

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ 20 AOÛT 1955 SKIKDA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE DES PROCÉDÉS



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie de l'environnement

*ÉTUDE GRAVIMÉTRIQUE DE L'EFFET INHIBITEUR DE
L'EXTRAIT DE NOYAU DE PRUNUS ARMENIACA L VIS-À-
VIS LA CORROSION DE CUIVRE EN MILIEU D'ACIDE
CHLORHYDRIQUE 0,5M*

Soutenu le/06/2023

Réalisé par : Larit Abderrahim

Encadré par : Mr Souabaa Badis

Lahiouel Mohamed Rida

Chehouli Romeissa

Année Universitaire 2022- 2023

Remerciements

Avant tout, je remercie DIEU, sans lui ce manuscrit n'aurait pu exister et qui m'a amené à ce degré de scène cé.

Je tiens à exprimer ma très grande considération et ma vive Reconnnaissance aux sincères professeurs de l'Universités «20 Août 1955-Skikda » surtout ceux de département Génie des procédé et pétrochimie.

J'exprime me vifs remerciements à mon encadreur Mr SOUABAA BADIS pour son énorme contribution et orientation dans la réalisation de cette thèse.

Je remercie également les membres de jury qui ont bien voulu examiner et discuter ce travail.

Mes plus vifs remerciements à tous mes amis de la promotion.

Rida Romeissa Abderrahim



Dédicace

Tout d'abord, je remercie Allah pour nous avoir guidés et permis de mener à bien ce travail. Maintenant, je dédie ce travail à tous ceux qui m'ont soutenu, que ce soit de près ou de loin.

Je remercie ma famille, en particulier mes parents qui m'ont soutenu dans mon parcours, et je prie pour qu'Allah les protège. J'exprime également ma gratitude envers mes frères et sœurs Houda, Ahmed, Abdelraouf, Omaima, mes oncles et tantes, ainsi que tous les membres de ma famille pour leur soutien constant.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers mes amis Hassam, Mokhtar, Yasser, Zayd, Hocine, Abdelmalek et Amer pour les années que nous avons passées ensemble. Ils ont été une partie intégrante de mon parcours et m'ont apporté leur soutien et leur encouragement.

Je souhaite également exprimer mes remerciements sincères à mes professeurs qui m'ont enseigné depuis le début de mon parcours. Grâce à eux, j'ai pu acquérir les connaissances et les orientations nécessaires.

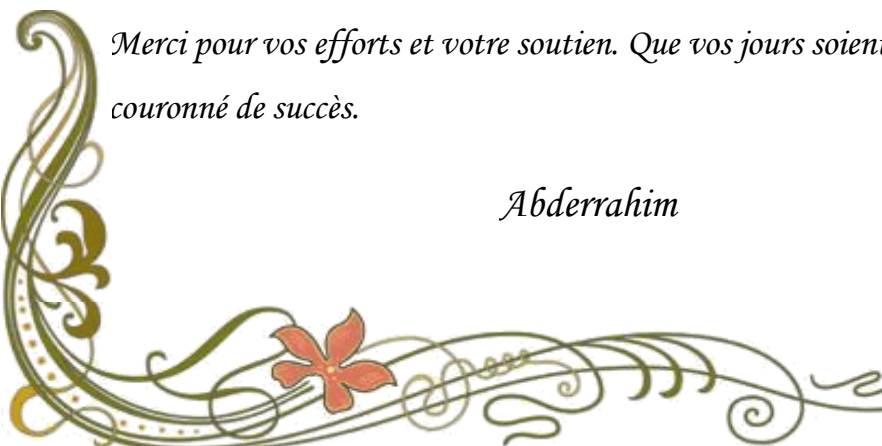
Et bien sûr, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers M. Souabaa Bades qui nous a accompagnés et aidés à mener à bien ce mémoire. Il a été d'une grande aide tout au long de ce voyage.

Je me remercie également pour ma patience et ma persévérance face à tous les défis et difficultés rencontrés tout au long de ce parcours.

N'oublions pas nos proches qui nous ont quittés. Nous prions Allah pour qu'Il leur accorde Sa miséricorde et les récompense de Sa bonté.

Merci pour vos efforts et votre soutien. Que vos jours soient joyeux et que votre chemin soit couronné de succès.

Abderrahim





Dédicace

*Premièrement je remercie Allah qui m'a donnée la
patience et la force pour Accomplir ce travail*

*Je dédie ce travail A ma famille en particulier à ma mère
et à mon père Je les remercie pour leur soutien et leur
patience à mon égard dans mon parcours académique, et
je leur présente mes sincères salutations*

*A mon encadreur Mr SOUABAA BADIS pour vos
conseils et votre guidage tout ou long de ce travail*

*A tout les membre de ma famille a tous mes amis et tous
ceux qui m'aimant...*

Rida





Dédicace

*Premièrement je remercie Allah qui m'a donnée la
patience et la force pour Accomplir ce travail*

*Je dédie ce travail A ma famille en particulier à ma mère
et à mon père Je les remercie pour leur soutien et leur
patience à mon égard dans mon parcours académique, et
je leur présente mes sincères salutations*

*A mon encadreur Mr SOUABAA BADIS pour vos
conseils et votre guidage tout ou long de ce travail*

*A tous les membre de ma famille a tous mes amis et tous
ceux qui m'aimant...*

Romeissa



Liste des figures

Figures		Pages
Figure I.1	Mécanisme de la corrosion atmosphérique : exemple de la corrosion d'un collecteur d'échappement.	05
Figure.I.2	Observation en microscopie électronique à balayage (MEB) d'une bactérie responsable de la corrosion bactérienne	06
Figure I.3	Corrosion uniforme	07
Figure I.4	Corrosion localisée	08
Figure I.5	Les différentes formes de la corrosion localisée	08
Figure I.6	Amorçages (a) et propagation (b) d'une piqûre	09
Figure I.7	Représentation schématique d'une pile de corrosion	10
Figure I.8	Représentation schématique ou phénomène de corrosion -écosion	10
Figure I.9	Corrosion par abrasion dans les pipes en cuivre	11
Figure I.10	Corrosion intergranulaire	11
Figure I.11	Fissures intergranulaires et transgranulaires	12
Figure I.12	Coupe métallographique montrant une corrosion sélective d'un laiton	12
Figure I.13	Classement des inhibiteurs de corrosion	14
Figure I.14	Diagrammes d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur anodique, cathodique ou mixte	16
Figure II.1	Extension historique de la culture de l'abricot	23
Figure II.2	Allure générale de l'abricotier -prunus armeniaca	24
Figure II.3	Feuille de l'espèce prunus armeniaca	25
Figure II.4	Fruits de l'espèce prunus armeniaca	26
Figure II.5	Noyaux de l'espèce prunus armeniaca	26
Figure II.6	Le métal et le symbols de cuivre	28
Figure II.7	Plaque de cuivre avant et après le découpage	30
Figure II.8	Plaque de cuivre avant polissage (A) et après le découpage polissage (B)	30
Figure II.9	Préparation de la solution électrolytiques (Hcl 0.5M)	31
Figure II.10	Dispositif expérimentale de la méthode pert de masse	32

Figure III.1	Évaluation de la perte de masse de cuivre en fonction de temps en milieu corrosif HCl (0.5M) en absence d'inhibiteur	33
Figure III.2	Évolution de la vitesse de corrosion de cuivre en fonction de temps en milieu corrosif HCl (0.5M) en absence d'inhibiteur	34
Figure III.3	Évolution de la vitesse de corrosion de cuivre à différentes concentrations de l'inhibiteur après 8 heure d'immersion en milieu corrosif HCl (0.5M)	35
Figure III.4	Évolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations après 8 heure d'immersion en milieu corrosif HCl (0.5M)	35
Figure III.5	Évolution de la vitesse de corrosion de cuivre à différentes concentrations de l'inhibiteur après 2 heure d'immersion en milieu corrosif HCl (0.5M)	37
Figure III.6	Évolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations après 2 heure d'immersion en milieu corrosif HCl (0.5M)	37
Figure III.7	Évolution de la vitesse de corrosion de cuivre à différentes concentrations de l'inhibiteur après 4 heure d'immersion en milieu corrosif HCl (0.5M)	38
Figure III.8	Évolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations après 4 heure d'immersion en milieu corrosif HCl (0.5M)	39
Figure III.9	Évolution de la vitesse de corrosion de cuivre à différentes concentrations de l'inhibiteur après 6 heures d'immersion en milieu corrosif HCl (0.5M)	40
Figure III.10	Évolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations après 6 heures d'immersion en milieu corrosif HCl (0.5M)	40
Figure III.11	Évolution de la vitesse de corrosion de cuivre à différentes concentrations de l'inhibiteur après 24 heures d'immersion en milieu corrosif HCl (0.5M)	41
Figure III.12	Évolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations après 24 heures d'immersion en milieu corrosif HCl (0.5M)	42

Figure III.13	Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du <i>Prunus armeniaca</i> selon le modèle de Langmuir après 2 heures d'immersion	44
Figure III.14	Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du <i>Prunus armeniaca</i> selon le modèle de Langmuir après 4 heures d'immersion	45
Figure III.15	Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du <i>Prunus armeniaca</i> selon le modèle de Langmuir après 6 heures d'immersion	45
Figure III.16	Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du <i>Prunus armeniaca</i> selon le modèle de Langmuir après 8 heures d'immersion	46
Figure III.17	Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du <i>Prunus armeniaca</i> selon le modèle de Langmuir après 24 heures d'immersion	46
Figure III.18	Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du <i>Prunus armeniaca</i> selon le modèle de Temkin après 2 heures d'immersion	47
Figure III.19	Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du <i>Prunus armeniaca</i> selon le modèle de Temkin après 4 heures d'immersion	47
Figure III.20	Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du <i>Prunus armeniaca</i> selon le modèle de Temkin après 6 heures d'immersion	48
Figure III.21	Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du <i>Prunus armeniaca</i> selon le modèle de Temkin après 8 heures d'immersion	48
Figure III.22	Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du <i>Prunus armeniaca</i> selon le modèle de Temkin après 24 heures d'immersion	49
Figure III.23	Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du <i>Prunus armeniaca</i> selon le modèle de Frankin après 2 heures d'immersion	49
Figure III.24	Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du <i>Prunus armeniaca</i> selon le modèle de Frankin après 4 heures d'immersion	50
Figure III.25	Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du <i>Prunus armeniaca</i> selon le modèle de Frankin après 6 heures d'immersion	50
Figure III.26	Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du <i>Prunus armeniaca</i> selon le modèle de Frankin après 8 heures d'immersion	51
Figure III.27	Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du <i>Prunus armeniaca</i>	51

	selon le modèle de Framkin après 24 heures d'immersion	
--	--	--

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux		Pages
Tableau I.1	Principaux facteurs de corrosion	04
Tableau II.1	Les principales Caractéristiques physiques du cuivre	29
Tableau III.1	Cinétique de corrosion de cuivre en milieu acide HCl (0.5 M) sans inhibiteur à T = ambiante	33
Tableau III.2	Cinétique de corrosion de cuivre en milieu acide HCl (0.5M) à différentes concentrations de l'inhibiteur à T = Ambiante et 8 heures d'immersion	34
Tableau III.3	Cinétique de corrosion de cuivre en milieu acide HCl (0.5M) à différentes concentrations de l'inhibiteur à T = Ambiante et 2heure d'immersion	36
Tableau III.4	Cinétique de corrosion de cuivre en milieu acide HCl (0.5M) à différentes concentrations de l'inhibiteur à T = Tambiente et 2heure d'immersion	38
Tableau III.5	Cinétique de corrosion de cuivre en milieu acide HCl (0.5M) à différentes concentrations de l'inhibiteur à T = Tambiente et 6 heures d'immersion	39
Tableau III.6	Cinétique de corrosion de cuivre en milieu acide HCl (0.5M) à différentes concentrations de l'inhibiteur à T = Tambiente et 24 heures d'immersion	41
Tableau III.7	Résultats obtenus après 2h d'immersion	43
Tableau III.8	Résultats obtenus après 4h d'immersion	43
Tableau III.9	Résultats obtenus après 6h d'immersion	43
Tableau III.10	Résultats obtenus après 8h d'immersion	43
Tableau III.11	Résultats obtenus après 24h d'immersion	44
Tableau III.12	Coefficient de corrélation des différentes isothermes d'adsorption à différentes durées d'immersion	52

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	01
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUES	
I.1. Généralités sur la corrosion.....	03
I.1.1. Définition.....	03
I.1.2. Importance économique de la corrosion	03
I.1.3. Les facteurs de la corrosion	04
I.1.4. Les modes de la corrosion.....	04
I.1.4.1. Corrosion chimique (sèche).....	04
I.1.4.2. Corrosion électrochimique (humide).....	05
I.1.4.3. Corrosion biochimique (bio-corrosion)	06
I.1.5. Les différentes formes de corrosion.....	06
I.1.5.1. Corrosion généralisée ou uniforme	06
I.1.5.2. Corrosion localisée.....	07
I.1.6. Les différents types de la corrosion localisée.....	08
I.1.6.1. Corrosion par piqûre.....	08
I.1.6.2. Corrosion caverneuse	09
I.1.6.3. Corrosion par couplage galvanique (bimétallique).....	09
I.1.6.4. La corrosion-érosion et la corrosion-cavitation.....	10
I.1.6.5. Corrosion abrasion.....	11
I.1.6.6. Corrosion intergranulaire (intercristalline).....	11
I.1.6.7. Corrosion sous contrainte.....	11
I.1.6.8. Corrosion sélective.....	12
I.1.7. Contrôle la corrosion.....	12
I.2. Moyens de protection contre la corrosion.....	13
I.3. Protection par les inhibiteurs de corrosion	13
I.3.1. Définition.....	13
I.3.2. Conditions et domaines d'utilisation	13
I.3.3. Classification des inhibiteurs.....	14
I.3.3.1. Selon leur composition chimique	14
I.3.3.2. Classification par la réaction électrochimique partielle	15
I.3.3.3. Selon leur mode d'action.....	16

I.3.3.4. Selon leur domaine d'utilisation.....	17
I.3.4. Inhibition de la corrosion par les substances naturelles.....	18
I.3.5. Les isothermes d'adsorption	18
I.3.5.1. Isotherme de Langmuir	18
I.3.5.2. Isotherme de Temkin	19
I.3.5.3. L'isotherme de Frumkin.....	19
CHAPITRE II : SYNTHESE EXPERIMENTALE	
II.1. METHODES D'ÉTUDES.....	21
II.1. La méthode de la perte de masse.....	21
II.1.1. Les avantages de la méthode	22
II.1.2. Les inconvénients de la méthode.....	22
II.2. Préparation de l'inhibiteur de corrosion.....	22
II.2.1. Aperçu sur l'espèce <i>Prunus Armeniaca</i> L.....	22
II.2.1.1. Origine et historique	22
II.2.1.2. Classification botanique.....	23
II.2.1.3. Caractères dendrologiques.....	24
II.3. Répartition de l'espèce.....	26
II.3.1. Dans le monde.....	26
II.3.2. En Afrique du Nord.....	27
II.4. Usages et intérêts.....	27
II.4.1. Utilisation alimentaire.....	27
II.4.2. Valeur nutritionnelle.....	27
II.4.3. Propriétés médicinales.....	27
II.4.4. Utilisation cosmétique.....	27
II.5. Le cuivre.....	28
II.5.1. Généralités.....	28
II.5.2. Propriété physiques et chimiques du cuivre.....	28
II.5.2.1. Propriétés électrochimiques.....	28
II.5.2.2. Propriétés physiques.....	29
II.5.3. Utilisation du cuivre.....	29
II.6. Réactifs, solvants et électrolyte.....	29
II.6.1. Matériaux utilisés.....	29

II.6.2. Préparation des échantillons.....	30
II.6.2.1. Découpage.....	30
II.6.2.2. Polissage.....	30
II.6.2.3. Préparation des solutions électrolytiques.....	30
II.6.2.4. Préparation de l'inhibiteur.....	31
II.6.2.5. Préparation des solutions inhibitrice.....	31
II.7. Manipulation de la méthode perte de masse.....	31

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. Cinétique de corrosion Sans inhibiteur	33
III.2. Cinétique de corrosion en présence de l'inhibiteur.....	34
III.2.1. Influence de la concentration de l'inhibiteur.....	34
III.2.2. Influence du temps d'immersion de l'inhibiteur.....	36
III.2.2.1. Temps d'immersion de l'inhibiteur t = 2h.....	36
III.2.2.2. Temps d'immersion de l'inhibiteur t = 4h.....	37
III.2.2.3. Temps d'immersion de l'inhibiteur t = 6h.....	39
III.2.2.4. Temps d'immersion de l'inhibiteur t = 8h.....	40
III.2.2.5. Temps d'immersion de l'inhibiteur t = 24h.....	41
III.2.3. Types d'isotherme d'adsorption.....	42
III.2.3.1. Isotherme Lungmuir	44
III.2.3.2. Isotherme Temkin	47
III.2.3.3. Isotherme Framkin	49
Conclusion.....	53
Références bibliographiques	54

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

La corrosion est un phénomène indésirable et spontané, qui est classé aujourd'hui comme l'un des événements naturels les plus dommageables et les plus coûteux. La corrosion est définie de manière générale comme la détérioration des propriétés du métal résultant de l'interaction avec son environnement par des réactions chimiques ou électrochimiques, à des degrés divers et à des vitesses différentes. C'est un problème constant et continu, elle peut provoquer des accidents aux conséquences graves et, dans certains cas, contribuer à la pollution de l'environnement naturel., souvent difficile à éliminer complètement. [1,2]

L'acide chlorhydrique est l'un des agents les plus largement utilisés dans le secteur industriel. Cet acide cause la dégradation des métaux, soit par des réactions chimiques ou électrochimiques. Il existe plusieurs méthodes disponibles pour protéger les métaux de la corrosion dans ce milieu, comme l'utilisation d'une barrière de protection, la galvanisation, la protection cathodique, utilisation des solutions antirouille ou des inhibiteurs de corrosion. [3]

L'utilisation des inhibiteurs pour empêcher le processus de dissolution des métaux reste une application inévitable et très répandue. Les inhibiteurs de corrosion sont des substances qui, lorsqu'elles sont ajoutées à de faibles concentrations dans des milieux corrosifs, diminuent ou empêchent la réaction du métal avec son environnement. [3]

Le principal inconvénient est que la plupart de ces inhibiteurs sont toxiques, ou cancérigènes et nocifs pour l'environnement malgré le fait que leur efficacité inhibitrice est bonne, par conséquent les préoccupations concernant les impacts de leur toxicité sur la santé humaine et l'environnement se sont accrues au fil du temps [3].

Pour cette raison, la recherche de molécules alternatives est devenue incontournable, et aujourd'hui l'accent est mis sur les molécules biodégradables d'origine végétale qui ne contiennent plus de métaux lourds ou d'autres composés toxiques. De plus, les extraits de plantes sont maintenant devenus une source d'inhibiteurs, écologiques qui garantissent une efficacité élevée à un prix moins cher. Ces types d'inhibiteurs ne contiennent ni des métaux lourds, ni des composés toxiques et ils sont biodégradables., efficacement disponibles et renouvelables [3,4,5].

Ce manuscrit s'articule autour de trois chapitres : Le premier chapitre de cette étude est consacré à une présentation générale sur la corrosion et les moyens de protection particulièrement à une revue bibliographique des inhibiteurs de corrosion en milieu acide.

Le deuxième chapitre, comprend la méthodologie employée dans ce travail, en présentant le montage d'extraction et la description des méthodes et conditions expérimentales mises en œuvre au

cours de l'étude de l'inhibition de l'extrait testé contre la corrosion de cuivre (gravimétrie). De plus, cette section traitera une description de la matière végétale utilisée.

Les résultats expérimentaux et les interprétations sont présentés dans le troisième chapitre, en vue de répondre à la problématique de savoir si l'extrait de noyau de *Prunus armeniaca* L possède une efficacité inhibitrice satisfaisante sur la corrosion du cuivre en milieu HCl (0.5 M) pour en faire un inhibiteur de corrosion vert. Ce travail se termine par une conclusion générale résumant l'essentiel des résultats et les perspectives à entreprendre pour approfondir l'étude.

Chapitre 1

Synthèse bibliographique

La corrosion est un problème mondial majeur qui touche tous les secteurs (industriels, économique, ingénierie...). Dans ce chapitre on peut présenter quelques notions principales sur la corrosion, ces types, ces formes et les facteurs qui dues de ce problème et les inhibiteurs de protection de ceux-ci.

I.1. Généralités sur la corrosion

1.1.1. Définition

La source du mot "corrosion" a son origine en latin. Le terme latin "rodere" désigne la pratique de "ronger", tandis que "corrodere" signifie « ronger en morceaux ». La corrosion se produit sous de nombreuses formes dans la vie quotidienne, comme des voitures corrodées, des clous, des tuyaux, des casseroles, des poêles et des pelles. La corrosion est un problème scientifique coûteux. En effet, la corrosion métallique a été un problème depuis l'utilisation des métaux communs.

La majorité des métaux sont présents dans la nature sous forme de composés comme les oxydes, les sulfures, les silicates et les carbonates. Il y a peu de métaux présents sous leur forme naturelle. La raison la plus évidente est leur stabilité thermodynamique par rapport aux métaux.

La corrosion peut être définie de manière spécifique ou universelle, en fonction du point de vue adopté. Par exemple, dans le milieu aquatique, la corrosion est considérée comme un processus électrochimique. De manière générale, la corrosion est définie comme une dégradation d'un matériau causée par un environnement agressif. L'eau, l'air, le dioxyde de carbone, les liquides organiques, les sels fondus ou le gaz sulfureux peuvent former des environnements corrosifs. La définition précise de la corrosion dépend donc des conditions particulières dans lesquelles elle se produit [6].

1.1.2. Importance économique de la corrosion

La corrosion a un impact sur tous les secteurs de l'économie, et peuvent être résumées dans les points suivants :

- Les pertes directes telles que le remplacement des matériaux corrodés et des équipements endommagés par la corrosion.
- Les pertes indirectes telles que les réparations et les pertes de production.
- Les mesures de protection telles que le surdimensionnement des structures porteuses, les inspections et l'entretien sont également prises en compte.

Cependant, les pertes directes ne représentent qu'une partie des coûts de la corrosion, qui sont souvent beaucoup plus élevés que les pertes indirectes. En effet la corrosion des matériaux entraîne une consommation gaspillée de matières premières et indirectement et d'énergie. [7].

1.1.3. Les facteurs de la corrosion

La plupart des métaux purs ne sont pas thermodynamiquement stables et développent une couche d'oxyde plus ou moins protectrice à leur surface lorsqu'ils sont en contact avec l'atmosphère. Cependant, cette couche peut être fragilisée, ce qui conduit à la corrosion du métal. Les phénomènes de corrosion dépendent de divers facteurs tels que la nature et la composition du milieu agressif, la température, le pH et les inhomogénéités de la structure réticulaire du métal. Ces facteurs peuvent être regroupés en quatre catégories principales :

Tableau. I.1 : Principaux facteurs de corrosion [8,9] :

<ul style="list-style-type: none"> • Facteurs relatifs au milieu et définissant le mode d'attaque 	<ul style="list-style-type: none"> - Concentration du réactif ; - Teneur en oxygène, en impuretés, en gaz dissous (CO₂, H₂S). - Acidité (pH) du milieu, salinité, température, pression. - Présence de bactéries.
<ul style="list-style-type: none"> • Facteurs métallurgiques 	<ul style="list-style-type: none"> - Composition de l'alliage, hétérogénéités cristallines. - Impuretés dans l'alliage, inclusions. - Traitements thermiques, mécaniques. - Additions protectrices.
<ul style="list-style-type: none"> • Facteurs définissant les conditions d'emploi 	<ul style="list-style-type: none"> - Etat de surface, défaut de fabrication. - Emploi d'inhibiteurs. - Croûtes d'oxydes superficielles. - Force électromotrice extérieure (électrolyse).
<ul style="list-style-type: none"> • Facteurs dépendant du temps 	<ul style="list-style-type: none"> - Vieillessement. - Température. - Modalité d'accès de l'oxygène ou autres gaz dissous. - Apparition d'un dépôt (calcaïque ou autre).

1.1.4. Les modes de la corrosion

D'une façon générale, la corrosion peut être de trois : corrosion chimique, électrochimique et la bactérienne

1.1.4.1. Corrosion chimique (sèche)

La corrosion chimique correspond à l'attaque directe du métal par son environnement. Elle peut se produire dans une solution non électrolyte ou sous l'action de gaz (O₂, H₂S et CO₂). La

corrosion sèche ou à haute température se produit lorsque le réactif est gazeux ou lorsque cette corrosion se produit à des températures élevées.

La réaction qui se produit est de la forme :



La corrosion chimique peut également se produire lorsqu'un métal est attaqué par un autre métal liquide, tel que le mercure (Hg), ou par un sel fondu, ou encore dans une solution non aqueuse (Al dans CCl₄) Dans ces cas, le métal peut interagir chimiquement avec son l'environnement.[10]

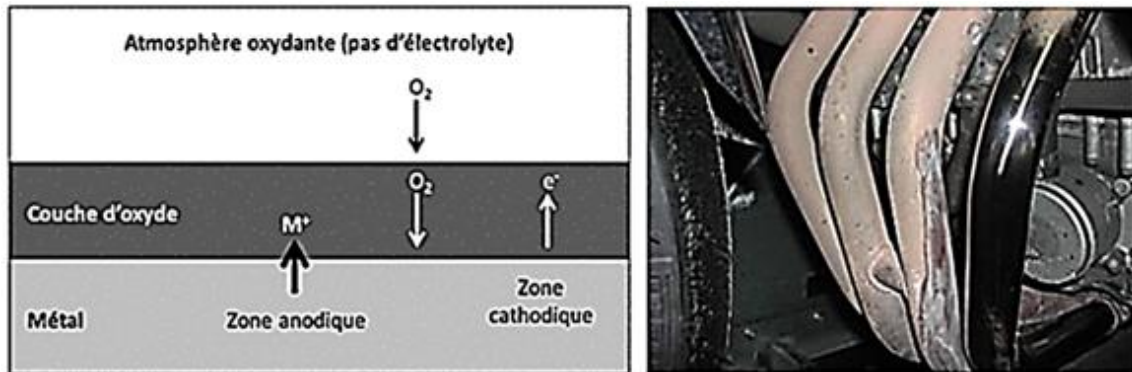


Figure I.1 : Mécanisme de la corrosion atmosphérique : exemple de la corrosion d'un collecteur d'échappement.

1.1.4.2. Corrosion électrochimique (humide)

La corrosion électrochimique se produit lorsque des hétérogénéités existent dans le métal ou la solution corrosive. Ces hétérogénéités peuvent entraîner la formation à la surface du métal de micro-anodes et de micro-cathodes, qui constituent des micropiles. Un courant électrique circule alors entre les électrodes, avec les zones appelées anodes qui subissent une attaque corrosive et les zones appelées cathodes qui sont le siège d'une ou plusieurs réactions de réduction. Ce processus électrochimique peut être accéléré par la présence d'ions conducteurs dans la solution corrosive, tels que les ions chlorure (Cl⁻) ou les ions sulfate (SO₄²⁻), qui peuvent faciliter le transport des électrons entre les électrodes. La corrosion électrochimique est un phénomène courant dans les environnements industriels et marins, où les métaux sont souvent soumis à des conditions agressives.

Pour un processus de corrosion électrochimique donné, on a toujours les éléments suivants :

- Un matériau, en règle générale métallique
- La présence d'un électrolyte conducteur (solvant polaire)
- Une zone anodique siège de la corrosion et une zone cathodique siège de la réduction du milieu
- Une différence de potentiel (ddp) entre la zone anodique et la zone cathodique

- La circulation d'un courant électrique entre deux points anode-cathode de la surface (électrons dans le métal, ions dans l'électrolyte). [10,11]

1.1.4.3. Corrosion biochimique (bio-corrosion)

La corrosion bactérienne résulte de la prolifération de colonies de bactéries anaérobiques dans des eaux riches en sulfates. Actuellement, la lutte contre cette forme de corrosion se concentre principalement sur des solutions biologiques, qui impliquent l'injection de produits bactéricides dans les environnements corrosifs [5].

Le mécanisme de ce mode de corrosion peut être :

- Chimique par production de substances corrosives (CO_2 , H_2S , H_2SO_4 , NH_3) ou d'un acide organique, comme dans le cas rencontré dans les canalisations enterrées qui déterminé par la formation d'acide sulfurique qui attaque le métal.
- Certaines bactéries peuvent réduire les sulfates par l'intermédiaire d'hydrogène qui provient par exemple des régions cathodiques, il y a donc dépolarisation des cathodes et formation accélérée de produit de corrosion aux anodes.

c. Dans certains cas, on peut observer sur les canalisations des dépôts adhérents résultant de l'attaque, non pas du métal lui-même, mais celle de certains constituants du milieu ambiant par des bactéries. Il en résulte la formation de piqûres sur le métal, à l'endroit où s'est produit le dépôt, suivant un processus de corrosion par différence de concentration en oxygène. [6,9]

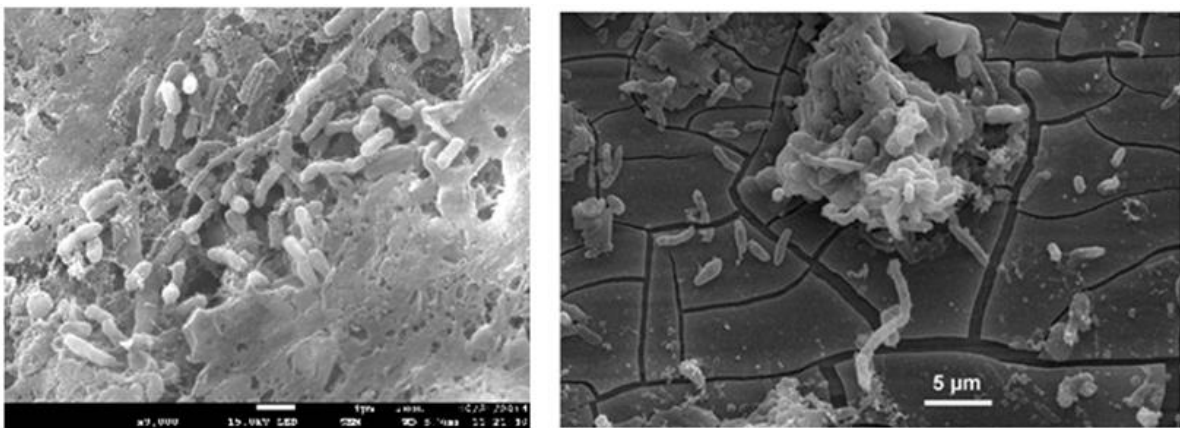


Figure I.2: Observation en microscopie électronique à balayage (MEB) d'une bactérie responsable de la corrosion bactérienne.

1.1.5. Les différentes formes de corrosion

La corrosion peut être classée en deux types principaux : la corrosion généralisée ou uniforme et la corrosion localisée.

1.1.5.1. Corrosion généralisée ou uniforme

La corrosion peut se manifester de deux manières différentes. La corrosion généralisée, d'une part, affecte l'ensemble de la surface d'un matériau exposé à son environnement. Si les vitesses

de corrosion observées sont identiques en tout point de cette surface, on parle alors de corrosion uniforme. Dans ce cas, les deux demi-réactions électrochimiques associées au processus de corrosion sont uniformément distribuées à la surface. La dégradation ou l'évolution du matériau sont alors homogènes, quels que soient leur nature. Autrement dit la corrosion uniforme entraîne lorsque les demi-réactions anodiques et cathodiques sont uniformément réparties à la surface du matériau. [12]

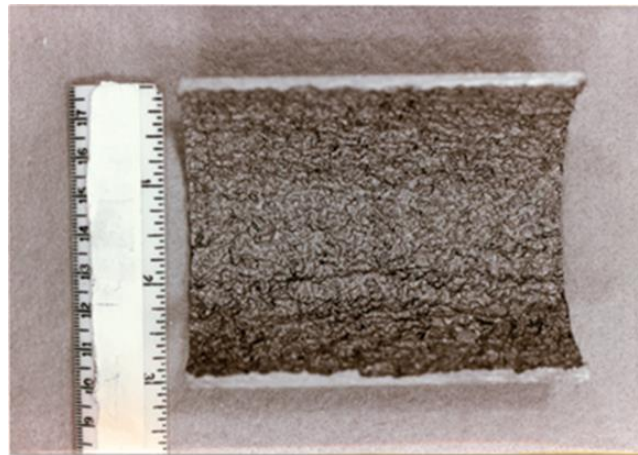


Figure I.3 : corrosion uniforme

La corrosion uniforme est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface. On trouve cette attaque notamment sur les métaux exposés aux milieux acide.

1.1.5.2. Corrosion localisée

La corrosion localisée affecter de manière non-homogène la surface du matériau, elle survient lorsque le matériau est exposé à un environnement sélectif. Cette sélectivité peut avoir différentes origines, que ce soit au niveau du matériau (présence d'inclusions, alliage hétérogène, protection de surface localement défectueuse ou matériau bimétallique...) ou de l'environnement (variation locale de composition, de pH ou de température). Cette forme de corrosion se manifeste en certains points seulement de la surface du matériau.

Dans ce cas, les deux demi-réactions d'oxydation et de réduction sont spatialement séparées. Par exemple, pour la corrosion par piqûre, la réaction d'oxydation s'effectue à l'intérieur de la piqûre, tandis que la réaction de réduction se produit à la surface du matériau, sur une zone parfois assez étendue autour de la piqûre.

Ce processus implique le transport d'électrons à l'intérieur du matériau ainsi que le transport d'ions à travers l'électrolyte, qui se produit généralement par diffusion et constitue souvent l'étape limitante [12].

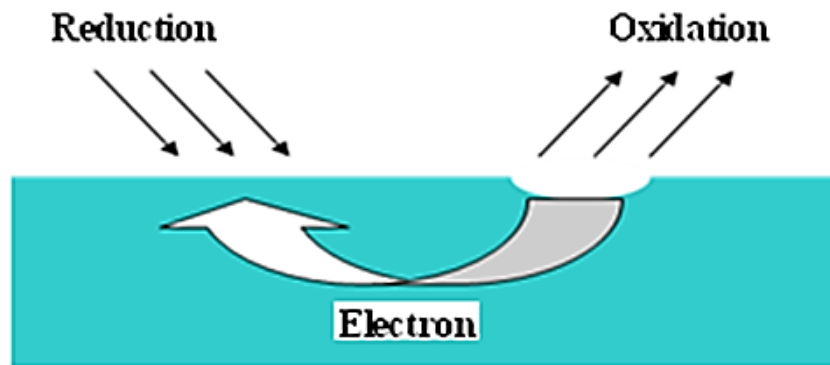


Figure I.4 : corrosion localisée

1.1.6. Les différents types de la corrosion localisée

Il existe plusieurs types de corrosion localisée, que nous pouvons schématiser de la manière suivante :

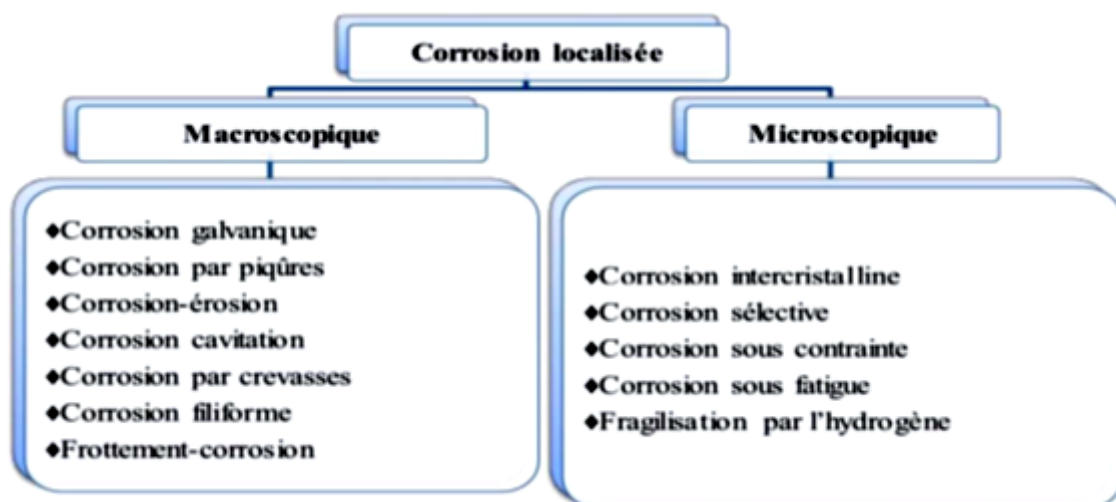


Figure I.5 : Les différentes formes de la corrosion localisée [13].

1.1.6.1. Corrosion par piqûre

La corrosion par piqûres se déclenche généralement sur des singularités de la surface, telles que des inclusions réactives, des précipités ou des défauts de mise en œuvre (rayures, pollution, etc.), bien que ce ne soit pas toujours le cas. Elle peut également se produire suite à une instabilité de la couche passive. La rupture du film est un événement rare qui se produit très rapidement, souvent à l'échelle nanométrique, en un point difficile à prévoir, ce qui rend les observations directes particulièrement complexes. L'amorçage de la piqûre est donc considéré comme un phénomène aléatoire, ce qui explique la difficulté parfois rencontrée pour le prédire.

La corrosion par piqûres peut être divisée en trois régimes distincts :

- Une phase d'incubation pendant laquelle des conditions locales spécifiques se développent, permettant l'amorçage et la stabilisation d'une corrosion active.

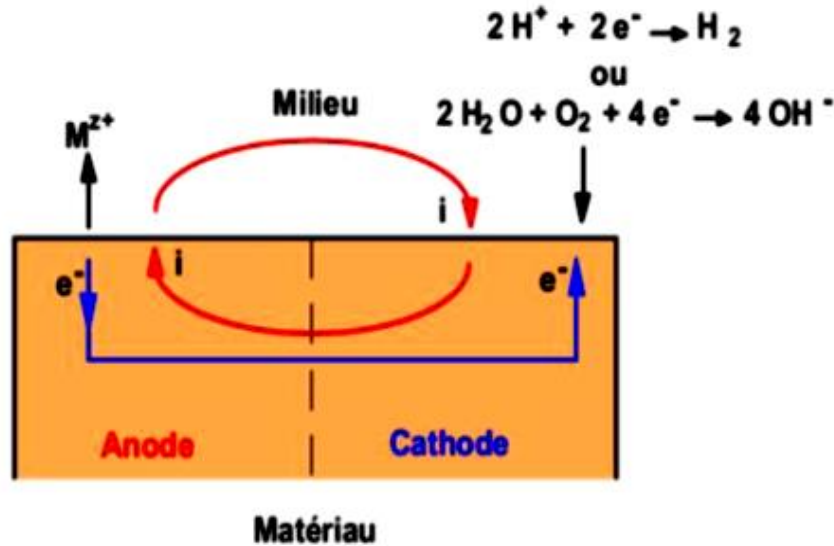


Figure I.7 : Représentation schématique d'une pile de corrosion [14].

Les réactions anodiques (corrosion du matériau) et cathodiques (réduction de l'oxydant) ont lieu dans des zones distinctes. Cette sélectivité des réactions résulte d'une hétérogénéité due soit au matériau, soit au milieu, soit aux conditions physico-chimiques à l'interface [14].

1.1.6.4. La corrosion-érosion et la corrosion-cavitation

La corrosion-érosion est un phénomène qui affecte de nombreux matériaux tels que l'aluminium, l'acier, et qui est particulièrement connu pour le cuivre en milieu marin. Il s'agit d'une détérioration de la surface provoquée par l'impact de particules, de gouttelettes, d'un jet ou par un écoulement turbulent près d'un défaut de surface, ce qui entraîne une réduction de l'épaisseur locale, souvent sous la forme d'une piqûre allongée [14].

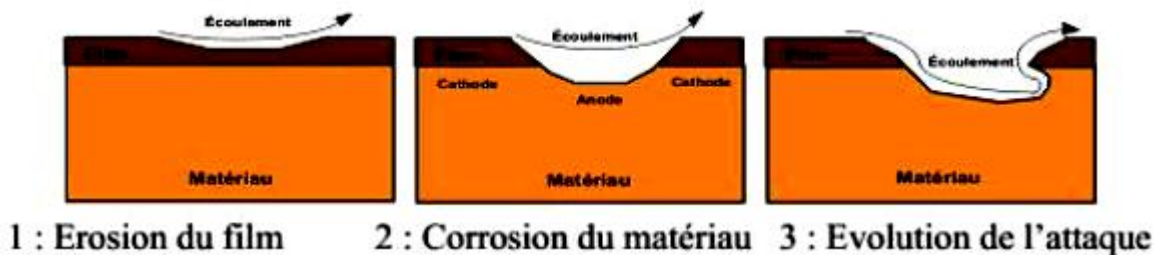


Figure I,8 : Représentation schématique du phénomène de corrosion-érosion

La turbulence créée contribue à l'érosion du film protecteur jusqu'à sa disparition, créant ainsi une pile de corrosion.

La corrosion cavitation est une forme particulière d'érosion, elle est provoquée par l'impulsion de bulles de vapeur sur une surface métallique, lorsque par suite de l'augmentation locale de la vitesse du liquide où la pression statique devient inférieure à la tension de vapeur du liquide, il en résulte un violent martèlement de la surface métallique et une destruction locale du film de corrosion protecteur, la corrosion peut donc se développer à nouveau. [8,15]

1.1.6.5. Corrosion abrasion



Figure 1,9 : Corrosion par abrasion dans les pipes en cuivre

La corrosion abrasion est produit lorsque le fluide en écoulement est chargé de particule solide en suspension. Les impacts de ces particules entraînent une dépassivassion de la couche protectrice en certains points, il y a accélération de la corrosion. [12,15]

1.1.6.6. Corrosion intergranulaire (intercristalline)

La corrosion intergranulaire est une forme de corrosion localisée qui s'attaque aux joints de grains et qui rend la structure mécaniquement fragile.

Est une attaque sélective qui se produit souvent aux phases précipitées lors d'un traitement thermique.

Ce type de corrosion est particulièrement dangereux car bien que la quantité de métal attaquée soit faible, les caractéristiques mécaniques du métal sont altérées en raison de la formation de fissures qui affaiblissent le métal. Par exemple, les aciers inoxydables austénitiques peuvent être sensibilisés à chaud par la précipitation du carbure de chrome aux joints de grains [16].

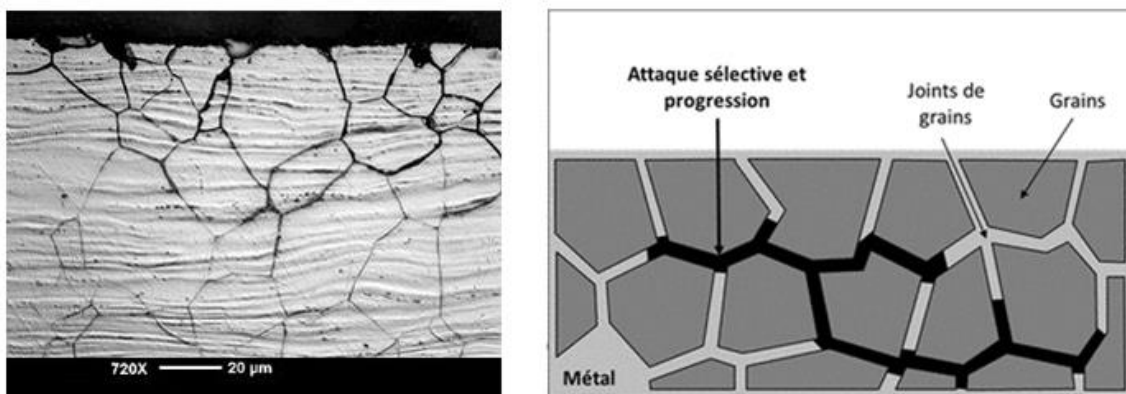


Figure 1.10 : Corrosion intergranulaire

1.1.6.7. Corrosion sous contrainte

La corrosion sous contrainte est un phénomène courant dans les équipements industriels. Agit une détérioration qui se qui résulte de l'action commune d'une contrainte mécanique (soit

appliquée ou résiduelle) et d'une réaction électrochimique. En l'absence de la contrainte, le phénomène ne se produit pas.

On peut identifier deux types de corrosion sous contrainte : la transgranulaire (à travers les grains), qui affecte principalement les grains sans impact significatif au niveau des joints de grains, et l'intergranulaire (le long des joints de grains), qui se concentre surtout au niveau des joints de grains, et rarement se manifeste sous la forme mixtes. et peuvent être simples ou branchées (ramifiées). Ce phénomène regroupe également d'autres types de corrosion,

- Corrosion sous tension.
- Corrosion par fatigue.
- La fragilisation par l'hydrogène [8]. [15,17]

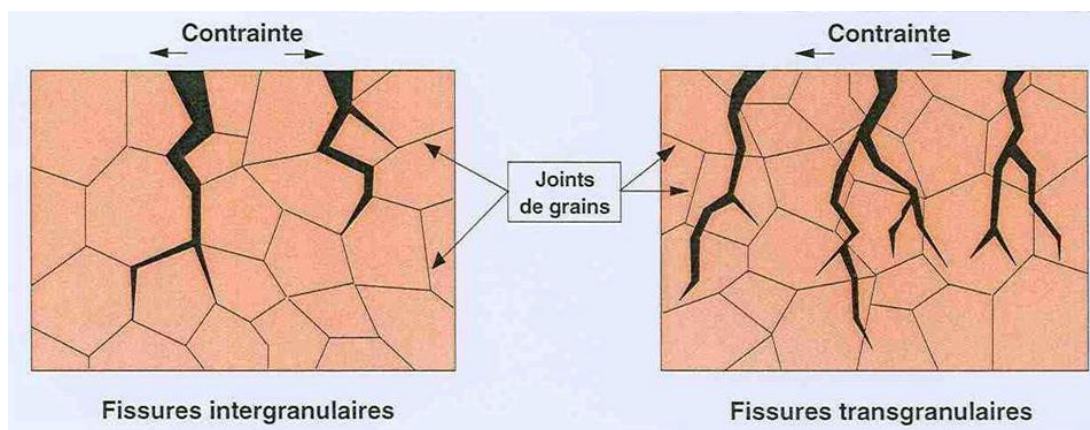


Figure 1.11 : Fissures intergranulaires et transgranulaires

1.1.6.8. Corrosion sélective

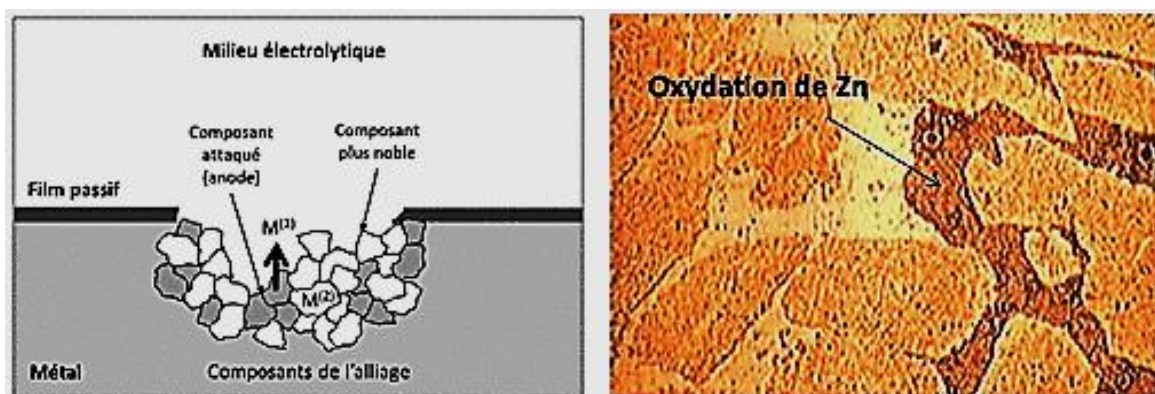


Figure 1.12 : Coupe métallographique montrant une corrosion sélective d'un laiton

La corrosion sélective est la dissolution ou l'oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse qui perd sa résistance. Elle est très dangereuse parce qu'elle est indétectable. [15]

1.1.7. Contrôle la corrosion :

Il existe plusieurs techniques pour réduire la vitesse de la corrosion et ainsi réduire les effets négatifs :

- Le contrôle par la sélection du métal : il est essentiel de choisir des matériaux adaptés à la tâche et à l'environnement en trouvant le bon équilibre entre la résistance à la traction, à la chaleur, aux produits chimiques et à la corrosion.
- Contrôle par le design de la structure : les ingénieurs doivent tenir compte des interactions entre des matériaux potentiellement incompatibles lors de la conception des produits. Pour éviter la formation un chemin électrique, il est essentiel de choisir un métal compatible et isolant.
- Contrôle d'environnement : des tests contrôlés peuvent simuler une variété atmosphères corrosives, telles que les projections eau salée, le brouillard salin et le séchage [16].

I.2. Moyens de protection contre la corrosion

La prévention de la corrosion doit commencer dès le départ. En autres termes, la corrosion doit être prise en compte depuis le début d'un projet jusqu' à sa fin. Il agit de garantir une durée de vie spécifique à un objet. En outre, la solution choisie doit respecter les normes de protection d'environnement et permettre le recyclage or élimination des différents composants à la fin de leur usage.

Les méthodes suivantes sont utilisées pour lutter contre la corrosion :

- Prévention par une forme adaptée des pièces.
- Prévention par un choix judicieux des matériaux.
- Protection par revêtements.
- Protection électrochimique.
- Protection par inhibiteurs.[16]

I.3. Protection par les inhibiteurs de corrosion

I.3.1. Définition

Un inhibiteur est une substance qui retarde la corrosion lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration. Leur domaine d'utilisation recouvre les milieux acides, la vapeur, et les eaux de refroidissement.[18]

I.3.2. Conditions et domaines d'utilisation

Un inhibiteur de corrosion doit généralement répondre à plusieurs exigences : réduire la vitesse de corrosion du métal tout en préservant ses caractéristiques physico-chimiques ; être stable à toutes les températures utilisées ; être stable en présence autres composants d'environnement mais ne pas affecter la stabilité des espèces contenues dans environnement ; être conforme aux normes de non-toxicité, efficace à faible concentration et peu onéreux.

Il existe plusieurs inhibiteurs de corrosion disponibles pour une utilisation industrielle. Leurs domaines d'application sont les suivants [19] :

- Industrie du pétrole (forage, extraction, raffinage, stockage et transport)

- L'industrie des peintures sur métaux.
- Le traitement des eaux (eaux sanitaires, eaux de chaudières, eaux de procédés industriels)
- La protection temporaire des métaux pendant une période où la pièce ou l'installation était susceptible de se corroder, comme lors d'un décapage acide, d'un nettoyage, d'un stockage, ou encore lors d'usinages très sévères tels que le perçage, le taraudage, le forage, le filetage, etc.

I.3.3. Classification des inhibiteurs

Les inhibiteurs de corrosion sont classés de différentes manières :

- Par domaine d'application ;
- Par réaction partielle ;
- Par mécanisme réactionnel [15].

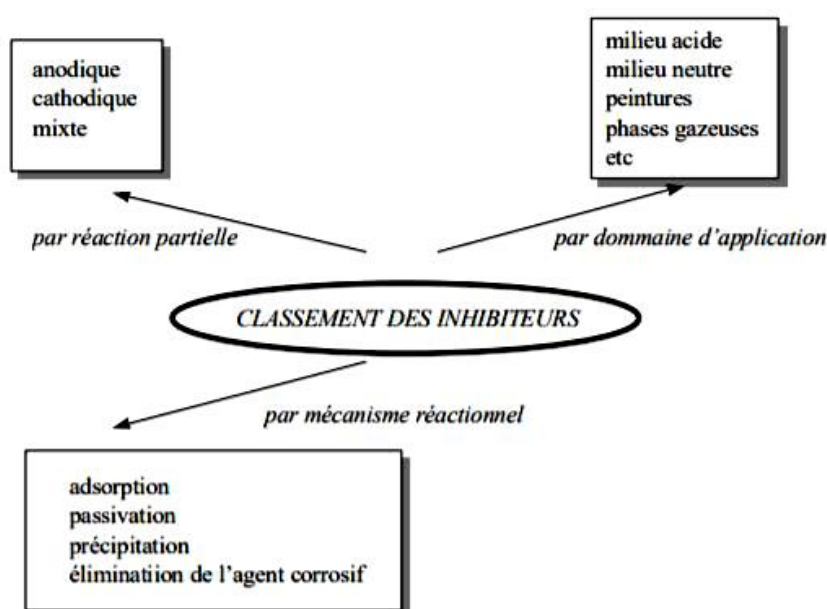


Figure I.13 : Classement des inhibiteurs de corrosion [15].

I.3.3.1. Selon leur composition chimique

En pratique. Les inhibiteurs peuvent être classés en fonction de leur utilisation dans des milieux aqueux, organiques ou gazeux. Les inhibiteurs utilisés dans des milieux aqueux sont sélectionnés en fonction du pH, tandis que ceux utilisés dans des milieux organiques sont incorporés dans des lubrifiants pour moteurs, de l'essence ou des peintures. Les inhibiteurs en phase gazeuse sont utilisés pour protéger les objets métalliques lors de leur transport et de leur stockage. Cette classification aide à sélectionner l'inhibiteur approprié pour une application spécifique en fonction des conditions environnementales et des exigences particulières [15].

a. Les inhibiteurs organiques [20]

Les molécules organiques sont de plus en plus utilisées comme inhibiteurs de corrosion, car elles sont considérées comme une alternative plus écologique aux inhibiteurs inorganiques. Ces inhibiteurs organiques sont principalement constitués de sous-produits de l'industrie pétrolière et

sont généralement des molécules amphiphiles, c'est-à-dire des molécules qui possèdent à la fois un caractère hydrophobe et un caractère hydrophile. La partie hydrophile est composée d'un ou plusieurs groupes fonctionnels, comme les groupes carboxyliques, les amines ou les phosphates, qui sont capables de former des liaisons avec la surface métallique. Les inhibiteurs organiques ont l'avantage d'être moins toxiques pour l'environnement que les inhibiteurs inorganiques, ce qui les rend plus attractifs pour de nombreuses applications comme :

- La radicale amine (-NH₂).
- Le radical mercapto (-SH).
- Le radical hydroxyle (-OH).
- Le radical carboxyle (-COOH).

b. Les inhibiteurs inorganiques (minéraux)

Les molécules minérales sont principalement utilisées dans des milieux proches de la neutralité voire en milieu alcalin et rarement en milieu acide. Ces composés sont ioniques et leurs produits de dissociation dans l'eau sont responsables des phénomènes d'inhibition, qu'il s'agisse d'anions ou de cations. Les anions inhibiteurs les plus courants sont les oxo-anions de type MeO₄^{x-}, tels que les chromates, molybdates, tungstates et vanadates. Les cations les plus utilisés sont le Ca²⁺ et le Zn²⁺, qui forment des sels insolubles avec certains anions tels que l'hydroxyle OH⁻. Cependant, la plupart des produits efficaces sont actuellement interdits pour des raisons environnementales, ce qui réduit le nombre de composés encore en usage.[21]

I.3.3.2. Classification par la réaction électrochimique partielle

On distingue trois catégories d'inhibiteurs en fonction de leur impact sur la vitesse des réactions électrochimique partielles :

a. Les inhibiteurs anodiques

Qui sont généralement sous forme anionique, agissent en ralentissant la vitesse de la réaction d'oxydation anodique en formant des composés insolubles avec les ions métalliques. Bien que ces inhibiteurs puissent entraîner une augmentation du potentiel de corrosion (déplacement du potentiel de corrosion dans le domaine cathodique), ils doivent être utilisés avec précaution. Si le film protecteur est altéré par une rayure ou une dissolution, ou si la quantité d'inhibiteur n'est pas suffisante pour restaurer le film, la partie exposée peut se corroder et former une piqûre profonde. [22]

b. Les inhibiteurs cathodiques

Agissent en ralentissant la vitesse de la réaction cathodique de l'oxydant, tel que l'oxygène ou les ions H⁺ de l'eau. En conséquence, ces inhibiteurs entraînent une diminution du potentiel de corrosion (déplacent le potentiel de corrosion vers des valeurs plus négatives).[22]

c. Les inhibiteurs mixtes

Ils affectent à la fois la réaction cathodique et anodique. Ils ont peu impact sur le potentiel de corrosion. Lorsque le film est déposé sélectivement sur la surface anodique, le potentiel de corrosion se déplace vers des valeurs positives. Dans le cas où le film est déposé à la surface cathodique, le potentiel de corrosion se déplace vers des valeurs négatives. [22]

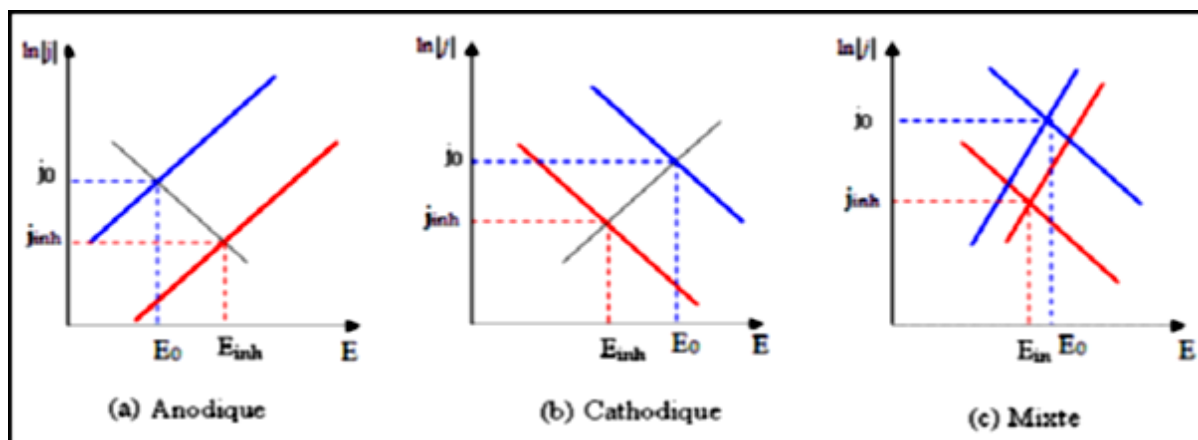


Figure I.14 : Diagrammes d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur anodique, cathodique ou mixte

I.3.3.3. Selon leur mode d'action

a. Les inhibiteurs agissants par adsorption

Il s'agit d'inhibiteurs filmants qui s'adsorbent à la surface pour donner un film protecteur. Sont en général les inhibiteurs organiques. Ils empêchent l'action du milieu agressif en se fixant sur la surface du métal. [10,13]

Il existe deux types d'adsorption entre la surface métallique et l'espèce adsorbée : la physisorption et la chimisorption, qui sont distinguées par les deux types de liaisons présentes : la liaison électrostatique et la liaison chimique. Les inhibiteurs d'adsorption agissent sur l'une ou l'autre de ces liaisons pour prévenir l'adsorption indésirable.

L'adsorption physique préserve l'identité des molécules adsorbées. Trois types de liaisons sont distingués :

- Les liaisons de Van der Waals, qui sont toujours présentes,
- Les liaisons polaires, qui dépendent des charges de surface et de l'inhibiteur,
- Les liaisons hydrogène, qui ne se forment qu'entre des donneurs de liaisons hydrogène (tels que les atomes N, O, P porteurs de doublets libres) et des accepteurs [23].

En revanche, la chimisorption est le résultat d'une mise en commun des électrons entre la surface métallique et la molécule d'inhibiteur, qui possède un centre actif tel que les atomes N, S, P, O. Ce partage d'électrons conduit à la formation de liaisons chimiques covalentes très fortes. L'inhibiteur agit comme un donneur d'électrons vis-à-vis de l'atome métallique de la surface.

b. Les inhibiteurs passivants

Les inhibiteurs agissent en formant des films de passivation tridimensionnels entre la surface corrodée et les molécules d'inhibiteur, phénomène connu sous le nom d'inhibition "d'interphase". Ils peuvent également être incorporés dans des couches barrières, ce qui conduit à la formation de réseaux homogènes et denses présentant une faible porosité et une bonne stabilité. En conséquence, ces molécules inhibitrices contribuent à améliorer la qualité et la durabilité des revêtements protecteurs.

Deux types d'inhibiteurs passivants sont couramment distingués :

- Les ions oxydants tels que CrO_4^{2-} , peuvent passiver acier sans oxygène.
- Les ions non-oxydants tels que (MoO_4^{2-} , WO_4^{2-} , PO_4^{3-} , $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$, $\text{C}_6\text{H}_5\text{COO}^-$), qui nécessitent d'oxygène et déplacent la réaction cathodique de réduction d'oxygène en favorisant son adsorption à la surface du métal.

Lors de l'utilisation de tels inhibiteurs, il est nécessaire de contrôler périodiquement la concentration du circuit, car tous ces ions se consomment lentement. La concentration nécessaire d'inhibiteur passivant dépend en fait de plusieurs facteurs tels que la température, le pH, la présence d'ions dépassivants tels que Cl^- ou de réducteurs tels que S^{2-} . [19].

c. Les inhibiteurs agissant par précipitation

Provoquent la formation d'un film superficiel constitué de sels minéraux ou de complexes organiques peu solubles formés lors de la précipitation des produits de réaction cathodique tout en bloquant la dissolution anodique. Il s'agit généralement de sels d'acide faible et de base forte comme les borates, les silicates, les phosphates, les polyphosphates et les sels de zinc. [10,13]

I.3.3.4. Selon leur domaine d'utilisation

On peut distinguer les inhibiteurs de corrosion utilisés en milieux aqueux, organiques ou gazeux. Ceux utilisés en milieux aqueux sont choisis en fonction du pH du milieu : en milieu acide, ils sont utilisés afin d'éviter l'attaque chimique de l'acier lors d'une opération de décapage ou de détartrage et en milieu neutre/alcalin, ils sont souvent utilisés pour protéger les conduites des circuits de refroidissement.

Les inhibiteurs utilisés en milieu organique sont incorporés dans les lubrifiants pour moteurs, dans l'essence ou dans les peintures. [10,13]

Les inhibiteurs en phase gazeuse sont employés pour protéger les objets métalliques pendant leur transport et stockage. Pour cela, des composés organiques ayant des pressions de vapeur élevées sont souvent utilisés. [10,13]

I.3.4. Inhibition de la corrosion par les substances naturelles

Bien que la plupart des composés synthétiques présentent une action anticorrosion efficace, ils sont également hautement toxiques. Leur utilisation peut perturber le système enzymatique du corps ou causer des dommages organiques tels que des lésions temporaires ou permanentes aux reins ou au foie. La toxicité peut survenir pendant la synthèse de ces substances ou lors de leur utilisation.

Par conséquent, les substances naturelles sont de plus en plus considérées comme une alternative écologique et sans danger aux inhibiteurs synthétiques [19].

Ce sont des inhibiteurs de corrosion naturels des métaux et leurs alliages, dans différents milieux corrosifs qui sont extraits d naturels de différentes parties de plantes (tiges, feuilles et graines). Il est possible d'utiliser plusieurs extraits, mais le problème principal est la stabilité de ces derniers.

Parmi les extraits les plus couramment utilisés, on trouve :

- Les tanins (polyphénols).
- Les huiles essentielles.
- Les huiles.
- Le mucilage (polycaccharides).
- Les alcaloïdes.

Les extraits utilisés contiennent des groupes fonctionnels riches en azote, oxygène et soufre, qui contribuent grandement à leur activité [19].

I.3.5. Les isothermes d'adsorption

Des trois isothermes classiques suivantes peut être utilisée pour illustrer les lois de variation de la quantité adsorbée en fonction de la concentration en inhibiteur : [13]

- Isotherme de Langmuir
- Isotherme de Frumkin
- Isotherme de Temkin

I.3.5.1. Isotherme de Langmuir

Selon le modèle de Langmuir, il existe un nombre déterminé de sites à la surface. Chaque site est capable d'adsorber une seule particule. De plus, l'énergie d'adsorption reste constante car les interactions entre les particules adsorbées sont ignorées. La vitesse d'adsorption est proportionnelle à la concentration en inhibiteur C_{inh} et à la fraction des sites d'adsorption non-occupés. L'équation de l'isotherme est de la forme I.1 suivante : [3]

$$\frac{C}{\theta} = C + \frac{1}{K_{ads}}$$

Où :

K_{ads} : est une constante d'équilibre du processus d'adsorption.

C : est la concentration de l'inhibiteur en solution

θ : est le taux de recouvrement.

Cette isotherme prise en considération les hypothèses suivantes :[16]

1 -Absence d'interaction entre les espèces adsorbées à la surface de l'électrode.

2 -Absence d'hétérogénéité de surface.

3 -Pour des activités élevées dans la solution, il y a recouvrement à saturation de l'électrode par l'espèce adsorbée.

I.3.5.2. Isotherme de Temkin

Le modèle de Temkin décrit l'adsorption en considérant que l'énergie libre d'adsorption de l'adsorbat est une fonction linéaire du taux de recouvrement θ , tandis que les constantes de vitesse chimiques varient en fonction de θ . Ce modèle prend également en compte les interactions entre les espèces adsorbées à la surface, qu'elles soient attractives ou répulsives.

L'isotherme de Temkin représentée par la variation du taux de recouvrement θ en fonction de Logarithme népérien de la concentration de l'inhibiteur en solution. Cette variation doit être linéaire. Elle est exprimée par l'équation I.2 suivante :

$$\theta = \frac{1}{\alpha} \ln K_{ads} C$$

Où :

K_{ads} : est une constante d'équilibre du processus d'adsorption.

C : est la concentration de l'inhibiteur en solution

θ : est le taux de recouvrement.

α : est un paramètre qui tient compte de l'hétérogénéité de la surface et des interactions intermoléculaires dans la couche adsorbée. [19]

I.3.5.3. L'isotherme de Frumkin

Ce type d'isotherme dépend des interactions moléculaires dans la couche d'adsorption et le degré d'hétérogénéité de la surface. Elle est exprimée par l'équation I.3 suivante :

$$\ln \left(\frac{C(1-\theta)}{\theta} \right) = \log K_{ads} + \alpha C$$

Où :

K_{ads} : est une constante d'équilibre du processus d'adsorption.

C : est la concentration de l'inhibiteur en solution

θ : est le taux de recouvrement.

α : est un paramètre qui tient compte de l'hétérogénéité de la surface et des interactions intermoléculaires dans la couche adsorbée. [24]

Chapitre II

Synthèse expérimentale

Dans ce chapitre, nous rappelons quelques définitions et notions nécessaires à notre travail, qui nous permettront de maîtriser les phénomènes à risque et ainsi de pouvoir interpréter les résultats obtenus. En plus d'introduire les méthodes expérimentales utilisées pour estimer la vitesse de corrosion et déterminer la concentration optimale. Une description des matériaux utilisés dans cette étude, les matières minérales et végétales dont nous avons extrait l'inhibiteur de corrosion, l'électrolyte, les formulations réalisées et les conditions opératoires.

II.METHODES D'ETUDE

Il existe de nombreuses méthodes d'évaluation de la corrosion, mais les plus couramment utilisées et citées dans la littérature pour l'inhibition de la corrosion des métaux sont :

- La gravimétrie (ou la perte de masse) ;
- Les techniques de polarisation potentiodynamique ;
- La spectroscopie d'impédance électrochimique ;
- Méthode de dosage.

Autres méthodes complètent ces techniques, telles qu'analyse et identification des huiles et extraits de plantes utilisés comme inhibiteurs de corrosion :

- La chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS) ;
- La chromatographie en phase liquide à haute performance (HPLC) ;
- L'infra-rouge à transformée de fourrier (IR-TF). [23].

Dans notre étude on utilise la méthode gravimétrique (perte de masse).

II.1. La méthode de la perte de masse

C'est une méthode plus ancienne utilisée pour étudier la vitesse et le taux de corrosion, même l'efficacité inhibitrice d'inhibiteur. Son principe est basé sur les calculs de perte de masse (Δm) après un temps d'exposition défini à un milieu corrosif.

L'utilisation de cette méthode reste limitée à cause de sa productibilité qui n'est pas toujours appréciable mais elle permet de juger de l'importance de phénomène [15].

La vitesse de corrosion est calculée à partir de la relation suivante II.1 :

$$W_{\text{corr}} = \frac{m_i - m_p}{S.t} = \frac{\Delta m}{S.t}$$

Δm : Perte de masse en mg.

m_i (mg) : la masse de l'échantillon avant l'essai.

m_p (mg) : la masse de l'échantillon après l'essai.

S : Surface exposé en cm^2

t : Temps d'exposition dans la solution en heure

W_{corr} : Vitesse de la corrosion en $\text{mg.cm}^{-2}\text{h}^{-1}$.

L'efficacité inhibitrice (% η) du composé étudié calculée par la relation II.2:

$$\% \eta = \frac{W_{\text{corr}} - W_{\text{inh}}}{W_{\text{corr}}} \times 100$$

W_{cor} et W_{inh} représentent la vitesse de corrosion en absence et présence d'inhibiteur.

Le taux de recouvrement de la surface par l'inhibiteur θ , il est défini par la relation suivante II.3 :

$$\theta = \frac{W_{\text{corr}} - W_{\text{inh}}}{W_{\text{corr}}}$$

II.1.1. Les avantages de la méthode

- Elle donne des informations sur le taux moyen de la perte de masse due à la corrosion.
- Elle peut aussi fournir des informations sur la nature de la corrosion à travers l'analyse de ses produits de corrosion.
- Elle est une méthode spontanée, ne pas nécessiter un appareillage important (balance analytique de précision à 0.1mg), facile à mettre en œuvre.

II.1.2. Les inconvénients de la méthode

- Elle exige un temps considérablement long pour avoir une différence de poids mesurable.
- Elle utilise un grand nombre des échantillons métallique destinés aux tests de corrosion et une grande quantité du milieu corrosif.
- Elle ne peut pas être appliquée lorsque l'échantillon métallique est une pipe dans une grande installation.
- La vitesse de corrosion mesurée est une vitesse moyenne.[24]

II.2. Préparation de l'inhibiteur de corrosion

II.2.1. Aperçu sur l'espèce *Prunus armeniaca* L

II.2.1.1. Origine et historique [25-33]

- L'abricotier a trois grandes régions d'origine : la Chine centrale, l'Asie centrale et l'Asie mineure En 1961, les espèces d'abricotiers ont été classées selon leurs migrations.
- On pense que l'origine de *Prunus armeniaca* vient de Chine, où il y a des forêts d'abricotiers sauvages. Cette plante est cultivée en Chine depuis 2000 ans.
- L'abricotier s'est répandu progressivement à travers l'Asie centrale, l'Iran, l'Asie Mineure, le Caucase et la Syrie. Les abricotiers issus de ces migrations ont ensuite été cultivés en France, notamment dans la vallée du Rhône et dans le Vaucluse, et présentent actuellement les

caractéristiques des abricotiers européens, comme l'amande douce, l'autofertilité et un faible besoin de greffage.

-La culture de l'abricot a été introduite au Proche-Orient via l'Iran et l'Arménie vers le premier siècle avant J.C.

- En 1846, on enregistrait qu'il y avait 23 variétés d'abricotier cultivées à la pépinière centrale d'Alger.

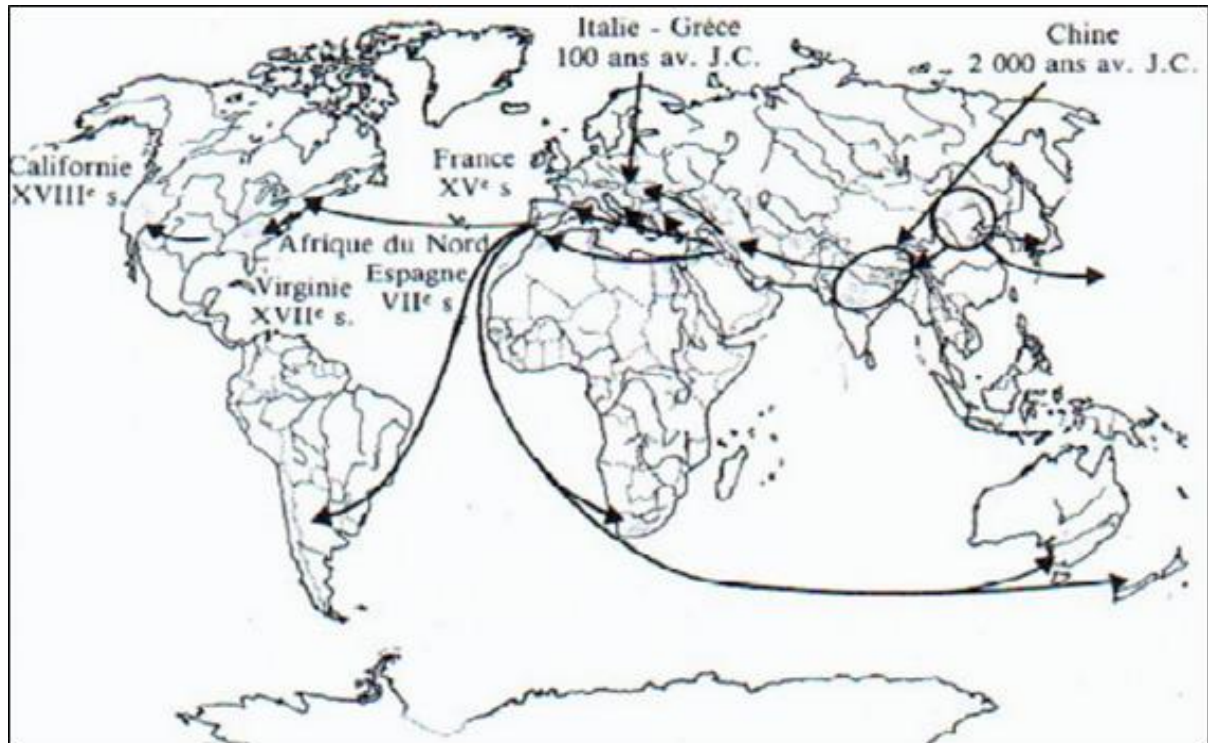


Figure II.1 : Extension historique de la culture de l'abricot.

II.2.1.2. Classification botanique

L'abricotier commun *Prunus armeniaca avulgaris* L. appartient à la famille des Rosacées.

L'abricotier est classé comme suit :

Famille	<i>Rosacées</i>
Tribu	<i>Prunées</i>
Ordre	<i>Rosales</i>
Genre	<i>Prunus</i>
Sous-genre	<i>Prunophora</i>
Section	<i>Armeniaca</i>
Espèce	<i>Prunus armeniaca</i> L.

La classification phylogénétique est la suivante :

Règne	Plantae (Plantes)
Clade	Tracheophyta (Plantes vasculaires)
Clade	Angiospermes (Plantes à fleurs)
Clade	Eudicotylédones vraies
Clade	Rosidées
Ordre	Rosales
Famille	Rosaceae (Rosacées)
Sous-famille	Amygdaloideae
Genre	Prunus
Espèce	Prunus armeniaca

II.2.1.3. Caractères dendrologiques

L'abricotier est un petit arbre au port étalé, mesurant généralement entre 4 et 5 mètres de haut. Il possède une écorce brun rougeâtre. Les feuilles sont alternes, de forme elliptique cordiforme, avec un bord crénelé denté. Les fleurs, de taille assez grande, sont blanches ou roses pâles et apparaissent avant les feuilles. Le fruit de forme globuleuse est une drupe à peau veloutée, de couleur jaune orangé. Le noyau n'est pas adhérent à la chair et contient une amande douce ou amère. [34]



Figure II.2 : Allure générale de l'abricotier -*Prunus armeniaca*

a. Allure générale

L'abricotier (*Prunus armeniaca*) est un arbre de petite taille, naturellement étalé, ne dépassant généralement pas 6 mètres de hauteur. En culture, il peut atteindre entre 10 et 15 mètres, mais sa taille est généralement maintenue en dessous de 3,5 mètres. Les dimensions de l'abricotier varient en fonction des variétés et des conditions de culture. [33,35]

b. Rameaux

Les rameaux de l'abricotier sont courts et raides, avec un port érigé ou semi-horizontale. Ils portent de petits bourgeons appelés "nœuds", où s'insèrent les feuilles. Un nœud peut contenir des bourgeons à bois solitaires, des boutons à fleurs isolés, des doubles boutons à fleurs, ou des doubles boutons à fleurs accompagnés d'un bourgeon à bois. [36]

c. Feuilles

Les feuilles de l'abricotier sont caduques et alternes. Elles présentent des glandes et des nectaires sur le pétiole, ainsi que des stipules à la base. Les feuilles de l'abricotier ont une forme cordiforme arrondie, sont lisses et glabres à la partie inférieure. Elles sont dentées, terminées en pointes, et peuvent avoir un à trois bourgeons à bois ou à fleurs à leur aisselle. [28,37]



Figure II.3 : Feuille de l'espèce *Prunus armeniaca*

d. Fleurs

Les fleurs de l'abricotier sont hermaphrodites et régulières, apparaissant avant les feuilles. Elles peuvent être solitaires ou groupées. La corolle est formée par la réunion de 5 sépales du calice et de 5 grands pétales libres, blancs à l'intérieur et plus ou moins teintés de rose à l'extérieur. Les fleurs ont également 15 à 30 étamines libres, insérées au niveau de la gorge du calice. L'ovaire de la fleur a une seule loge avec deux ovules, dont l'un avorte, expliquant pourquoi le noyau ne renferme qu'une seule amande. [38,39]

e. Fruits

Le fruit de l'abricotier est une drupe, c'est-à-dire un fruit à pulpe charnue dont la graine (ou amande) est enfermée dans un noyau lignifié et très dur. La peau du fruit est toujours duveteuse, et la chair est jaune et très parfumée à maturité. [29]



Figure II.4 : Fruits de l'espèce *Prunus armeniaca*

f. Noyau

Le noyau de l'abricot est généralement libre ou faiblement adhérent à la chair, et à maturité, il est nettement séparé de la chair par un espace plus ou moins important. Le noyau de l'abricot est lisse, généralement ovale aigu d'un côté et obtus de l'autre. Il contient une amande. [33,36]



Figure II.5 : Noyaux de l'espèce *Prunus armeniaca*

II.3. Répartition de l'espèce**II.3.1. Dans le monde**

Les régions où *Prunus Armeniaca* L. c'est bien développé soit le Nord de la Chine, la Mandchourie, la Corée du Nord, les montagnes du Khingan et le Nord-Est de la Mongolie. [40]

La provenance des abricots est classée en six groupes éco-géographiques suivant leur diversité génétique

Groupe 1	Asie centrale
Groupe 2	Irano-caucasien
Groupe 3	Europe
Groupe 4	Dzhugar-Zailij
Groupe 5	Nord de la Chine
Groupe 6	Est de la Chine

II.3.2. En Afrique du Nord

En Afrique du Nord, l'introduction de l'abricot a été assurée par différentes civilisations : les phéniciens, les Romains et les arabes. La culture de l'abricot dans le Maghreb (Tunisie, Algérie et Maroc) a débuté au 12^{ème} siècle et sa propagation interne a été assurée par greffage et principalement par ensemencement. Le *Prunus armeniaca* L. cultivé au Maghreb appartient au groupe éco-géographique Irano-Caucasien. [40]

II.4. Usages et intérêts

L'abricotier (*Prunus armeniaca*) est un arbre fruitier cultivé pour ses fruits délicieux et sa valeur nutritionnelle. Il présente plusieurs usages et intérêts, notamment :

II.4.1. Utilisation alimentaire

Les abricots sont consommés frais, séchés, en confiture, en compote, en conserve ou utilisés comme ingrédients dans diverses préparations culinaires. Ils sont appréciés pour leur saveur douce et parfumée, ainsi que pour leur teneur en vitamines, en fibres et en antioxydants. [41]

II.4.2. Valeur nutritionnelle

Les abricots sont une excellente source de vitamines, notamment de la vitamine A, de la vitamine C et de la vitamine E. Ils contiennent également des minéraux tels que le potassium, le calcium et le magnésium, ainsi que des fibres alimentaires bénéfiques pour la digestion. [41]

II.4.3. Propriétés médicinales

Certaines études suggèrent que les abricots peuvent avoir des propriétés médicinales, notamment des effets antioxydants, anti-inflammatoires et anticancéreux. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour confirmer ces effets et déterminer les mécanismes d'action. [42]

II.4.4. Utilisation cosmétique

L'huile d'amande d'abricot, extraite des amandes du fruit, est utilisée en cosmétique pour ses propriétés hydratantes et adoucissantes. Elle est souvent utilisée dans la fabrication de produits pour les soins de la peau et des cheveux. [43]

II.5. Le cuivre

II.5.1. Généralités

Le cuivre est un métal rouge orangé qui correspond à l'élément chimique de symbole Cu et de numéro atomique 29. Il est présent naturellement dans la croûte terrestre et se révèle essentiel au développement de toutes les formes de vie.

Il est très malléable et ductile, presque mou. Ses capacités en conductivité thermique et électriques sont très élevées. Ce métal se distingue par sa couleur unique, étant le seul métal coloré à part l'or. Lorsqu'il est nettoyé, sa surface arbore une teinte rose saumon. Le cuivre est également appelé le "métal rouge".

A l'air libre, il s'altère et on voit une couche de couleur vert-grise, appelée patine ou vert-de-gris et qui recouvre le cuivre. C'est le dioxyde de carbone et non l'air qui oxyde le cuivre. [44].

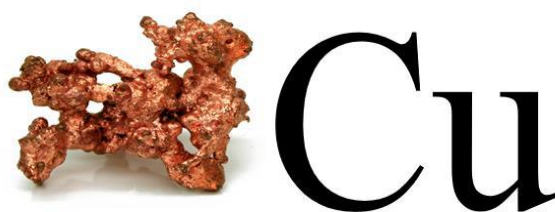


Figure II.6 : Le métal et le symbole de cuivre.

La plupart des acides attaquent le cuivre. Il se dissout parfaitement dans l'acide nitrique.

II.5.2. Propriété physiques et chimiques du cuivre

II.5.2.1. Propriétés électrochimiques

Le cuivre, métal peu oxydable, présente deux degrés d'oxydation possibles : Cu^+ et Cu^{+2} .

Sa couleur fonce à l'air par oxydation et noircit par sulfuration. L'air sec et l'eau pure sont sans action sur le cuivre. Tout cela confirme le caractère relativement noble de ce métal.

Le potentiel standard du couple Cu/Cu^{+2} est supérieur à celui de l'hydrogène. Par conséquent, Le cuivre n'est ainsi pas corrodé par les solutions non complexantes exemptes d'oxydants ; par contre, les solutions acides ou alcalines renfermant des oxydants le corrodent et peuvent constituer des solutions de décapage (sulfochromique, sulfonitrique). En milieu neutre ou faiblement alcalin et oxydant, le cuivre se passivera par formation superficielle d'oxydes ; également article Matériaux maintenus à l'état d'anode ou de cathode pendant tout l'emploi .

En présence de sels ammoniacaux ou de cyanures formant avec les ions Cu^+ des complexes très stables, produisant une très forte corrosion du cuivre, même en l'absence d'oxydants. En effet, dans ces milieux, le domaine de passivation est excessivement réduit et le potentiel d'équilibre du cuivre abaissé à une valeur considérablement plus basse » (autrement dit, le cuivre devient beaucoup moins noble). [44,45]

II.5.2.2. Propriétés physiques

Le cuivre est relativement mou et ductiles et s'allie facilement avec d'autres métaux pour donner, par exemple, les laitons et les bronzes

Les principales caractéristiques physiques du cuivre sont données dans le tableau II.1. [44]

	Détails
Formule	Cu
No atomique	29
État physique	Solide
Dureté	3
Masse molaire	63.54 g/mol
Point de fusion	1084.62°C
Point d'ébullition	2562°C
Masse volumique	8.97 g/cm ³
Rouge	Couleur
Rayon métallique	1.28 Å
Conductivité électrique	59.6 10 ⁶ S/m
Conductivité thermique	Conductivité thermique 401 w/m. k
Résistivité électrique	$\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot M$
Énergie de fusion	13,05 kJ·mol ⁻¹
Chaleur massique	380 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹

II.5.3. Utilisation du cuivre

Le cuivre est le métal le plus utilisé dans le monde après le fer et l'aluminium. Il est utilisé sous sa forme de corps simple, et parfois en alliages.

Le cuivre est utilisé dans nombreux domaines notamment :

-Il est utilisé a longtemps en architecture, comme matériau de couverture étanche. Souvent, il a été utilisé dans la confection des toitures en forme de dôme .

-Le cuivre est utilisé en industrie pour la réalisation de conducteurs électriques, grâce à sa forte conductivité (Fabrication des câbles électriques et composants électronique). Sa conductibilité thermique est également appréciée (fabrication des chaudières ou d'échangeurs de chaleur). Par contre, on l'utilise assez peu dans l'industrie ménagère en raison de son prix élevé. [26]

II.6. Réactifs, solvants et électrolyte

II.6.1. Matériaux utilisés

- le matériau testé dans cette étude est le cuivre.

- l'inhibiteur utilisé cette étude est l'extrait de noyau de Prunus armeniaca L.

II.6.2. Préparation des échantillons

II.6.2.1. Découpage

On coupe la plaque en cuivre pour obtenir des plaquettes carrés ($1 \times 1 \text{ cm}^2$).

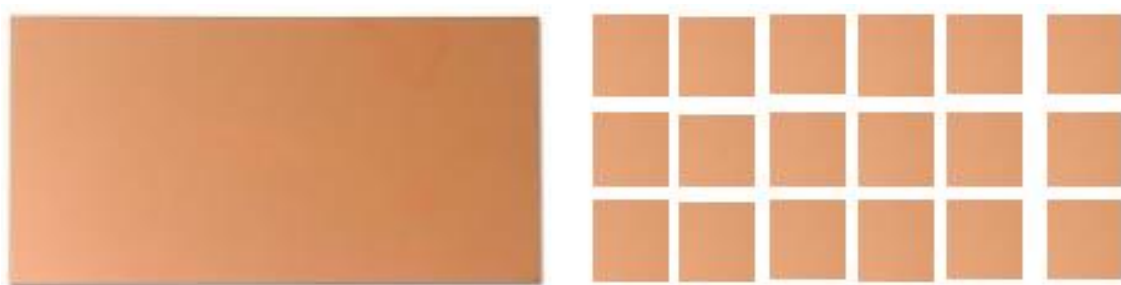


Figure II.7 : Plaque de cuivre avant et après le découpage

Avec le pied à coulisse, on prend les mesures des plaquettes (longueurs L , largeurs J , épaisseurs e) puis on les pèse avec une balance analytique de précision et on calcule la surface selon la relation suivante :

$$S = 2 \times ((L \times J) + (L \times e) + (J \times e))$$

II.6.2.2. Polissage

Afin d'obtenir des résultats fiable et reproductible, les échantillons subissent avant chaque essai à un prétraitement, qui consiste d'un polissage de la surface de l'échantillon au papiers abrasifs de granulométries fine suivi d'un rinçage à l'eau de robinet pour nettoyer la surface après l'abrasion mécanique, puis rinçage à l'acétone d'un nettoyage et dégraissages chimique qui élimine les corps indésirable, puis rinçage l'eau distillée pour éliminer les traces d'acétone, et enfin l'échantillon est séché par séchoir électrique à fin d'éviter la formation immédiate des produits de corrosion.



Figure II.8 : Plaque de cuivre avant polissage (A) et après le découpage polissage (B)

II.6.2.3. Préparation des solutions électrolytiques

La préparation de la solution électrolytiques ($\text{HCl } 0.5\text{M}$) a été obtenu par la dilution de 41.80ml de HCl dans un litre de l'eau distillé, de l'acide commerciale 37% et 1.18 densité, l'électrolyte obtenu a été stocké dans des fioles jaugées.

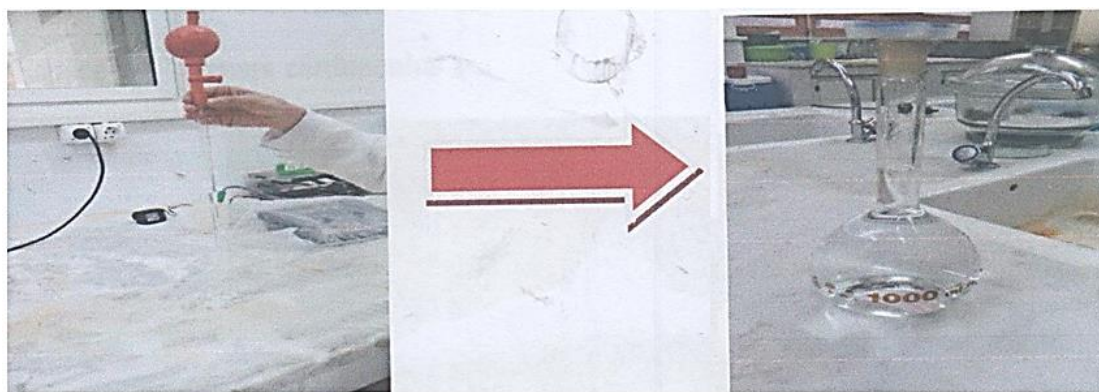


Figure II.9 : Préparation de la solution électrolytiques (HCl 0.5M)

II.6.2.4. Préparation de l'inhibiteur

L'extrait hydro-méthanolique de l'extrait de noyau de *Prunus armeniaca* L a été obtenu par la méthode de macération à froid.

Les noix de la plante *Prunus armeniaca* L ont été nettoyées et séchées à température ambiante, ensuite broyées à l'aide d'un broyeur électrique. 180 grammes de broyat ont été macérées dans 1440 mL méthanol et 360 mL d'eau distillée (80/20) pendant 96 heures sous agitation. Après la filtration par papier filtre et coton hydrophile, le filtrat obtenu est évaporé à l'aide du rotavapeur suivi par le séchage dans l'étuve de type MEMMERT de à température ambiante, l'extrait obtenu est conservé au réfrigérateur (4°C) jusqu'à l'utilisation.

II.6.2.5. Préparation des solutions inhibitrice

Après la préparation des inhibiteurs, nous préparons des solutions avec l'inhibiteur à différentes concentrations :

Concentration (ppm)ou mg/l	20	40	60	80	100
Concentration (g/l)	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1

On met les différentes concentrations de Dans des flacons de 100 ml

II.7. Manipulation de la méthode perte de masse

Cette méthode dont le dispositif est représenté dans la figure II.9 nécessite le matériel de laboratoire suivant :

- Échantillons.
- Béchers.
- Balance de précision.
- Baguette de suspension.
- Fil de cuivre.

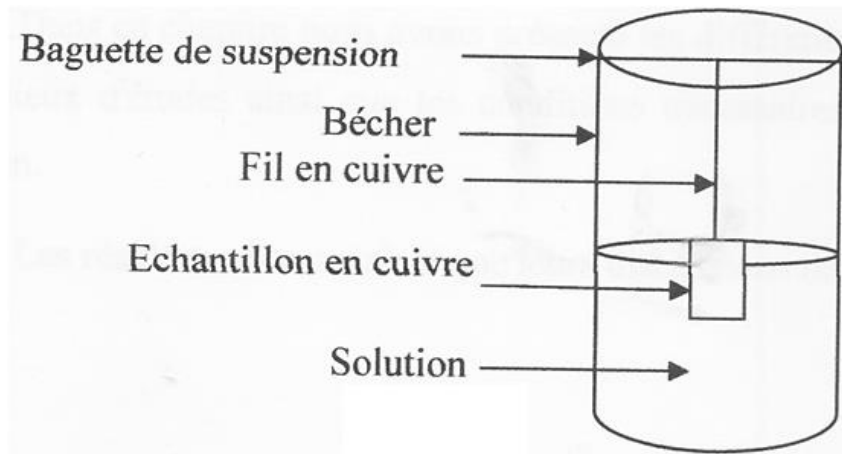


Figure II.10 : Dispositif expérimentale de la méthode perte de masse

- Les surfaces préparées sont rincées et dégraissées avec l'acétone pour éliminer toutes les traces, puis ils sont lavés avec l'eau distillée, séchées puis immergés une fois dans les flacons de la solution corrosif et une autre fois dans la solution inhibitrice, à des temps précis.
- À la fin de chaque test les pièces testées sont rincées avec de l'eau distillée et séchées ensuite, les pièces sont pesées.
- Les essais sont réalisés à la température ambiante.
- La durée d'immersion a été fixée à 0h,2h,4h,6h,8h,24h, pour tous les tests.
- Chaque essai a été répété au moins trois fois, afin de vérifier la reproductibilité des résultats.

Chapitre III

Résultats et discussions

Ce chapitre vise à présenter les résultats obtenus pour différentes expériences utilisées pour étudier l'effet inhibiteur de l'extrait de noyau de *Prunus armeniaca* L sur la corrosion du cuivre en milieu HCl (0.5 M), nous avons utilisés, dans cette étude la méthode gravimétrique, et nous avons calculé plusieurs paramètres tels que la vitesse de corrosion V_{cor} , l'efficacité inhibitrice ($\eta\%$) ainsi que le taux de recouvrement de cuivre après un temps d'immersion, en absence et en présence de l'inhibiteur à différentes concentrations à une température ambiante.

III.1 Cinétique de corrosion Sans inhibiteur

Les séries d'expérience ci-dessous sont réalisées par la méthode gravimétrique sans inhibiteur de corrosion, dans un but de déterminer la vitesse de corrosion et la masse perdue de cuivre immergé dans les solutions en fonction du temps.

Tableau III.1 : Cinétique de corrosion de cuivre en milieu acide HCl (0.5 M) sans inhibiteur à T = ambiante.

Temps (heure)	2	4	6	8	24
Δm (mg)	0.23	0.70	1.40	2.35	6.12
V_{cor} (mg/h.cm ²)	0.0434	0.0729	0.0972	0.1223	0.1062

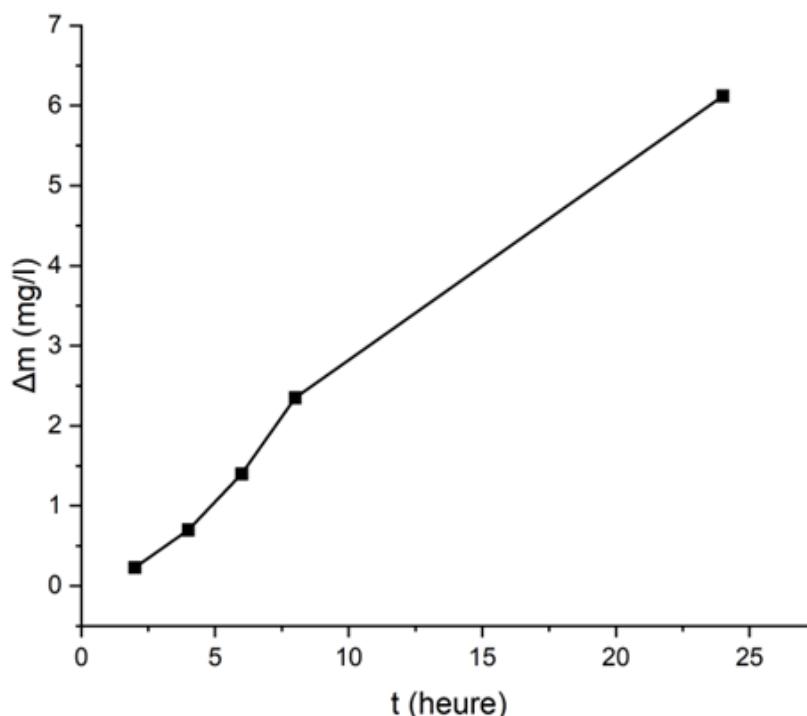


Figure III.1 : Évaluation de la perte de masse de cuivre en fonction de temps en milieu corrosif HCl (0.5M) en absence d'inhibiteur

La figure III.1 représente la variation de la perte de masse de cuivre en fonction de temps en milieu corrosif HCl (0.5M) en absence d'inhibiteur, elle montre que la perte de masse de cuivre augmente progressivement et atteint 6.12 mg après 24 heures d'immersion.

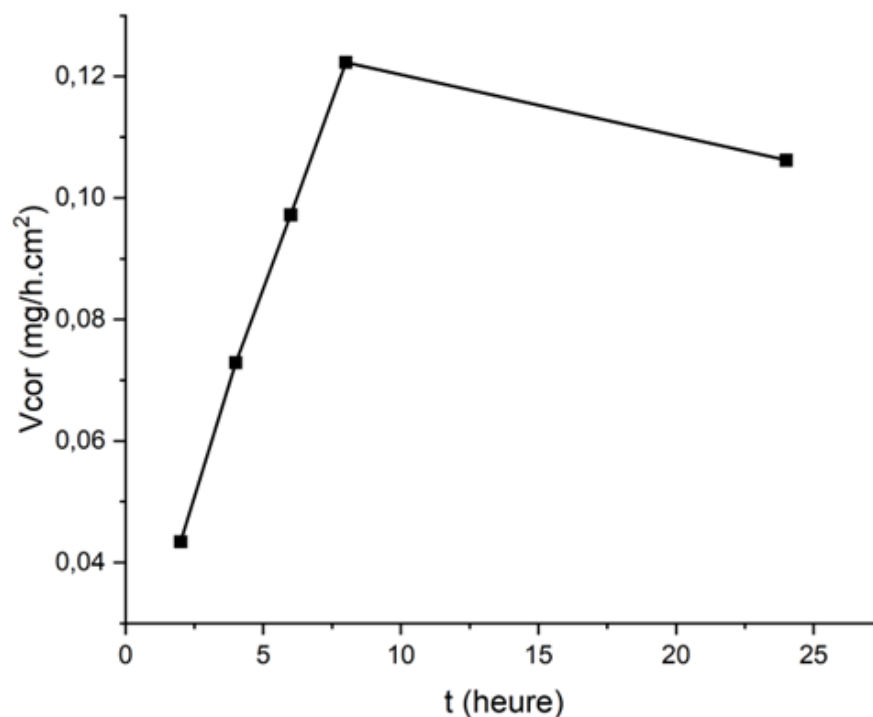


Figure III.2 : Évolution de la vitesse de corrosion de cuivre en fonction de temps en milieu corrosif HCl (0.5M) en absence d'inhibiteur

L'analyse des résultats de la figure III.2, montre que la vitesse de corrosion de cuivre augmente avec l'augmentation de temps d'immersion où nous enregistrons une vitesse de corrosion maximale après 8 heure d'immersion ($V_{\max} = 0.1223 \text{ mg/h.cm}^2$) suivi d'une diminution après 24 heure d'immersion ($V = 0.1062 \text{ mg/h.cm}^2$).

III.2. Cinétique de corrosion en présence de l'inhibiteur

III.2.1. Influence de la concentration de l'inhibiteur

Pour découvrir l'effet de la concentration de l'inhibiteur sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibiteur, nous avons effectué des mesures gravimétriques sur le cuivre en milieu HCl 0.5 M après 8 heure d'immersion à différentes concentrations de l'inhibiteur (Le tableau III.2).

Tableau III.2 : Cinétique de corrosion de cuivre en milieu acide HCl (0.5M) à différentes concentrations de l'inhibiteur à T = Ambiante et 8 heures d'immersion.

C (mg/l)	Δm (mg)	V_{cor} (mg/h.cm ²)	θ	$\eta\%$
0	2.35	0.1223	-	-
20	1.26	0.0843	0.4636	46.36
40	1.08	0.0562	0.5404	54.04
60	0.69	0.0359	0.7064	70.64
80	0.40	0.0208	0.8299	82.99
100	0.15	0.0078	0.9362	93.62

En traçant la variation de la vitesse de corrosion de cuivre après 8 heure d'immersion en milieu acide HCl (0.5M) en fonction de la concentration de l'inhibiteur, et d'autre part la variation de l'efficacité inhibitrice dans les mêmes conditions.

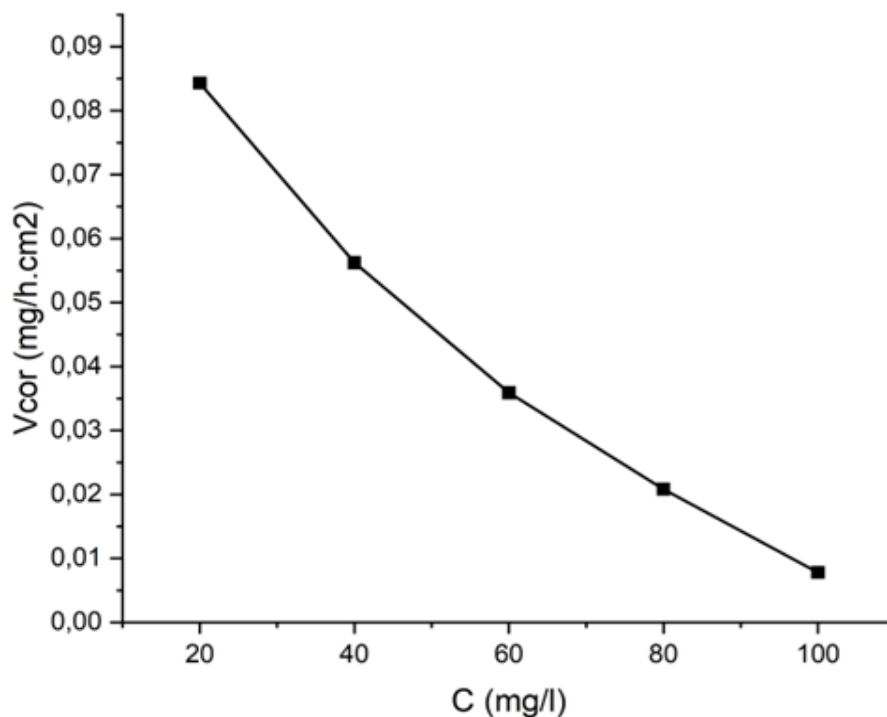


Figure III.3 : Évolution de la vitesse de corrosion de cuivre à différentes concentrations de l'inhibiteur après 8 heure d'immersion en milieu corrosif HCl (0.5M).

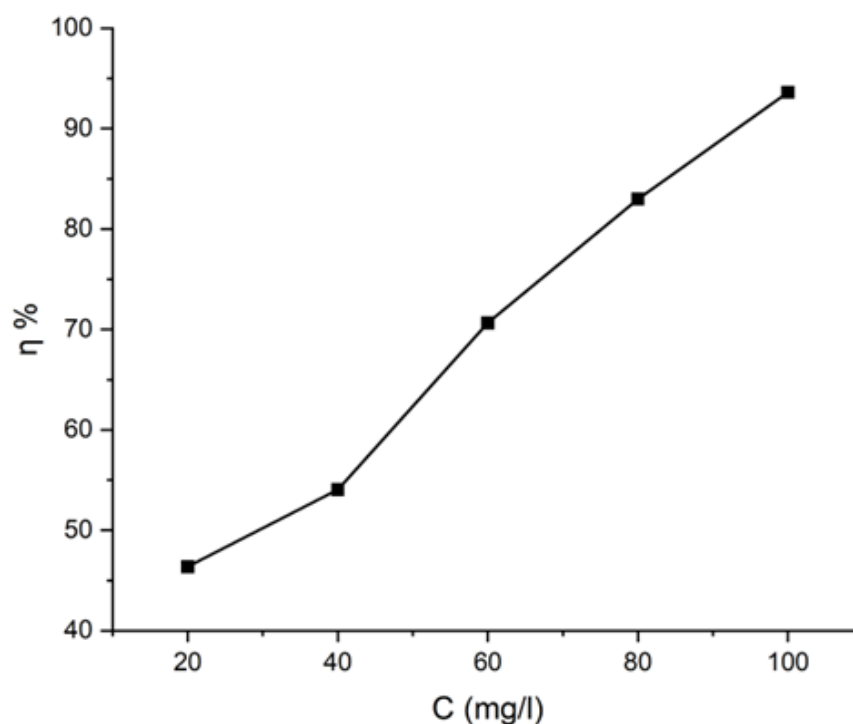


Figure III.4 : Évolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations après 8 heure d'immersion en milieu corrosif HCl (0.5M).

L'analyse des résultats obtenus montre clairement que l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur conduit à une diminution de la vitesse de corrosion, et une augmentation de l'efficacité inhibitrice. Le meilleur taux d'inhibition est obtenu pour une concentration de 100 mg/l. Cette concentration est considérée comme une concentration critique et nous donne une efficacité maximale de 93,62 %.

Cela signifie que l'extrait a de bonnes propriétés inhibitrices de la corrosion de cuivre en milieu acide chlorhydrique HCl (0.5M).

III.2.2. Influence du temps d'immersion de l'inhibiteur

Dans cette partie de l'étude, nous avons effectué des mesures gravimétriques sur le cuivre en milieu HCl 0.5 M à différentes périodes d'immersion en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur.

Le but de cette étude est de découvrir l'effet du temps d'immersion sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibiteur.

III.2.2.1. Temps d'immersion de l'inhibiteur t = 2h

Le tableau III.3 regroupe les résultats de la vitesse de corrosion V_{cor} , l'efficacité inhibitrice ($\eta\%$) ainsi que le taux de recouvrement θ de cuivre, obtenus après 2 heure d'immersion de cuivre en milieu acide HCl (0.5M) à différentes concentrations de l'inhibiteur.

Tableau III.3 : Cinétique de corrosion de cuivre en milieu acide HCl (0.5M) à différentes concentrations de l'inhibiteur à T = Ambiante et 2heure d'immersion.

C (mg/l)	Δm (mg)	$V_{cor}(mg/h.cm^2)$	θ	$\eta\%$
0	0.23	0.0434	-	-
20	0.15	0.0312	0.2811	28.11
40	0.11	0.0229	0.4723	47.23
60	0.08	0.0166	0.6157	61.57
80	0.06	0.0125	0.7119	71.19
100	0.04	0.0083	0.8087	80.87

En traçant la variation de la vitesse de corrosion de cuivre après 2 heure d'immersion en milieu acide HCl (0.5M) en fonction de la concentration de l'inhibiteur, et d'autre part la variation de l'efficacité inhibitrice dans les mêmes conditions.

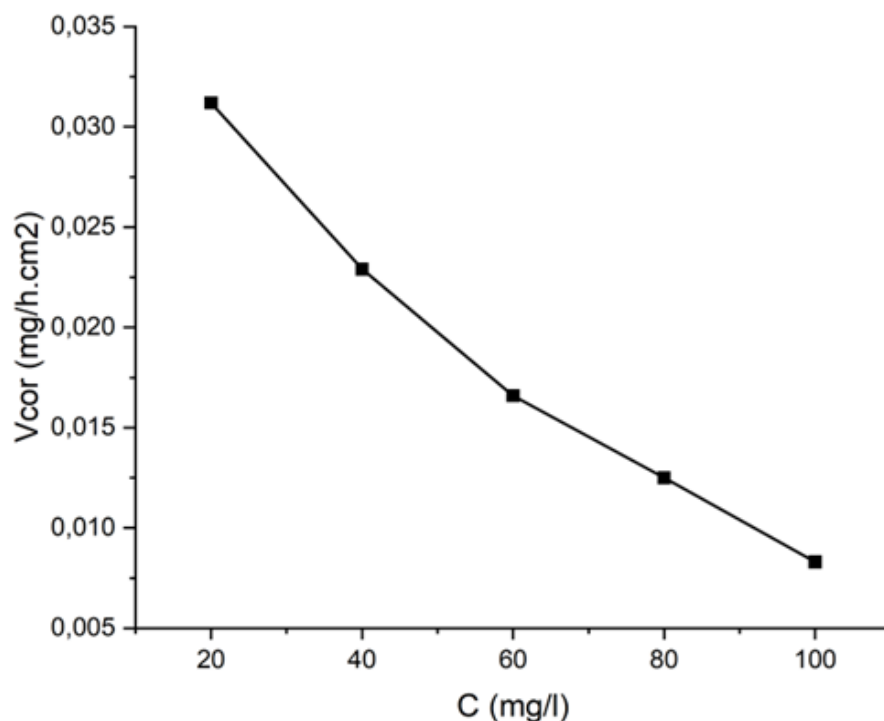


Figure III.5 : Évolution de la vitesse de corrosion de cuivre à différentes concentrations de l'inhibiteur après 2 heure d'immersion en milieu corrosif HCl (0.5M).

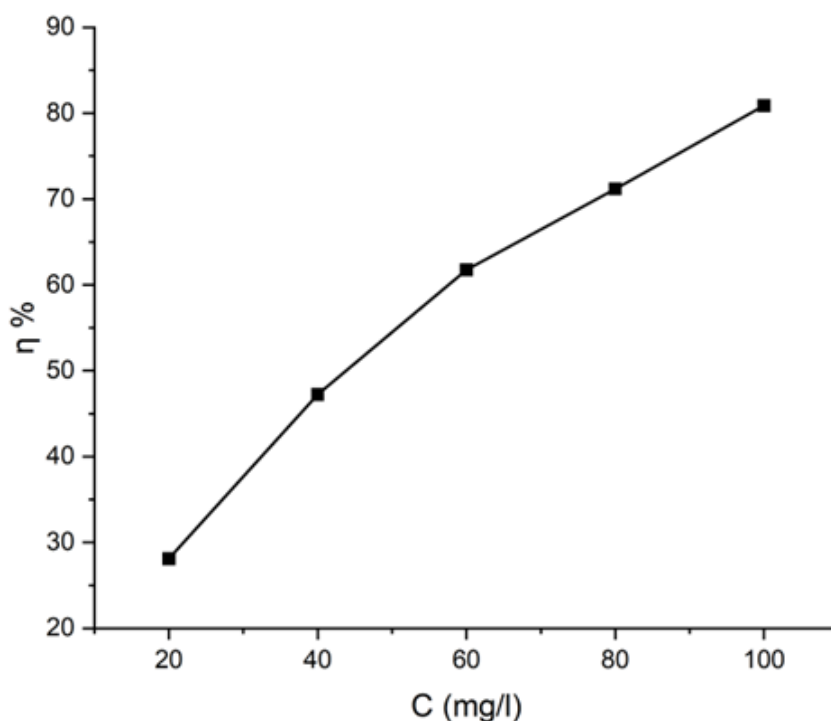


Figure III.6 : Évolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations après 2 heure d'immersion en milieu corrosif HCl (0.5M).

III.2.2.2. Temps d'immersion de l'inhibiteur $t = 4h$

Le tableau III.4 regroupe les résultats de la vitesse de corrosion V_{corr} , l'efficacité inhibitrice ($\eta\%$) ainsi que le taux de recouvrement θ de cuivre, obtenus après 4 heure d'immersion de cuivre en milieu acide HCl (0.5M) à différentes concentrations de l'inhibiteur.

Tableau III.4 : Cinétique de corrosion de cuivre en milieu acide HCl (0.5M) à différentes concentrations de l'inhibiteur à $T = T_{\text{ambiante}}$ et 2heure d'immersion.

C (mg/l)	Δm (mg)	V_{cor} (mg/h.cm ²)	θ	$\eta\%$
0	0.65	0.0677	-	-
20	0.50	0.0520	0.2319	23.19
40	0.39	0.0385	0.4313	43.13
60	0.26	0.0270	0.6011	60.11
80	0.16	0.0166	0.7574	75.74
100	0.07	0.0072	0.8936	89.36

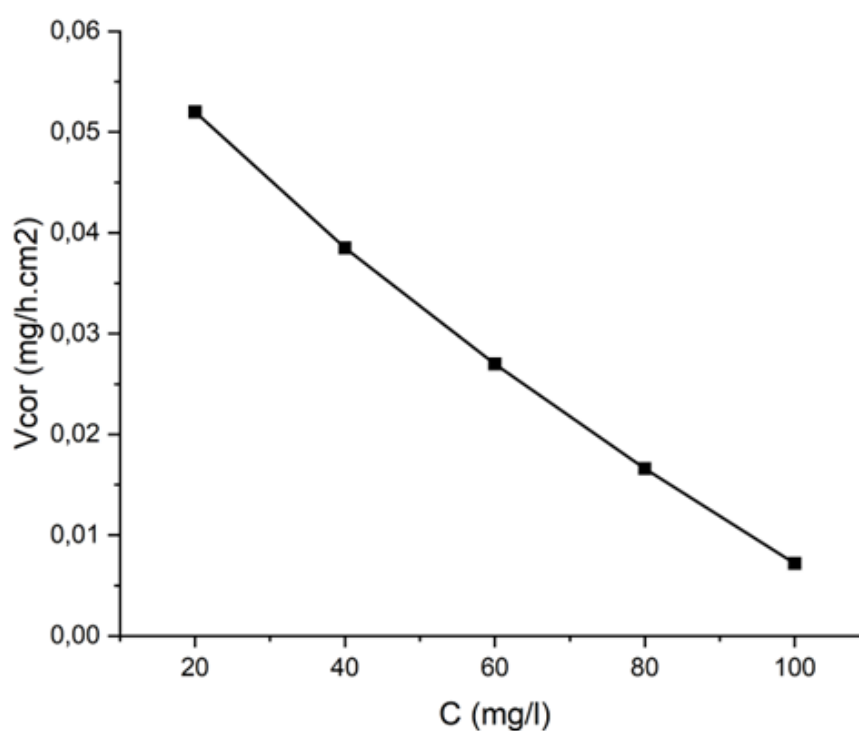


Figure III.7 : Évolution de la vitesse de corrosion de cuivre à différentes concentrations de l'inhibiteur après 4 heure d'immersion en milieu corrosif HCl (0.5M).

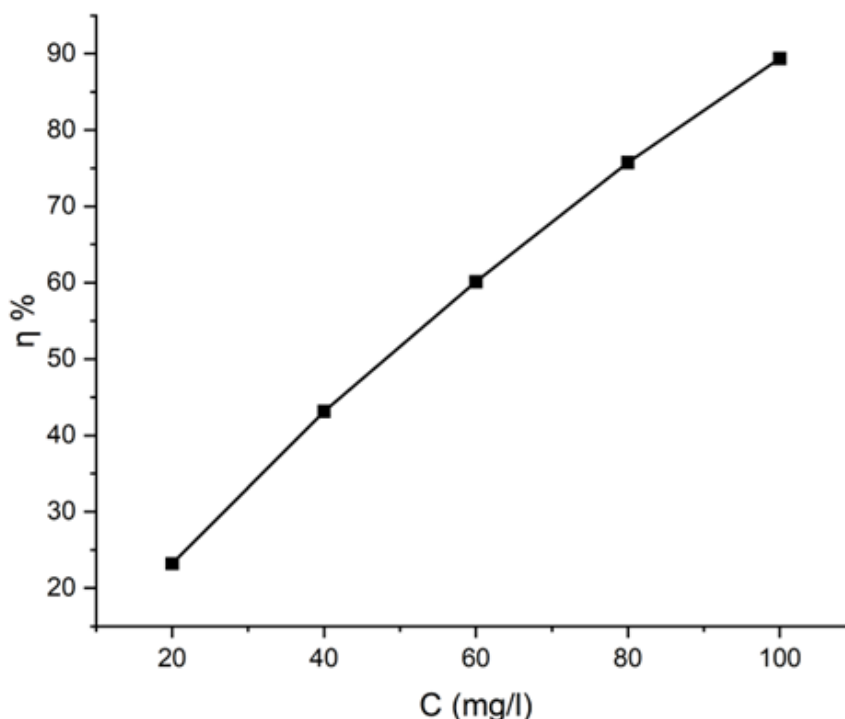


Figure III.8 : Évolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations après 4 heures d'immersion en milieu corrosif HCl (0.5M).

III.2.2.3. Temps d'immersion de l'inhibiteur t = 6h

Le tableau III.5 regroupe les résultats de la vitesse de corrosion V_{cor} , l'efficacité inhibitrice ($\eta\%$) ainsi que le taux de recouvrement θ de cuivre, obtenus après 6 heures d'immersion de cuivre en milieu acide HCl (0.5M) à différentes concentrations de l'inhibiteur.

Tableau III.5 : Cinétique de corrosion de cuivre en milieu acide HCl (0.5M) à différentes concentrations de l'inhibiteur à $T = T_{ambiente}$ et 6 heures d'immersion.

C (mg/l)	Δm (mg)	V_{cor} (mg/h.cm ²)	θ	$\eta\%$
0	1.40	0.0972	-	-
20	0.87	0.0604	0.3786	37.86
40	0.57	0.0395	0.5940	59.40
60	0.35	0.0243	0.7500	75.00
80	0.23	0.0159	0.8364	83.64
100	0.13	0.0090	0.9074	90.74

En traçant la variation de la vitesse de corrosion de cuivre après 6 heures d'immersion en milieu acide HCl (0.5M) en fonction de la concentration de l'inhibiteur, et d'autre part la variation de l'efficacité inhibitrice dans les mêmes conditions.

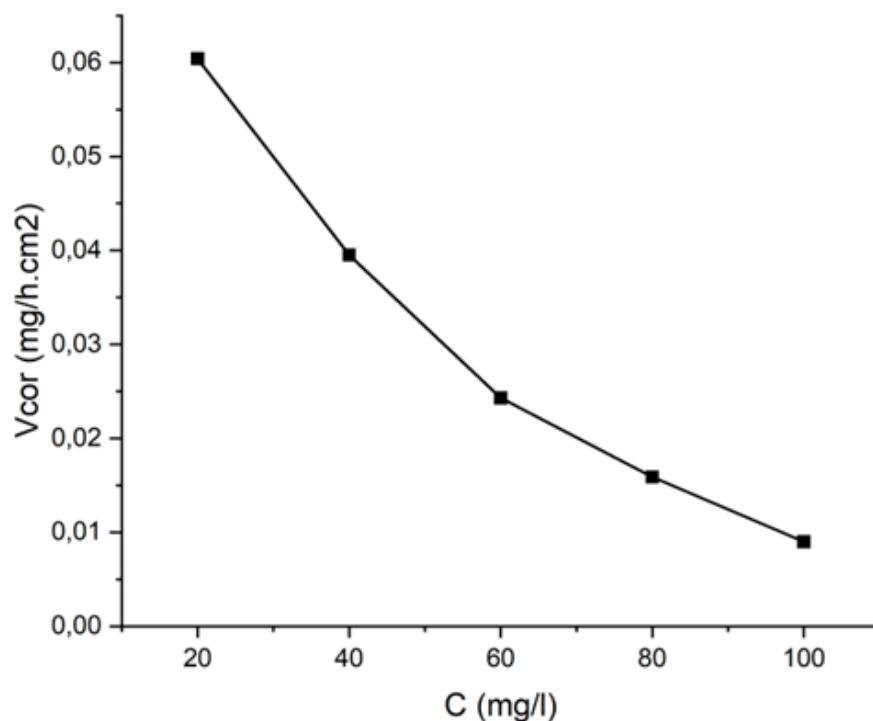


Figure III.9: Évolution de la vitesse de corrosion de cuivre à différentes concentrations de l'inhibiteur après 6 heures d'immersion en milieu corrosif HCl (0.5M).

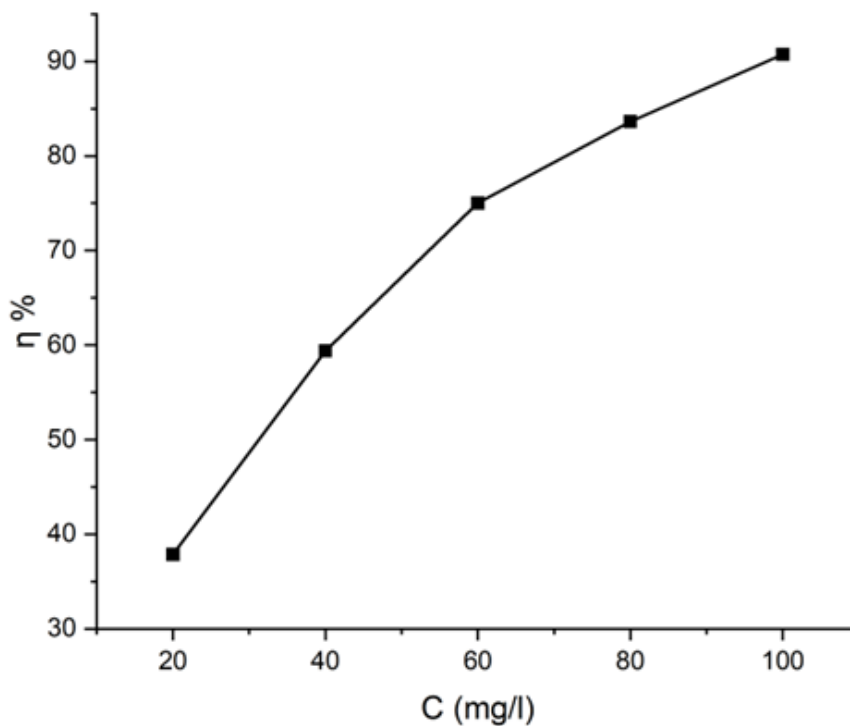


Figure III.10: Évolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations après 6 heures d'immersion en milieu corrosif HCl (0.5M).

III.2.2.4. Temps d'immersion de l'inhibiteur t = 8h

Les résultats que nous avons obtenus dans ces conditions ont été rassemblés dans le tableau III.2 et représentés dans les figures III.3 et III.4, elles sont étudiées et analysées dans l'élément III.2.1.

III.2.2.5. Temps d'immersion de l'inhibiteur t = 24h

Le tableau III.6 regroupe les résultats de la vitesse de corrosion V_{cor} , l'efficacité inhibitrice ($\eta\%$) ainsi que le taux de recouvrement θ de cuivre, obtenus après 48 heures d'immersion de cuivre en milieu acide HCl (0.5 M) à différentes concentrations de l'inhibiteur.

Tableau III.6 : Cinétique de corrosion de cuivre en milieu acide HCl (0.5M) à différentes concentrations de l'inhibiteur à $T = T_{ambiente}$ et 24 heures d'immersion

C (mg/l)	Δm (mg)	V_{cor} (mg/h.cm ²)	θ	$\eta\%$
0	6.12	0.1062	-	-
20	4.28	0.0743	0.3003	30.03
40	2.56	0.0513	0.5169	51.69
60	1.97	0.0342	0.6779	67.79
80	1.30	0.0225	0.7881	78.81
100	0.78	0.0135	0.8728	87.28

En traçant la variation de la vitesse de corrosion de cuivre après 24 heures d'immersion en milieu acide HCl (0.5M) en fonction de la concentration de l'inhibiteur, et d'autre part la variation de l'efficacité inhibitrice dans les mêmes conditions.

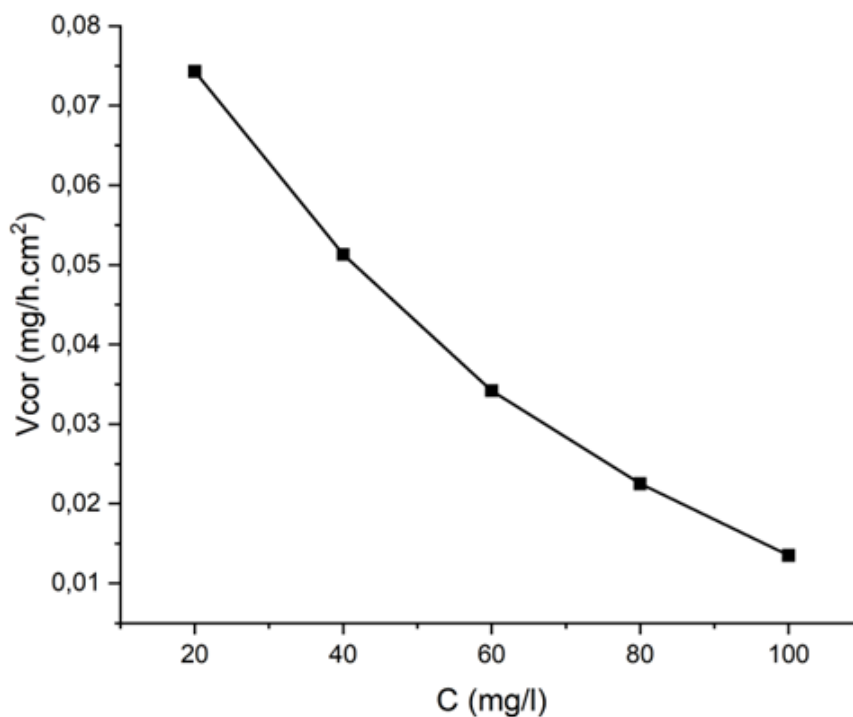


Figure III.11 : Évolution de la vitesse de corrosion de cuivre à différentes concentrations de l'inhibiteur après 24 heures d'immersion en milieu corrosif HCl (0.5M).

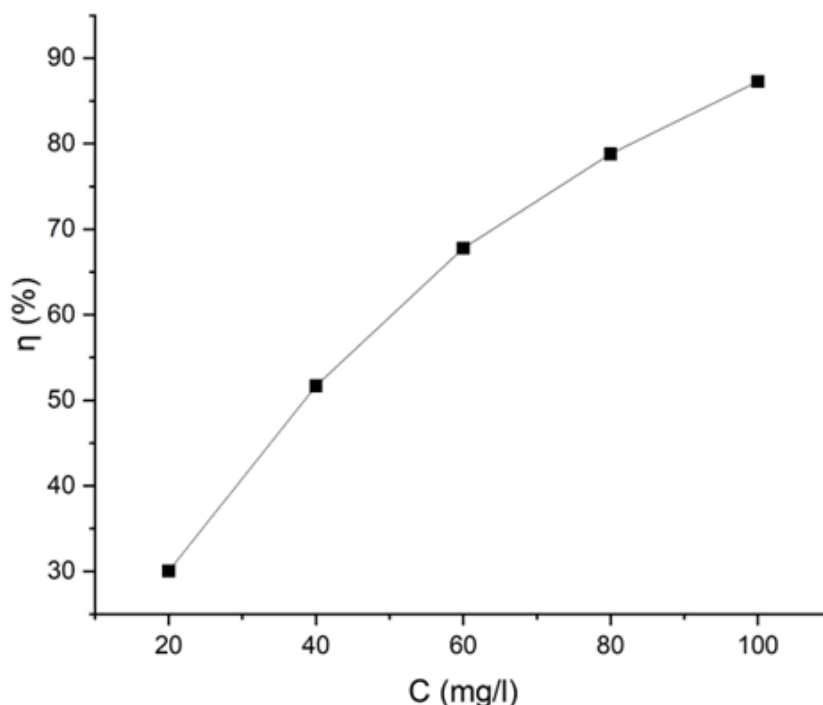


Figure III.12: Évolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations après 24 heures d'immersion en milieu corrosif HCl (0.5M).

L'analyse des résultats montre que :

- La perte de masse est très faible voir même négligeable dans les différentes périodes d'immersion dans le milieu corrosif.
- Dans tous les cas, la vitesse de corrosion subit une diminution même à faible concentration de l'inhibiteur, et d'autre part il y a une augmentation de l'efficacité inhibitrice à différentes durées d'immersion.
- La valeur optimale de l'efficacité inhibitrice de corrosion du cuivre en présence de l'extrait du noyau de *Prunus armeniaca* est enregistré en présence de 100 mg/L dans les différentes périodes d'immersion.
- Après 8 heures d'immersion, l'efficacité inhibitrice maximale a été enregistrée est de 93,62 % en présence de 100 mg/L de d'extrait.

Ces résultats montrent que l'extrait du noyau de *Prunus armeniaca* agit efficacement contre la corrosion du cuivre en milieu acide chlorhydrique HCl (0.5 M). [46,47].

III.3. Types d'isotherme d'adsorption

Afin de trouver l'isotherme d'adsorption appropriée, nous avons utilisé les valeurs du taux de recouvrement θ pour différentes concentrations de l'inhibiteur obtenues à partir des mesures de perte de poids à différentes durées d'immersion, pour tracer les courbes suivants :

- En traçant $C/\theta=f(C)$ pour l'isotherme Lungmuir
- En traçant $\theta = f(\ln(C))$ pour l'isotherme Temkin

- En traçant $\ln(C(1-\theta)/\theta) = f(C)$ pour l'isotherme Frankin

Les tableaux suivants regroupent les résultats obtenus à différentes périodes d'immersion que nous utiliserons pour tracer les courbes de chaque isotherme.

Tableau III.7 : Résultats obtenu après 2h d'immersion

C (mg/l)	θ	η %	C/ θ	Ln(C)	Ln (C(1- θ)/ θ)
20	0.2811	28.11	71.14	2.9957	3.9347
40	0.4723	47.23	84.61	3.6888	3.7997
60	0.6157	61.57	97.16	4.0943	3.6230
80	0.7119	71.19	112.34	4.3820	3.4773
100	0.8087	80.87	123.65	4.6051	2.1635

Tableau III.8 : Résultats obtenu après 4h d'immersion

C (mg/l)	θ	η %	C/ θ	Ln(C)	Ln (C(1- θ)/ θ)
20	0.2319	23.19	86.24	2.9957	4.1933
40	0.4313	43.13	92.76	3.6888	3.9654
60	0.6011	60.11	99.81	4.0943	3.6842
80	0.7574	75.74	105.88	4.3820	3.2435
100	0.8936	89.36	111.90	4.6051	2.4771

Tableau III.9 : Résultats obtenu après 6h d'immersion

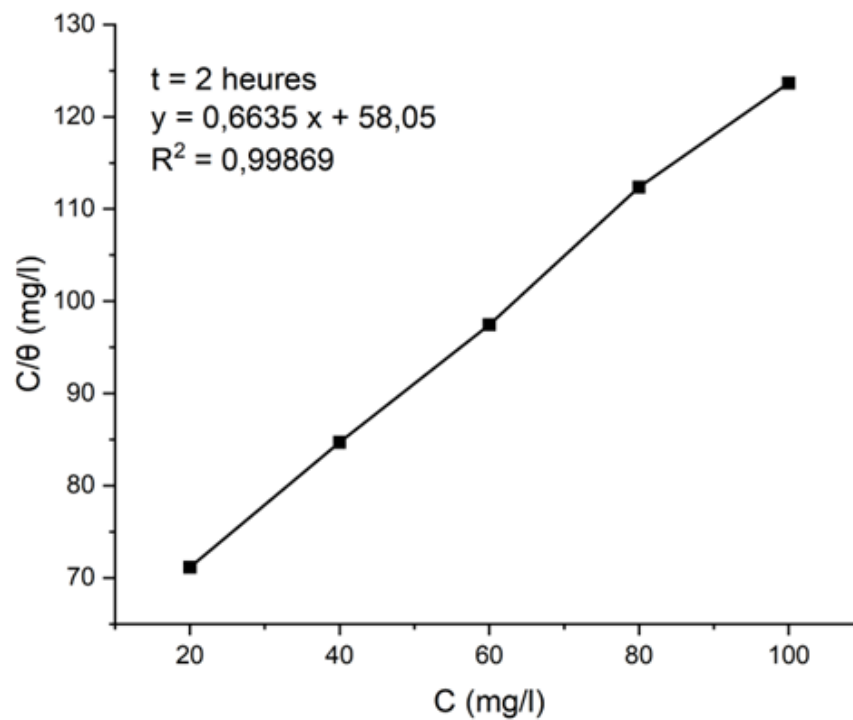
C (mg/l)	θ	η %	C/ θ	Ln(C)	Ln (C(1- θ)/ θ)
20	0.3786	37.86	52.82	2.9957	3.4912
40	0.5940	59.40	67.34	3.6888	3.3083
60	0.7500	75.00	80.00	4.0943	2.9957
80	0.8364	83.64	95.64	4.3820	2.7503
100	0.9074	90.74	110.20	4.6051	2.3228

Tableau III.10 : Résultats obtenu après 8h d'immersion

C (mg/l)	θ	η %	C/ θ	Ln(C)	Ln (C (1- θ)/ θ)
20	0.3107	31.07	84.37	2.9957	3.7925
40	0.5404	54.04	74.01	3.6888	3.5269
60	0.7064	70.64	84.93	4.0943	3.2163
80	0.8299	82.99	96.39	4.3820	2.7971
100	0.9362	93.62	106.81	4.6051	1.9110

Tableau III.11 : Résultats obtenu après 24h d'immersion

C (mg/l)	θ	η %	C/ θ	Ln(C)	Ln (C (1- θ)/ θ)
20	0.3003	30.03	64.37	2.9957	3.8411
40	0.5159	51.59	77.38	3.6888	3.6212
60	0.6779	67.79	82.86	4.0943	3.3502
80	0.7881	78.81	101.50	4.3820	3.0850
100	0.8727	87.27	114.57	4.6051	2.6792

III.3.1. Isotherme Lungmuir**Figure III.13** : Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du *Prunus armeniaca* selon le modèle de Langmuir après 2 heures d'immersion.

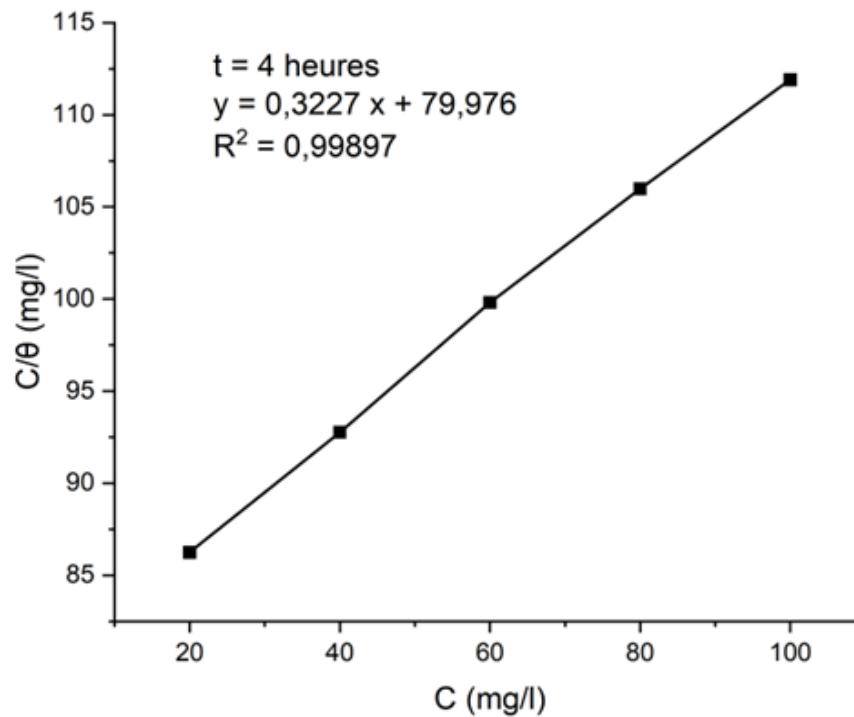


Figure III.14 : Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du *Prunus armeniaca* selon le modèle de Langmuir après 4 heures d'immersion.

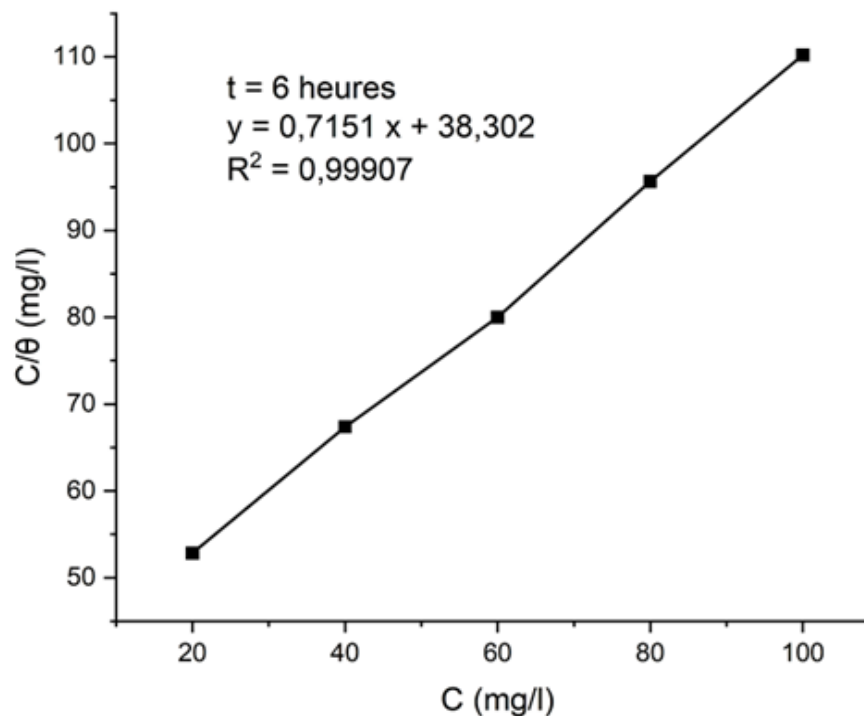


Figure III.15 : Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du *Prunus armeniaca* selon le modèle de Langmuir après 6 heures d'immersion.

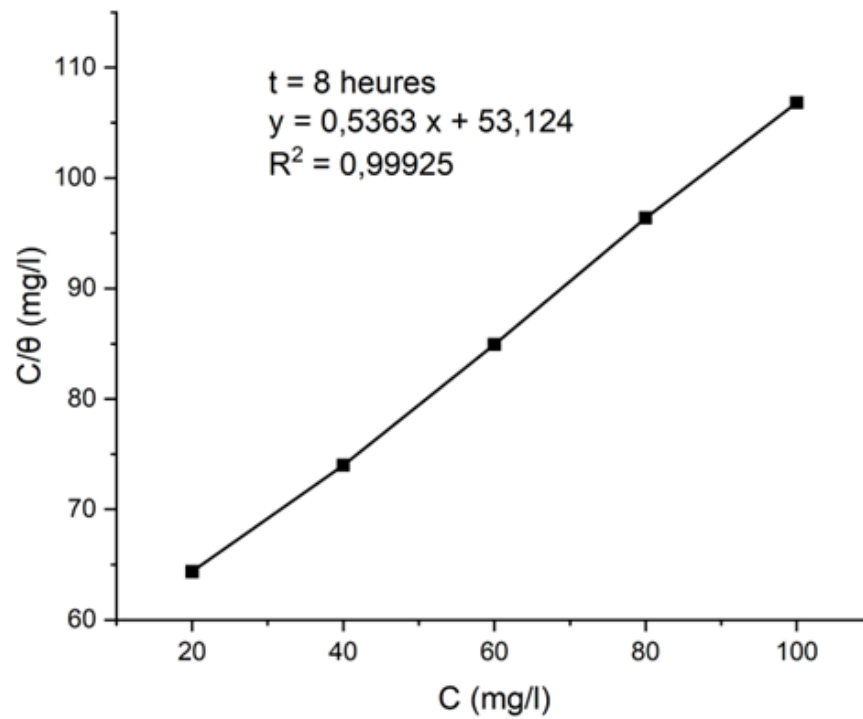


Figure III.16 : Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du *Prunus armeniaca* selon le modèle de Langmuir après 8 heures d'immersion.

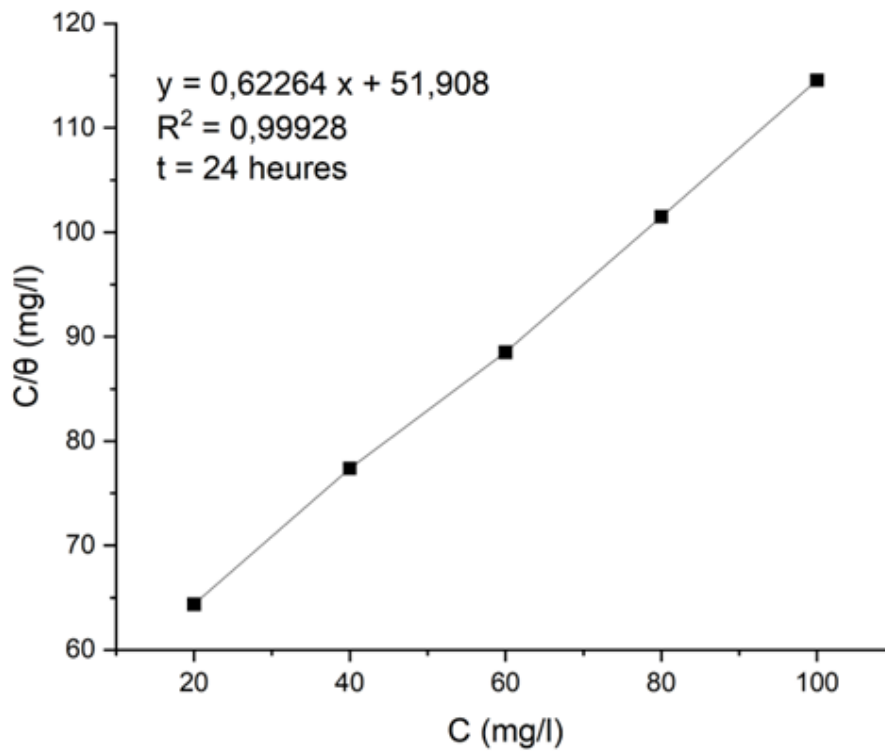


Figure III.17 : Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du *Prunus armeniaca* selon le modèle de Langmuir après 24 heures d'immersion.

III.3.2. Isotherme Temkin

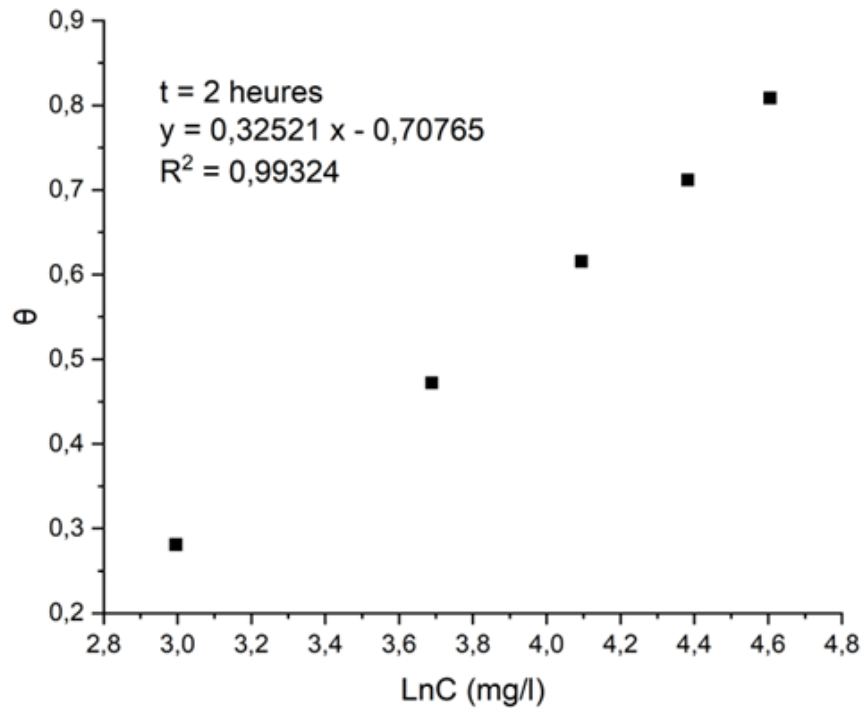


Figure III.18 : Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du Prunus armeniaca selon le modèle de Temkin après 2 heures d'immersion.

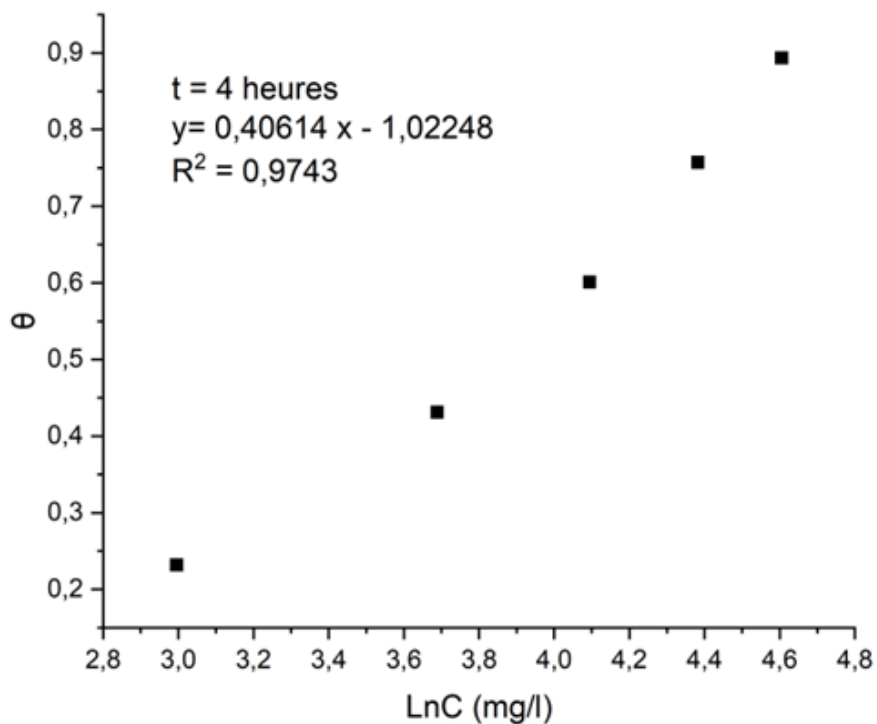


Figure III.19 : Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du Prunus armeniaca selon le modèle de Temkin après 4 heures d'immersion.

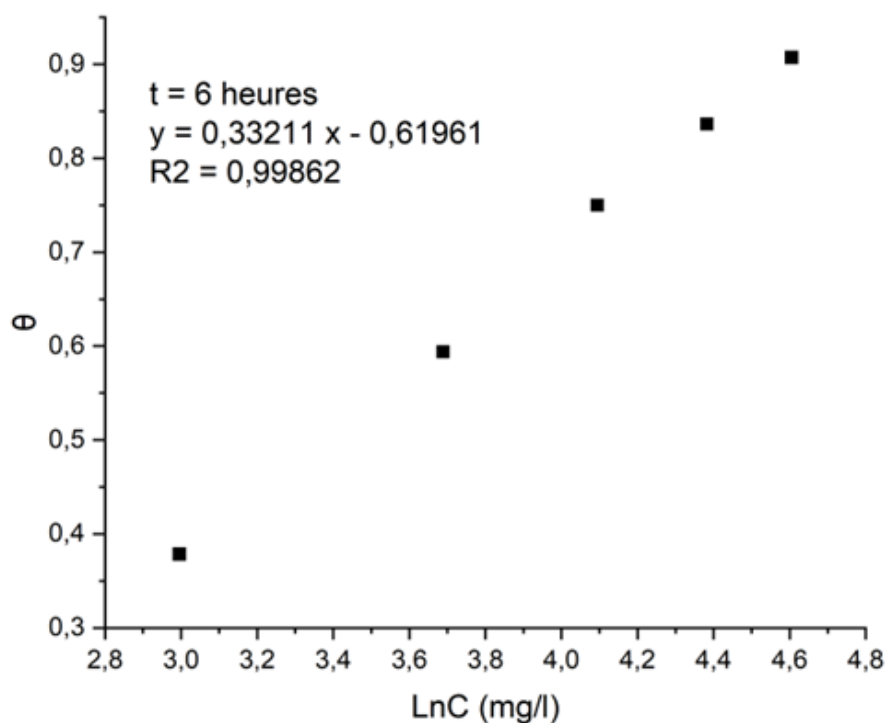


Figure III.20 : Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du Prunus armeniaca selon le modèle de Temkin après 6 heures d'immersion.

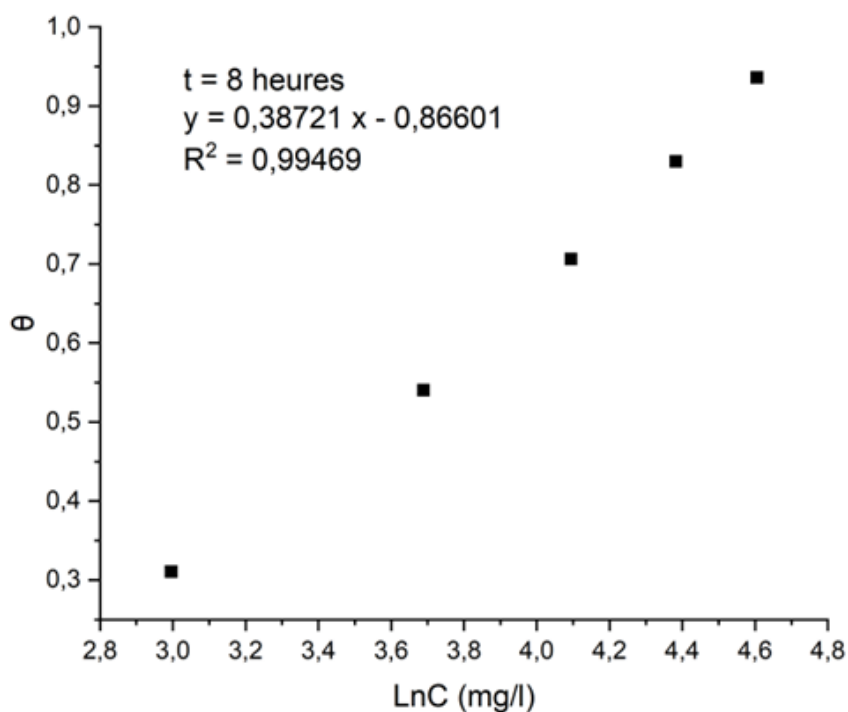


Figure III.21 : Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du Prunus armeniaca selon le modèle de Temkin après 8 heures d'immersion.

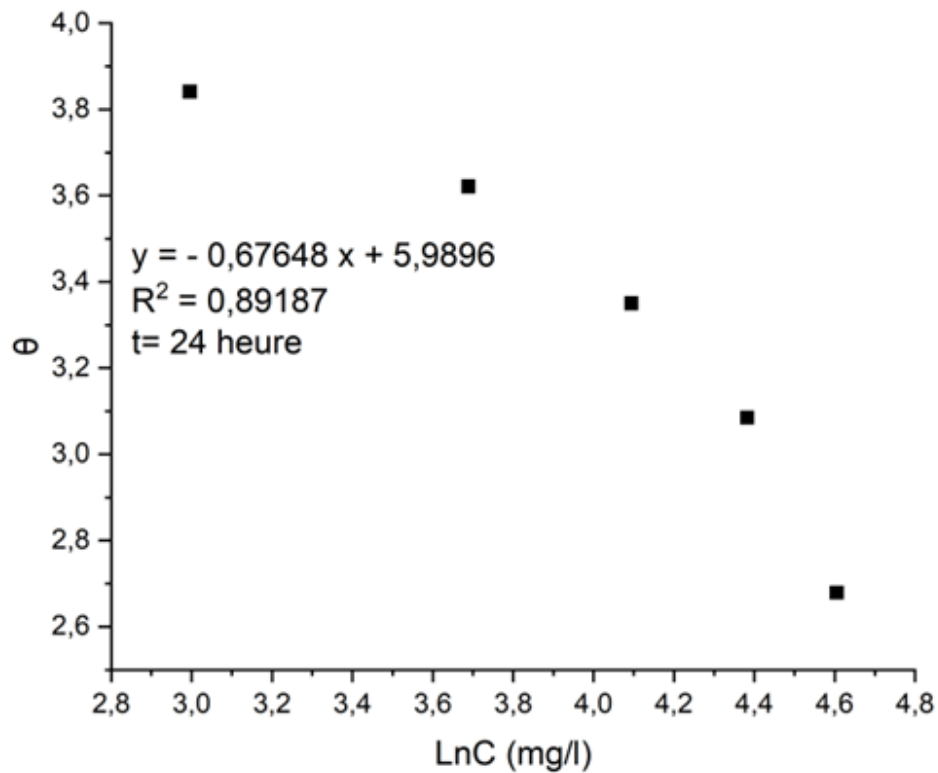


Figure III.22 : Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du *Prunus armeniaca* selon le modèle de Temkin après 24 heures d'immersion.

III.3.3. Isotherme Framkin

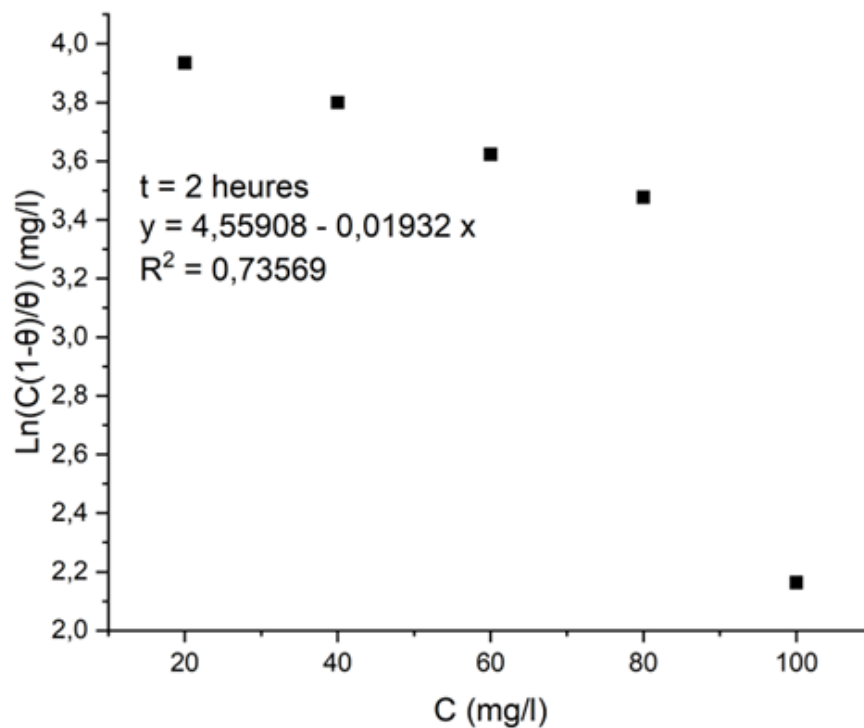


Figure III.23 : Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du *Prunus armeniaca* selon le modèle de Framkin après 2 heures d'immersion.

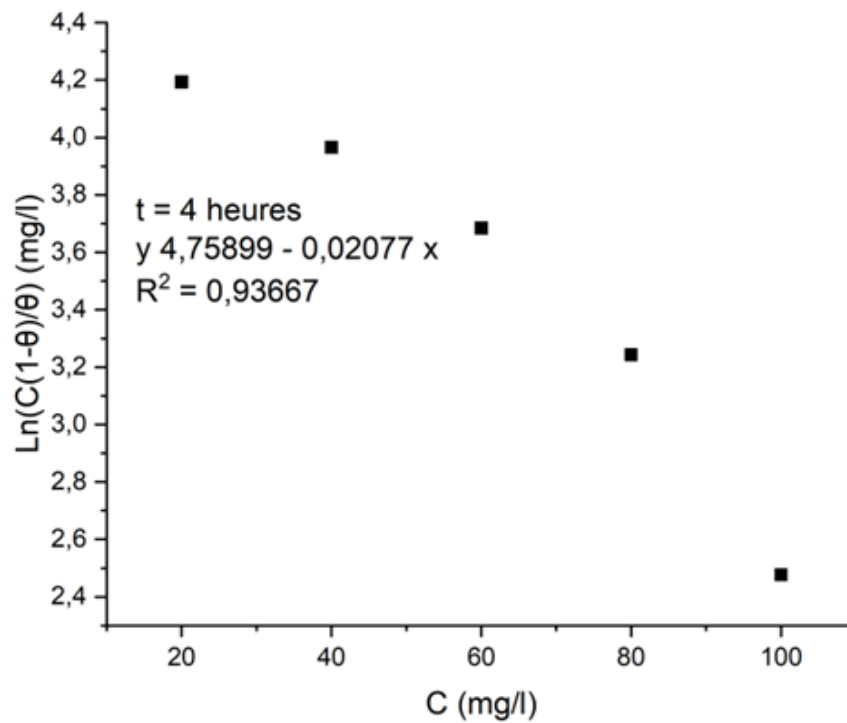


Figure III.24 : Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du *Prunus armeniaca* selon le modèle de Frankin après 4 heures d'immersion.

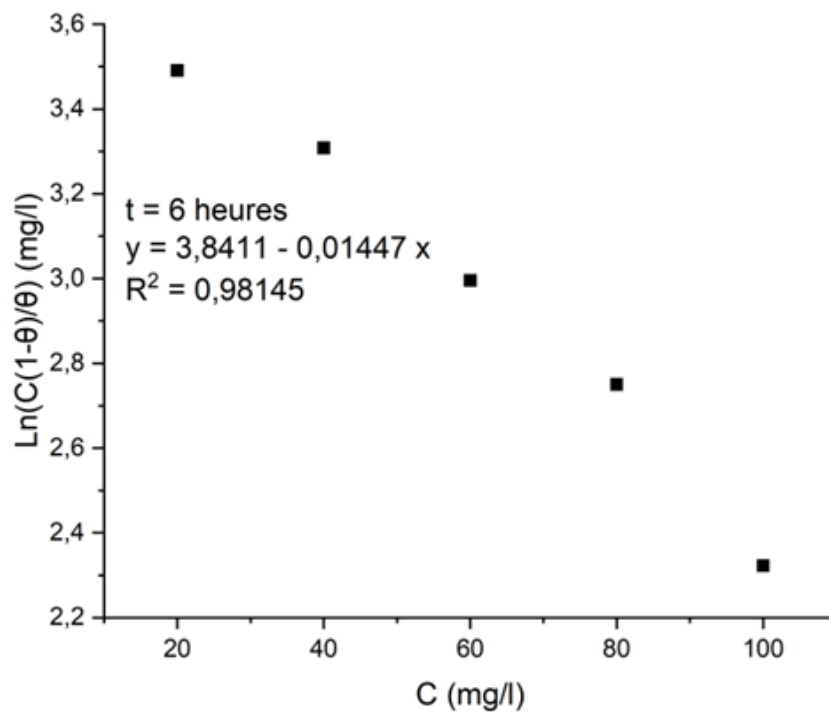


Figure III.25 : Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du *Prunus armeniaca* selon le modèle de Frankin après 6 heures d'immersion.

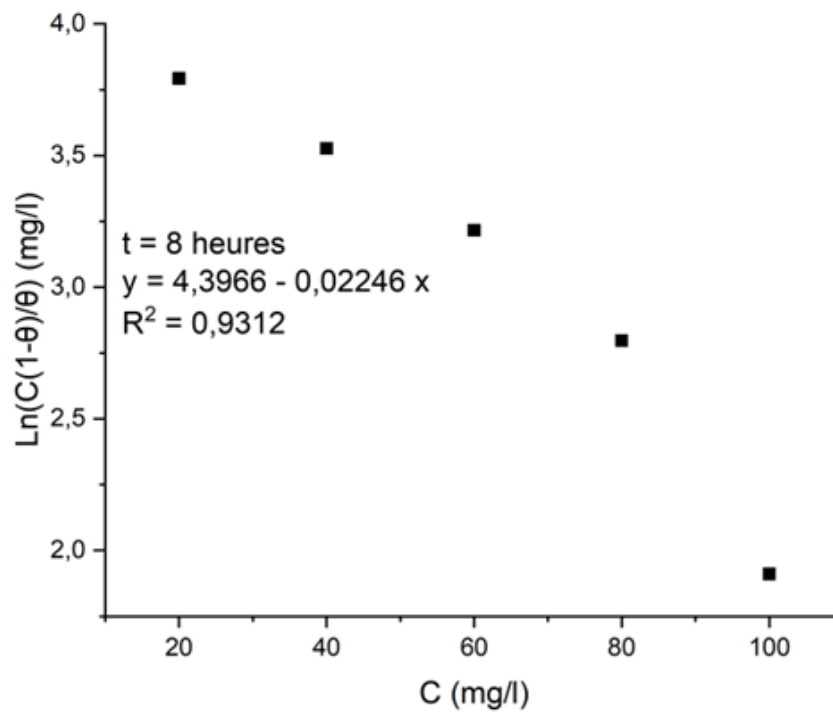


Figure III.26 : Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du *Prunus armeniaca* selon le modèle de Frankin après 8 heures d'immersion.

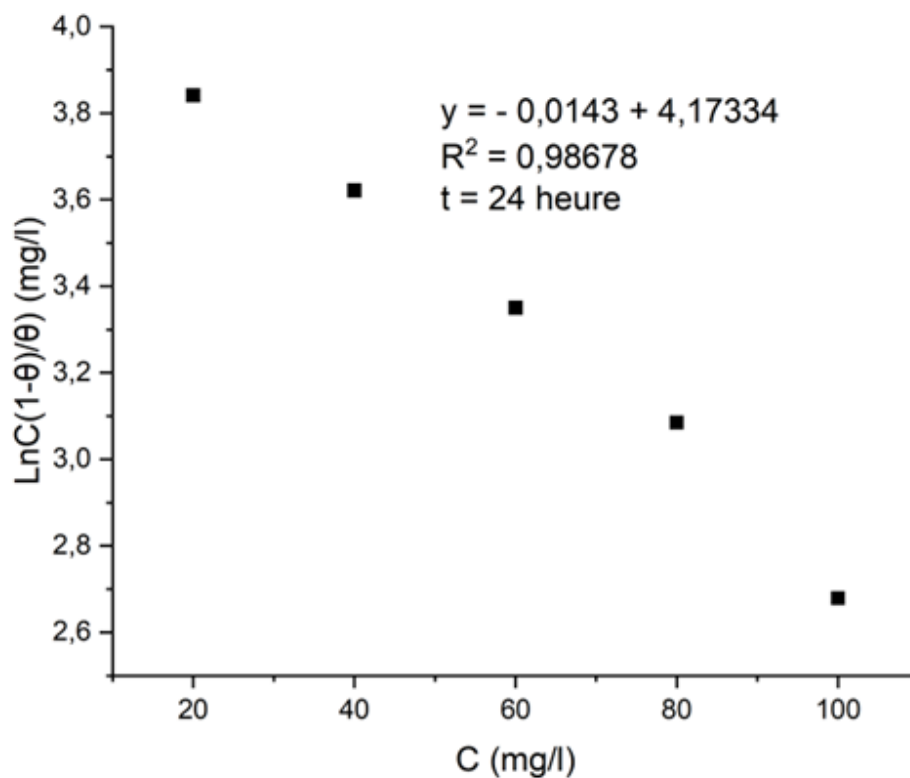


Figure III.27 : Isotherme d'adsorption de l'extrait de noyau du *Prunus armeniaca* selon le modèle de Frankin après 24 heures d'immersion.

Le tableau III.12 regroupe les résultats de coefficient de corrélation des différentes isothermes d'adsorption à différentes durées d'immersion.

Tableau III.12 : Coefficient de corrélation des différentes isothermes d'adsorption à différentes durées d'immersion

Modèle d'isotherme	Coefficient de corrélation (R^2)				
	2	4	6	8	24
Langmuir	0.99869	0.99897	0.99907	0.99925	0.99928
Temkin	0.99324	0.9743	0.99862	0.99496	0.89187
Frumkin	0.73569	0.93667	0.98145	0.9312	0.98678

Les isothermes d'adsorption sont un complément important susceptible de déterminer le mécanisme qui conduit à l'adsorption de ces composés sur la surface. L'efficacité du processus d'adsorption de cet inhibiteur vert est liée au taux de recouvrement θ et à la concentration de l'extrait. L'isotherme de Langmuir présente le meilleur ajustement linéaire.

D'après les courbes (C/θ) en fonction de la concentration de l'inhibiteur, L'isotherme de Langmuir présente le meilleur ajustement linéaire avec des valeurs du coefficient de corrélation R^2 approximativement égales à 1 (Tableau III.12). Ce qui peut conduire à la formation d'une couche protectrice inhibitrice sur la surface de cuivre.

Le modèle de Langmuir décrit l'adsorption idéale comme l'adsorption qui correspond à un coefficient de corrélation égale à 1. Dans notre cas, les valeurs de coefficient de corrélation comprises entre 0,99869 et 0,99928 à différents temps d'immersion, cet écart à l'unité peut s'expliquer par les interactions entre les espèces adsorbées sur la surface métallique. [48,49,50]

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail a été consacré à l'étude de l'inhibition de la corrosion de cuivre dans l'acide chlorhydrique 0.5M par l'extrait de noyau de *Prunus armeniaca* L. Pour cela, nous avons étudié l'influence de la concentration et du temps sur le processus de corrosion en l'absence et en présence d'inhibiteur, par la méthode de la perte de masse.

Les résultats trouvés montrent que :

- L'étude gravimétrique a montré que la vitesse de corrosion est diminuée tandis que l'efficacité inhibitrice est augmentée en fonction de la concentration.
- Les résultats obtenus sous l'influence de la concentration montrent qu'un maximum d'efficacité est obtenu pour une concentration de 100mg/l avec un pourcentage d'efficacité de 93.62 %.
- Les résultats obtenus sous l'influence de la durée d'immersion montrent qu'un maximum d'efficacité est obtenu après 8 heures d'immersion pour une concentration de 100 mg/l avec un pourcentage de 93.62%.
- L'augmentation de l'efficacité inhibitrice indique qu'il y a une adsorption des molécules de cet extrait sur la surface de cuivre, cela conduit à la formation d'une couche protectrice qui empêche sa dissolution.
- Cette efficacité inhibitrice est traduite par l'adsorption de l'extrait sur la surface de cuivre en milieu acide chlorhydrique (HCl 0.5M) qui a été révélée par l'étude des isothermes de Langmuir qui affiche une valeur de R^2 proche à 1.
- Le tracé des différentes isothermes (Langmuir, Temkin et Frumkin) a montré que l'adsorption de l'extrait obéit à l'isotherme de Langmuir.
- Ces résultats montrent que l'extrait du noyau de *Prunus armeniaca* L agit efficacement contre la corrosion et peut être considéré comme une alternative aux inhibiteurs chimiques de corrosion qui sont habituellement toxiques et nocifs pour l'environnement.

Nous pouvons envisager quelques perspectives pour la poursuite de ce travail :

- L'évaluation de l'efficacité de cet extrait comme inhibiteur de la corrosion pour d'autres métaux et alliages dans différents milieux.
- Réalisation d'une étude complémentaire de l'effet inhibiteur de cet extrait, par l'utilisation des méthodes électrochimiques (courbes de polarisation, l'impédance électrochimique...)

Référence bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] - E. McCafferty, Introduction to Corrosion Science. Springer Science & Business Media, 2010, 571 p. ISBN 978-1-4419-0455-3.
- [2] - Abdel Salam Hamdy Makhlouf, Handbook of Smart Coatings for Materials Protection, 1^{ère} Edition Woodhead publishing, United Kingdom, 2014, 659p. ISBN 978-0-85709-688-3.
- [3] - D. Benmessaoud Left, M. Zertoubi, A. Irhzo, et coll, Revue : Huiles et Extraits de plantes comme inhibiteurs de corrosion pour différents métaux et alliages dans le milieu acide chlorhydrique. Journal of Materials and environmental science submission 4, no. 6 : 855-866, (2013).
- [4] - B. E. Amitha Rani, Bharathi Bai J. Basu. Green inhibitors for corrosion protection of Metals and Alloys: An Overview. Journal international of Corrosion ,2011, vol 2012, pp1-16.
- [5] - M.Benarioua, Etude de l’Inhibition de la Corrosion d’un Acier Doux en Milieu Acide par l’Emploi d’Inhibiteurs à Base de Plantes, thèse de doctorat en Sciences des Matériaux, Batna : Université de Batna 2, Mostefa Ben Boulaïd, 2019. 104p.
- [6] - Vedula S. Sastri, Green Corrosion Inhibitors: Theory and Practice.1^{ère} édition. Wiley,2011, 328p. 978-0470452103.
- [7] -B. SANYAL, Organic compounds as corrosion inhibitors in different environments, Prog. Org. Coat., 9 (1981) 165-236.
- [8] - S. Bensaada. Cours de corrosion. Edition 2.09. 5267.Alger, office des publication universitaires, 2011, 70 p. ISBN : 978-9961-0-1511-7
- [9] - Chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel. Corrosion et inhibition des puits et collectes. Paris, Technip, 1981, 82 p. ISBN 13. 978-2-7108-0409-3
- [10] - NESTOR, Perez. Electrochemistry and corrosion science. Kluwer Academic Publishers, New York 2004, 377P. ISBN: 1-4020-7860-9
- [11] -G.Daufin, J.Talbot. HAL « Etude de quelques problèmes de corrosion dans l’industrie laitière. 1^{ère} partie Généralités sur la corrosion des métaux et alliages. Le lait, INRA édition
- [12] Gérard Béranger, Henri Mazille, corrosion et anticorrosion, Paris Harmes sciences publication, Lavoisier, Paris 2002, 303 p. ISBN 2-7462-0467-3
- [13] - Cristian Felipe Perez Brokate. Etude de la compétition entre corrosion uniforme et localisée par automates cellulaires. [en ligne]. Thèse Doctorat Chimie Physique et Chimie Analytique. Paris : Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2016, pp 101. Disponible sur :< <https://theses.hal.science/tel-01561596>>.(consulté le 30/05/2023).

- [14] - Helie, M. Matériaux métalliques-phénomènes de corrosion [en ligne]. Disponible sur : < <https://www.cefracor.org/fr/file/44/download?token=LsVNwply> >. (Consulté le 30/05/2023).
- [15] -Dieter Landolt, Corrosion et chimie de surfaces des matériaux 12, Presse polytechniques et universitaires romandes, Lausanne 1997, 553 p. ISBN 2-88074-245-5.
- [16] - Zaki Ahmad. Fundamentals and concepts of corrosion and Electrochemical Protection, 1^{ère} édition Elsevier, USA 2006,673 p. ISBN-13: 978-0-7506-5924-6
- [17] - Bernard Baroux, La corrosion des métaux passivité et la corrosion localisée, Dunod, Paris, 2014, 299 p. ISBN 978-2-10-070546-7
- [18] - E. H. Norman, "NACE Glossary of Corrosion Terms," Materials Protection, Vol. 4, 1965, p. 79.80
- [19] - Ernest W. Flick. Corrosion Inhibitors - An Industrial Guide. 2^{ème} Edition, Noyes Publications, USA, 1993. 355p. ISBN 0-8155-1330-5
- [20] - FIAUD C., LEMAITRE C., PEBERE N. Mécanique et ingénierie des Matériaux. Lavoisier, Paris, Hermès Science Publications, 245p, 2002.
- [21] - Pierre R. Roberge, Handbook of corrosion engineering. 2^{ème} Edition, McGraw-Hill Education, USA, 2012. 1088p. ISBN 978-0071750370
- [22] - Zoulikha Khiati. Inhibition de la corrosion du cuivre en milieux chlorure et sulfates neutres par une nouvelle molécule dérivée de 1,2,4-triazole. [En ligne]. Thèse Doctorat Chimie Physique et Chimie Analytique. Oran : Université des sciences et de la technologie d'Oran, 2013, pp 278. Disponible sur : < <https://hal.science/tel-01376746> >. (consulté le 30/05/2023).
- [23] : Florina Constantin, Étude de l'efficacité d'inhibiteurs de corrosion utilisés dans les Liquides de refroidissement, autre. [En ligne]. Thèse Doctorat en cotutelle Franco-Roumaine INSA de Lyon, Français, 2011, 278 pp. Disponible sur : < <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2011ISAL0117/these.pdf> >. (Consulté le 30/05/2023).
- [24] - NADJI Ayoub. Synthèse et étude de l'effet inhibiteur contre la corrosion d'un acier au carbone A283 Gr-C par une molécule organique. Thèse Master Chimie des Produits Naturels. Tébessa : Université de Larbi Tébessi, 2020, 91 p.
- [25] - VAVILOV NI. La base phytogéographique de la sélection végétale. In : Chronica Botanica, une collection internationale d'études de la méthode et de l'histoire de la biologie et l'agriculture (Ed). Verdoom, traduction du russe par K.S. Chester. 1951, 13 : 13-54.
- [26] - Baily, CH., Hough, L. Abricots. In: Janick J et Moore JN Moore (Eds). Advances in fruit élevage. Purdue University Press, West Lafayette, 1975, pp. 367-383.

- [27] - Faust, M., Suranyi, D., et Nyujto, F. Origin et la diffusion de apricot. In: j.janick (ed), Avis horticoles, John Wiley et Sons, Inc., New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapour, Toronto. 1998, 22: 225-266.
- [28] - Gautier, M., L'abricotier et sa culture. L'arboriculture fruitière. Paris. 1988, Vol 3, 37- 41pp.
- [29] - Bretaudeau. J. Atlas d'arboriculture fruitière. Collection des techniques horticoles spécialisées. Ed : J.B bailliere. Paris, 1979, Vol 3, 145-162 pp.
- [30] - Herbez, F., Girault de Saint-Fareau, A., Joanne, P., et Vattier d'Ambroyse, V. Narbonne et son histoire. Ed : bastion, Narbonne. France.1995, 108p
- [31] - Daniel, Z., Hopf, M., et la domestication des plantes dans le monde antique : l'origine et la propagatio de cultivé en Asie de l'Ouest, l'Europe et les plantes de la vallée du Nil, Oxford University Press . USA, 2001.328 p
- [32] - Chouakis. Deuxième rapport national sur l'état des ressources phylogénétique. INRAA. Alger. 2006, 32-33pp.
- [33] - Lichou, M., et Audubert, P. L'abricotier. Edition Granier, J. CTIFL. Paris.1989,386p. ISBN : 978-2-901002-69-7
- [34] - JULVE P. Baseflor. In incorporation du tourteau d'amande d'abricot en substitution au tourteau de soja dans l'alimentation des animaux domestiques : Ruminants (cas des ovins à l'engrais) et monogastriques (cas du poulet de chair).Ed. Agro, Batna.1998, 23p.
- [35] - Jérôme Grimplet. Génomique fonctionnelle et marqueurs de qualité chez l'abricot. [En ligne]. Thèse doctorat en Sciences agronomiques. INRA. TOULOUSE. 2004, 250pp.disponible sur < <https://core.ac.uk/download/pdf/78383201.pdf> > (consulté le 31/05/2023)
- [36] - GOT, N. L'abricotier. Edition : La maison rustique. Paris. 1958, 159 p.
- [37] - Gautier, M. L'abricotier et sa culture, (1^{ère} partie). Edition : L'arboriculture fruitière. N°313. Paris.1980, 29-46pp.
- [38] - Couranjou, J. L'amélioration génétique de l'abricotier. Edition : INRA. France.1975, 320-347pp.
- [39] - François Gallouin, Nicole Tonelli. Des fruits et des graines comestibles du monde entier. Tec et Doc - Lavoisier. Paris, 2013, 726 p. ISBN : 978-2-7430-1481-0
- [40] - Khalil 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 photo dynamique (PDT) . [En ligne]. Thèse Doctorat en Génie des procédés et des produits. Université de Lorraine.2015, 318p.Disponible sur <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01754591>. (Consulté le 31/05/2023)
- [41] - FAO. Apricot (*Prunus armeniaca*) production and trade [en ligne]. Disponible sur : <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. (Consulté le 31/05/2023).
- [42] - Jarić, S., Popović, Z., Mačukanović-Jocić, M, et al. An ethnobotanical survey of traditionally used plants on Suva planina mountain (south-eastern Serbia). *Journal of Ethnopharmacology*. 2015, Vol 175, 93-108.
- [43] - Barros, H. R., Ferreira, I. C, Baptista, P. Wild and commercial mushrooms as source of nutrients and nutraceuticals. *Food and Chemical Toxicology*. 2016, Vol 86, 107-124.
- [44] - Superprof ressources. Que sait-on sur le cuivre, ce métal ancestral ? [en ligne]. https://www.superprof.fr/ressources/scolaire/physique-chimie/tout-niveau/tableauperiодique_metal-rouge.html (consulté le 18.05.2022) . /
- [45] - Yves BADÉ. Caractéristiques physico-chimiques du cuivre « Cuivrage ». *Techniques-ingenieur*, 1982, M1605 v1.
- [46] - S. A. Ali, A. M. El Shareef, R. F. Al-Ghandi, M. T. Saeed, The isoxazolidines: the effects of steric factor and hydrophobic chain length on the corrosion inhibition of mild steel in acidic medium, *Corrosion science* 47 (11), 2659-2678, 2005.
- [47] - N. Soltani, M. Khayatkashani, *Gundelia tournefortii* as a green corrosion inhibitor for mild steel in HCl and H₂SO₄ solutions, *International Journal of Electrochemical Science* 10 (1), 46-62, 2015.
- [48] - B. Hireche, H. Ferhat. « Etude de l'effet inhibiteur des huiles essentielles de Cyprés (*Cupressus Sempervirens*. L) sur la corrosion de l'acier X70 (sans et avec soudure) ». Mémoire de Master. Université de Biskra (Algérie), 2019.
- [49] - N. Abdulwali. « Inhibition de la corrosion de l'acier doux dans l'acide chlorhydrique par les composés thiazoles et benzimidazoles ». Thèse de Doctorat. Université de Rabat (Maroc), 2016.
- [50] - O. Sebaoui, M.S. benmesmoudi. « Étude comparative de l'inhibition de corrosion d'un acier par deux types de produits chimiques par la méthode de perte de masse : influence de la température ». Mémoire de Master. Université de Tlemcen (Algérie), 2017.

Résumé

Ce travail vise à étudier l'inhibition de la corrosion du cuivre en utilisant un extrait du noyau de *Prunus Armeniaca* L dans une solution d'acide chlorhydrique à 0.5 M à température ambiante. Les résultats obtenus ont montré que l'efficacité d'inhibition de l'extrait atteint 93,62% à une concentration de 100 mg/l après 8 heures d'immersion. Cette efficacité d'inhibition est attribuée à l'adsorption de l'extrait sur la surface du cuivre. De plus, les résultats ont montré que le processus d'adsorption suit l'isotherme de Langmuir.

Mots-clés : corrosion, cuivre, inhibiteurs de corrosion verts, extrait de noyau de *Prunus Armeniaca* L, acide chlorhydrique, adsorption, isotherme de Langmuir.

Abstract

This study aims to investigate the inhibition of copper corrosion using an extract from the *Prunus Armeniaca* L. kernel in a 0.5 M hydrochloric acid solution at room temperature. The obtained results showed that the inhibition efficiency of the extract reaches 93.62% at a concentration of 100 mg/liter after 8 hours of immersion. This inhibitory efficiency is attributed to the adsorption of the extract on the surface of the copper. Furthermore, the results indicated that the adsorption process follows the Langmuir isotherm.

Keywords: corrosion, copper, green corrosion inhibitors, *Prunus Armeniaca* L kernel extract, hydrochloric acid, adsorption, Langmuir isotherm

ملخص

يهدف هذا العمل الى دراسة تثبيط تآكل النحاس بواسطة مستخلص نواة *Prunus Armeniaca* L في وسط حمض الهيدروكلوريك 0.5 مول في درجة حرارة الغرفة باستخدام طريقة فقدان الكتلة لحساب معدل التآكل وكفاءة التثبيط بدلالة التركيز ووقت الغمر. أظهرت النتائج المتحصل عليها ان كفاءة التثبيط لمستخلص نواة *Prunus Armeniaca* L تصل الى 93.62% وذلك عند تركيز 100ملغ/لتر بعد 8 ساعات من الغمر . ترجع الكفاءة التثبيطية لهذا المستخلص الى امتزاز هذا الاخير على سطح النحاس. علاوة على ذلك، أظهرت النتائج ان عملية الامتزاز تتبع متساوي الحرارة لانجموير.

الكلمات المفتاحية: التآكل، النحاس، مثبطات التآكل الخضراء، مستخلص نواة *Prunus Armeniaca* L، حمض الهيدروكلوريك، الامتزاز، متساوي الحرارة.