être estimé à 2,5 billions de dollars américains en utilisant un PIB (Le Produit Intérieur Brut) mondial de 3,4% (2013). Avec l'utilisation des techniques de contrôle de la corrosion disponibles, il est prévu que des économies allant de 15% à 35% du coût de la corrosion, soit entre 375 et 875 milliards de dollars américains par an à l'échelle mondiale, pourraient être réalisées [19].

## I.4. Processus de corrosion

La corrosion d'un métal ou d'un alliage peut se développer suivant trois processus qui caractérisent chaque type de corrosion :

### I.4.1. Corrosion chimique

Il s'agit d'une réaction hétérogène entre deux phases l'une est solide (le métal) l'autre est gazeuse. Le processus d'oxydoréduction de la corrosion chimique se déroule dans le domaine atomique avec un milieu ambiant en absence d'électrolyte. Donc la corrosion purement chimique exclue le passage d'un courant électrique, un flux électronique cesse, car l'échange d'électrons entre les différents partenaires de réactions s'effectue directement. L'air renferme l'oxygène, de la vapeur d'eau et des vapeurs acides (anhydride carbonique  $\text{CO}_2$  et sulfureux  $\text{SO}_2$ , hydrogène sulfureux  $\text{H}_2\text{S}$  etc...) ce sont les agents corrosifs mais le plus souvent c'est le  $\text{CO}_2$ . Les oxydes et autres produits de réaction solides ou liquides qui se forment à la surface du métal jouent alors le rôle d'électrolytes grâce à leur conductivité ionique [20].

### I.4.2. Corrosion biologique

L'attaque directe ou indirecte des bactéries sur les métaux est connue sous le nom de corrosion biologique des métaux. De nombreux autres composés, dont le dioxyde de carbone, l'anhydride de l'acide sulfurique et les acides organiques qui attaquent les métaux, peuvent être produits par ces bactéries. Certaines bactéries, comme *Desulfovibrio desulfuricans*, ont la capacité de transformer les sulfates en soufre et de produire du soufre ferreux. L'attaque bactérienne est principalement observée dans les canalisations éclatées, les structures submergées et les bâtiments immergés [21].

### I.4.3. Corrosion électrochimique

La corrosion en milieu aqueux se produit par un processus électrochimique [22].

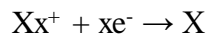
La plupart des formes de corrosion sont le résultat de ce processus [23].

Le phénomène implique des électrons et des ions et peut-être séparés en deux réactions partielles, anodiques et cathodiques. Sur les sites anodiques une réaction d'oxydation se produit, c'est-à-dire la perte des électrons, par contre un processus de réduction ou un gain des électrons doit se produire au niveau des sites cathodiques. Les deux réactions, anodique et cathodique, sont complémentaires et doivent se dérouler à la même vitesse.

La réaction anodique du métal est de la forme :



D'autre part, la réaction cathodique du métal est de la forme :



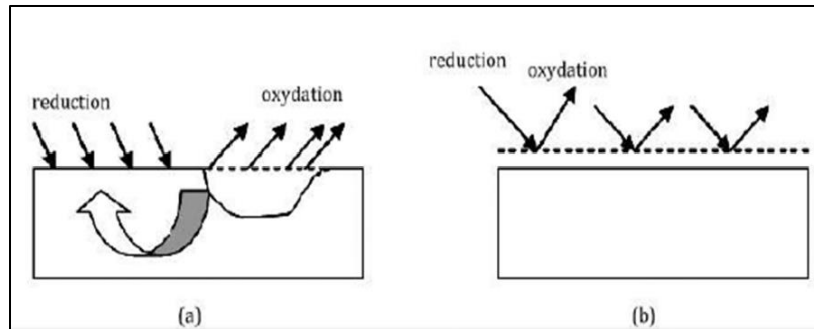
Pour qu'il y ait corrosion électrochimique, il faut quatre conditions fondamentales exigentes : une anode, une cathode, un environnement conducteur pour le mouvement ionique (électrolyte), et une connexion électrique entre l'anode et la cathode. Si l'un de ces éléments est manquant ou désactivé, la corrosion électrochimique ne peut se produire [22].

### I.5. Les différentes formes de corrosion

Il existe huit formes principales de corrosion qui représentent la grande majorité des problèmes de corrosion observés.

La corrosion uniforme ou générale se produit indépendamment de la microstructure du matériau et de la conception du composant. Elle dépend fortement des conditions environnementales et de la composition du matériau comme elle se produit généralement à un rythme lent.

Toutes les autres formes de corrosion sont localisées et dépendent des environnements, de la conception des composants et des systèmes, et/ou de la microstructure des matériaux. Ces formes produisent généralement des taux de corrosion plus élevés que la corrosion uniforme et, dans certains cas, peuvent être très rapides [24].



**Figure 1.** Types de corrosion : (a) corrosion localisée et (b) corrosion uniforme [25].

### I.5.1. Corrosion uniforme

Dans le cas de la corrosion uniforme, le métal est attaqué plus ou moins uniformément sur toute sa surface. Aucune partie de la surface du métal n'est attaquée plus préférentiellement que d'autres, et la pièce de métal est amincie par le processus de corrosion jusqu'à ce que la pièce soit complètement détruite. La corrosion du zinc dans l'acide chlorhydrique et la corrosion atmosphérique du fer ou de l'acier dans des environnements extérieurs agressifs en sont des exemples.

Dans ces cas, des anodes et des cathodes localisées existent et fonctionnent. Cependant, les positions de ces anodes et cathodes localisées sont différentes et changent avec le temps. Ils "dansent" sur toute la surface du métal de sorte que le métal est attaqué uniformément [17].

### I.5.2. Corrosion localisée

Dans le cas de la corrosion localisée, il existe également des anodes et des cathodes locales, mais leurs positions deviennent fixes, de sorte que la corrosion se produit sur des parties déterminées de la surface du métal [17].

#### I.5.2.1. Corrosion galvanique

La corrosion galvanique se produit lorsque des métaux ou des alliages dissemblables sont en contact électrique l'un avec l'autre et sont immergés dans une solution conductrice (il existe une différence de potentiel entre deux métaux dissemblables en contact dans une solution). Plus les métaux sont éloignés l'un de l'autre dans la série galvanique, plus la corrosion galvanique est importante.

La corrosion du matériau moins résistant à la corrosion (côté actif) augmente tandis que celle du matériau plus résistant à la corrosion (côté noble) diminue ; autrement dit, le matériau

moins résistant à la corrosion devient l'anode et le matériau plus résistant à la corrosion devient la cathode, ce qui conduit à la corrosion galvanique [26].

#### **I.5.2.2. Corrosion par piqûres**

La corrosion par piqûres en général est l'effet de la perte de la couche d'oxyde superficielle qui agit comme une couche protectrice. En raison de la présence de produits de corrosion, il est difficile d'observer la corrosion par piqûres. L'autre effet destructeur de ce mécanisme de corrosion est qu'il se développe localement et vers l'intérieur de la matrice métallique. [27].

La corrosion par piqûres a tendance à se produire sur les alliages passifs en présence d'espèces halogènes telles que les ions chlorure ( $\text{Cl}^-$ ), bromure ( $\text{Br}^-$ ) et iodure ( $\text{I}^-$ ) et HF. Ces espèces halogènes s'attaquent aux défauts des films passifs et cassent localement le film. Parce que l'amplitude de la réaction anodique à l'intérieur des fosses est équilibrée avec celle de la réaction cathodique à l'extérieur des fosses, une grande quantité d'ions métalliques est dissoute à l'intérieur des fosses. [28].

#### **I.5.2.3. Corrosion caverneuse**

La corrosion caverneuse résulte de l'emprisonnement d'eau ou d'autres liquides dans des zones localisées, en fonction de la conception du composant/système. Ces conceptions comprennent principalement les angles aigus, les fixations, les joints, les rondelles et les joints d'étanchéité [24].

La corrosion caverneuse et la corrosion par piqûres sont très similaires et se produisent généralement en présence d'ions halogénés, généralement du chlorure. La corrosion caverneuse commence généralement par la formation de piqûres. La principale différence entre la corrosion caverneuse et la corrosion par piqûres est que la corrosion caverneuse nécessite une zone physiquement occluse pour se développer. La prévention de la corrosion caverneuse est problématique, car il est difficile d'éliminer l'électrolyte des zones occluses [29].

#### **I.5.2.4. Corrosion intergranulaire**

La présence de grains d'un parcours anodisé au niveau des joints provoque une corrosion intergranulaire Continue (par rapport à la matrice). Elle a besoin d'hétérogénéités au niveau des joints de grains et d'un environnement corrosif pour pouvoir distinguer le comportement de l'intérieur du grain et de la zone de joint d'un point de vue électrochimique. En réalité, l'environnement est presque toujours un environnement chloré neutre.

L'action des ions chlorure agit comme une perturbation sur la rupture du film passif lors de l'amorçage et/ou sur la capacité de l'alliance à se recombinaison lors de la propagation [30].

### I.5.2.5. Corrosion érosion

L'érosion-corrosion est l'effet synergique des dommages mécaniques causés par l'impact du fluide sur le matériau et la corrosion chimique due à la réaction électrochimique causant la dégradation du métal/de l'alliage [31]. C'est une forme de corrosion localisée qui se produit le plus facilement dans les flux multiphasiques, tels que le pétrole, les tuyaux, le gaz et la distillation multi-effet à basse température. Le mécanisme de l'érosion-corrosion a fait l'objet de nombreux travaux [32].

### I.5.2.6. La fissuration par corrosion sous contrainte (FCC)

La fissuration par corrosion sous contrainte (FCC) est définie comme la croissance de fissures due à l'action simultanée d'une contrainte (nominalement statique et de traction) et d'un environnement réactif. La fissuration par corrosion sous contrainte est le résultat des interactions combinées et synergiques des contraintes mécaniques et des réactions de corrosion/oxydation [33].

### I.5.2.7. Corrosion sélective

Cette forme de corrosion est observée dans les alliages où un élément est nettement moins noble que les autres. Le mécanisme de corrosion implique que l'élément le moins noble est éliminé du matériau. Il en résulte un matériau poreux dont la résistance et la ductilité sont très faibles.

Les zones sélectivement corrodées sont parfois recouvertes de produits de corrosion ou d'autres dépôts, et comme le composant conserve exactement sa forme d'origine, les attaques peuvent être difficiles à découvrir [34].

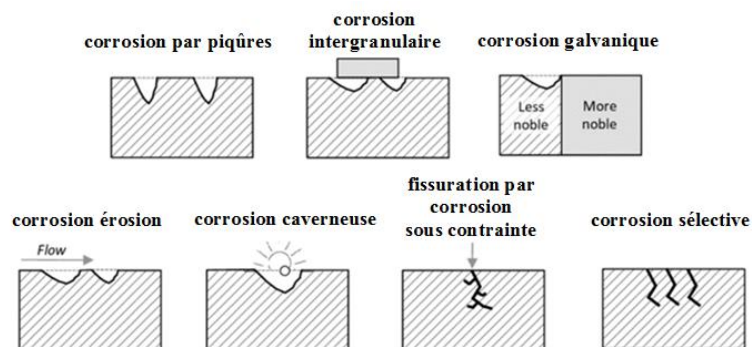


Figure 2. Les formes de corrosion localisée [35].

## I.6. Facteurs de la corrosion

Les phénomènes de corrosion sont influencés par un grand nombre de facteurs, que l'on peut classer en quatre grands groupes comme le montre le tableau ci-dessous [36].

**Tableau 1.** Facteurs de la corrosion.

<b>Facteurs définissant le mode d'attaque</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Concentration du réactif</li> <li>- Teneur en oxygène</li> <li>- PH du milieu</li> <li>- Addition d'inhibiteurs</li> <li>- Pression</li> </ul>
<b>Facteurs métallurgiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Composition de l'alliage</li> <li>- Procédé d'élaboration</li> <li>- Impuretés</li> <li>- Traitements thermiques</li> <li>- Traitements mécaniques</li> <li>- Addition protectrice</li> </ul>
<b>Facteurs définissant les conditions d'emploi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Etat de surface</li> <li>- Forme des pièces</li> <li>- Sollicitations mécaniques</li> <li>- Emploi d'inhibiteurs</li> <li>-procédés d'assemblage</li> </ul>
<b>Facteurs dépendants du temps</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vieillessement</li> <li>- Tension mécanique</li> <li>- Température</li> <li>- Modification des revêtements protecteurs</li> </ul>

## I.7. La protection/prévention contre la corrosion

Différentes stratégies peuvent être employées pour protéger le matériau de la corrosion, en agissant sur le matériau lui-même et sur l'environnement chimique :

- Modification du design,
- Le choix judicieux des matériaux,
- L'utilisation des revêtements,
- La protection électrochimique,
- L'ajout d'inhibiteurs dans l'environnement corrosif [37].

### **I.7.1. Modification du design**

Une conception appropriée d'un composant peut être utilisée pour prévenir/retarder la corrosion. Par exemple, il est important de minimiser les zones où l'eau peut être piégée et s'accumuler, ce qui entraîne une corrosion localisée. Le fait de percer des trous dans les structures pour assurer un drainage adéquat peut contribuer à résoudre ce problème.

Une autre stratégie de conception consiste à ne pas utiliser le bois, le papier, le carton, les mousses à cellules ouvertes et les caoutchoucs éponges dans les environnements très humides, car ils absorbent l'humidité et déclenchent la corrosion des pièces métalliques. Un moyen de prévenir la corrosion galvanique dans les structures est d'isoler les métaux/alliages dissemblables en utilisant des revêtements à leur interface. L'élimination des angles vifs peut être bénéfique pour réduire la corrosion par crevasses.

Il est essentiel de minimiser les zones inaccessibles afin qu'elles soient facilement accessibles pour le nettoyage et l'entretien [38].

### **I.7.2. Choix des matériaux**

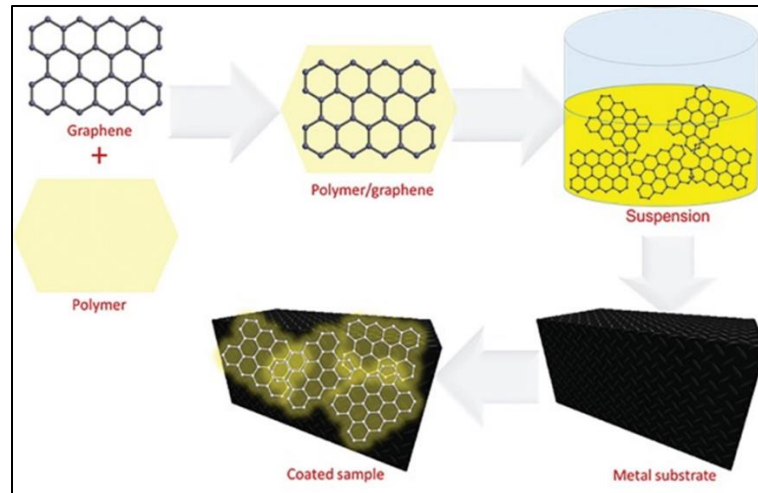
L'une des approches les plus efficaces pour la protection contre la corrosion est de choisir des métaux/alliages qui ne sont pas réactifs ou qui forment une couche Passive. Par exemple, l'ajout de plus de 12 % de Cr augmente la résistance à la corrosion de l'acier en raison de la formation d'un film passif stable. Le titane et ses alliages contenant du molybdène sont plus résistants à la corrosion que les aciers inoxydables conventionnels.

La présence d'azote dans les alliages contenant du molybdène est également favorable à la résistance à la corrosion [38].

### **I.7.3. Les revêtements**

Grâce à l'application des revêtements, la corrosion est évitée par l'un des trois mécanismes principaux suivants ou par la combinaison de deux d'entre eux :

- I. Effet de barrière, où tout contact entre le milieu corrosif et le matériau métallique est empêché.
- II. Protection cathodique : le matériau de revêtement agit comme une anode sacrificielle.
- III. Inhibition/passivation, y compris les cas de protection anodique [39].

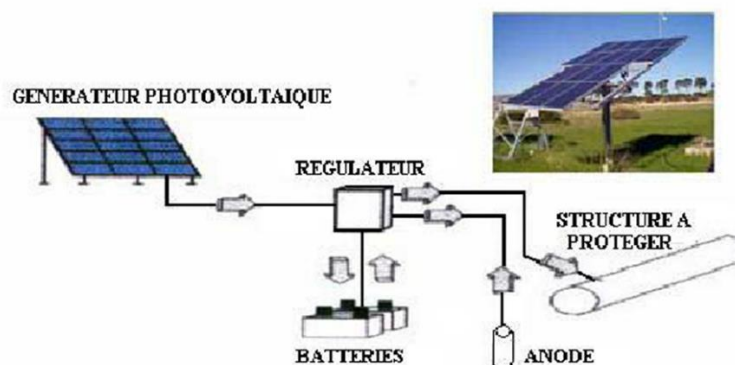


**Figure 3.** Procédé de revêtement de feuilles de polymère/graphène [40].

#### I.7.4. Protection cathodique (protection électrochimique)

Les matériaux susceptibles de se corroder peuvent parfois faire l'objet d'une protection cathodique. Cette méthode est utilisée avec succès pour réduire ou éliminer la corrosion dans une variété de structures métalliques, qu'elles soient submergées ou exposées, y compris les pipelines, les cuves, les coques de navires, les plates-formes offshore, les portes d'éviction, etc. Afin de prévenir le développement de ce type de corrosion, le matériau à protéger est polarisé à un potentiel inférieur à son potentiel d'oxydation en utilisant soit une source de courant externe (protection par courant forcé), soit une anode sacrifiée (protection par anode sacrifiée).

Cette dernière méthode est facile à mettre en œuvre, nécessite peu d'entretien, mais requiert un investissement important pour protéger de grandes installations en raison de son champ d'application restreint [41].



**Figure 4.** Système de la protection cathodique alimenté par énergie solaire photovoltaïque [42].

## I.8. Généralité sur les inhibiteurs de la corrosion

### I.8.1. Définition

Un inhibiteur de corrosion est un produit chimique (molécule organique ou inorganique) qui est ajouté en petites quantités à un environnement liquide corrosif généralement. Plus rarement, un environnement gazeux, et qui sert à protéger le métal de la corrosion en restaurant une barrière isolante locale ou totale à l'environnement corrosif [43].

Ils modifient les réactions électrochimiques par leur action sur l'électrolyte à l'interface métal/électrolyte, entravant et/ou réduisant la vitesse de la réaction anodique (inhibiteurs anodiques), cathodique (inhibiteurs cathodiques) ou les deux (inhibiteurs mixtes).

En général, les inhibiteurs se caractérisent par leur capacité à bloquer/altérer le circuit électrochimique formé par le système agressif [44]. La performance d'un inhibiteur de corrosion est liée à la structure chimique et aux propriétés physicochimiques du composé, comme les groupes fonctionnels, la densité électronique au niveau de l'atome donneur, le caractère de l'orbitale p et la structure électronique de la molécule [45].

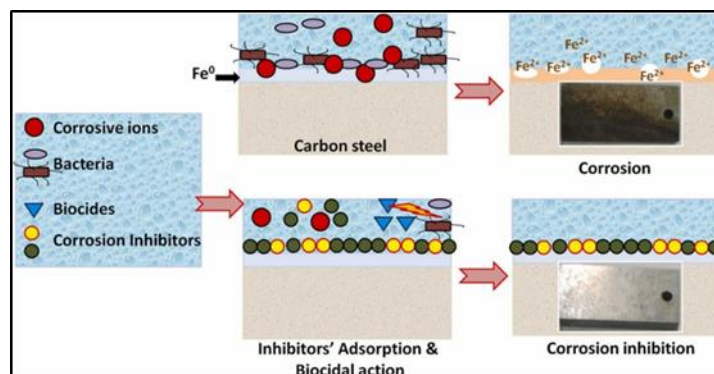


Figure 5. Protection de l'acier au carbone par les inhibiteurs de corrosion [46].

### I.8.2. Propriétés des inhibiteurs

En dehors de tout mécanisme d'action, un inhibiteur de corrosion doit vérifier un certain nombre de propriétés fondamentales :

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

- Être peu onéreux pour espérer déboucher sur des valorisations industrielles [47] .

Utilisation des inhibiteurs concerne quatre types d'environnements différents :

- Les eaux naturelles, les eaux d'approvisionnement, les eaux de refroidissement statique dans la plage de pH proche de la neutralité,
- Solutions acides aqueuses utilisées pour le décapage des métaux, le nettoyage après service, des surfaces métalliques,
- Production primaire et secondaire de pétrole et raffinage,
- Environnements divers [48] .

### I.8.3. Conditions d'utilisation

- Un inhibiteur (ou une combinaison d'inhibiteurs) peut être utilisé comme seul moyen de Protection de deux manières :

Soit de manière permanente, en permettant l'utilisation de métaux (tels que les alliages ferreux non alliés) dans des conditions de résistance à la corrosion ; dans ce cas, une surveillance de l'installation est nécessaire ; soit de manière temporaire, en protégeant une structure ou une installation pendant qu'elle est particulièrement sensible à la corrosion.

- Un inhibiteur (ou un mélange d'inhibiteurs) peut être ajouté à une autre forme de Protection, telle qu'une protection anticorrosion supplémentaire pour l'acier à haute résistance, ou une couche superficielle de peinture, de graisse ou d'huile, etc... [49].

### I.8.4. Classification des inhibiteurs

Les inhibiteurs de corrosion ont été classés selon plusieurs types :

- Selon leur composition chimique :

- Inhibiteurs organiques,
- Inhibiteurs inorganiques (minéraux),

- Selon leur mode d'action :

- Inhibiteurs d'adsorption,
- Inhibiteurs passivants (ils forment des films de passivation).

- Selon la nature électrochimique du processus :

- Inhibiteurs anodiques,
- Inhibiteurs cathodiques,
- Inhibiteurs mixtes [50].

➤ En fonction du domaine d'application, il existe différents inhibiteurs, tels que ceux pour les environnements acides, les environnements neutres, les peintures, les gaz, etc... [20].

#### I.8.4.1. Selon leur composition chimique

##### ➤ Inhibiteurs Organique

Les composés organiques agissent comme des inhibiteurs cathodiques, anodiques et mixtes [51].

Les inhibiteurs de corrosion organiques agissent par adsorption sur la surface du métal par l'intermédiaire d'un groupe polaire, puis forment une couche organique qui peut ralentir le processus anodique ou cathodique [52].

Ces composés se sont révélés très efficaces pour inhiber la corrosion aqueuse en raison de la formation d'un film sur la surface du métal. L'action inhibitrice des composés organiques est attribuée aux interactions avec les surfaces métalliques par adsorption. La fonction polaire est souvent considérée comme le centre de réaction pour l'établissement du processus d'adsorption [53].

Les inhibiteurs de corrosion organiques utilisent la paire d'électrons solitaires des hétéroatomes pour couvrir les surfaces métalliques en formant des liaisons de type coordonné avec les orbitales d vacantes du métal. L'augmentation de l'efficacité de l'inhibition dans l'ordre  $O < N < S < P$  signifie la plus grande polarisabilité des paires solitaires dans les éléments de la troisième période, ce qui en fait de meilleurs inhibiteurs [54].

Les facteurs suivants influencent l'efficacité des inhibiteurs organiques :

- La taille de la molécule organique,
  - L'aromaticité et/ou la liaison conjuguée,
  - La longueur de la chaîne de carbone,
  - La force de liaison avec le substrat métallique,
  - Le type et le nombre d'atomes ou de groupes de liaison dans la molécule,
  - La capacité d'une couche à devenir compacte ou réticulée,
  - La capacité de former un complexe avec l'atome en tant que solide dans le réseau métallique,
- [55].

##### ➤ Inhibiteurs inorganiques

Outre les inhibiteurs de corrosion organiques, les molécules inorganiques et les sels inorganiques sont également considérés comme des inhibiteurs dans la prévention de la

corrosion des surfaces métalliques. De nombreux complexes, ions et sels inorganiques ont été utilisés avec succès contre la corrosion des surfaces métalliques dans différents environnements corrosifs [56]. Les inhibiteurs de corrosion inorganiques empêchent la corrosion par la réaction des parties anodiques et cathodiques du système [57].

L'utilisation des inhibiteurs minéraux est souvent limitée aux environnements neutres ou alcalins. Ils ont souvent des produits de dissociation (anion ou cation) qui sont des inhibiteurs de corrosion efficaces. Le chromate, le phosphate, le molybdate, le nitrate, le nitrite, le silicate, etc. sont des exemples d'anions qui agissent comme des inhibiteurs, tandis que  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Zn}^{2+}$  sont les deux principaux cations qui agissent comme des inhibiteurs.

En raison de leur toxicité, les inhibiteurs minéraux sont de moins en moins utilisés. Leur utilisation est limitée à des systèmes spécifiques en circuit fermé [58].

#### I.8.4.2. Selon leur mode d'action

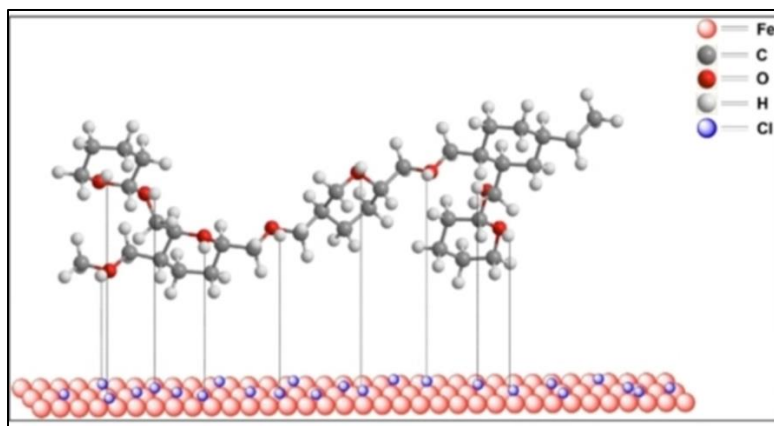
##### ➤ Inhibiteurs d'adsorption

L'adsorption des inhibiteurs sur les surfaces métalliques se produit par le biais d'interactions donneur-accepteur (physiques, chimiques ou mixtes) [51].

Les inhibiteurs organiques sont adsorbés sur la surface des métaux soit par physisorption, soit par chimisorption [59].

##### • Adsorption physique

L'adsorption physique est due aux forces de Van der Waals ou aux forces électrostatiques entre la charge ionique ou les dipôles de l'espèce inhibitrice et la surface du métal chargée électriquement.[60] .



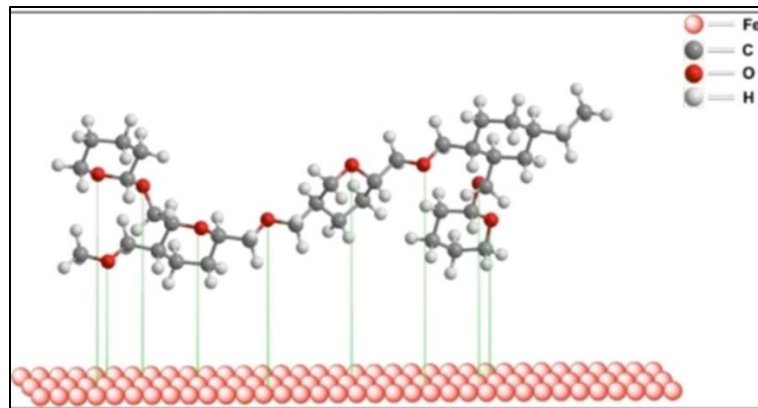
**Figure 6.** Un mécanisme proposé pour une physisorption d'un polysaccharide [61].

- **Adsorption chimique**

L'adsorption chimique est un mécanisme qui se produit plus fréquemment que celui de la physisorption et qui entraîne une plus grande efficacité de l'inhibiteur. Il provoque un transfert électronique entre les orbitales du métal et la molécule inhibitrice, ce qui entraîne le développement de liaisons chimiques stables.

Chaque métal connaît un phénomène unique et irréversible appelé chimisorption. Il s'agit d'un processus rapide qui dépend de la température et se caractérise par une énergie d'activation importante.

Un moindre couplage atome-atome augmente la tendance à une forte adsorption ; par conséquent, plus les atomes fonctionnels ont tendance à établir des liaisons avec le métal en donnant facilement des électrons, plus les inhibiteurs sont efficaces. Par conséquent, l'efficacité de l'inhibition augmente avec la réduction de l'électronégativité d'un groupe de molécules organiques qui ne diffèrent que par leurs atomes fonctionnels. L'efficacité de l'inhibition augmente dans l'ordre suivant :  $O < N < S < Se < P$  [60].



**Figure 7.** Un mécanisme proposé pour une chimisorption d'un polysaccharide [61].

Il a été suggéré que les molécules adsorbées physiquement se lient au métal au niveau des cathodes locales et que la dissolution du métal est retardée lorsque la réaction cathodique est empêchée, tandis que les molécules adsorbées chimiquement protègent les zones anodiques [62].

➤ **Inhibiteurs passivants**

Ce type d'inhibiteurs forme des films de passivation tridimensionnels entre la surface corrodée et les molécules d'inhibiteur. Inhibition „d'interphase” est également un nom donné à ce type d'inhibition. Ils sont également incorporés dans les couches barrières et ainsi ces

molécules inhibitrices conduisent à des réseaux homogènes et denses présentant de fait une faible porosité et une bonne stabilité

Il existe deux types d'inhibiteurs passifs : les ions oxydants, comme ceux qui peuvent oxyder passivement le fer ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ), et les ions non oxydants, qui nécessitent la présence d'oxygène et déplacent la réaction de réduction cathodique en favorisant son adsorption à la surface du métal ( $\text{MoO}_4^{2-}$ ,  $\text{WO}_4^{2-}$  ...).

Tous ces ions se consomment lentement, c'est pourquoi, lors de l'utilisation de ces inhibiteurs, il est nécessaire de vérifier périodiquement la concentration du circuit. La concentration requise pour un inhibiteur passif, qui se situe généralement entre  $10^{-3}$  et  $10^{-4}$  mol/L, dépend en fait d'un certain nombre de variables, notamment la température, le pH, la présence d'ions qui peuvent réduire ou augmenter l'activité, tels que les ions  $\text{Cl}^-$  ou  $\text{S}^{2-}$  [50].

#### **I.8.4.3. Selon la nature électrochimique du processus**

##### **➤ Inhibiteurs anodique (passivants)**

Un inhibiteur anodique augmente la polarisation anodique et déplace donc le potentiel de corrosion vers la direction cathodique, d'où son nom d'inhibiteur de passivation. Les inhibiteurs anodiques tels que les chromates, les phosphates, les tungstates et autres ions d'éléments de transition à forte teneur en oxygène sont ceux qui étouffent la réaction de corrosion se produisant à l'anode en formant un composé peu soluble avec un ion métallique nouvellement produit. Ils sont adsorbés sur la surface du métal et forment un film protecteur ou une barrière, réduisant ainsi la vitesse de corrosion. Les inhibiteurs anodiques forment une fine pellicule protectrice le long de l'anode et augmentent leur potentiel, ce qui ralentit la réaction de corrosion.

Bien que ce type de contrôle soit efficace, il peut s'avérer dangereux car une attaque locale grave peut se produire si certaines zones ne sont pas protégées en raison de l'épuisement des inhibiteurs. Un certain nombre d'inhibiteurs inorganiques tels que les orthophosphates, les silicates, etc. relèvent du type anodique. Bien que les inhibiteurs anodiques soient largement utilisés, certains d'entre eux présentent des propriétés indésirables. Si ces inhibiteurs sont utilisés à de très faibles concentrations, ils provoquent une stimulation de la corrosion telle que la formation de piqûres, c'est pourquoi les inhibiteurs anodiques sont considérés comme dangereux.

Il existe deux types d'inhibiteurs passivant :

- Les anions oxydants tels que les chromates, les nitrites et les nitrates qui peuvent passiver l'acier en l'absence d'oxygène.

- Les ions non oxydants tels que les phosphates, les tungstates et les molybdates qui nécessitent la présence d'oxygène pour passiver l'acier.

En général, les inhibiteurs de passivation peuvent en fait provoquer des piqûres et accélérer la corrosion lorsque les concentrations sont inférieures aux limites minimales. C'est pourquoi il est essentiel de surveiller la concentration des inhibiteurs [63].

#### ➤ **Inhibiteurs cathodiques**

Les inhibiteurs cathodiques ralentissent la corrosion en réduisant la vitesse des réactions cathodiques dans l'environnement de corrosion. Un inhibiteur cathodique provoque la formation de composés insolubles qui précipitent sur les sites cathodiques sous la forme d'un film barrière. Ces inhibiteurs sont appelés inhibiteurs de précipitation. Les sels de zinc et de magnésium sont des inhibiteurs cathodiques qui forment des précipités d'hydroxyde de zinc et d'hydroxyde de magnésium à la cathode. Les phosphates précipitent sous forme de phosphates ferreux et ferriques sur le substrat d'acier. Les inhibiteurs cathodiques ne sont pas aussi efficaces que les inhibiteurs anodiques, mais ils ne sont pas susceptibles de provoquer des piqûres [64].

#### ➤ **Inhibiteurs mixtes**

Les inhibiteurs mixtes bloquent les réactions anodiques et cathodiques et réduisent le taux de corrosion en formant un mince film hydrophobe protecteur sur toute la surface du métal par le biais d'un mécanisme d'adsorption [65]. Les matériaux dotés d'un groupe hydrophobe et de groupes polaires, tels que N, S et OH, sont efficaces. Ces inhibiteurs sont appelés inhibiteurs d'adsorption ou inhibiteurs formant un film [66].

L'efficacité du film dépend de la composition chimique, de la structure moléculaire et de leur affinité pour la surface du métal. Les inhibiteurs cationiques, tels que les amines, et les inhibiteurs anioniques, tels que les sulfonates, sont adsorbés sur la surface du métal, qu'elle soit chargée positivement ou négativement. La force de la liaison est le facteur dominant pour les inhibiteurs organiques. Les inhibiteurs organiques peuvent également agir comme des bloqueurs de pores, réduisant la perméabilité du béton. Les amines et les aminoalcools sont les inhibiteurs mixtes couramment utilisés, qui déplacent l'ion chlorure et forment un film passivant durable [67].

#### **I.8.4.4. Selon le domaine d'application**

Il existe de nombreux types d'inhibiteurs différents ; nous avons mentionné deux exemples ci-dessous :

➤ **Phase gazeuse : inhibiteurs de corrosion volatils**

Les inhibiteurs de corrosion volatils sont des molécules de gaz utilisées comme inhibiteurs de corrosion. Ils sont destinés à la protection temporaire des matériaux métalliques placés dans l'atmosphère, essentiellement en condition de stockage ou de transport. Leur utilisation se fait soit sous forme de papiers d'emballage imprégnés de produit soit sous forme de poudre ou par pulvérisation d'une solution (solvant volatil).

Les inhibiteurs en phase vapeur (IPV) ou inhibiteurs de corrosion volatils (ICV) sont les sels de base à faible teneur en azote (cyclohexylamine, dicyclohexylamine, guanidine), et les acides faibles (acide nitreux, acide carbonique, acide benzoïque). La partie organique assure la volatilité et un certain pouvoir protecteur, et la partie inorganique ajuste la volatilité, qui doit correspondre à la température de la pièce [68].

➤ **Inhibiteurs pour milieux acide**

Les solutions acides aqueuses provoquent une grave corrosion des métaux et des alliages. Des composés organiques tels que les hydrocarbures à triple liaison, les alcools acétyléniques, les sulfoxydes, les sulfures, les mercaptans et les composés aliphatiques, aromatiques ou hétérocycliques contenant de l'azote et du soufre, ainsi que de nombreuses autres familles de composés organiques simples, peuvent être ajoutés à l'électrolyte métallique en tant qu'inhibiteurs afin de réduire l'effet corrosif [69].

### **I.8.5. Les inhibiteurs verts**

Un certain nombre de composés hétérocycliques avec N, S et O comme hétéroatomes se sont révélés être des inhibiteurs de corrosion efficaces [70], et le criblage de composés hétérocycliques synthétiques est toujours en cours. Bien que de nombreux composés synthétiques aient montré de bonnes anticorrosion, la plupart d'entre eux sont très toxiques pour l'homme et l'environnement.

Les questions de sécurité et d'environnement liées aux inhibiteurs de corrosion dans l'industrie ont toujours été au centre des préoccupations mondiales. Ces inhibiteurs peuvent causer des dommages réversibles (temporaires) ou irréversibles (permanents) à des organes tels que les reins ou le foie, ou perturber un processus biochimique d'un système enzymatique à un endroit donné de l'organisme. La toxicité peut se manifester soit pendant la synthèse du composé ou lors de son application.

Ces effets toxiques ont conduit à l'utilisation de produits naturels comme agents anticorrosion, qui sont respectueux de l'environnement et inoffensifs [71]. Les inhibiteurs de corrosion verts sont entièrement composés de substances chimiques naturelles.

Ces inhibiteurs de corrosion sont biodégradables, respectueux de l'environnement, rentables, renouvelables et ne contiennent pas de métaux lourds ou d'autres composés toxiques [72].

### I.8.5.1. Les polyphénols comme inhibiteurs de corrosion

Il existe des recherches anciennes dans lesquelles divers scientifiques et ingénieurs ont utilisé les produits dérivés de la plante tels que la racine, le fruit, la fleur, la tige et la gomme en tant qu'inhibiteurs de corrosion verts [73].

Parmi les différents types d'inhibiteurs, les polyphénols sont apparus comme des candidats prometteurs en raison de leurs caractéristiques avantageuses, notamment leur faible coût, leur biodégradabilité, leur caractère renouvelable et, surtout, leur innocuité pour l'environnement et l'homme [74].

On suppose qu'un certain nombre de groupes OH autour de la molécule les incite à former des liens étroits avec l'hydrogène et à former des complexes avec les métaux. Les complexes provoquent des blocages des micro-anodes et/ou des micro-cathodes et retardent ainsi la dissolution ultérieure du métal. Une autre suggestion est l'adsorption des polyphénols sur les métaux en raison de la présence d'interactions donneur-accepteur entre les électrons  $\pi$  de l'anneau aromatique et l'orbitale d vacante des atomes de métal de surface [75].

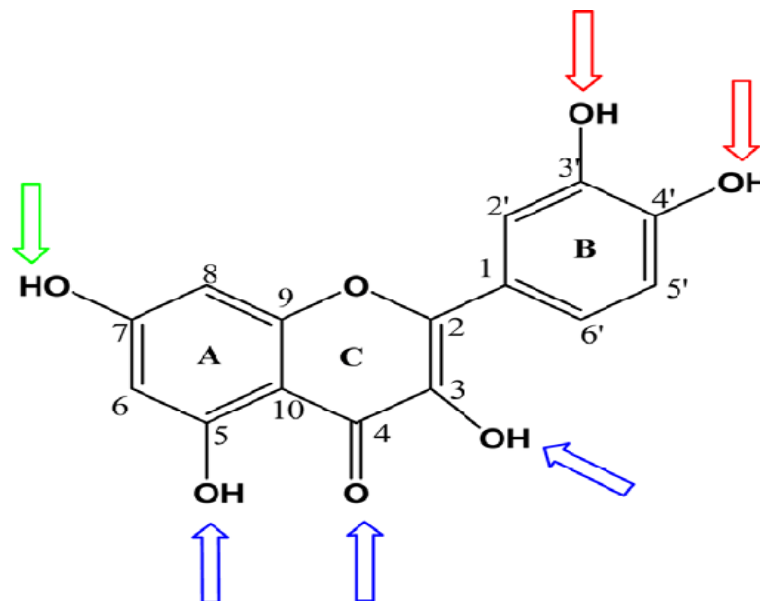
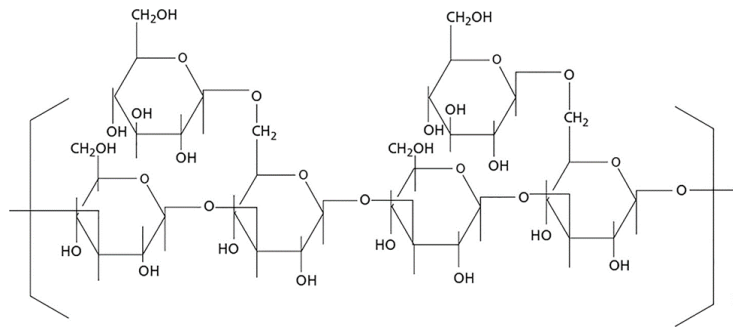


Figure 8. Structure typique d'un aglycone de polyphénol [76].

### I.8.5.2. Les Polysaccharides comme inhibiteurs de corrosion

Les polysaccharides sont des polymères naturels qui sont respectueux de l'environnement, biodégradables, peu coûteux et stables, ce qui explique qu'ils soient utilisés comme inhibiteurs de corrosion des métaux. Ils sont peu coûteux, renouvelables et facilement disponibles et contiennent des groupes OH, des hétéroatomes et des longueurs de chaîne alkyle, ce qui leur permet de se déposer facilement sur la surface du métal [77].

De nombreux chercheurs ont également étudié la distribution des groupes fonctionnels des polysaccharides de gomme par analyse FT-IR. Les principaux groupes représentés selon les études rapportées sont -OH, -C=O, -C-O, C\H et -CH<sub>2</sub> [78]. Certaines études ont également signalé la présence de CH<sub>3</sub> [79], -COO, -C-C-O et -C-O-C [80].



**Figure 9.** Structure du  $\beta$ -glucane dans le polysaccharide de *Ganoderma lucidum* [81]

#### ➤ Mécanisme d'adsorption des polysaccharides

Les polysaccharides et leurs dérivés sont des composés organiques non polluants utilisés comme inhibiteurs de corrosion efficaces [82]. Ces matériaux organiques présents dans la solution corrosive sont adsorbés sur la surface du métal par liaison physique (physisorption) ou chimique (adsorption chimique). Ces inhibiteurs organiques réduisent leur taux de résolution anodique en couvrant toute la surface du métal ou en empêchant la réaction cathodique en bloquant le site actif de la surface du métal de sorte que la surface du métal n'est pas endommagée ou dégradée de quelque manière que ce soit [83].

De cette manière, le polymère est déposé sur la surface métallique comme un bloqueur, dans lequel les molécules corrosives ne peuvent pas attaquer. L'efficacité de l'inhibition de la corrosion par les polysaccharides dépend des différents types de molécules inhibitrices. Certaines molécules ont un plus grand nombre d'anneaux cycliques, d'autres ont des groupes fonctionnels et des longueurs de chaîne alkyle, et d'autres encore ont des groupes sulfonates et carboxyliques [84]. Outre le groupe volumineux dans la molécule inhibitrice, la présence d'une paire d'électrons non partagée et d'une liaison  $\pi$  étendue fait de la molécule organique un inhibiteur de corrosion efficace.

Les molécules inhibitrices qui ont des valeurs  $\Delta G$  inférieures à  $-20 \text{ kJ/mol}$  relèvent de la physisorption et les valeurs  $\Delta G$  allant jusqu'à  $-40 \text{ kJ/mol}$  sont ajustées à la surface du métal par adsorption chimique. La nature de l'inhibiteur représentant la valeur d' $\Delta G$  entre les deux sont considérée comme un type mixte [85]

## I.9. Les méthodes d'évaluation de la corrosion

Les méthodes les plus courantes sont : la gravimétrie qui est une méthode très ancienne de mesure directe, les méthodes électrochimiques stationnaires (courbe de polarisation) est les méthodes électrochimiques transitoires parmi lesquelles les mesures d'impédances électrochimiques.

### I.9.1. Méthode gravimétrique

Cette méthode présente l'avantage d'être d'une mise en œuvre simple, de ne pas nécessiter un appareillage important, mais ne permet pas l'approche des mécanismes mis en jeu lors de la corrosion. le principe de cette méthode repose sur la mesure de la perte de masse  $\Delta m$  subie par un échantillon de surface  $S$ , pendant le temps  $t$  d'immersion dans une solution corrosive maintenue à température constante [86].

### I.9.2. Méthodes électrochimiques

Les méthodes électrochimiques utilisées permettant l'étude du phénomène de corrosion selon :

#### I.9.2.1. Les courbes de polarisation

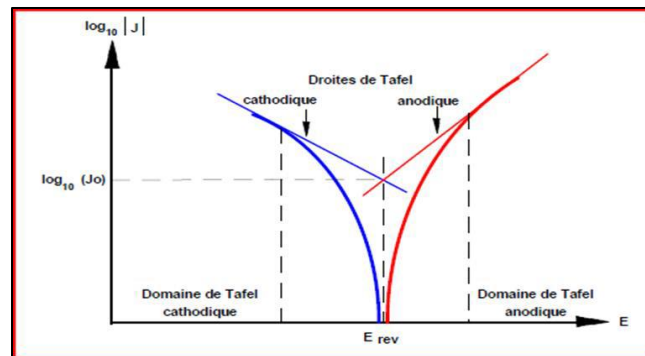
La courbe de polarisation de l'interface métal-solution est une caractéristique fondamentale de la cinétique électrochimique, mais ne rend compte que de l'étape la plus lente du processus global à l'interface électrochimique. Pour déterminer une courbe de polarisation potentiostatique, on applique à l'aide d'un potentiostat, différents potentiels entre l'électrode de travail et une électrode de référence. On mesure le courant stationnaire qui s'établit après un certain temps dans le circuit électrique entre cette électrode de travail et une contre-électrode.

Le potentiostat est programmé pour balayer automatiquement le potentiel à une vitesse choisie [87].

Cette méthode permet de déterminer d'une façon précise les paramètres électrochimiques d'un métal au contact de l'électrolyte à savoir : la densité de courant de corrosion ( $I_{\text{corr}}$ ), le

potentiel de corrosion ( $E_{\text{corr}}$ ), les pentes de Tafel, les résistances de polarisations ( $R_p$ ), les courants limites de diffusion. Elle donne des mesures rapides et sa mise en œuvre est relativement simple. La détermination de la vitesse de corrosion à partir des courbes de polarisation est étroitement liée à la cinétique régissant le processus électrochimique [87],[88]

Pour déterminer expérimentalement les paramètres électrochimiques ( $I_{\text{corr}}$ ,  $E_{\text{corr}}$ ) une présentation logarithmique de la densité de courant est en général préférable, car elle met en évidence la relation linéaire entre le logarithme de la densité de courant et le potentiel (**Figure 10**) [89].

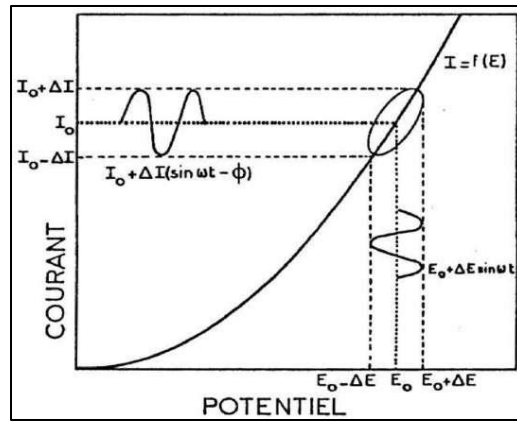


**Figure 10.** Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel [89].

### I.9.2.2. Spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE)

La mesure de l'impédance électrochimique consiste à étudier la réponse du système électrochimique, suite à une perturbation qui est, le plus souvent, un signal alternatif de faible amplitude. Elle présente plusieurs avantages. Elle permet la détermination précise de la vitesse de corrosion même dans le cas où le métal est recouvert d'une couche protectrice [90]. Elle permet aussi l'évaluation du taux d'inhibition, la caractérisation des différents phénomènes de corrosion (dissolution, passivation, piqûration, ...) et l'étude des mécanismes réactionnels à l'interface électrochimique [91].

Son principe consiste à superposer au potentiel de l'électrode une modulation de potentiel sinusoïdale de faible amplitude et à suivre la réponse en courant pour différentes fréquences du signal perturbateur. La réponse en courant est également sinusoïdale, superposée à un courant stationnaire mais déphasée d'un angle  $\phi$  par rapport au potentiel. Inversement, un courant peut être imposé et le potentiel enregistré (**Figure 11**).



**Figure 11.** Schéma d'un système électrochimique non linéaire soumis à une perturbation sinusoïdale [92] ,[93]

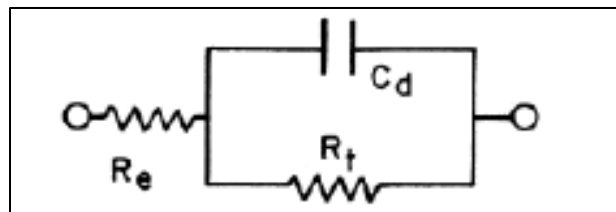
L'impédance  $Z(\omega)$  est un nombre complexe caractérisé par son module  $|Z|$  et sa phase  $\phi$ . En utilisant sa partie réelle  $Z_{Re}$  et sa partie imaginaire  $Z_{Im}$ , ce nombre peut s'écrire sous la forme de l'équation suivante avec  $j = \sqrt{-1}$

$$Z(\omega) = |Z| (j\phi) = Z_{Re} + j.Z_{Im}$$

$$|Z| = (Z_{Re}^2 + Z_{Im}^2)^{1/2}$$

$$\phi = \arctan (Z_{Im}/Z_{Re})$$

La technique d'impédance électrochimique permet entre autres de déterminer la valeur de la résistance de l'électrolyte. En effet, la réponse d'une électrode en contact avec un électrolyte est souvent représentée par un circuit simplifié ou circuit de Randles [94] . (**Figure 12**).



**Figure 12.** Circuit électrique équivalent d'un système électrochimique (Circuit de Randles) [94].

Le circuit de Randles est constitué de la résistance électrolytique  $R_e$  en série avec la combinaison parallèle d'une capacité de double couche  $C_d$  (décrite par le modèle de Gouy-Chapman-Stern) et de la résistance de transfert de charge de la réaction de corrosion  $R_t$  qui peut être assimilée à la résistance de polarisation  $R_p$ .

L'impédance est alors donnée par l'équation :

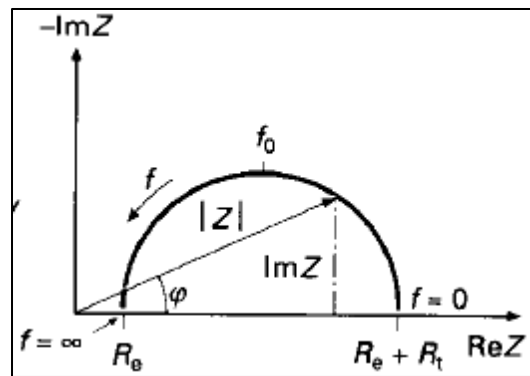
$$Z = R_e + (R_p / 1 + j \omega C_d R_p)$$

$$\omega = 2\pi f \text{ (f étant la fréquence)}$$

Il existe deux modes de représentation des diagrammes d'impédance électrochimique. Ils peuvent être tracés en coordonnées cartésiennes dans le plan complexe de Nyquist en plaçant les valeurs  $Z_{Re}(\omega)$  en abscisse et  $-Z_{Im}(\omega)$  en ordonnée, ou en mode de Bode ; dans ce cas, le module de l'impédance  $|Z|$  (représenté en échelle logarithmique) et le déphasage  $\phi$  sont tracés en fonction de la fréquence, elle est aussi représentée en échelle logarithmique.

Les mesures d'impédance sont souvent présentées dans le plan complexe de Nyquist (**Figure 13**). L'exploitation du diagramme de la **Figure 13** obtenu à partir de l'expression de l'impédance électrochimique donne accès à plusieurs paramètres représentatifs du système :

- La résistance de l'électrolyte ( $R_e$ ) est la limite à hautes fréquences (high intercept),
- la résistance de transfert de charges ( $R_t$ ), est obtenue par l'interception du cercle basse fréquence avec l'axe des réels ( $Z_{Re}$ ) (low intercept [94]).



**Figure 13.** Représentation schématique d'un diagramme d'impédance de Nyquist d'un système électrochimique [94].

Chapitre II

Généralités sur les espèces  
étudiées

## Introduction

La nature est pleine de ressources aux vertus bénéfiques pour l'homme [95], depuis le début de l'histoire, les plantes et les produits végétaux ont été la principale source d'alimentation, de santé et de bien-être, d'abri et de matériel de transport, de vêtements, de parfums, d'eau et d'énergie [96].

Ces dernières années, un grand intérêt a été consacré au développement de nouvelles applications des gommages naturelles. Ces polymères sont préférés aux polymères synthétiques et semi-synthétiques car ils sont non toxiques, moins chers, biodégradables et largement disponibles.

Malgré la description bien fournie dans la littérature pour les caractéristiques des gommages végétales, il y a un manque distingué des différentes familles productrices de gommages et leurs applications potentielles. Parmi ces gommages, celles produites par la famille des *Rosacées* (ex : amandiers, abricotiers, cerisiers, pêches, et pruniers) et *Burseraceas* ont fait l'objet d'une attention particulière.

### II.1. La famille *Rosacées*

Les 3000 espèces de *Rosacées* sont présentes pratiquement partout dans le monde, mais c'est dans les régions tempérées de l'hémisphère nord qu'elles sont les plus nombreuses. Une *Rosacée* peut ne pas être immédiatement reconnue en raison de la remarquable variété de ses caractéristiques végétatives et florales. Enfin, cette famille se distingue par la grande variété de ses fruits. Elle occupe une place importante dans les assemblages de fruits alimentaires, tant sur les vergers que dans nos jardins en raison des qualités ornementales de ses espèces.

Les *Rosacées* comprennent toutes les formes végétatives connues ; certaines sont herbacées, comme les Fraisiers, remarquables par leurs stolons rampants ; d'autres sont arbustives, comme les Rosiers, les Ronces et les Framboisiers. Leurs poils épidermiques épais et lignifiés se transforment en aiguilles pointues et tortueuses. Cette nature épidermique est facilement identifiable car les aiguilles se séparent facilement de la tige tout en entrant fréquemment dans les lambeaux épidermiques.

Enfin, de nombreuses *Rosacées* sont des arbres, comme les Cerisiers, les Pruniers, les Pêchers, les Pommiers et les Poiriers. Certains de leurs rameaux se transforment fréquemment en épines. Les feuilles sont toujours changées et stipulées. Au départ, elles sont composées de tiges imparipennées à folioles bosselées (parfois grandes, parfois petites : Reines précurseurs, Aigremoine) [97].

## II.2. La famille *Burseraceae*

La famille des *Burseraceae* est probablement née à l'éocène, en Amérique du Nord. La migration a traversé les régions tropicales et subtropicales du monde entier, ce qui a donné environ 18 genres connus et 700 espèces réparties dans le Sud du continent américain et de l'Europe, pour atteindre ensuite l'Afrique, l'Asie et l'Océanie [98]. Jusqu'à une date récente, les plantes étaient considérées comme appartenant à l'ordre des Rutales [99]. Les données statistiques basées sur les séquences d'ADN ont en fait reclassifié.

La famille des *Burseraceae* dans l'ordre des Sapindales, la classe des Dicotyledoneae et la sous-classe Rosidae [100]. Leurs arbres et arbustes résineux figurent généralement en bonne place dans l'ethnobotanique des régions où ils sont présents, étant donné que cette propriété a conduit à l'utilisation des espèces de cette famille depuis l'Antiquité pour leurs propriétés aromatiques et leurs nombreuses applications médicinales.

Bien que la famille soit répartie dans toutes les régions tropicales et subtropicales du monde, la majorité des informations scientifiques disponibles se limite aux genres asiatiques et africains, tels que *Commiphora* (myrrhe), *Canarium* (encens élémi) et *Boswellia* (encens), ou au genre *Bursera* (linaloé), présent au Mexique [101].

## II.3. Les espèces étudiées

### II.3.1. Généralités sur *Prunus armeniaca L* (L'abricotier)

L'abricotier est une espèce qui peut être très exigeante en matière de froid hivernal (700 à 1000 heures en dessous de 7,2 °C). Il fleurit juste après l'amandier et avant le pêcher. Il est assez sensible au gel hivernal, mais lorsque les bourgeons floraux sont dormis ils peuvent supporter des températures comprises entre -16 et -24 °C. Cette espèce redoute les printemps pluvieux et humides, saison propice à l'apparition de maladies cryptogamiques. Les sols profonds argilo-limoneux bien drainés sont préférés par l'abricotier. La floraison de l'abricotier a lieu entre février et mars pour une récolte en avril-mai, ou en mai-juin pour les variétés à floraison tardive [102].

Les arbres peuvent atteindre une taille de 10 à 15 mètres, mais ils ont la même taille en culture (Garder en dessous de 3,5 m). Les fleurs qui sont apparues en premier sont blanches ou roses avec 5 pétales réguliers et plusieurs étamines. Les feuilles sont lisses, caduques, grandes, arrondies, avec des bords dentelés et des pointes pointues. Les pétioles sont rougeâtres et mesurent 1 à 3 cm de long [103].

**II.3.1.1. Classification Botanique du *Prunus armeniaca* L**

<b>Règne :</b>	<i>Plantae</i>
<b>Sous-règne :</b>	<i>Tracheobionta</i>
<b>Division :</b>	<i>Magnoliophyta</i>
<b>Classe :</b>	<i>Magnoliopsida</i>
<b>Sous-classe :</b>	<i>Rosidae</i>
<b>Ordre :</b>	<i>Rosales</i>
<b>Famille :</b>	<i>Rosacée</i>
<b>Sous-famille :</b>	<i>Prunoideae</i>
<b>Genre :</b>	<i>Prunus</i> [104]

**II.3.1.2. Origine de l'abricotier**

Les abricots ont trois centres d'origine : La Chine, l'Asie centrale et le Proche-Orient. La plupart des chercheurs soutiennent l'histoire des abricots anciens en Asie centrale et en Chine, considérant ces régions comme des centres indépendants de domestication.

Cependant, l'histoire de l'abricot n'est pas tout à fait claire, et la principale question est de savoir si l'histoire de la culture en Asie centrale est plus ou moins longue que celle de la Chine reste sans réponse. Quelques chercheurs affirment que la culture de l'abricot en Chine remonte à la fin de l'année 3000 av. Cependant, il n'existe aucune preuve archéologique du début de la domestication de l'abricot et de la culture de l'huile d'olive en Chine.

En Asie centrale, la culture de l'abricot a été introduite récemment entre 1000 et 2000 av. J.-C. De nombreux chercheurs ont montré que la diversité génétique des abricots en Chine est la plus riche dans le monde [105].

De nombreuses théories différentes décrivent comment les abricots sont passés de l'Asie centrale au reste du monde. Selon une théorie, les Romains ont déplacé l'abricot vers l'ouest lors de leurs expéditions pour s'emparer du Proche-Orient (Syrie, Iran et Caucase) en l'an 2 avant J.-C. L'abricot s'est progressivement répandu en Afrique, dans les pays méditerranéens et au Moyen-Orient, et a également été introduit dans les Balkans par les Ottomans aux XVe et XVIe siècles. L'abricot a été introduit en Europe du Sud à partir des pays d'Europe de l'Est, et a été introduit en Angleterre en 1524 ou 1548 à partir de l'Italie. Il a été introduit sur le continent américain par les Espagnols en 1626 [106].

### II.3.1.3. Utilisation de l'abricot

Les abricots peuvent être consommés frais, dénoyautés et séchés, congelés ou mis en conserve. Ils peuvent être utilisés dans les desserts et pour l'aromatisation. Divers composants de l'abricot sont utiles pour soigner différents troubles du corps humain.

L'abricot est riche en fer et en traces de calcium, ce qui en fait une très bonne source pour prévenir l'anémie. En cas de fièvre, le jus d'abricot associé au miel étanche la soif. Et aide à éliminer les déchets de l'organisme. Diverses maladies de la peau telles que les squames, l'eczéma, les coups de soleil et les démangeaisons peuvent être soignées par la consommation de jus d'abricot. L'huile de noyau d'abricot est classée parmi les graisses et les huiles, elle est utilisée comme agent occlusif de conditionnement de la peau et comme ingrédient de parfum. La poudre d'abricot sec est utilisée dans l'industrie cosmétique comme ingrédient actif de gommage qui contribuent à l'exfoliation et au nettoyage de la peau [107].

### II.3.1.4. La partie étudiée (la gomme)

#### ➤ Généralités sur les gommes

Les gommes sont une chaîne complexe de polysaccharides hydrophiles composés de galactose, d'arabinose et de rhamnose, générés au cours du processus de gommose [108]. Ce sont des Polymères à forte teneur en hydrates de carbone, insoluble dans l'alcool et d'autres solvants organiques, mais généralement soluble ou dispersable dans l'eau.

Les gommes naturelles sont des polysaccharides hydrophiles composés d'unités monosaccharidiques reliées par des liaisons glycosidiques. Elles se présentent sous forme d'exsudations de divers arbres et arbustes des régions tropicales ou sous forme de phycocolloïdes (algues), et diffèrent des résines naturelles par leur composition chimique et leurs propriétés de solubilité. Certains contiennent des composants acides et d'autres sont neutres. Ils sont principalement utilisés comme colloïdes protecteurs et agents émulsifiants dans les produits alimentaires et pharmaceutiques, comme agents d'encollage pour les textiles et dans les procédés électrolytiques [109]. Lorsqu'ils sont traités avec de l'eau chaude ou froide, elles forment des solutions ou des dispersions colloïdales visqueuses.

Les gommes naturelles ont des utilisations potentielles en biotechnologie, en plus des industries alimentaires, environnementales et pharmaceutiques, car ces biopolymères peuvent être utilisés comme épaississants et émulsifiants pour contrôler ou améliorer les propriétés rhéologiques et la stabilité des produits [110].

Selon plusieurs études, les groupes fonctionnels présents dans les polysaccharides des gommes sont -OH, -C=O, -C-O, -C-H et -CH<sub>2</sub>, -COO, -C-C-O et -C-O-C% [111].

Les hydrates de carbone représentent 43,52 à 98,46 % des principaux composants chimiques des gommages végétales naturelles. Il a été noté que les gommages en poudre ont une teneur élevée en humidité (0,71-17,50 %). Des variations significatives de la teneur en matières grasses (0-23,4 %) ont été documentées, avec la présence d'acides gras saturés et insaturés. La concentration en protéines de la gomme varie de 0,30 à 22,75 % [112].

Ces biopolymères, également appelés hydrocolloïdes, sont présents sous forme de matériaux de stockage, d'exsudats, de composants de la paroi cellulaire et de substances extracellulaires de plantes, d'animaux, d'algues, de champignons et d'autres sources microbiennes [113].

Les qualités des gommages végétales sont la disponibilité, la biocompatibilité, la non-toxicité, Biodégradabilité, émulsifiant, épaississant, stabilisant les phases non miscibles et modifiant les caractéristiques rhéologiques des matériaux alimentaires.

Toutefois, ces gommages naturelles présentent des inconvénients tels que le potentiel de Contamination microbienne, une viscosité réduite et une grande variété. La teneur en humidité des gommages est normalement de 10 % ou plus, ce qui peut entraîner une contamination microbienne au cours de la production. Mais elle peut être évitée à l'aide de conservateurs. En outre, la viscosité des gommages végétales augmente généralement au contact de l'eau, alors qu'en raison de la nature complexe des gommages, la viscosité est réduite après stockage, [114].



**Figure 14.** Exsudation de gomme de l'abricotier [115].

#### ➤ **Le phénomène de gommose et son mécanisme**

Les gommages sont l'exsudat naturel (mécanisme de défense des plantes) des plantes soumises à un stress [116]. Les gommages exsudées sont produites par certaines plantes via le processus de gommose et/ou par fragmentation de la cellulose végétale en réponse à un dommage mécanique ou pour prévenir l'invasion bactérienne [117]. L'extrusion se produit sous forme de bourgeons en forme de larmes ou de masses informes pour empêcher l'infection et la perte d'eau dans la zone

endommagée de la plante. La matière excrétée forme ensuite un objet solide avec différentes couleurs observées telles que le blanc, le gris pâle, l'ambre, le brun foncé, etc...., après avoir été exposé à la lumière du soleil [116].

Le mécanisme détaillé de la sécrétion de la gomme est encore mal compris. Mais on sait que l'éthylène est considéré comme le principal facteur responsable de l'induction de la gommose. L'éthylène ou les composés libérant de l'éthylène (Par exemple, l'éthéphon (acide 2-chloroéthylphosphonique) stimulent considérablement la formation de gommes dans les fruits à noyaux, les arbres et les fruits de la famille des *Rosacées* [118].

### II.3.2. Généralité sur *Boswellia carterii*

#### II.3.2.1. L'arbre

*Boswellia carterii* Birdw est un arbuste rabougré [119] de petite et moyenne taille appartenant à la famille des *Burseraceae* [120]. Il a besoin de chaleur et de conditions arides pour se développer, c'est pour cela qu'on le trouve dans les zones arides. Il est à feuilles caduques dont la hauteur varie de 6 à 9 mètres. Son écorce est épaisse, grise et parchemineuse. Ses feuilles composées et imparipennées possèdent 9 à 14 paires de folioles dentées, ovales-oblongues. Ses petites fleurs blanches avec de nectaires rouges et forment de belles grappes terminales ou axillaires [121].

#### II.3.2.2. Classification Botanique

<b>Règne :</b>	<i>Plantae</i>
<b>Embranchement :</b>	<i>Angiospermes</i>
<b>Classe :</b>	<i>Rosidae</i>
<b>Ordre :</b>	<i>Sapindales</i>
<b>Famille :</b>	<i>Burseraceae</i>
<b>Genre :</b>	<i>Boswellia</i>
<b>Espèces :</b>	<i>Carterii</i> [121]

#### II.3.2.3. Historique et utilisation folklorique

Les arbres de la famille des *Boswellia* (*Burseraceae*), tels que *Boswellia carterii* Birdw sont originaires d'Éthiopie, de Somalie, d'Inde et de la péninsule arabe [122]. Les résines communément appelées encens ou oliban, obtenues à partir d'arbres du genre *Boswellia*, sont les plus connues des gommes-résines aromatiques utilisées dans le monde entier comme encens dans les cérémonies religieuses [123]. En outre, l'encens a une énorme socio-économique.

Historiquement, il a été utilisé dans les cérémonies religieuses et culturelles et comme ingrédient dans les médecines traditionnelles depuis des temps immémoriaux [124].

L'oliban est connu pour ses activités analgésiques, anti-inflammatoires, sédatives, anti-hyperlipidémiques et antibactériennes dans les médecines Unani (islamique) et chinoise traditionnelle [122]. L'utilisation la plus ancienne de l'encens se trouve dans une inscription sur la tombe d'une reine égyptienne du XVe siècle av. J.-C., Hathsepsout, qui l'exportait de la terre de Pount (Somalie) pour préparer ses cosmétiques, ses lotions de soin et ses parfums. Les anciens Égyptiens brûlaient de l'encens lors de cérémonies religieuses et de rituels. Ils l'utilisaient également pour l'embaumement et la momification des cadavres.

La résine comme encens ne s'est pas limitée aux Égyptiens de l'Antiquité, mais s'est étendue aux Babyloniens, Grecs, Romains et Assyriens [125]. L'utilisation médicinale de l'encens pourrait figurer parmi les thérapies les plus anciennes de l'humanité [126].

La gomme-résine de *Boswellia carterii*, en tant que médecine traditionnelle chinoise, est souvent utilisée dans le traitement des rhumatismes et des maladies infectieuses, ainsi que le traitement de la polyarthrite rhumatoïde [127].

#### II.3.2.4. La partie étudiée (l'oliban)

##### ➤ Les résines

Les résines sont des sécrétions de plantes et des exsudats qui sont produits soit naturellement par des plantes saines (résidus physiologiques), soit par des agents pathogènes attaquant des plantes saines (résidus pathogènes). Elles fonctionnent comme un mécanisme de défense de la plante et participent au processus de cicatrisation suite à une blessure [128].

##### ➤ Les oléo-gommo-résines

En effet, un certain nombre de substances végétales naturelles sont des oléo-gommo-résines. Leur nom implique qu'elles comprennent des molécules qui peuvent être divisées en trois fractions : les monoterpènes et des huiles essentielles (oléo), les polysaccharides (gommo). Et les diterpènes ou triterpènes comme résine [129].

##### ➤ Loliban

Connu sous le nom de "lubān dhakar" [126], l'oliban, ou encore l'encens [130] exsudée par *Boswellia carterii* est une résine naturelle végétale et elle est en effet une oléo-gomme-résine [129].

La résine se présente sous forme de petites larmes d'une longueur de 0,5 à 3 cm, généralement ovoïdes, en forme de poire ou de massue. Elle est généralement d'une couleur jaunâtre pâle, souvent teintée de vert, de bleu ou de rouge, semi-translucide et recouverte d'une poussière d'un blanc terne. La surface de la larme est terne même après l'enlèvement de la poussière. Elles sont cassantes et, à l'intérieur, elles sont opalescentes et translucides, la surface fracturée étant terne et cireuse. La drogue a une odeur parfumée et balsamique, un goût aromatique et légèrement amer, et se ramollit en une masse plastique lorsqu'elle est mâchée [125]. *Boswellia carterii* Birdw. (*Burseraceae*) peut sécréter de la gomme-résine à partir de l'écorce [119].

Les constituants chimiques de la gomme-résine de *Boswellia carterii* sont principalement des terpénoïdes, notamment des triterpènes pentacycliques, des triterpènes tétracycliques, des diterpènes et des monoterpènes [131]. Elle contient également une variété d'huiles essentielles, d'acides organiques et de polysaccharides [132]. Des études ont montré que ces substances chimiques présentent une activité biologique étendue, notamment des effets anti-inflammatoires, analgésiques, antitumoraux et antibactériens [122].

Aujourd'hui, il est largement utilisé comme agent adhésif, comme ingrédient dans les préparations cosmétiques, comme parfum dans les rituels quotidiens et comme revêtement pour les matériaux [124]. Il peut être utilisé pour traiter le cancer du côlon, le cancer du sein humain et la leucémie. Le *Boswellia carterii* est extrait de différentes manières. Par exemple, l'extrait méthanolique peut être utilisé pour cibler les cellules cancéreuses du côlon [133].



**Figure 15.** Olibane de *boswellia carterii* [119].

# **Chapitre III**

## **Matériel et méthodes**

### III.1. Matériel

#### III.1.1. Matériel végétal

Le matériel utilisé dans cette recherche est :

1. La gomme d'abricot (*Prunus armeniaca L*) qui a été récoltée durant le mois de mars 2023 dans la région de M'sila exactement à wled daraj.



**Figure 16.** Gomme d'abricot (*Prunus armeniaca L*).

2. L'oliban de *Boswellia Carterii* qui a été acquis.



**Figure 17.** Oliban de *Boswellia carterii*.

L'identification botanique de ces plantes (**Figures 16, 17**) a été effectuée par **Pr. Rebass** Département d'Agronomie-Faculté des Sciences-Université Mohammed Boudiaf-M'Sila.

#### III.1.2. Les électrodes

➤ **L'électrode de travail (ET)**

Le matériau utilisé comme électrode de travail, est l'acier demi-doux (C = 0.242 %) X50, largement utilisé dans les pièces des machines pour applications mécaniques, les pièces ou bâtis moulés et les pièces fourragées.

Les échantillons en forme de barres cylindriques de 0.5 cm de longueur, ont été découpés à partir d'une barre de 1.5 cm de diamètre. Chaque échantillon a subi un polissage mécanique à l'aide d'un papier abrasif de granulométrie de plus en plus fine de carbure de silicium SiC (400, 600, 800, 1000 et 1200) suivie d'un lavage à l'eau distillée jusqu'à l'obtention d'une surface

miroir. Ensuite les électrodes sont nettoyées et dégraissées à l'acétone et séchées à température ambiante avant utilisation.

➤ **La contre électrode (CE)**

Appelée aussi électrode auxiliaire, c'est une électrode inattaquable, constituée d'une plaque de platine, son rôle est d'assurer le passage de courant dans la cellule d'électrolyte. Sa position dans la cellule doit tenir compte des lignes de champ électrique très concentré au voisinage d'électrode de travail.

➤ **Une électrode de référence**

L'électrode de référence est une électrode impolarisable, caractérisée par un potentiel constant quel que soit le courant qui la traverse et permet de mesurer les potentiels appliqués du substrat (électrode de travail).

L'électrode utilisée est une électrode au calomel  $\text{Hg}_{(l)}/\text{Hg}_2\text{Cl}_{2(s)}/\text{KCl}_{(sat)}$  noté ECS. Elle est placée aussi près que possible de l'électrode de travail pour minimiser la chute ohmique que peut provoquer la résistance de l'électrolyte (comprise entre l'électrode de travail et la contre électrode).

### **III.1.3. L'électrolyte**

La solution corrosive est une solution d'acide chlorhydrique 1M obtenue par dilution de l'acide commercial concentré avec l'eau distillée. Ce milieu a été choisi car il est très utilisé dans l'étude de la corrosion de l'acier.

Les inhibiteurs utilisés dans le présent travail sont les extraits des polysaccharides des deux espèces sélectionnées avec une concentration de 180 mg/L.

## **III.2. Méthodes**

### **III.2.1. Préparation des extraits**

Nous avons préparé quatre sortes d'extraits différents : un décocté, un extrait d'infusion, un extrait hydro-alcoolique (Ethanol 70°), et un extrait de polysaccharides dérivé de la poudre de drogue.

#### **III.2.1.1. Décoction (décoction aqueuse à 10 %)**

5 g de poudre ont été placés dans 50 ml d'eau distillée et portés à ébullition pendant une heure. Le décocté refroidi est ensuite desséché dans l'étuve à 45°C après sa filtration.

### III.2.1.2. Infusion

Nous avons ajouté 50 ml d'eau bouillante à 5 g de poudre. Le mélange a ensuite été filtré après trois heures de contact puis desséché dans l'étuve à 45°C.

### III.2.1.3. Extrait éthanolique

L'extrait hydro-alcoolique est obtenu en faisant macérer 10 g de poudre dans 100 ml d'éthanol (70 : 30 ; v/v) à température ambiante pendant 24 heures. Une fois, la procédure a été répétée avec 100 ml de solvant (70 : 30 ; v/v). Le mélange obtenu a été filtré et soumis à l'évaporateur rotatif à 45 °C, puis desséché dans l'étuve à 45°C.

### III.2.1.4. Extraction des polysaccharides

Un échantillon de 50 g poudre à étudier est prétraité avec de l'éthanol. Pour éliminer les monosaccharides, les oligosaccharides et les constituants colorés, on place 250 ml d'éthanol dans un Soxhlet et on le chauffe à 80 °C pendant quatre heures. Après séchage, le broyat est macéré sous agitation pendant 4 heures à 100°C sous reflux dans 80 °C d'eau distillée. Après filtration sur filtre en papier et centrifugation (3500 tours/minute, 15 minutes, 20 °C), le filtrat récupéré est concentré à environ un quart de son volume initial sous pression réduite à l'aide d'un évaporateur rotatif à 65 °C.

Les polysaccharides déjà présents dans le concentré sont ensuite précipités en ajoutant trois volumes d'éthanol à 95 % à 4°C pendant une nuit. Après 10 minutes de centrifugation à 3500 tours/minute, les culots obtenus sont lavés trois fois à l'éthanol. Pour obtenir un extrait brut de polysaccharides. Les polysaccharides obtenus sont séchés à 40°C pendant une nuit dans une étuve ventilée.

### III.2.1.5. Rendement d'extraction

Après l'extraction, le rendement total est déterminé par la formule suivante qui s'exprime en pourcentage (%) du poids de l'extrait brute obtenu par rapport à la matière sèche de l'échantillon utilisé pour l'extraction [134].

$$R \% = [(m_{\text{ext}} / m_{\text{ms}})] \times 100$$

Où :

$m_{\text{ext}}$  : La masse d'extrait

$m_{\text{ms}}$  : La masse de la matière sèche

## III.2.2. Dosage des polyphénols

Dosage total des polyphénols a été obtenu au moyen du réactif de folin-ciocalteu. Le réactif est constitué d'une variété d'acides Phosphotungestique ( $H_3PW_{12}O_{40}$ ) et phosphomolybdique

(H<sub>3</sub>PMO<sub>12</sub>O<sub>40</sub>) qui, en présence d'alcalinité, diminue à mesure que les groupes oxydables des composés phénoliques donnent lieu à la création d'un produit de réduction bleu (oxyde de tungstène et de molybdène). Ceux-ci présentent une absorbance maximale à 765 nm, qui sont proportionnelle à la teneur en polyphénols présents dans les extraits végétaux [135].

500 µL du réactif de folin-ciocalteus, diluée dix fois dans l'eau distillée, est combiné avec 100 µL de chaque extrait convenablement dilué afin de déterminer la teneur en polyphénols des extraits. Après 4 minutes, 400 µL de solution de carbonate de sodium (7,5 % dans l'eau distillée) sont additionnés. Un spectrophotomètre UV est utilisé pour mesurer l'absorbance, qui est mesurée à 765 nm après 2 heures d'incubation à température ambiante [136], [137].

Une courbe d'étalonnage parallèle est réalisée dans les mêmes conditions opératoires en utilisant différentes concentrations d'acide gallique. La concentration des polyphénols est calculée à partir de la droite d'étalonnage établie avec l'acide gallique.

Les résultats sont exprimés en microgramme d'équivalent d'acide gallique par milligrammes d'extrait (µg EAG/mg d'extrait).

### III.2.3. Dosage des polysaccharides

La méthode de Dubois et al. (1956) est utilisée pour calculer la quantité totale de teneur dans les oses, en utilisant le phénol et l'acide sulfurique comme partenaires de réaction. Les liaisons glycosidiques sont hydrolysées à chaud en présence d'acide sulfurique concentré, et la déshydratation des unités osidiques aboutit à la production de composés de furfural.

Ces derniers interagissent avec le phénol par condensation pour créer des composés de couleur orange-jaune qui absorbent la lumière à 485 nm. Un étalon de gamme de glucose est réalisé avec des concentrations d'eau allant de 0 à 0,25 g/L.

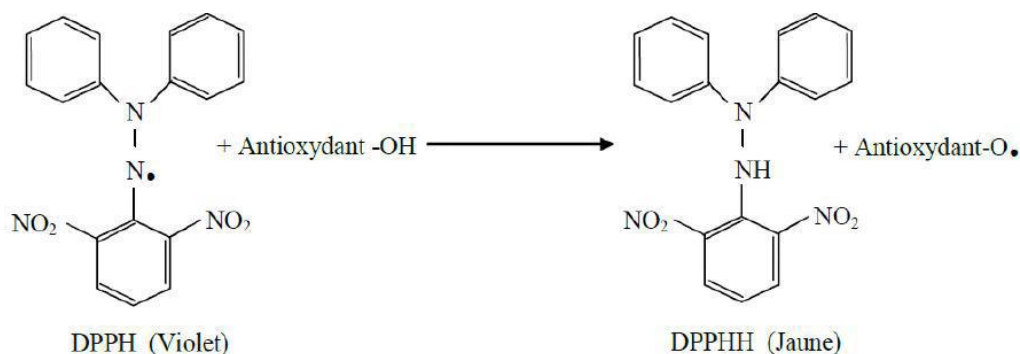
Le principe de dosage est le suivant :

- 200 µL d'échantillon doivent être placés dans les tubes dose, avec 200 µL d'une solution de phénol à 5 % et 1 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> à 80%.
- Vortexer les tubes pendant 5 secondes, puis les incubent à 90 °C pendant 5 minutes, laisser les reposer pendant 30 minutes à température ambiante et dans l'obscurité complète ensuite mesurer l'absorbance à 485 nm. La teneur est exprimée en microgramme équivalents de glucose par milligrammes d'extrait (µg EG/mg d'extrait).

### III.2.4. Evaluation de l'activité antioxydante par le teste DPPH

#### III.2.4.1. Principe

Le radical 1,1-diphényl-2-picrylhydrazyl (DPPH<sup>•</sup>), fut l'un des premiers radicaux utilisés pour étudier la relation entre la structure et l'activité antioxydante des composés organiques. Dans ce test, les antioxydants réduisent le diphényl-picrylhydrazyl ayant une couleur violette en un composé jaune le diphényl-picrylhydrazine (**figure 18**), dont l'intensité de la couleur est inversement proportionnelle à la capacité des antioxydants présent dans les extraits [138].



**Figure 18.** Mécanisme de réduction du radical libre DPPH par un antioxydant [139].

Pour tester l'activité antiradicalaire des extraits, 500  $\mu$ l de chacune des concentrations préparées ont été incubés avec 1250  $\mu$ l d'une solution méthanolique de DPPH à 0,004 %. Après 30 minutes d'incubation, la réaction de transfert se produit.

Le transfert d'hydrogène de l'antioxydant au DPPH est suivi par spectroscopie UV visible, qui enregistre le déplacement de la bande d'absorption du DPPH à 517 nm. La capacité antioxydante des extraits est déterminée en calculant le pourcentage d'inhibition de l'absorption de DPPH [140].

#### III.2.4.2. Expression des résultats

Le pourcentage de décoloration du DPPH en solution dans le méthanol est utilisé pour calculer l'activité antioxydante, qui exprime la capacité à piéger les radicaux libres. L'activité antioxydante est désignée par la formule :

$$I\% = \left\{ \frac{(\text{Abs contrôle} - \text{Abs test}) \times 100}{\text{Abs contrôle}} \right\}.$$

La valeur IC<sub>50</sub> a été déterminée pour chaque extrait et est définie comme la concentration du substrat qui provoque une perte de 50 % de l'activité DPPH. Il s'agit également de la concentration d'échantillon nécessaire pour obtenir une réduction de 50 % de l'absorbance de la solution de contrôle composée de méthanol et de DPPH. Les valeurs IC<sub>50</sub> moyennes ont été calculées à l'aide de régressions linéaires à partir de trois expériences distinctes, où l'abscisse est représentée par la

concentration des composés testés et l'ordre est représenté par l'activité antioxydante en pourcentage.

Les résultats ont été exprimés par la moyenne de trois types de mesures d'écart type.

### III.2.5. Test de l'inhibition de la corrosion

#### III.2.5.1. Essais gravimétriques

Le principe de cette méthode repose sur la mesure de la perte de masse ( $\Delta m$ ) subie par un échantillon de surface ( $S$ ), pendant le temps ( $t$ ) d'immersion dans une solution corrosive maintenue à température constante [86].

On peut évaluer la vitesse de corrosion  $V_{\text{corr}}$  à partir de la détermination de la perte de masse, et elle est traduite par mm/an selon la relation suivante :

$$V_{\text{corr}} = \Delta m / S.t$$

Avec :

$t$  : temps d'immersion (en heure) et  $S$  : surface de l'échantillon ( $\text{cm}^2$ ).

La valeur de l'efficacité inhibitrice ( $\text{EI}\%$ ) est donnée par la formule suivante :

$$\text{EI \%} = (1 - V'_{\text{corr}} / V_{\text{corr}}) \times 100$$

Dans laquelle  $V_{\text{corr}}$  et  $V'_{\text{corr}}$  présentent les vitesses moyennes de corrosion de l'échantillon, respectivement en l'absence et en présence d'inhibiteur.

#### III.2.5.2. Les courbes de polarisation

Les mesures électrochimiques sont effectuées à l'aide d'un dispositif comprenant un potentiostat-galvanostat SP 300 de type ECLAB, contrôlé par un logiciel d'analyse appelé " ECLAB software V10.37".

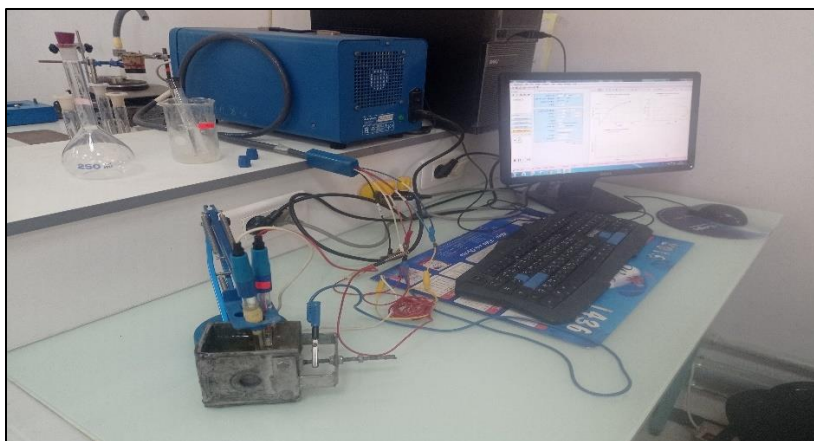


Figure 19. Montage électrochimique.

Le potentiel appliqué à l'échantillon dans la méthode potentiodynamique fluctue continuellement entre -700 et -300 mV avec une vitesse de balayage 1 mV/s. Tous les tests ont été effectués à température ambiante ( $22^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ).

L'électrode de travail est maintenue à son potentiel d'abandon pendant une heure avant le tracé de ces circuits cathodiques et anodiques. L'électrode de travail et la contre-électrode de placage sont utilisées pour mesurer l'intensité du courant. La détermination du potentiel de corrosion de Tafel ( $E_{\text{corr}}$ ), de la résistance de polarisation ( $R_p$ ), de la densité de courant de corrosion ( $i_{\text{corr}}$ ) et des propriétés anodiques et cathodiques ( $\beta_a$  et  $\beta_c$ ) est rendue possible par le tracé des courbes intensité-potentiel.

L'efficacité inhibitrice **EI %** est déterminée à partir des relations suivantes :

$$\mathbf{EI \%} = ((i^{\circ}_{\text{corr}} - i_{\text{corr}}) / (i^{\circ}_{\text{corr}})) \times 100$$

$i^{\circ}_{\text{corr}}$  et  $i_{\text{corr}}$  représentent respectivement les densités de courant de corrosion déterminées par extrapolation des droites cathodiques de Tafel au potentiel de corrosion sans et avec addition de l'inhibiteur.

### III.2.5.3. Spectroscopie d'impédance électrochimiques

La spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) bien établie est un outil puissant à l'étude de la corrosion, les propriétés de surface, la cinétique de l'électrode et l'information sur le mécanisme peut être obtenue à partir des diagrammes d'impédance.

Les mesures d'impédance adapté au potentiel de corrosion  $E_{\text{corr}}$ , dans un domaine de fréquence [100 kHz (HF), 20 mHz (BF)] avec une onde sinusoïdale d'amplitude de 10 mv.

A partir des diagrammes d'impédance réalisés au potentiel de corrosion ( $E_{\text{corr}}$ ), nous accédons aux résistances de transfert de charge ( $R_t$ ), aux capacités de la double couche ( $C_{dl}$ ) et donc au taux d'inhibition dans les conditions opératoires utilisées.

L'efficacité inhibitrice est calculée par les relations suivantes :

$$\mathbf{EI \%} = ((R_{ti} - R_t) / R_{ti}) \times 100$$

$R_t$  et  $R_{ti}$  représentent respectivement les valeurs de la résistance de transfert de charges en présence et en absence de l'inhibiteur.

$$\mathbf{EI \%} = ((C_{dl} - C_{dli}) / C_{dl}) \times 100$$

Avec :

$C_{dl}$  : Capacité de la double couche sans addition de l'inhibiteur.

$C_{dli}$  : Capacité de la double couche avec addition de l'inhibiteur.

Les valeurs de la résistance de transfert de charges  $R_t$ , sont calculées à partir de la différence d'impédance aux hautes et basses fréquences sur l'axe des réels, comme suggéré par Haruyama et Tsuru [141].

# **Chapitre IV**

## **Résultats et discussion**

## IV.1. Rendements des extractions

Les extraits des deux espèces sélectionnées ont été préparés par plusieurs méthodes d'extraction : extraction par macération dans un mélange éthanol/eau (70/30), extraction par l'eau chaude (infusion et décoction) et extraction des polysaccharides.

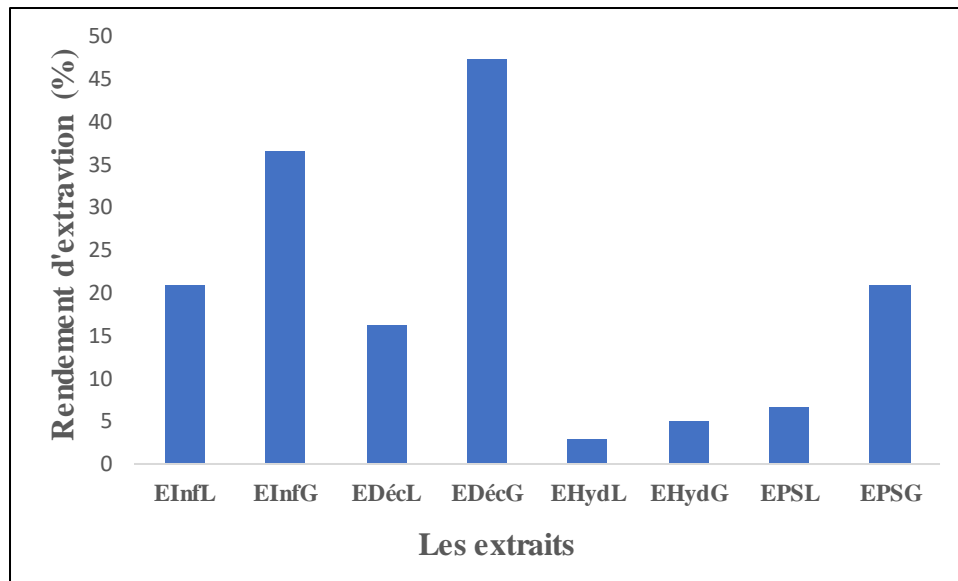
Les rendements des différents extraits obtenus à partir des parties sélectionnées de *Prunus armeniaca L* et *Boswellia carterii* sont présentés dans le **Tableau 2**.

**Tableau 2.** Rendement des extraits.

<i>Prunus armeniaca L</i>				
Extrait	EInf <sub>G</sub>	EDéc <sub>G</sub>	EHyd <sub>G</sub>	EPS <sub>G</sub>
La masse de la matière sèche (g)	5	5	10	50
La masse d'extrait (g)	1.830	2.370	0.5	10.470
Rendements %	36.6	47.4	5	20.94
<i>Boswellia carterii</i>				
Extrait	EInf <sub>L</sub>	EDéc <sub>L</sub>	EHyd <sub>L</sub>	EPS <sub>L</sub>
La masse de la matière sèche (g)	5	5	10	50
La masse d'extrait (g)	1.050	0.820	0.30	3.372
Rendements %	21	16.4	3	6.744

- Les rendements d'extractions varient entre 5 % et 47.4 % dans *Prunus armeniaca L* et entre 3 % et 21 % dans *Boswellia carterii*.
- Les meilleurs rendements sont enregistrés dans la gomme d'abricot.
- Le rendement le plus élevé dans *Prunus armeniaca L* est celui de la décoction avec une valeur de 47.4 % suivis par l'extrait de l'infusion et l'extrait des polysaccharides avec des rendements 36.6 % et 20.94 % respectivement, tandis que le rendement le plus faible est celui de l'extrait hydroalcoolique qui est de valeur de 5 %, par contre dans le deuxième espèce le meilleur rendement est obtenu avec l'extrait d'infusion 21 % suivi par l'extrait de décoction 16.4 % et l'extrait des polysaccharides 6.744 %, le rendement le plus faible est celui de l'extrait hydroalcoolique.
- La variation des rendements des divers extraits peut être attribuée à la différence de la nature des composés présents dans les espèces *Prunus armeniaca L* et *Boswellia carterii*, ainsi que la différence entre les méthodes d'extraction.

Les rendements d'extraction des différentes méthodes sont reportés dans la figure suivante:

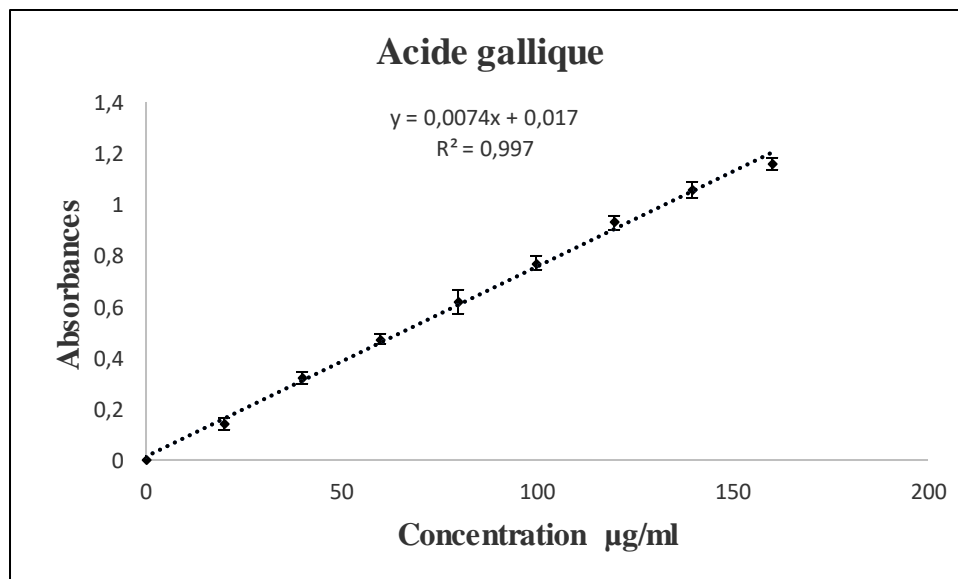


**Figure 20.** Rendements des extraits de *Prunus armeniaca* et *Boswellia carterii* exprimés en pourcentage.

## IV.2. Dosage des polyphénols

Les différents extraits bruts, obtenus par les différentes méthodes d'extractions ont été analysés quantitativement par spectrophotométrie UV-visible pour leurs contenus en polyphénols.

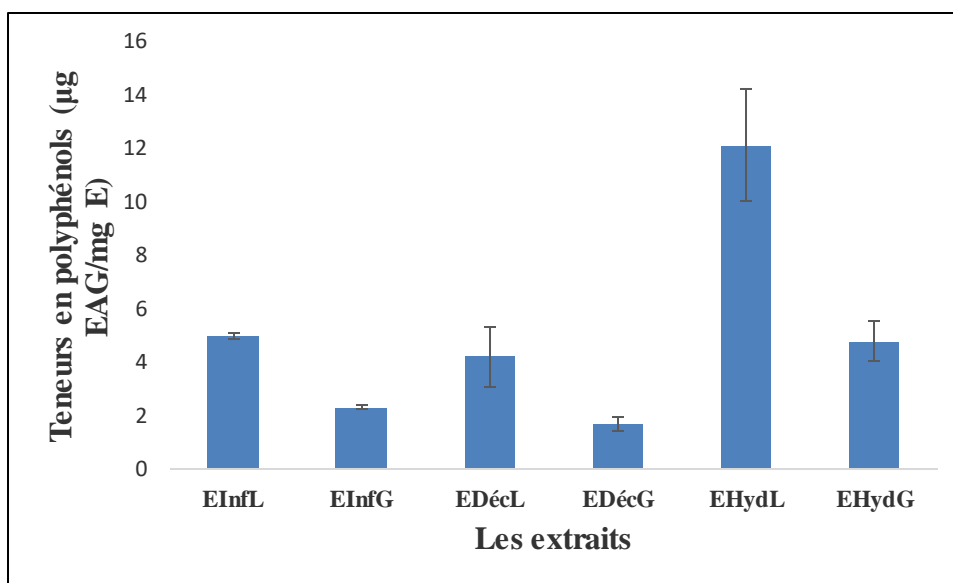
Les résultats sont exprimés en termes d'équivalents acide gallique à l'aide d'une courbe d'étalon (**Figure 21**).



**Figure 21.** Courbe d'étalonnage d'acide gallique.

La teneur des polyphénols totaux est calculée selon l'équation de régression de la gamme d'étalonnage établie avec l'acide gallique ( $y = 0.0074x + 0,017$ ) et  $R^2 = 0.997$ .

Les résultats de l'analyse colorimétrique des composés polyphénoliques dans les deux espèces sélectionnées ont été résumés dans la figure suivante :



**Figure 22.** La teneur en polyphénols totaux des différents extraits.

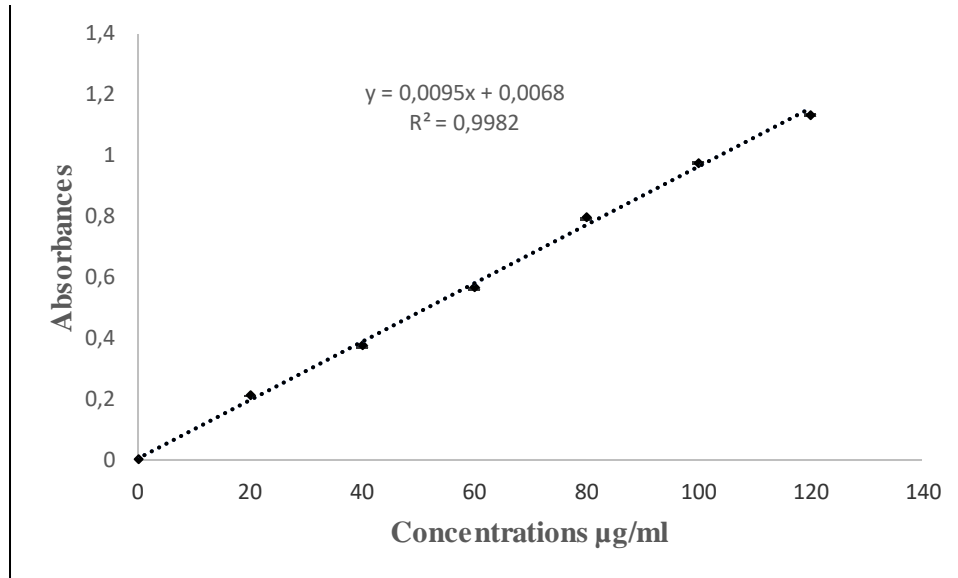
Les résultats montrent que les teneurs en polyphénols totaux varient considérablement entre les différents extraits de *Prunus armeniaca L* et de *Boswellia carterii*. L'analyse des résultats du dosage des polyphénols montre que *Boswellia carterii* est plus riche en composés polyphénoliques que *Prunus armeniaca L*, comme elles montrent que ces composés sont présents dans tous les extraits avec des concentrations variantes selon l'organe et le solvant utilisé pour l'extraction. Les résultats obtenus ont été résumés dans le **Tableau 3**.

**Tableau 3.** La teneur en polyphénols (µg EAG/mg d'extrait)

<i>Prunus armeniaca L</i>			
Les extraits	EHyd <sub>G</sub>	EInf <sub>G</sub>	EDéc <sub>G</sub>
La teneur en polyphénols (µg EAG/mg d'extrait)	4.79	2.33	1.71
Ecartype	0.75	0.08	0.23
<i>Boswellia carterii</i>			
Les extraits	EHyd <sub>L</sub>	EInf <sub>L</sub>	EDéc <sub>L</sub>
La teneur en polyphénols (µg EAG/mg d'extrait)	12.14	5.03	4.25
Ecartype	2.11	0.12	1.12

### IV.3. Dosage des polysaccharides

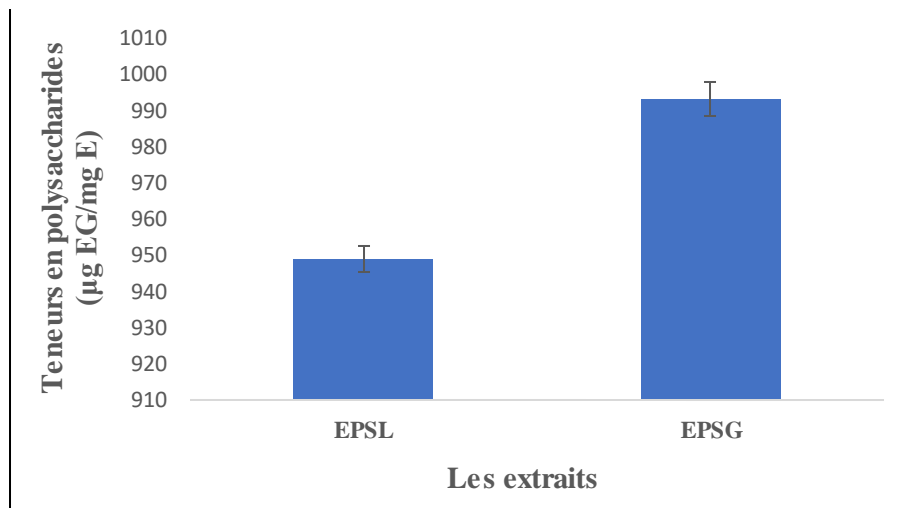
Le dosage des polysaccharides a été réalisé par la méthode colorimétrique, le glucose considéré comme contrôle positif, qui a permis de réaliser la courbe d'étalonnage, et delà le calcul de la teneur des polysaccharides dans nos extraits.



**Figure 23.** Courbe d'étalonnage du glucose.

Après extrapolation des résultats sur la courbe d'étalonnage (**Figure 23**), Les teneurs des polysaccharides des deux espèces sélectionnées ont été obtenus à partir de la courbe d'étalonnage qui suit une équation de type :  $y = 0,0095x + 0,0068$  avec et  $R^2 = 0,9982$ .

La teneur en polysaccharides est représentée dans la figure suivante :



**Figure 24.** Teneurs en polysaccharides.

La détermination quantitative des polysaccharides issues de *Prunus armeniaca L* et *Boswellia carterii* montre qu'ils sont très riches en polysaccharides avec des teneurs respectives de  $(993.14 \pm 4.52 \mu\text{g EG/ mg de l'extract})$  et  $(948.94 \pm 3.62 \mu\text{g EG / mg de l'extract})$ .

#### IV.4. Test d'activité antioxydante (DPPH)

La méthode de DPPH a été choisie, en raison de sa simplicité, rapidité, sensibilité et de sa reproductibilité, mais aussi parce que les mesures de l'IC50 exprimées en mg/ml sont comparables entre elles et à celle d'une référence [142].

En faisant varier la concentration des extraits en calculant pour chaque concentration le pourcentage d'inhibition correspondant.

Les valeurs obtenues nous ont permis de tracer les courbes qui représentent les variations de pourcentage d'inhibition en fonction de la concentration des extraits éthanolique, d'infusion, de décoction et de polysaccharides dans *Prunus armeniaca L* et *Boswellia carterii*.

Les résultats obtenus pour les différents extraits sont présentés ci-dessous :

##### ➤ *Prunus armeniaca L*

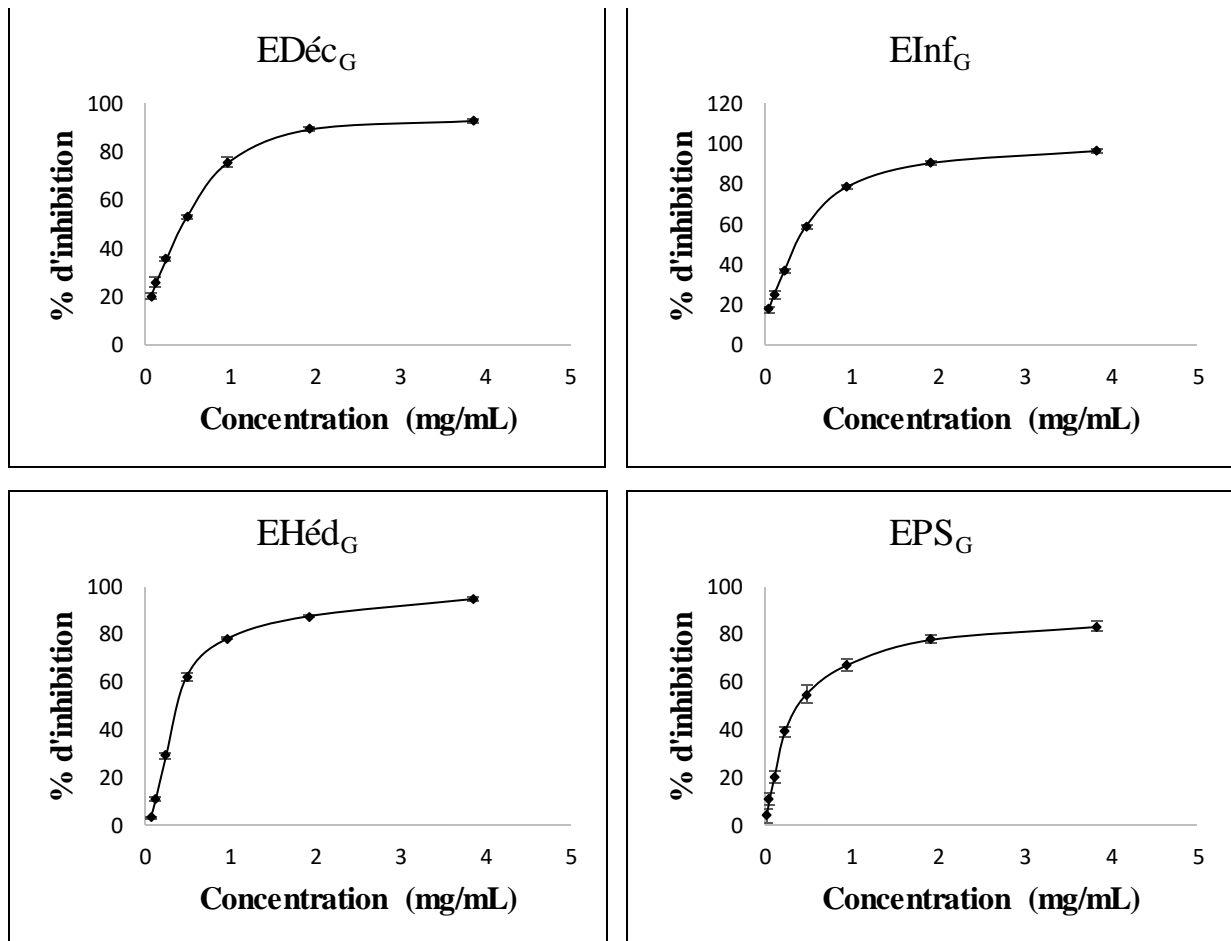


Figure 25. Pourcentage d'inhibition % en fonction de concentrations de différents extraits de *Prunus armeniaca L*.

Les valeurs des  $IC_{50}$  de différents extraits sont illustrées dans la figure ci-après:

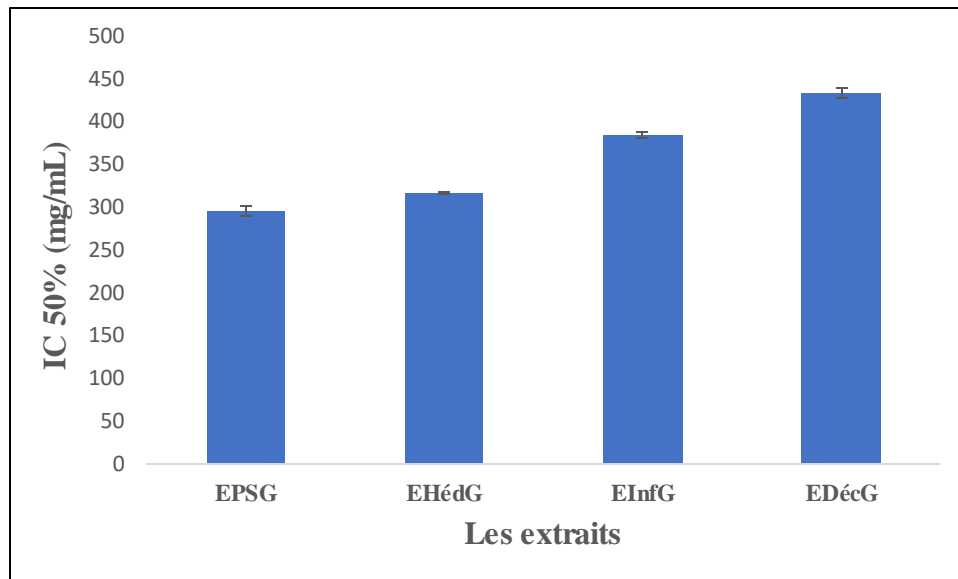
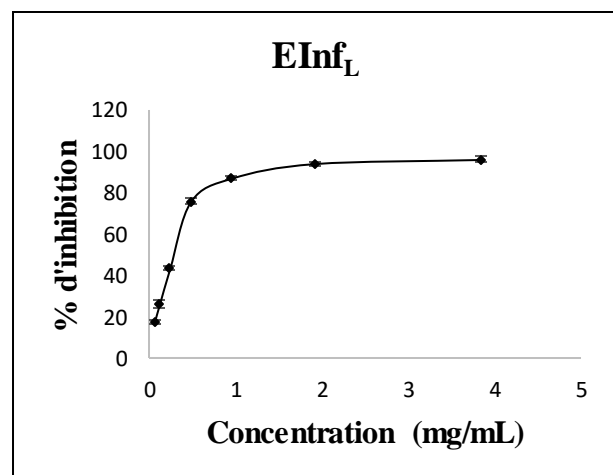
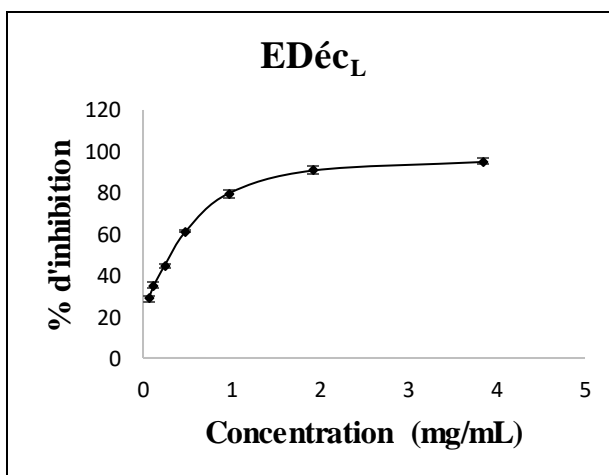


Figure 26. Valeurs d'IC<sub>50</sub> des extraits de *Prunus armeniaca L.*

L'extrait de polysaccharides semble être l'extrait le plus actif de cette plante avec une valeur d'IC<sub>50</sub> égale à (296.15 ± 5.59 mg/mL). L'extrait hydroalcoolique a montré une inhibition proche de celle de polysaccharides avec une valeur de (316,47 ± 1,64 mg/mL), suivie par les extraits de l'infusion et de la décoction leur IC<sub>50</sub> successives est de (358.23 ± 3.23 mg/mL) et (433.36 ± 5.98 mg/mL) respectivement.

➤ *Boswellia carterii*



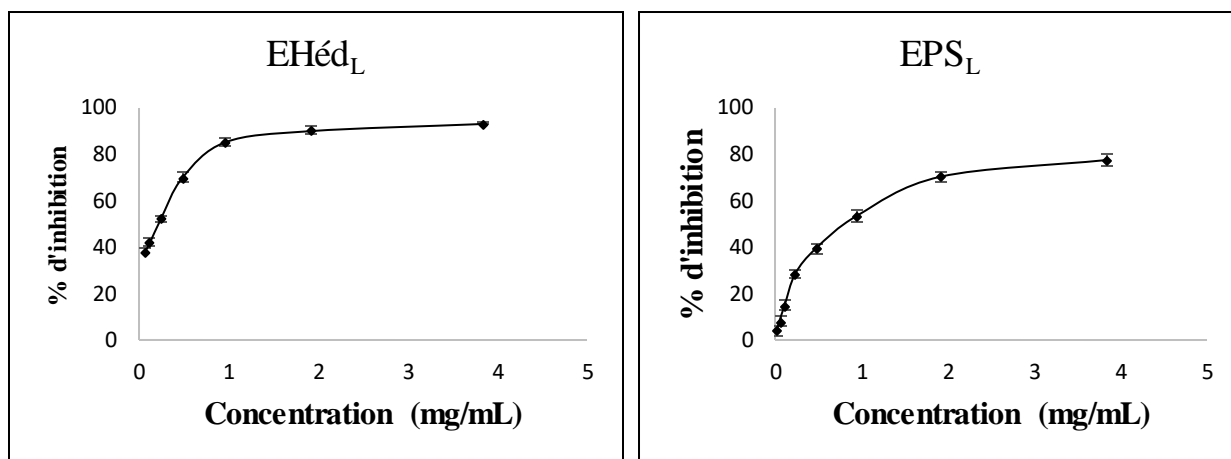


Figure 27. Activité inhibitrice du radical DPPH par les extraits de *Boswellia carterii*.

Les valeurs  $IC_{50}$  des extraits pour l'activité piégeant les radicaux libres par la méthode de DPPH sont présentées dans la figure suivante :

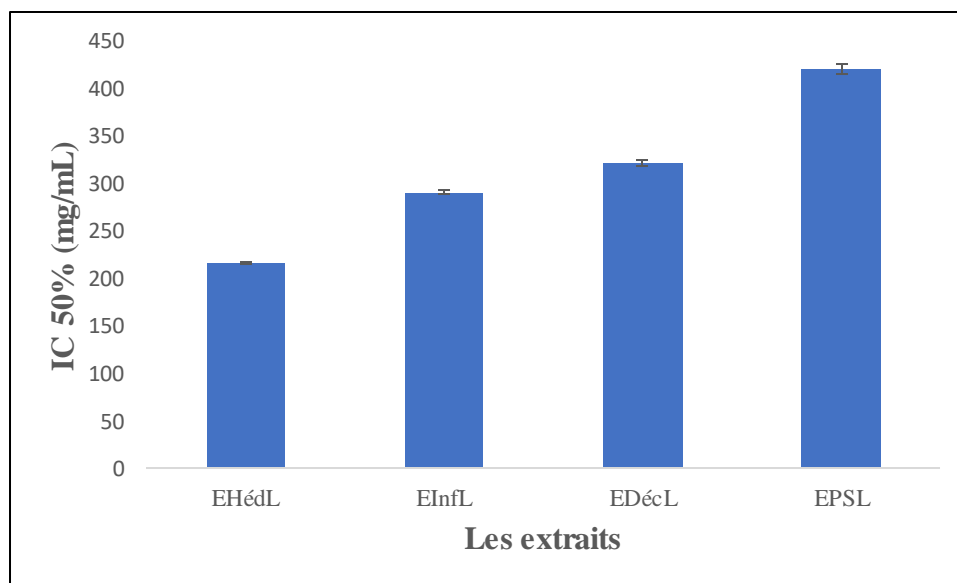


Figure 28. Valeurs  $IC_{50}$  d'extraits pour l'activité piégeant les radicaux libres par la méthode de DPPH des extraits de *Boswellia carterii*.

Les résultats obtenus montrent que l'extrait hydroalcoolique possède une activité antiradicalaire modérée avec une valeur d' $IC_{50}$  plus au moins significative de l'ordre de  $(216.56 \pm 1.59 \text{ mg/mL})$ . Cependant, l'activité des extraits d'infusion, de décoction, des polysaccharides est moins efficace avec des valeurs d' $IC_{50}$  de  $(290.94 \pm 1.86 \text{ mg/mL})$ ,  $(321.31 \pm 3.31 \text{ mg/mL})$  et  $(420.91 \pm 4.79 \text{ mg/mL})$  respectivement. Nous rappelons que plus la valeur de l' $IC_{50}$  est faible plus l'extrait est puissant vis-à-vis des radicaux libres.

En comparaison avec les antioxydants standards les extraits testés des deux espèces étudiées s'avèrent moins efficaces.

## IV.5. Test de l'inhibition de la corrosion

Le pouvoir inhibiteur de la corrosion de l'acier en milieu acide sans et avec addition de nos extraits sera évalué en utilisant différentes techniques : essais gravimétriques, les méthodes électrochimiques stationnaires (courbes de polarisation en mode potentiostatique) et la méthode électrochimique transitoire (la spectroscopie d'impédance électrochimique).

### IV.5.1. Essais gravimétriques

Les tests gravimétriques ont été conduits à température ambiante dans une solution d'acide chlorhydrique à 1M sans et avec inhibiteurs des deux extraits des polysaccharides. Les valeurs des vitesses de corrosion  $V_{corr}$ , de l'efficacité inhibitrice EI (%) et du taux de recouvrement de surface ( $\Theta = EI/100$ ) relevés après 24h, 48h et 72h d'immersions sont présentés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 4.** L'évolution des vitesses de corrosion, taux de recouvrement et l'efficacité inhibitrices.

	$V_{corr}$ (mg/cm <sup>2</sup> .h)	$\theta$	EI (%)
<b>H<sub>2</sub>O</b>	$2.111 \cdot 10^{-3}$	---	---
<b><i>Prunus armeniaca L</i></b>			
<b>PS<sub>G</sub> 24 h</b>	$1.841 \cdot 10^{-3}$	0.1279	12.79
<b>PS<sub>G</sub> 48 h</b>	$8.56 \cdot 10^{-4}$	0.5944	59.44
<b>PS<sub>G</sub> 72 h</b>	$5.33 \cdot 10^{-4}$	0.7471	74.71
<b><i>Boswellia carterii</i></b>			
<b>PS<sub>L</sub> 24 h</b>	$2.083 \cdot 10^{-3}$	0.0132	1.32
<b>PS<sub>L</sub> 48 h</b>	$2.003 \cdot 10^{-3}$	0.0511	5.11
<b>PS<sub>L</sub> 72 h</b>	$6.138 \cdot 10^{-4}$	0.6953	69.53

Les mesures de la perte de masse sont une première approche de la caractérisation de l'inhibition de la corrosion de l'acier par les inhibiteurs étudiés en milieu acide chlorhydrique (HCl 1M). On constate que les inhibiteurs étudiés sont instables en termes de l'efficacité inhibitrice d'un temps d'immersion à un autre.

D'après les résultats présentés dans le tableau 4, nous remarquons que pour les deux inhibiteurs la vitesse de corrosion diminue par rapport au blanc, tandis que l'efficacité inhibitrice croît avec le temps d'immersion, on résulte que le temps d'immersion critique pour les deux inhibiteurs PS<sub>G</sub> et PS<sub>L</sub> est de l'ordre de 72h, ce temps d'immersion nous donne une efficacité maximale de l'ordre de 74.71 % et 69.53% respectivement.

Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure suivante :

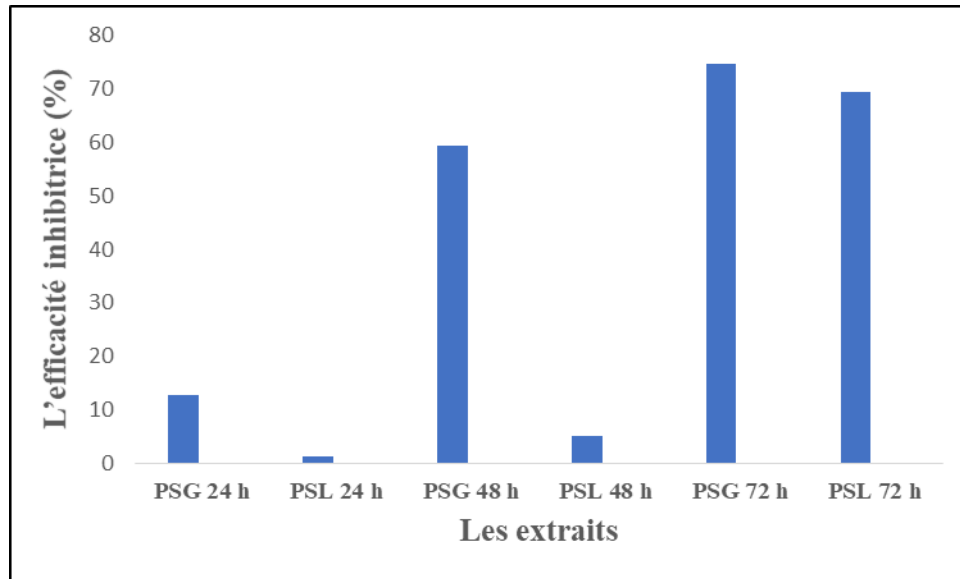


Figure 29. Les valeurs d'efficacité inhibitrice obtenue par l'essai gravimétrique.

#### IV.5.2. Les courbes de polarisation

Pour tracer les courbes de Tafel, on a choisi le domaine de linéarité des branches cathodiques et anodiques dans la courbe de polarisation et tracé le courbe  $\log |i| = f(E)$ .

Le tableau 5 regroupe les valeurs des paramètres électrochimiques déterminées à partir des courbes de polarisation précédemment obtenues, la densité du courant de corrosion ( $i_{\text{corr}}$ ), le potentiel de corrosion ( $E_{\text{corr}}$ ) ainsi que l'efficacité inhibitrice de corrosion EI (%).

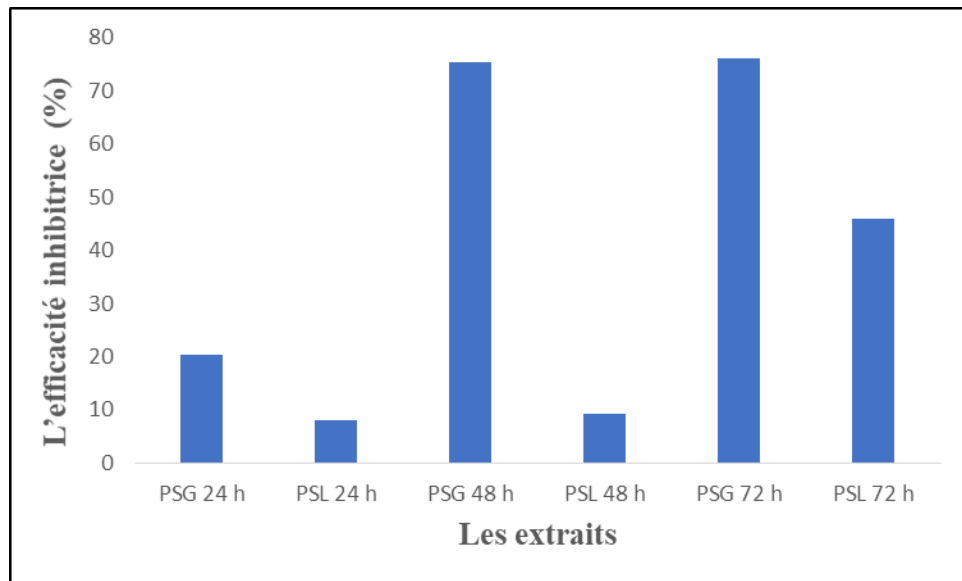
**Tableau 5.** Les paramètres électrochimiques et l'efficacité inhibitrice pour les inhibiteurs  $PS_G$  et  $PS_L$  pour la corrosion de l'acier dans HCl 1M obtenus par les courbes de polarisation.

	$I_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A}$ )	$E_{\text{corr}}$ (mV)	EI (%)
HCl	23.585	- 427.608	---
H <sub>2</sub> O	231.062	- 449.629	---
<i>Prunus armeniaca L</i>			
PS <sub>G</sub> 24 h	183.999	- 443.256	20.37
PS <sub>G</sub> 48 h	56.891	- 483.033	75.38
PS <sub>G</sub> 72 h	55.32	- 432.837	76.06
<i>Boswellia carterii</i>			
PS <sub>L</sub> 24 h	249.347	- 443.592	-7.91
PS <sub>L</sub> 48 h	209.585	- 504.141	9.29
PS <sub>L</sub> 72 h	124.965	- 434.097	45.92

D'après l'analyse des résultats illustrés dans le tableau 4, nous constatons que :

- Les extraits des polysaccharides de *Prunus armeniaca* L possèdent une excellente propriété inhibitrice de la corrosion de l'acier X50 en milieu HCl 1M.
- L'efficacité inhibitrice de corrosion augmente en fonction du temps d'immersion, cette augmentation est probablement due à la formation d'un film à la surface du métal qui a protégé celui-ci contre l'effet agressif de l'électrolyte.

Les résultats de l'efficacité inhibitrice des extraits des polysaccharides de *Prunus armeniaca* L et *Boswellia carterii*, sont représentés dans la figure suivante :

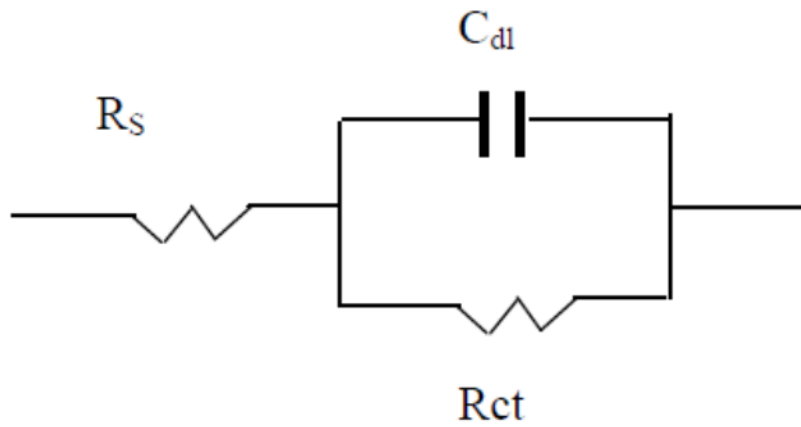


**Figure 30.** L'efficacité inhibitrice des extraits des polysaccharides de *Prunus armeniaca* L Et *Boswellia carterii*.

Nos résultats montrent que 72 h d'immersion dans l'extrait polysaccharidique de *Prunus armeniaca* L a révélé une efficacité inhibitrice supérieure à celle obtenus avec l'extrait de *Boswellia carterii*, ces résultats sont de l'ordre de 76.06 % pour *Prunus armeniaca* L et 45.92 % Pour *Boswellia carterii*.

### IV.5.3. Spectroscopie d'impédance électrochimique

La mise en contact d'une électrode métallique et d'un électrolyte se voit accompagnée de l'apparition d'une impédance non faradique de type capacitive et le transfert de charge à l'interface métal/solution peut être modélisé par l'association en parallèle d'une impédance faradique généralement représenté par une résistance de transfert de charge  $R_{tc}$  et une capacité de double couche électrique  $C_{dl}$  représenté par un circuit simple **Figure 31**.



**Figure 31.** Circuit équivalent simple.

La valeur de l'impédance dépend de plusieurs facteurs qui sont : la nature du couple métal/électrolyte, la fréquence du signal traversant l'interface et la densité de courant.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion générale

L'utilisation d'extraits de plantes comme inhibiteurs de la corrosion des métaux/alliages a suscité un très grand intérêt de la part des chercheurs ces derniers temps. Cela tient principalement au fait que le règne végétal représente une source importante d'une immense variété de molécules bioactives.

Dans le présent travail, on s'est intéressé aux effets antioxydants et anticorrosive des extraits issus des deux plantes *Prunus armeniaca L* et *Boswellia carterii* qui sont peu étudiées sur le plan phytochimique.

L'évaluation quantitative des polyphénols dans les extraits analysés montre une existence faible de ces métabolites. En parallèle, l'analyse quantitative des polysaccharides montre le contraire (riche en polysaccharides).

L'analyse de l'activité antioxydante *in vitro* a montré un pouvoir réducteur et une activité antiradicalaire dans l'extrait polysaccharidiques de *Prunus armeniaca L*, par contre, dans *Boswellia carterii* l'extrait hydroalcoolique possède la meilleure activité. Les valeurs des IC<sub>50</sub> des extraits des deux plantes sont très proches.

L'évaluation de l'activité anticorrosive a été déterminée par une méthode gravimétriques et une méthode électrochimique qui présente les courbes de polarisation et l'impédance électrochimique (EIS). L'étude de l'efficacité inhibitrice des extraits polysaccharidique des deux plantes par la méthode de Tafel, a révélé que l'extrait des polysaccharides de la gomme de *Prunus armeniaca L* est plus efficace (76,06 %) que celui de *boswellia cartrii* (45.92 %) pour un temps d'immersion de 72h. Quant à la méthode gravimétriques elle a montré que l'efficacité maximale est l'ordre de 74.71 % pour *prunus armeniaca l* et 69.53% pour *boswellia carterii* avec un temps d'immersion de 72 h.

Concernant la méthode d'impédance, on a trouvé que le rendement inhibiteur augmente avec le temps d'immersion.

# **Références Bibliographiques**

## Références bibliographiques

- [1] I. Thornton, "Metals in the global environment: facts and misconceptions," p. 2, 1995.
- [2] C. P. Cutler, "Use of metals in our society," *Met. Allergy From Dermat. to Implant Device Fail.*, pp. 3–16, 2018.
- [3] H. Derfouf, Y. Harek, L. Larabi, W. J. Basirun, and M. Ladan, "Corrosion inhibition activity of carbon steel in 1.0 M hydrochloric acid medium using Hammada scoparia extract: gravimetric and electrochemical study," *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 33, no. 8, pp. 808–833, 2019.
- [4] G. Santos, "The importance of metallic materials as biomaterials," *Adv Tissue Eng Regen Med Open Access*, vol. 3, no. 1, pp. 300–302, 2017.
- [5] A. Kamis, "Corrosion affects all materials-metal and non-metal. Annually, it costs society billion of dollars. It is not only financially damaging to the economies, but also wasting our limited natural resources, damaging the environment and causing a great deal of," *Bul. FKKS SA*, vol. 6, no. 2, pp. 12–15, 1992.
- [6] S. J. Kulkarni, "A review on studies and research on corrosion and its prevention," *Int J Res Rev*, vol. 2, no. 9, pp. 574–578, 2015.
- [7] T. Ibrahim and M. AbouZour, "Corrosion inhibition of mild steel using fig leaves extract in hydrochloric acid solution," *Int. J. of ELECTROCHEMICALSCIENCE*, vol. 6, pp. 6442–6455, 2011.
- [8] B. E. Rani and B. B. J. Basu, "Green inhibitors for corrosion protection of metals and alloys: an overview," *Int. J. Corros.*, vol. 2012, 2012.
- [9] Z. Z. Tasić, M. B. P. Mihajlović, A. T. Simonović, M. B. Radovanović, and M. M. Antonijević, "Ibuprofen as a corrosion inhibitor for copper in synthetic acid rain solution," *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, p. 14710, 2019.
- [10] O. K. Abiola, N. C. Oforika, E. E. Ebenso, and N. M. Nwinuka, "Eco-friendly corrosion inhibitors: the inhibitive action of Delonix Regia extract for the corrosion of aluminium in acidic media," *Anti-Corrosion Methods Mater.*, vol. 54, no. 4, pp. 219–224, 2007.
- [11] A. Y. El-Etre, "Natural honey as corrosion inhibitor for metals and alloys. I. Copper in neutral aqueous solution," *Corros. Sci.*, vol. 40, no. 11, pp. 1845–1850, 1998.
- [12] A. Y. El-Etre, "Inhibition of aluminum corrosion using Opuntia extract," *Corros. Sci.*, vol.

- 45, no. 11, pp. 2485–2495, 2003.
- [13] P. R. Roberge, *Corrosion engineering Principles and Practice*. McGraw-Hill Education, 2008.
- [14] K. Cissé, D. Gassama, A. A. Diagne, and M. Badji, “Influence of the Inhibition of Corrosion of S235 Steel in a Solution of Perchloric Acid by Gum Arabic,” *Am. J. Mater. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 17–21, 2020.
- [15] A. Peter, S. K. Sharma, and I. B. Obot, “Anticorrosive efficacy and adsorptive study of guar gum with mild steel in acidic medium,” *J. Anal. Sci. Technol.*, vol. 7, pp. 1–15, 2016.
- [16] R. Javaherdashti, “A Short Journey to the Realm of Corrosion,” in *Microbiologically Influenced Corrosion: An Engineering Insight*, London: Springer London, 2008, p. 1. doi: 10.1007/978-1-84800-074-2\_1.
- [17] E. McCafferty, *Introduction to corrosion science*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [18] F. Moulinier, “Combien coute la corrosion,” *Tech. Sci. Methodes*, vol. 7, pp. 26–38, 2010.
- [19] G. Koch, “Cost of corrosion,” *Trends oil gas Corros. Res. Technol.*, pp. 3–30, 2017.
- [20] D. Landolt, *Corrosion et chimie de surfaces des métaux*, vol. 12. PPUR presses polytechniques, 2003.
- [21] F. Suedile, “Extraction, caractérisation et étude électrochimique de molécules actives issues de la forêt amazonienne pour la protection du zinc contre la corrosion,” Antilles-Guyane, 2014.
- [22] S. G. Al-Subai, “Corrosion Resistance of Austenitic Stainless Steel in Acetic Acid Solution Containing Bromide Ions,” University of Manchester, 2011.
- [23] Y. I. Kuznetsov, A. D. Mercer, and J. G. N. Thomas, “Electrochemical Aspects of the Inhibition of Corrosion of Metals,” in *Organic Inhibitors of Corrosion of Metals*, Boston, MA: Springer US, 1996, p. 1. doi: 10.1007/978-1-4899-1956-4\_1.
- [24] B. D. Craig, R. A. Lane, and D. H. Rose, “Corrosion prevention and control: A program management guide for selecting materials,” *Adv. Mater. Manuf. Test. Inf. Anal. Cent.*, p. 61,72, 2006.
- [25] wiley-scrinever, *corrosion engineering*, 1st ed. 2014.

- [26] S. Papavinasam, “Corrosion Control in the Oil and Gas Industry.” Elsevier, pp. 249–300, 2014.
- [27] A. Dehghanghadikolaei, H. Ibrahim, A. Amerinatanzi, and M. Elahinia, “Biodegradable magnesium alloys,” in *Metals for biomedical devices*, Elsevier, 2019, pp. 265–289.
- [28] M. Niinomi, *Metals for biomedical devices*. Woodhead publishing, 2019.
- [29] E. M. da Costa *et al.*, “CREVICE CORROSION ON STAINLESS STEELS IN OIL AND GAS INDUSTRY: A REVIEW OF TECHNIQUES FOR EVALUATION, CRITICAL ENVIRONMENTAL FACTORS AND DISSOLVED OXYGEN,” *Eng. Fail. Anal.*, p. 106955, 2023.
- [30] N. Pauze and D. David, “Corrosion fatigue in the short-transverse direction of AA 2024-T351 plates containing localized corrosion defects Fatigue corrosion dans le sens court de tôles d’aluminium 2024-T351 présentant des défauts de corrosion localisée,” Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2008. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-00359611>
- [31] R. J. K. Wood, “Erosion–corrosion interactions and their effect on marine and offshore materials,” *Wear*, vol. 261, no. 9, pp. 1012–1023, 2006.
- [32] E. Mahdi, A. Rauf, and E. O. Eltai, “Effect of temperature and erosion on pitting corrosion of X100 steel in aqueous silica slurries containing bicarbonate and chloride content,” *Corros. Sci.*, vol. 83, pp. 48–58, 2014.
- [33] T. Shoji, Z. Lu, and Q. Peng, “Factors affecting stress corrosion cracking (SCC) and fundamental mechanistic understanding of stainless steels,” in *Stress corrosion cracking*, Elsevier, 2011, pp. 245–272.
- [34] E. Bardal, “Corrosion and Protection,” E. Bardal, Ed., London: Springer London, 2004, p. 135,136,282,90. doi: 10.1007/978-1-85233-845-9\_7.
- [35] R. Landolfò, L. Cascini, and F. Portioli, “Modeling of metal structure corrosion damage: A state of the art report,” *Sustainability*, vol. 2, no. 7, pp. 2163–2175, 2010.
- [36] H. Marmi, “Amélioration de la résistance à la corrosion électrochimique des aciers par utilisation des inhibiteurs,” Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [37] X. Wu and M. Philippe, “Adsorption and thermal stability of 2-mercaptobenzothiazole and 2-mercaptobenzimidazole deposited on Cu(111) surfaces and effects on corrosion

- inhibition mechanisms Adsorption et stabilité thermique de 2-mercaptopbenzothiazole et 2-mercaptopbenzimidazole dé,” Université Paris sciences et lettres, 2020. [Online]. Available: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-03551413>
- [38] V. Hasannaemi, M. Sadeghilaridjani, and S. Mukherjee, *Electrochemical and corrosion behavior of metallic glasses*. MDPI Books, 2021.
- [39] E. Bardal, “”Corrosion and Protection”springer.” London, p. 135,136,282,283, 2003.
- [40] A. Kausar, “Graphene to Polymer/Graphene Nanocomposites: Emerging Research and Opportunities,” pp. 145–172, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90937-2.00006-X>.
- [41] S. Payan, “Comportement à la corrosion galvanique de matériaux composites à matrice d’alliage d’aluminium renforcée par des fibres de carbone haut-module,” Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, 2001.
- [42] S. Kharzi, M. Haddadi, and A. Malek, “Conception d’un dispositif de protection cathodique alimenté par énergie solaire photovoltaïque,” *Rev. des Energies Renouvelables ICRESD\_07 Tlemcen*, 2007.
- [43] S. Audisio and G. Béranger, *Anticorrosion et durabilité dans le bâtiment, le génie civil et les ouvrages industriels*. PPUR Presses polytechniques, 2010.
- [44] Y. L. Kobzar and K. Fatyeyeva, “Ionic liquids as green and sustainable steel corrosion inhibitors: Recent developments,” *Chem. Eng. J.*, vol. 425, p. 131480, 2021.
- [45] E. Ech-Chihbi *et al.*, “Computational, MD simulation, SEM/EDX and experimental studies for understanding adsorption of benzimidazole derivatives as corrosion inhibitors in 1.0 M HCl solution,” *J. Alloys Compd.*, vol. 844, p. 155842, 2020.
- [46] B. Anandkumar, N. G. Krishna, R. V. Solomon, T. Nandakumar, and J. Philip, “Synergistic enhancement of corrosion protection of carbon steels using corrosion inhibitors and biocides: Molecular adsorption studies, DFT calculations and long-term corrosion performance evaluation,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 11, no. 3, p. 109842, 2023.
- [47] M. Faustin, “Étude de l’effet des alcaloïdes sur la corrosion de l’acier C38 en milieu acide chlorhydrique 1M: application à *Aspidosperma album* et *Geissospermum laeve* (Apocynacées),” Antilles-Guyane, 2013.

- [48] V. S. Sastri, *Green corrosion inhibitors: theory and practice*. John Wiley & Sons, 2012.
- [49] C. FIAUD, “Inhibiteurs de corrosion,” *Tech. l’ingénieur. Matériaux métalliques*, no. M160, p. M160. 1-M160. 16, 1990.
- [50] F. Constantin, “Etude de l’efficacité d’inhibiteurs de corrosion utilisés dans les liquides de refroidissement,” INSA de Lyon; Universitatea din Pitești. Facultatea de Litere (România), 2011.
- [51] C. Verma, M. A. Quraishi, and A. Singh, “Corrigendum to ‘2-Aminobenzene-1, 3-dicarbonitriles as green corrosion inhibitor for mild steel in 1 M HCl: Electrochemical, thermodynamic, surface and quantum chemical investigation’ [Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 49 (2015) 229–239,” *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 100, no. 58, p. 572, 2016.
- [52] F. Bolzoni, A. Brenna, and M. Ormellese, “Recent advances in the use of inhibitors to prevent chloride-induced corrosion in reinforced concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 154, p. 106719, 2022.
- [53] R. T. Loto, C. A. Loto, and A. P. I. Popoola, “Corrosion inhibition of thiourea and thiadiazole derivatives: a review,” *J. Mater. Environ.*, vol. 3, no. 5, pp. 885–894, 2012.
- [54] M. A. Kiani, M. F. Mousavi, S. Ghasemi, M. Shamsipur, and S. H. Kazemi, “Inhibitory effect of some amino acids on corrosion of Pb–Ca–Sn alloy in sulfuric acid solution,” *Corros. Sci.*, vol. 50, no. 4, pp. 1035–1045, 2008.
- [55] O. L. RIGGS JR and R. M. Hurd, “Temperature coefficient of corrosion inhibition,” *Corrosion*, vol. 23, no. 8, pp. 252–260, 1967.
- [56] K. Sayin and D. Karakaş, “Quantum chemical studies on the some inorganic corrosion inhibitors,” *Corros. Sci.*, vol. 77, pp. 37–45, 2013.
- [57] K. Tamalmani and H. Husin, “Review on corrosion inhibitors for oil and gas corrosion issues,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 10, p. 3389, 2020.
- [58] H. Nahali, “Évaluation de l’efficacité inhibitrice de Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> contre la corrosion des armatures du béton: Apport de l’émission acoustique dans la caractérisation et le contrôle de l’anticorrosion,” INSA de Lyon; Université de Tunis El Manar, 2015.
- [59] M. Hosseini, S. F. L. Mertens, and M. R. Arshadi, “Synergism and antagonism in mild steel corrosion inhibition by sodium dodecylbenzenesulphonate and

- hexamethylenetetramine,” *Corros. Sci.*, vol. 45, no. 7, pp. 1473–1489, 2003.
- [60] H. Hamani, “Synthèse, caractérisation et étude du pouvoir inhibiteur de nouvelles molécules bases de Schiff. setif: Université Ferhat Abbas–Setif,” These de doctorat, 2015.
- [61] Y. Dewangan, A. K. Dewangan, and D. K. Verma, *Polysaccharide as Green Corrosion Inhibitor*, vol. 107. 2021.
- [62] L. P. T. Benítez, P. J. M. Castellar, E. D. A. Percy, and M. J. B. Bravo, “Uso de extractos de plantas como inhibidores de corrosión,” *Inf. técnico*, vol. 78, no. 2, pp. 155–164, 2014.
- [63] A. Singh, *Corrosion Inhibitors*. BoD–Books on Demand, 2019.
- [64] M. Aliofkhaezai, “Corrosion inhibitors, principles and recent applications,” p. 98, 2018.
- [65] I. L. Kondratova, P. Montes, and T. W. Bremner, “Natural marine exposure results for reinforced concrete slabs with corrosion inhibitors,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 25, no. 4–5, pp. 483–490, 2003, doi: 10.1016/S0958-9465(02)00088-4.
- [66] C. M. Hansson, L. Mammoliti, and B. B. Hope, “Corrosion inhibitors in concrete—part I: the principles,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 28, no. 12, pp. 1775–1781, 1998, doi: 10.5772/57255.
- [67] H. E. Jamil, A. Shrii, R. Boulif, M. F. Montemor, and M. G. S. Ferreira, “Corrosion behaviour of reinforcing steel exposed to an amino alcohol based corrosion inhibitor,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 6, pp. 671–678, 2005.
- [68] S. About, “Green inhibitors to reduce the corrosion damage,” in *Corrosion*, IntechOpen London, 2020, p. 4,5.
- [69] S.-Y. Chiou, “A study of the effect of some inhibitors on the corrosion rates of austenitic stainless steels in sulfuric acid,” 1989.
- [70] F. Bentiss, M. Traisnel, and M. Lagrenee, “The substituted 1, 3, 4-oxadiazoles: a new class of corrosion inhibitors of mild steel in acidic media,” *Corros. Sci.*, vol. 42, no. 1, p. 127, 2000.
- [71] P. B. Raja and M. G. Sethuraman, “Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media—a review,” *Mater. Lett.*, vol. 62, no. 1, p. 113, 2008.
- [72] N. O. Eddy, S. A. Odoemelam, and A. O. Odiongenyi, “Inhibitive, adsorption and synergistic studies on ethanol extract of *Gnetum africana* as green corrosion inhibitor for mild steel in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,” *Green Chem. Lett. Rev.*, vol. 2, no. 2, pp. 111–119, 2009.

- [73] L. R. Chauhan and G. Gunasekaran, "Corrosion inhibition of mild steel by plant extract in dilute HCl medium," *Corros. Sci.*, vol. 49, no. 3, pp. 1143–1161, 2007.
- [74] M. Gabsi *et al.*, "The curious case of polyphenols as green corrosion inhibitors: a review on their extraction, design, and applications," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, no. 21, pp. 59081–59105, 2023.
- [75] M. J. Kassim and T. K. Wei, "Plants polyphenols: an alternative source for green corrosion inhibitor," in *Proceedings of The Annual International Conference, Syiah Kuala University-Life Sciences & Engineering Chapter*, 2012.
- [76] K. Halake *et al.*, "Applications using the metal affinity of polyphenols with mussel-inspired chemistry," *Macromol. Res.*, vol. 26, pp. 93–99, 2018.
- [77] X. Li, S. Deng, H. Fu, and G. Mu, "Inhibition effect of 6-benzylaminopurine on the corrosion of cold rolled steel in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution," *Corros. Sci.*, vol. 51, no. 3, pp. 620–634, 2009.
- [78] J. Singthong, S. Ningsanond, and S. W. Cui, "Extraction and physicochemical characterisation of polysaccharide gum from Yanang (*Tiliacora triandra*) leaves," *Food Chem.*, vol. 114, no. 4, pp. 1301–1307, 2009.
- [79] J. Kang, S. W. Cui, J. Chen, G. O. Phillips, Y. Wu, and Q. Wang, "New studies on gum ghatti (*Anogeissus latifolia*) part I. Fractionation, chemical and physical characterization of the gum," *Food Hydrocoll.*, vol. 25, no. 8, pp. 1984–1990, 2011.
- [80] P. Petrea, G. Amarioarei, N. Apostolescu, A. C. Puiel, and S. Ciovica, "Some aspects of the characterization of vegetable gums: *Prunus persica* (plum) and *Prunus domestica* (cherry)," *Cellul Chem Technol*, vol. 47, pp. 369–375, 2013.
- [81] P. Zeng, Y. Chen, L. Zhang, and M. Xing, "Ganoderma lucidum polysaccharide used for treating physical frailty in China," *Prog. Mol. Biol. Transl. Sci.*, vol. 163, pp. 179–219, 2019.
- [82] T. Brindha, J. Mallika, and V. Sathyanarayana Moorthy, "Synergistic effect between starch and substituted piperidin-4-one on the corrosion inhibition of mild steel in acidic medium," *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 6, no. 1, pp. 120–191, 2015.
- [83] A. Popova, E. Sokolova, S. Raicheva, and M. Christov, "AC and DC study of the temperature effect on mild steel corrosion in acid media in the presence of benzimidazole derivatives," *Corros. Sci.*, vol. 45, no. 1, pp. 33–58, 2003.

- [84] H. Cang, Z. Fei, H. Xiao, J. Huang, and Q. Xu, "Inhibition effect of reed leaves extract on steel in hydrochloric acid and sulphuric acid solutions," *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 7, pp. 8869–8882, 2012.
- [85] C. Kamal and M. G. Sethuraman, "Spirulina platensis—A novel green inhibitor for acid corrosion of mild steel," *Arab. J. Chem.*, vol. 5, no. 2, pp. 155–161, 2012.
- [86] A. Fiala, A. Chibani, A. Darchen, A. Boulkamh, and K. Djebbar, "Investigations of the inhibition of copper corrosion in nitric acid solutions by ketene dithioacetal derivatives," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 253, no. 24, pp. 9347–9356, 2007.
- [87] F. Bentiss, M. Lagrenee, M. Traisnel, and J. C. Hornez, "Corrosion inhibition of mild steel in 1 M hydrochloric acid by 2, 5-bis (2-aminophenyl)-1, 3, 4-oxadiazole," *Corrosion*, vol. 55, no. 10, pp. 968–976, 1999.
- [88] M. Lebrini, "Synthèses et études physicochimiques de nouveaux thiadiazoles inhibiteurs de corrosion de l'acier en milieu acide," Lille 1, 2005.
- [89] D.C.Zocher, "No Title," *Mater. Perform.*, vol. 15, p. 33, 1976.
- [90] et Q.M. A. Khan S, "Aligarh Muslim University,35." India, pp. 73–78, 2002.
- [91] S. Tazi *et al.*, "L'effet Inhibiteur d'EugénoI sur la corrosion du Laiton dans NaCl 3%(The Inhibition effect of Brass corrosion in NaCl 3% by Eugenol)," *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 7, no. 5, pp. 1642–1652, 2016.
- [92] M. A. Hegazy, "A novel Schiff base-based cationic gemini surfactants: synthesis and effect on corrosion inhibition of carbon steel in hydrochloric acid solution," *Corros. Sci.*, vol. 51, no. 11, pp. 2610–2618, 2009.
- [93] N. Srisuwan, "Propriétés inhibitrices d'un mélange d'amines grasses et de sébaçate de sodium vis-à-vis de la corrosion d'un acier au carbone," 2008.
- [94] J. E. B. Randles, "Kinetics of rapid electrode reactions," *Discuss. faraday Soc.*, vol. 1, pp. 11–19, 1947.
- [95] K. Rebbas, R. Bounar, R. Gharzouli, M. Ramdani, Y. Djellouli, and D. Alatou, "Plants of interest medicinal and ecological in the area of Ouanougha (M'sila, Algeria)," *Phytothérapie*, vol. 10, pp. 131–142, 2012, doi: <https://doi.org/10.1007/s10298-012-0701-6>.
- [96] A. Ranjbar Douchaly, K. Jaimand, and S. Mozaffari, "Comparison of essential oils

- compositions of *Boswellia carteri* Birdwood as a food and non-food in different distillation from Iranian market,” *J. Med. plants By-product*, vol. 5, no. 1, pp. 39–44, 2016.
- [97] F. Dupont and F. Guignard, *Botanique: les familles de plantes*. Elsevier Health Sciences, 2015.
- [98] A. Weeks, D. C. Daly, and B. B. Simpson, “The phylogenetic history and biogeography of the frankincense and myrrh family (Burseraceae) based on nuclear and chloroplast sequence data,” *Mol. Phylogenet. Evol.*, vol. 35, no. 1, pp. 85–101, 2005.
- [99] R. M. T. Dahlgren, “A revised system of classification of the angiosperms,” *Bot. J. Linn. Soc.*, vol. 80, no. 2, pp. 91–124, 1980.
- [100] I. I. Apg, “An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG II,” *Bot J Linn Soc*, vol. 141(4), pp. 399–436, 2003.
- [101] A. L. Rüdiger, A. C. Siani, and V. F. V. Junior, “The chemistry and pharmacology of the South America genus *Protium* Burm. f.(Burseraceae),” *Pharmacogn. Rev.*, vol. 1, no. 1, pp. 93–104, 2007.
- [102] F. Bahlouli, A. Tiaïba, and A. Slamani, “Etude des différentes méthodes de séchage d’abricot, point sur les méthodes de séchage traditionnelles dans la région du Hodna, wilaya de M’Sila,” *Rev. Ener. Renouv. SMSTS*, vol. 8, pp. 61–66, 2008.
- [103] J. Grimplet, “Génomique fonctionnelle et marqueurs de qualité chez l’abricot,” 2004.
- [104] K. Zaghdoudi, “Optimisation de l’extraction des caroténoïdes à partir du persimmon (*Diospyros kaki* L.), de l’abricot (*Prunus armeniaca* L.) et de la pêche (*Prunus persica* L.): étude photophysique en vue d’une application en thérapie photodynamique (PDT),” Université de Lorraine, 2015.
- [105] W. Li *et al.*, “Genetic diversity, population structure, and relationships of apricot (*Prunus*) based on restriction site-associated DNA sequencing,” *Hortic. Res.*, vol. 7, 2020.
- [106] K. U. Yilmaz and K. Gurcan, “Genetic diversity in apricot,” *Genet. Divers. Plants*, pp. 249–270, 2012.
- [107] B. Mehta, “Effect of pre harvest foliar sprays of boron and retain® for improvement of quality parameters of apricots (*Prunus armeniaca* L.) in Tasmania,” University of Tasmania, 2013.

- [108] A. Fahn, E. Werker, and P. Ben-Tzur, "Seasonal effects of wounding and growth substances on development of traumatic resin ducts in *Cedrus libani*," *New Phytol.*, vol. 82, no. 2, pp. 537–544, 1979.
- [109] J. W. Gooch, "Gumming," in *Encyclopedic Dictionary of Polymers*, J. W. Gooch, Ed., New York, NY: Springer New York, 2007, p. 474. doi: 10.1007/978-0-387-30160-0\_5632.
- [110] G. A. Valencia, E. N. Zare, P. Makvandi, and T. J. Gutiérrez, "Self-assembled carbohydrate polymers for food applications: A review," *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 18, no. 6, pp. 2009–2024, 2019.
- [111] M. Jindal, V. Rana, V. Kumar, R. S. Singh, J. F. Kennedy, and A. K. Tiwary, "Sulfation of *Aegle marmelos* gum: Synthesis, physico-chemical and functional characterization," *Carbohydr. Polym.*, vol. 92, no. 2, pp. 1660–1668, 2013.
- [112] A. M. Hamdani, I. A. Wani, and N. A. Bhat, "Sources, structure, properties and health benefits of plant gums: A review," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 135, pp. 46–61, 2019.
- [113] M. Izydorczyk, S. W. Cui, and Q. Wang, "Polysaccharide gums: structures, functional properties, and applications," *Food carbohydrates Chem. Phys. Prop. Appl.*, vol. 293, 2005.
- [114] S. Bahadur, U. K. Sahu, D. Sahu, G. Sahu, and A. Roy, "Review on natural gums and mucilage and their application as excipient," *J. Appl. Pharm. Res.*, vol. 5, no. 4, pp. 13–21, 2017.
- [115] D. O. Bokov, M. S. Sokurenko, A. D. Malinkin, E. P. Khromchenkova, L. V. Shevyakova, and V. V. Bessonov, "Physicochemical Features, Qualitative and Quantitative Analysis, Present Status and Application Prospects of Polysaccharide Gums," *Int. J. Pharm. Qual. Assur.*, vol. 11, no. 1, pp. 154–162, 2020.
- [116] S. Barak, D. Mudgil, and S. Taneja, "Exudate gums: chemistry, properties and food applications—a review," *J. Sci. Food Agric.*, vol. 100, no. 7, pp. 2828–2835, 2020.
- [117] G. Sharma *et al.*, "Guar gum and its composites as potential materials for diverse applications: A review," *Carbohydr. Polym.*, vol. 199, pp. 534–545, 2018.
- [118] M. Saniewski, K. Miyamoto, and J. Ueda, "Methyl jasmonate induces gums and stimulates anthocyanin accumulation in peach shoots," *J. Plant Growth Regul.*, vol. 17, pp. 121–124, 1998.

- [119] J.-Q. Yu, Y.-L. Geng, D.-J. Wang, H.-W. Zhao, L. Guo, and X. Wang, “Terpenes from the gum resin of *Boswellia carterii* and their NO inhibitory activities,” *Phytochem. Lett.*, vol. 28, pp. 59–63, 2018.
- [120] F. Guo, L. Zhao, K. Zhang, X. Wang, and J. Yu, “Anti-inflammatory and hepatoprotective cembranes from the gum resin of *Boswellia carterii*,” *Phytochem. Lett.*, vol. 46, pp. 6–10, 2021.
- [121] J. Machenaud, “Étude bibliographique et analytique des acides  $\beta$ -boswelliques et des guggulstérones, molécules constitutives des résines d’encens et de myrrhe, excipients d’un médicament à usage humain dans un nouveau contexte réglementaire,” 2017.
- [122] N. Banno *et al.*, “Anti-inflammatory activities of the triterpene acids from the resin of *Boswellia carteri*,” *J. Ethnopharmacol.*, vol. 107, no. 2, pp. 249–253, 2006.
- [123] F. Modugno, E. Ribechini, and M. P. Colombini, “Chemical study of triterpenoid resinous materials in archaeological findings by means of direct exposure electron ionisation mass spectrometry and gas chromatography/mass spectrometry,” *Rapid Commun. Mass Spectrom. An Int. J. Devoted to Rapid Dissem. Up-to-the-Minute Res. Mass Spectrom.*, vol. 20, no. 11, pp. 1787–1800, 2006.
- [124] M. Lemenith and D. Teketay, “Frankincense and myrrh resources of Ethiopia: II. Medicinal and industrial uses,” *SINET Ethiop. J. Sci.*, vol. 26, no. 2, pp. 161–172, 2003.
- [125] F. A. Badria, “Frankincense (Heaven’s Gift)—chemistry, biology, and clinical applications,” *Evidence-based Strateg. Herb. Med. Psychiatr. Disord. Emerg. Med.*, pp. 1–22, 2015.
- [126] W. Tadesse, G. Desalegn, and R. Alia, “Natural gum and resin bearing species of Ethiopia and their potential applications,” *For. Syst.*, vol. 16, no. 3, pp. 211–221, 2007.
- [127] T. Shen and H. Lou, “Bioactive constituents of myrrh and frankincense, two simultaneously prescribed gum resins in Chinese traditional medicine,” *Chem. Biodivers.*, vol. 5, no. 4, pp. 540–553, 2008.
- [128] Z. Jemmali, “Développements méthodologiques en TLC/MALDITOF MS et GC/MS pour l’analyse des composés terpénoïdes présents dans les résines végétales,” Université d’Orléans, 2016.
- [129] A. Aksamija, “Étude chimique des matériaux résineux: oliban, dammar et mastic: application à des prélèvements artistiques et archéologiques,” Université d’Avignon,

- 2012.
- [130] P. Goetz, “De l’Histoire à la Recherche Moderne,” *La phytocosmétologie thérapeutique*, pp. 11–23, 2007.
- [131] M. Verhoff *et al.*, “Tetra- and pentacyclic triterpene acids from the ancient anti-inflammatory remedy frankincense as inhibitors of microsomal prostaglandin E<sub>2</sub> synthase-1,” *J. Nat. Prod.*, vol. 77, no. 6, pp. 1445–1451, 2014.
- [132] M. Mertens, A. Buettner, and E. Kirchhoff, “The volatile constituents of frankincense—a review,” *Flavour Fragr. J.*, vol. 24, no. 6, pp. 279–300, 2009.
- [133] Y.-J. Yoo, S.-E. Huh, Y. Kim, and H.-J. Jang, “Anti-cancer activity of *Boswellia carterii* extract alters the stress functional gene expression in the pancreatic cancer cell,” *BioChip J.*, vol. 13, pp. 191–201, 2019.
- [134] C. Drosou, K. Kyriakopoulou, A. Bimpilas, D. Tsimogiannis, and M. Krokida, “A comparative study on different extraction techniques to recover red grape pomace polyphenols from vinification byproducts,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 75, pp. 141–149, 2015.
- [135] N. Boizot and J.-P. J.-P. Charpentier, “Méthode rapide d’évaluation du contenu en composés phénoliques des organes d’un arbre forestier,” *Cah. des Tech. l’INRA*, pp. 79–82, 2006.
- [136] S. Boumerfeg, A. Baghiani, D. Messaoudi, S. Khennouf, and L. Arrar, “Antioxidant properties and xanthine oxidase inhibitory effects of *Tamus communis* L. root extracts,” *Phyther. Res. An Int. J. Devoted to Pharmacol. Toxicol. Eval. Nat. Prod. Deriv.*, vol. 23, no. 2, pp. 283–288, 2009.
- [137] A. Baghiani *et al.*, “Studies of antioxidants and xanthine oxidase inhibitory potentials of root and aerial parts of medicinal plant *Capparis spinosa* L.,” *Am. J. Med. Med. Sci.*, vol. 2, no. 1, pp. 25–32, 2012.
- [138] C. Sánchez-Moreno, “Methods used to evaluate the free radical scavenging activity in foods and biological systems,” *Food Sci. Technol. Int.*, vol. 8, no. 3, pp. 121–137, 2002.
- [139] P. Molyneux, “The use of the stable free radical diphenylpicrylhydrazyl (DPPH) for estimating antioxidant activity,” *Songklanakarin J. sci. technol.*, vol. 26, no. 2, pp. 211–219, 2004.
- [140] S. Agrawal, G. T. Kulkarni, and V. N. Sharma, “A comparative study on the antioxidant

- activity of methanolic extracts of *Terminalia paniculata* and *Madhuca longifolia*,” *Free Radicals Antioxidants*, vol. 1, no. 4, pp. 62–68, 2011.
- [141] H. S. Tsuru T and Gijutsu B, “No Title,” *J. Japan Soc. Corros. Eng.*, vol. 27, p. 573, 1978.
- [142] G. Ozkan, P. Franco, I. De Marco, J. Xiao, and E. Capanoglu, “A review of microencapsulation methods for food antioxidants: Principles, advantages, drawbacks and applications,” *Food Chem.*, vol. 272, pp. 494–506, 2019.