

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE 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 Chimique

Etude de l'efficacité inhibitrice des extraits de la plante *Allium triquètre* sur la corrosion de l'acier A106/A dans le milieu salin NaCl 3%

Soutenu le/06/2023

Réalisé par :

KISMOUNE Mosaab

KECHICHEB Anis

Encadré par :

DOB Karima

Année Universitaire 2022-2023

Remerciement

Tout d'abord, nous exprimons notre gratitude envers Dieu tout-puissant de nous avoir accordé la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail avec succès.

Nous tenons à remercier chaleureusement notre encadrant, le Dr. Dob Karima, pour avoir guidé ce travail. Elle nous a toujours apporté l'aide et le soutien dont nous avons besoin tout au long de cette période de travail.

Nous sommes également reconnaissants envers tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner ce travail.

Nos remerciements vont également à l'ingénieur du laboratoire de technologie de l'Université du 20 août 1955 de Skikda pour son assistance, ainsi qu'à l'étudiante Zaineb Ramadan.

Finalement, nous exprimons notre gratitude envers toutes les personnes qui nous ont apporté leur aide, que ce soit de près ou de loin, de manière directe ou indirecte, dans la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je suis honoré de dédier ce modeste travail à ceux qui ont sacrifié pour moi, mes chers parents. Je vous remercie de tout le soutien et de l'amour dont j'ai bénéficié depuis mon enfance, et j'espère avoir votre satisfaction et votre amour continus.

A mes frères (Ahmed, chouaib, Alla, Baha) et ma sœur(Meriem).

A tout ma famille Kismoune.

A mon encadreur Dob. Karima.

A chers mes amis (Housseem, Nasro, Khaled, Wassim, Fika, fateh, Abd Allah, Hamza, Ayoub, Mohammed Bouziani, Soufiane, Abd Raouf, Abd elkadar, Saïd, Anour, Ahcen, Mourad).

A tous mes collègues de génie chimique de la promotion 2022-2023.

Mosaab

Dédicace

Je suis honoré de dédier ce modeste travail à ceux qui ont sacrifié pour moi, mes chers parents. Je vous remercie de tout le soutien et de l'amour dont j'ai bénéficié depuis mon enfance, et j'espère avoir votre satisfaction et votre amour continus.

A mon frère(Hichem) et mes sœurs (Chaima, Rihab, Asma).

A mon grand famille (mes grand parentes, mes oncles, mes tantes).

A tout ma famille Kechicheb.

A mon encadreur Dob. Karima.

A chers mes amis(Mosaab, Skander, Soufiane, Abd el Kader zarman, Zidane, Imad, Hamza ,Mohammed bouziani, Oussama, Ayoub, Saïd ,Abd raouf, Fares, Atef, Yassine, Hicham kahlouch, Rabah, Fateh, Rami, Abd el Rahman, Abd Elmounaaim, Mohammed, Abd Allah).

A tous mes collègues de génie chimique de la promotion 2022-2023.

Anis

Résumé

Ce travail représente une étude de l'efficacité inhibitrice contre la corrosion de l'acier A106/A dans un milieu de chlorure de sodium par l'utilisation des extraits végétaux d'*allium triquètre*. Pour cet effet nous avons utilisé des mesures de perte de poids.

Les résultats obtenus à partir des méthodes utilisées montrent que le polyphénol et l'huile essentielle inhibent efficacement la corrosion de l'acier A106/A dans une solution de NaCl à 3%. Plusieurs paramètres affectent l'efficacité de l'inhibition, tels que la concentration, la température et le temps d'immersion.

Le traitement des résultats obtenus révèle une adsorption physique à la surface du métal conformément à l'isotherme de Frumkin. En revanche, les valeurs négatives de l'énergie libre standard d'adsorption (ΔG_0) indiquent la spontanéité de la réaction d'adsorption.

Il est également observé que l'efficacité du polyphénol atteint 93,93% à une concentration de 1000 ppm après une immersion de 24 heures, tandis que l'efficacité de l'huile essentielle atteint 90,90%.

L'efficacité inhibitrice des polyphénols est meilleure par rapport à l'huile essentielle.

Mots clés : corrosion de l'acier, inhibition, chlorure de sodium, *allium triquètre* polyphénole, huile essentielle.

Abstract

This work represents a study on the inhibitory efficiency against the corrosion of A106/A steel in a sodium chloride medium using extracts from *Allium triquetrum*. In this study, weight loss measurements were used.

The results obtained from the methods used show that both polyphenol and essential oil effectively inhibit the corrosion of A106/A steel in a 3% NaCl solution. Several parameters affect the inhibition efficiency, such as concentration, temperature, and immersion time.

The analysis of the obtained results reveals a physical adsorption at the metal surface in accordance with the Frumkin isotherm. However, the negative values of the standard free energy of adsorption (ΔG_0) indicate the spontaneity of the adsorption reaction.

It is also observed that the efficiency of polyphenol reaches 93.93% at a concentration of 1000 ppm after 24 hours of immersion, while the efficiency of the essential oil reaches 90.90%.

The inhibitory efficiency of polyphenols is better compared to the essential oil.
Keywords: steel corrosion, inhibition, sodium chloride, *Allium triquetrum*, polyphenol, essential oil.

الملخص

هذا العمل يمثل دراسة لفاعلية التطبيق ضد التآكل A106/A في وسط كلوريد الصوديوم بواسطة مستخلصات نبات *Allium triquetre* في هذه الدراسة تم استخدام قياسات فقدان الوزن.

تظهر النتائج المتحصل عليها بواسطة الطرق المستخدمة أن كل من البوليفينول والزيت العطري يثبطان بفاعلية في محلول كلوريد الصوديوم بتركيز 3%. هناك عدة عوامل تؤثر على فعالية تثبيط تآكل الفولاذ A106/A مثل التركيز، الحرارة، ووقت الغمر.

تكشف معالجة النتائج المتحصل عليها عن امتصاص فيزيائي على سطح المعدن وفقا لنموذج فريمكن، حيث تشير القيم السلبية للطاقة الحرة (ΔG_0) إلى عفوية تفاعل الامتزاز.

يُلاحظ أيضًا أن كفاءة البوليفينول تصل إلى 93.93% عند تركيز 1000 جزء في المليون بعد 24 ساعة من الغمر، بينما تصل كفاءة الزيت العطري إلى 90.90% عند نفس المدة.

تكون فعالية التثبيط للبوليفينول أفضل مقارنة بالزيت العطري.

الكلمات الرئيسية: تآكل الصلب، التثبيط، كلوريد الصوديوم *,allium triquetre*, بوليفينول, زيت عطري.

Liste des tableaux

Tableau I.1:	les principaux facteurs de corrosion.....	11
Tableau I.2:	L'effet inhibiteur de corrosion des extraits naturels de plantes sur les aciers dans différents milieux acides.....	21
Tableau II.1:	Classification d' <i>Allium triquetrum L</i> classique et phylogénétique.....	39
Tableau II.2:	La composition chimique de l'acier au carbone A106/A.....	43
Tableau II.3:	La composition mécanique de l'acier au carbone A106/A.....	43
Tableau III.1:	les paramètres de corrosion mesurés par gravimétrie de l'acier A106/A dans NaCl 3% pendant 1h en absence et en présence des différentes concentrations de l'inhibiteur.....	48
Tableau III.2:	La variation de la vitesse de corrosion de l'acier A106/A dans NaCl à 3%, sans et avec une concentration de 1000 ppm d'inhibiteur d'huile, en fonction du temps d'immersion.....	50
Tableau III.3:	La variation de l'efficacité inhibitrice de corrosion l'acier A106/A à concentration de 1000ppm d'inhibiteur d'huile dans NaCl à 3%, en fonction de temps d'immersion.....	50
Tableau III.4:	Les valeurs de coefficient de corrélation pour les différentes isothermes (huile).....	54
Tableau III.5:	Les paramètres thermodynamiques relatifs à l'adsorption d'inhibiteur huile essentielle sur la surface de l'acier au carbone dans NaCl 3% pour le temps immersion (1h).....	54
Tableau III.6:	les paramètres de corrosion mesurés par gravimétrie de l'acier A106/A dans NaCl 3% pendant 1h en absence et en présence des différentes concentration de l' inhibiteur.....	55
Tableau III.7:	La variation de la vitesse de corrosion de l'acier A106/A dans NaCl à 3%, sans et avec une concentration de 1000 ppm d'inhibiteur polyphénole, en fonction du temps d'immersion.....	57
Tableau III.8:	Tableau III-8 : La variation de l'efficacité inhibitrice de corrosion l'acier A106/A à concentration de 1000ppm d'inhibiteur polyphénole dans NaCl à 3%, en fonction de temps d'immersion.....	58

Liste des tableaux

Tableau III.9: Variation de la vitesse de corrosion en fonction de la température dans le milieu NaCl 3% (tim=1h).....	59
Tableau III.10: Variation de l'énergie d'activation (E_a) de polyphénole sur la surface de l'acier A106/A à différentes températures pour tim =1 heure.....	62
Tableau III.11: Enthalpie ΔH_a et entropie ΔS_a d'activation pour l'acier dans NaCl 3% en absence et présence d'inhibiteur.....	63
Tableau III-12: Les valeurs de coefficient de corrélation pour les différentes isothermes (polyphénole).....	65
Tableau III-13: Les paramètres thermodynamiques relatifs à l'adsorption d'inhibiteur polyphénole sur la surface de l'acier au carbone dans NaCl 3% pour le temps immersion (1h).....	65
Tableau III-14: comparaison de la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice entre l'huile et polyphénole en fonction des différentes concentrations d'inhibiteur dans un milieu NaCl 3% pendant 1h.....	66

Liste des figures

Figure I.1:	Corrosion généralisée exemple d'une porte d'un véhicule corrodés.....	6
Figure I.2:	Représentation schématique d'une corrosion localisée.....	7
Figure I.3:	Corrosion par piqûre de l'aluminium.....	7
Figure I.4:	Corrosion galvanique résultante d'un Assemblage de deux métaux différents : robinet en cuivre et conduite en acier galvanisé.....	8
Figure I.5:	Corrosion intergranulaire.....	8
Figure I.6 :	Corrosion sélective.....	9
Figure I.7 :	Représentation schématique du phénomène de corrosion-érosion.....	9
Figure I.8 :	Corrosion sous contrainte.....	10
Figure I.9 :	Corrosion caverneuse.....	10
Figure I.10:	Formation des couches barrières interférant avec les réactions électrochimiques, dans le cas d'une étude en milieu acide.....	17
Figure I.11:	Représentation schématique des modes d'adsorption de molécules organiques inhibitrices sur une surface métallique.....	18
Figure I.12:	Différents classes des inhibiteurs verts de corrosion.....	21
Figure II-1:	Les feuilles et la tige florifère d' <i>Allium triquetrum</i>	35
Figure II-2:	Les bulbes d' <i>Allium triquetrum L.</i>	36
Figure II-3:	Détails de la fleur d' <i>Allium triquetrum</i>	37
Figure II-4:	Fruits et graines d' <i>Allium triquetrum L.</i>	37
Figure II-5:	Exemple d'alcaloïde isoquinoléique d' <i>Amaryllidaceae</i>	38
Figure II-6:	Montage de hydrodistillation.....	41
Figure II-7:	Préparation de la solution corrosive (NaCl 3%).....	42
Figure II-8:	Echantillon de l'acier A106/A.....	44
Figure II-9:	Echantillons d'acier A106/A placés dans des béchers contenant une solution de NaCl à 3%.....	46

Liste des figures

Figure III-1:	Efficacité inhibitrice de l'acier A106/A en fonction différentes concentration d'inhibiteur.....	49
Figure III-2:	Variation de la vitesse de corrosion en fonction de la concentration d'inhibiteur d'huile essentielle.....	49
Figure III-3:	Représentation de la vitesse de corrosion en fonction de temps d'immersion.....	50
Figure III-4:	Variation de l'efficacité inhibitrice d'huile essentielle en fonction de temps d'immersion.....	51
Figure III-5:	Isotherme de Langmuir obtenu à différents concentration en huile essentielle dans NaCl 3%.....	52
Figure III-6:	Isotherme de Temkin obtenu à différents concentration en huile essentielle dans NaCl 3%.....	53
Figure III-7:	Isotherme de Frumkin obtenu à différents concentration en huile essentielle dans NaCl 3%.....	53
Figure III-8:	Efficacité inhibitrice de l'acier A106/A en fonction différentes concentration d'inhibiteur de polyphénole.....	56
Figure III-9:	Variation de la vitesse de corrosion en fonction de la concentration d'inhibiteur de polyphénole.....	56
Figure III-10:	Variation de la vitesse de corrosion en fonction de temps d'immersion.....	57
Figure III-11:	Variation de l'efficacité inhibitrice de polyphénols en fonction de temps d'immersion.....	58
Figure III-12:	Evolution de la vitesse de corrosion en fonction de la température dans NaCl 3%.....	60
Figure III-13:	Effet de la température sur l'efficacité de l'acier en milieu NaCl 3% contenant 1000ppm de l'inhibiteur polyphénole.....	60
Figure III-14:	Droites d'Arrhenius de $\ln V$ en fonction de la température sans et avec inhibiteur.....	61
Figure III-15:	Variation de $\ln (V/T)$ en fonction de l'inverse de la température.....	63

Liste des figures

Figure III-16:	Isotherme de Langmuir obtenu à différents concentration en polyphénole dans NaCl 3%.....	64
Figure III-17:	Isotherme de Temkin obtenu à différents concentration en polyphénole dans NaCl 3%.....	64
Figure III-18:	Isotherme de Frumkin obtenu à différents concentration en polyphénole dans NaCl 3%.....	65
Figure III-19:	histogramme comparatif entre la vitesse de corrosion obtenu par l'huile essentiel et le polyphénole.....	66
Figure III-20 :	histogramme comparatif entre l'efficacité obtenu par l'huile essentiel et le polyphénole.....	67

Liste des figures

Liste des symboles

NACE:	National Association of Corrosion Engineers.
ISO:	Organisation internationale de normalisation.
C :	Concentration (ppm).
V_{corr} :	Vitesse de corrosion ($\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{h}$).
T :	Température ($^{\circ}\text{K}$).
t :	temps (heure).
s :	surface (cm^2).
θ :	Taux de recouvrement.
E :	Efficacité (%).
E_a :	Energie d'activation (kJ / mol).
R :	Constant de gaz parfait ($\text{J}/\text{K}\cdot\text{mol}$).
R^2 :	Coefficient de corrélation.
K :	Consentant d'équilibre de la réaction.
Δm :	La variation de masse (gramme).
$\Delta G^{\circ}_{\text{ads}}$:	Energie d'adsorption libre (KJ/mol).
$\Delta S^{\circ}_{\text{ads}}$:	L'entropie ($\text{KJ}/\text{mol}\cdot\text{K}$).
$\Delta H^{\circ}_{\text{ads}}$:	L'enthalpie standard d'adsorption ($\text{KJ}/\text{mol}^{-1}$).

Table de matière

Introduction générale	2
Chapitre I : Etude bibliographique	
I-1 la corrosion	5
I-1-1 Définition	5
I-1-2 Les modes de corrosion	5
I-1-2-1 Corrosion chimique.....	5
I-1-2-2 corrosion biochimique	5
I-1-2-3 corrosion électrochimique.....	6
I-1-3 Différents types de corrosion.....	6
I-1-3-1 Corrosion uniforme.....	6
I-1-3-2 Corrosion localisée	7
I-1-3-2-1 Corrosion par piqûres.....	7
I-1-3-2-2 Corrosion galvanique.....	8
I-1-3-2-3 Corrosion intergranulaire.....	8
I-1-3-2-4 Corrosion sélective.....	9
I-1-3-2-5 Corrosion érosion.....	9
I-1-3-2-6 Corrosion sous contrainte (CSC)	10
I-1-3-2-7 Corrosion caverneuse.....	10
I-1-4 Les facteurs de la corrosion	11
I-1-4-1 Effet de la température.....	11
I-1-4-2 Effet de l'acidité.....	11
I-1-4-3 la salinité	12
I-1-4-4 Régime hydrodynamique.....	12
I-2 Lutte contre la corrosion	12
I-2-1 Protection de la corrosion par les inhibiteurs.....	13
I-2-1-1 Introduction.....	13
I-2-1-2 Définition	13
I-2-1-3 Propriétés des inhibiteurs.....	13
I-2-1-4 Les facteurs affectant la performance des inhibiteurs	14
I-2-1-4-1 Effet de la température.....	14
I-2-1-4-2 Effet de la concentration d'inhibiteur	14
I-2-1-4-3 Vitesse d'écoulement.....	15

Table de matière

I-2-1-4-4 La nature de métal.....	15
I-2-1-4-5 L'électrolytes	15
I-2-1-4-6 Le pH	15
I-2-1-5 Classification des inhibiteurs.....	16
I-2-1-5-1 Classement selon la nature de l'inhibiteur	16
Les inhibiteurs organiques.....	16
Les inhibiteurs minéraux	16
I-2-1-5-2 Classement selon le mécanisme d'action.....	17
Mécanisme d'action électrochimie.....	17
Mécanismes d'action inter faciale	17
I-2-1-5-3 Classement selon le domaine d'application.....	18
Inhibition en milieu acide	18
Inhibition en milieu neutre	19
Inhibition par passivation	19
Inhibition par précipitation	19
Inhibition en phase gazeuse.....	18
Inhibiteurs pour peintures.....	20
I-2-2 Les inhibiteurs verts.....	20
I-2-2-1 introductions	20

Chapitre II : Condition et méthode expérimentale

Introduction	35
II-1 Généralité sur la plante	35
II-1-2 Description	35
II-1-2-1 Feuilles et tige florifère.....	35
II-1-2-2 Bulbes	36
II-1-2-3 fleurs	36
II-1-2-4 Fruits et graines	37
II-1-2-5 Principe active.....	38
II-1-3 Origine et habitat	38
II-1-4 Appellations.....	38
II-1-5 Classification et utilisations.....	38
II-1-6 Procédé d'extraction.....	40
Pour huile	40

Table de matière

Pour polyphénole	40
II-1-6-1 Hydrodistillation.....	41
II-2 Milieu d'essai	41
II-2-1 Préparation de la solution corrosive (NaCl 3%).....	41
II-3 Description du matériau	42
II-3-1 Acier utilisé	42
II-3-2 Composition chimique.....	42
II-3-3 Caractéristiques mécaniques	43
II-4 Préparation des échantillons	43
II-5 Techniques expérimentales	44
II-5-1 Technique de perte de masse	44
II-5-1-1 Théorie et principe de la technique de perte de masse	44
II-6 Isothermes d'adsorption	45
II-7 Mode opératoire	45
Chapitre III : résultats et discussion	
Introduction	48
III-1 Méthode de la perte de masse.....	48
III-1-2 Effet de la concentration de l'inhibiteur de l'huile essentielle.....	48
III-1-3 Influence du temps d'immersion pour huile	50
III-1-4 Isotherme d'adsorption pour huile	52
III-1-4-1 Les paramètres thermodynamiques.....	54
III-1-5 Effet de la concentration de l'inhibiteur de polyphénole	55
III-1-6 Influence du temps d'immersion pour polyphénole.....	57
III-1-7 Effet de la température	59
III-1-8 Isotherme adsorption pour polyphénole.....	64
III-2 Etude comparative.....	66
III-2-1 Comparaison entre les deux inhibiteurs testés dans un milieu NaCl 3% à temps d'immersion 1h	66
Conclusion général	69
Référence bibliographique	71

Introduction Générale

Introduction général

La corrosion est un phénomène responsable de la destruction de la plus part des matériaux naturels ou artificiels due à l'influence de facteurs ou de réactifs météorologiques, produits chimiques. Cette interaction se traduit par une détérioration des propriétés mécaniques des matériaux telles que la ductilité, l'apparence et la résistance, qui peuvent avoir un impact ennuyeux.

Les métaux sont largement utilisés dans l'industrie en raison de leurs propriétés mécaniques et chimiques. Par exemple, il existe des tuyaux métalliques transportant différents produits chimiques, colonnes pour opération unitaires.

Toutes les installations industrielles sont essentiellement en métal. Cependant avec au fil du temps, nous avons observé ces unités se détériorer en raison d'un certain nombre de facteurs, y compris la corrosion reste le facteur dominant.

Pour résoudre les problèmes liés à la corrosion, nous avons changé la plupart des métaux utilisés, mais cette méthode s'est avérée très coûteuse, ce qui nous a conduits à en chercher d'autres plus efficace.

Les inhibiteurs sont utilisés comme une méthode innovante de protection contre la corrosion. Ce sont des composés chimiques ajoutés en petite quantité à l'environnement pour réduire la vitesse de corrosion des matériaux. Ils peuvent être utilisés pour assurer une protection permanente des pièces ou une protection temporaire, notamment lorsque la pièce est particulièrement sensible à la corrosion. Les inhibiteurs verts, qui sont non toxiques et efficaces dans le domaine de la corrosion, suscitent un grand intérêt dans l'industrie. Dans notre étude, nous nous sommes concentrés sur l'utilisation d'un extrait de plante à cet effet.

L'efficacité des inhibiteurs de corrosion est influencée par plusieurs facteurs. Au niveau macroscopique, elle est affectée par des paramètres tels que la vitesse d'écoulement du milieu corrosif, la composition chimique de la solution, la température et la pression. Au niveau moléculaire, elle dépend du nombre de sites disponibles pour l'adsorption des inhibiteurs, de la densité de charge de ces inhibiteurs, de la taille des molécules inhibitrices, du mode d'interaction entre les inhibiteurs et la surface métallique, ainsi que de la structure électronique des molécules impliquées. Ces facteurs jouent un rôle clé dans la capacité de

l'inhibiteur à former une couche protectrice sur la surface métallique, ralentissant ainsi le processus de corrosion.

Le premier objectif de ce travail a consisté à obtenir l'huile essentielle et polyphénole de la plante *Allium triquètre L.*

Le deuxième objectif de notre étude était de rechercher les propriétés inhibitrices de l'huile essentielle et les polyphénols de la plante lorsqu'ils sont appliqués sur l'acier au carbone dans une solution saline contenant 3% de NaCl.

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

Le premier chapitre est consacré à une présentation générale relative à la corrosion et leur mode de protection par inhibition.

Le second chapitre présente les conditions expérimentales de cette étude ainsi que la méthode d'évaluation de corrosion.

Les résultats expérimentaux sont exposés dans le troisième chapitre, où nous avons démontré l'efficacité de l'inhibition des deux extraits (l'huile essentielle et les polyphénols) de la plante *Allium triquetrum L.* en ce qui concerne la corrosion de l'acier au carbone A106/A dans une solution de NaCl à 3%.

Enfin, l'ensemble de ce travail se résume par une conclusion générale.

Chapitre I
Etude
biobibliographique

Introduction

Le phénomène de corrosion est connue depuis longtemps, mais son étude scientifique a dû attendre les essais de DeLa Rive, à l'université de Grenoble, et ceux de Faraday (1791-1867) sur l'électricité et la pile de courant en 1830. Ces chercheurs ont découvert que la corrosion des métaux était un phénomène électrochimique. Cependant, cette explication ne s'applique pas à toutes les formes de corrosion, ni à la compréhension de la corrosion humide. Par exemple, la corrosion sèche fait intervenir la réaction chimique du milieu extérieur directement sur le matériau [1].

I-1- La corrosion**I-1-1 Définition**

« Interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui même, de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs » [2].

Selon NACE

La corrosion est la détérioration d'un matériau, généralement métallique, qui résulte d'une réaction avec son environnement. C'est à dire soit un environnement gazeux (oxygène de l'air par exemple), soit un environnement liquide (eau de mer par exemple), soit un environnement de contraintes dans de tels milieux, soit même en milieu biologique (bactéries se déposant des les tuyères industrielles - chimique ou pétrochimique - ou d'extraction pétrolière) [3].

I-1-2 Les modes de corrosion**I-1-2-1 Corrosion chimique**

C'est une réaction hétérogène entre une phase solide (le métal) et une phase liquide ou gazeuse [4]. Le processus d'oxydoréduction de la corrosion chimique se déroule dans le domaine atomique en absence d'électrolyte et, le plus souvent, à température élevée. Donc la corrosion purement chimique exclue le passage d'un courant électrique [5].

I-1-2-2 corrosion biochimique

L'existence des organismes vivants dans la nature peut modifier localement les milieux et les rendre très agressifs, ce type de corrosion correspond à l'attaque directe ou indirecte des

métaux par des bactéries. L'attaque bactérienne apparaît en particulier dans les canalisations enterrées, les structures immergées et les pipelines pétroliers [6,7].

I-1-2-3 corrosion électrochimique

C'est l'attaque des métaux dans les électrolytes en raison de l'existence d'une hétérogénéité dans le système (métal-réactif), il s'agit de l'ensemble des réactions d'oxydoréductions, qui l'entraîne à la formation de micro piles anode-cathode, le courant débite une différence de potentiel existant entre l'anode et la cathode et les zones qui constituent les anodes sont attaquées. La quantité de courant qui traverse cette pile est proportionnelle à la quantité de métal qui se corrode [6].

I-1-3 Différents types de corrosion

I-1-3-1 Corrosion uniforme

La corrosion uniforme ou généralisée est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface (Figure I.1), Elle se traduit par une dissolution uniforme de la surface métallique en contact avec l'agent agressif. Cette forme de corrosion est relativement facile à quantifier par des mesures de perte de masse ou d'épaisseur et sa progression sur une structure en service peut être suivie par des contrôles périodiques. Les concepteurs d'appareillages peuvent en tenir compte en prévoyant des surépaisseurs consommables par la corrosion. Ce type de corrosion est donc souvent peu dangereux même s'il peut être très couteux [8].



Figure I.1: Corrosion généralisée exemple d'une porte d'un véhicule corrodés.

I-1-3-2 Corrosion localisée

La corrosion localisée survient sur une partie du métal a un taux bien supérieur au reste de la surface (Figure I.2), elle peut avoir plusieurs formes, De façon globale, Si la progression de la corrosion s’accomplit à une vitesse uniforme en tout point de la surface, on parle de corrosion uniforme. Si la progression des vitesses de corrosion est non homogène, on parle de corrosion localisée [8].

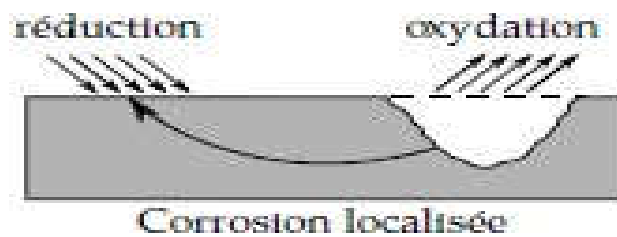


Figure I.2 : Représentation schématique d’une corrosion localisée [9].

Les différentes formes de la corrosion localisée sont:

I-1-3-2-1 Corrosion par piqûres

C’est une forme de corrosion qui se produit par certains anions, notamment les ions chlorures, sur les métaux dit « passivables » (aluminium, chrome, cobalt, cuivre, acier inoxydable, acier dans le béton, etc.) qui sont protégés par un film d’oxyde passif.

Cette forme de corrosion est particulièrement insidieuse, l’attaque se limite à des piqûres, très localisées et pouvant progresser très rapidement en profondeur, alors que le reste de la surface reste indemne.

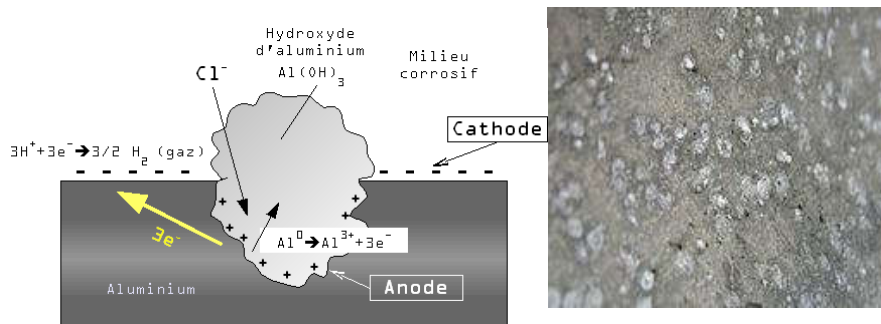


Figure I.3 : Corrosion par piqûre de l’aluminium [10].

I-1-3-2-2 Corrosion galvanique

C'est un des formes les plus courants de corrosion en milieu aqueux. Elle est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux matériaux dans laquelle une des électrodes (l'anode) se consomme au bénéfice de l'autre (la cathode) qui reste intact (figure I.4). Cette sélectivité des réactions est due à une hétérogénéité provenant soit du matériau ou des conditions physicochimique à l'interface [10,11].

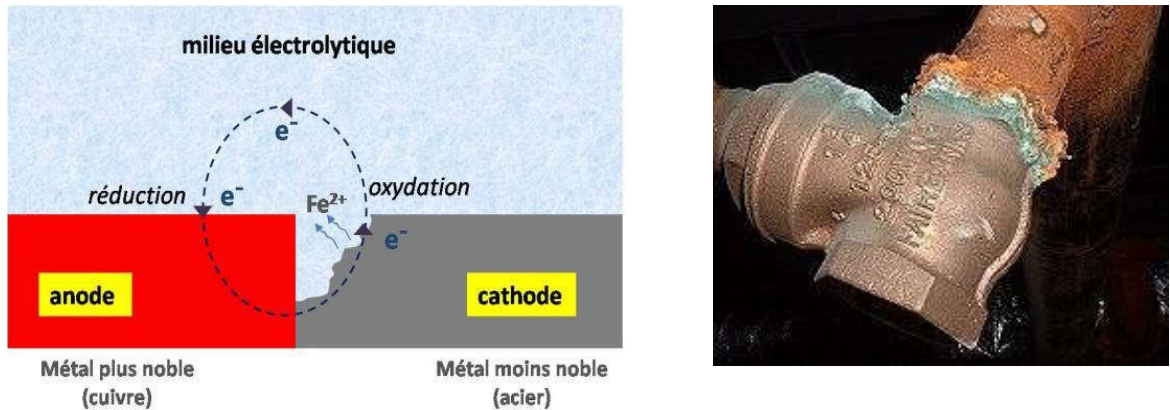


Figure I.4 : Corrosion galvanique résultante d'un

Assemblage de deux métaux différents : robinet en cuivre et conduite en acier galvanisé [12].

I-1-3-2-3 Corrosion intergranulaire

Cette forme de corrosion se manifeste aux joints de grains. Ce phénomène microscopique (invisible dans les étapes initiales) peut provoquer des fissures qui affaiblissent les caractéristiques mécaniques du métal. Certains aciers inoxydables et alliages (fer, chrome, nickel) sont très affectés par ce mode de corrosion qui réduit leur résistance mécanique [13].

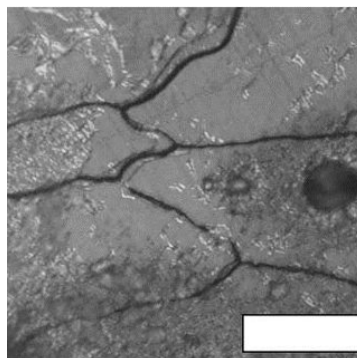


Figure I.5 : Corrosion intergranulaire [14].

I-1-3-2-4 Corrosion sélective

Elle est très dangereuse parce qu'elle est indétectable. Elle consiste en la dissolution sélective d'un élément d'alliage, les autres éléments restent non attaqués. Le métal devient poreux et perd sa résistance [13].

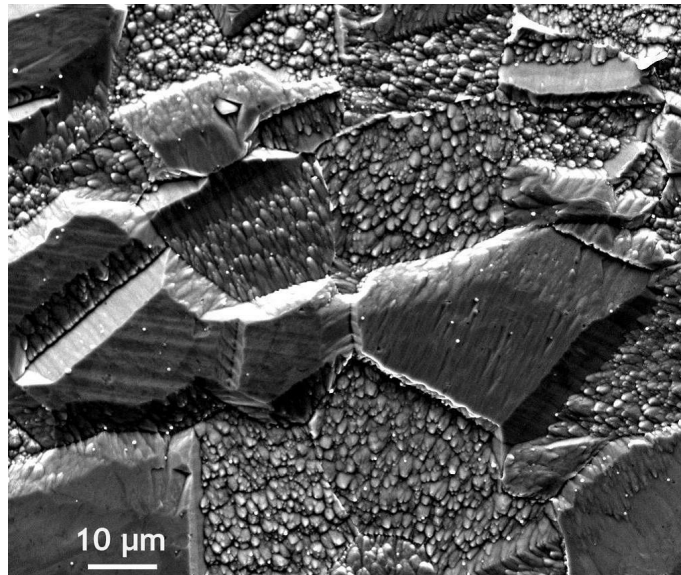


Figure I.6 : Corrosion sélective [15].

I-1-3-2-5 Corrosion érosion

La corrosion par érosion affecte de nombreux matériaux (aluminium, acier...), elle est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de la matière, elle est souvent favorisée par l'écoulement rapide d'un fluide (figure I.7) [16].

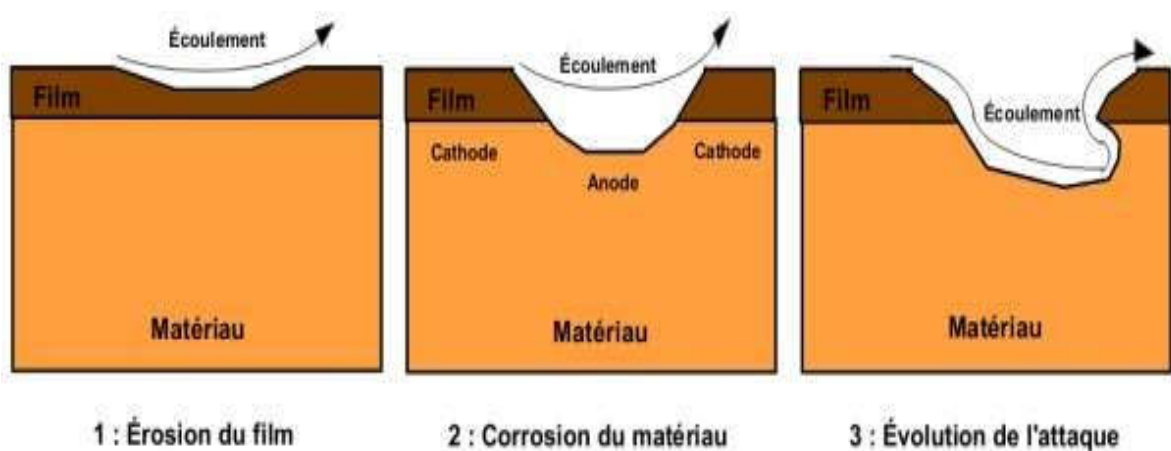


Figure I.7 : Représentation schématique du phénomène de corrosion-érosion.

I-1-3-2-6 Corrosion sous contrainte (CSC)

Ce type de corrosion se définit comme un processus de développement de fissures, pouvant aller jusqu'à la rupture complète de la pièce sous l'action combiné d'une tension mécanique et d'un milieu corrosif [16].



Figure I.8 : Corrosion sous contrainte.

I-1-3-2-7 Corrosion caverneuse

Ce type de corrosion est généralement associé à la présence de petits volumes de solution stagnants dans les trous, sous les dépôts, à l'interface des brides et joints, à l'interface d'un objet tombé dans le fond d'un récipient, etc. C'est une attaque électrochimique par «aération différentielle» qui se prolonge par une des réactions secondaires [17].

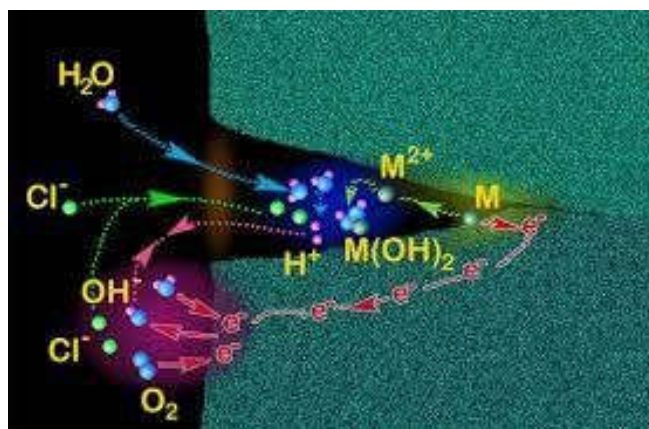


Figure I.9 : Corrosion caverneuse [13].

I-1-4 Les facteurs de la corrosion

Les processus de corrosion dépendant d'un grand nombre de facteurs en relation les uns avec les autres de manière complexe pouvant réagir avec un effet de synergie. Ces facteurs sont classés en quatre principaux groupes présentés dans le tableau **I-1 [18]**:

Tableau I-1 : les principaux facteurs de corrosion [19].

Facteurs du milieu corrosif	Facteurs métallurgique	Facteurs définissant les conditions d'emploi	Facteurs dépendant du temps
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Concentration du réactif ➤ Teneur en oxygène ➤ pH du milieu ➤ Température ➤ Pression 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Composition de l'alliage ➤ Procédés d'élaboration ➤ Impuretés ➤ Traitement thermique ➤ Traitement mécanique 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Etat de surface ➤ Forme des pièces ➤ Emploi d'inhibiteur ➤ Procédés d'assemblage 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Vieillessement ➤ Tension mécanique ➤ Modification des revêtements protecteurs

I-1-4-1 Effet de la température

Généralement, l'augmentation de la température accélère les phénomènes de corrosion, car elle diminue les domaines de stabilités des métaux et accélère les cinétiques de réaction et de transport. L'importance de son influence diffère cependant en fonction du milieu corrosif dans lequel se trouve le matériau **[20]**.

I-1-4-2 Effet de l'acidité

La susceptibilité du matériau à la corrosion est fonction du pH de l'électrolyte. Une forte concentration en protons dans la solution augmente l'agressivité du milieu, ce qui modifié les

équilibres des réactions chimiques et électrochimiques. La corrosion augmente avec la diminution du pH du milieu [21].

I-1-4-3 la salinité

Les chlorures sont des ions agressifs, souvent à l'origine de corrosion localisée, leur présence en solution s'accompagne d'effet complémentaire, d'une part, leur concentration locale induit une acidification du milieu et d'autre part, la salinité a une influence sur la conductivité du milieu aqueux [22].

I-1-4-4 Régime hydrodynamique

Le transport des réactifs vers l'interface et des produits de réaction vers l'électrolyte est de nature à modifier la cinétique des réactions électrochimiques en changeant la concentration des espèces et donc le potentiel d'équilibre. Les conditions hydrodynamiques fixent les vitesses de réaction en contrôlant le transport de matière par l'établissement d'une couche limite de diffusion des espèces, appelée couche de Nernst, ce qui explique l'importance de l'agitation de l'électrolyte lors des essais de corrosion en laboratoire [23].

I-2 Lutte contre la corrosion

Diverses mesures sont prises pour protéger les matériaux métalliques des effets destructeurs de la corrosion en milieu acide. La protection immédiate la plus fiable est contre la corrosion en sélectionnant un métal ou un alliage résistant à l'environnement corrosif. L'anticorrosion doit être prise en compte dès la conception de l'installation pour éviter de nombreux problèmes et assurer une certaine durée de vie. Les solutions adoptées doivent respecter la réglementation en matière de protection de l'environnement et permettre le recyclage ou l'élimination des différents composants en fin d'utilisation. Il existe plusieurs techniques de protection :

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

- Protection électrochimique.

Dans notre étude, nous sommes intéressées à la protection de la corrosion par l'utilisation d'inhibiteurs verts.

I-2-1 Protection de la corrosion par les inhibiteurs

I-2-1-1 Introduction

En matière de protection contre la corrosion, il est possible d'agir sur le matériau lui-même (choix judicieux, formes adaptées, contraintes en fonction des applications, ...), sur la surface du matériau (revêtement, peinture, tout type de traitement de surface, ...) ou sur l'environnement avec lequel le matériau est en contact (inhibiteurs de corrosion). L'utilisation des inhibiteurs pour protéger les métaux et les alliages contre la corrosion est une pratique courante. Les composés organiques ont montré une efficacité d'inhibition significative.

Néanmoins, leur utilisation est limitée à cause de leurs effets polluants, leur coût et parce qu'ils sont non biodégradables, ces soucis ont orienté les recherches vers l'utilisation des composés naturels comme agents anticorrosion qui sont écologiques et inoffensifs [24].

I-2-1-2 Définition

Selon la norme ISO 8044, un inhibiteur est une « substance chimique ajoutée au système de corrosion à une concentration choisie pour son efficacité ; celle-ci entraîne une diminution de la vitesse de corrosion du métal sans modifier de manière significative la concentration d'aucun agent corrosif contenu dans le milieu agressif » [25].

La définition d'un unique de corrosion n'est pas unique. Celle retenue par la « National Association of Corrosion Engineers (NACE) » est la suivante : un inhibiteur est une substance qui retarde la corrosion lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration [3].

I-2-1-3 Propriétés des inhibiteurs

- doit abaisser la vitesse de corrosion du métal tout en conservant les caractéristiques physico-chimiques de ce dernier,
- être compatible avec les normes en vigueur de non-toxicité et de protection de l'environnement,
- être efficace à faible concentration,

- être stable en présence d'autres constituants,
- être stable dans le domaine de température utilisé [26].

I-2-1-4 Les facteurs affectant la performance des inhibiteurs

I-2-1-4-1 Effet de la température

Avec l'augmentation de la température, la vitesse de corrosion des métaux augmente et l'efficacité de la plupart des inhibiteurs diminue à cause de diminution de recouvrement de la surface de métal par les inhibiteurs adsorbés. Mais, en présence de certains inhibiteurs, par exemple, sulfure de dibenzyle, le dibenzyle-sulfoxyde, l'aniline et la gélatine, la vitesse de corrosion est réduite [27].

I-2-1-4-2 Effet de la concentration d'inhibiteur

Les lois de variation de la quantité adsorbée en fonction de la concentration en inhibiteur peuvent souvent être représentées par les isothermes classiques suivantes :

➤ Isotherme d'adsorption de Langmuir :

Le modèle de Langmuir suppose qu'il existe à la surface un nombre fixe de sites. Chacun de ces sites ne peut adsorber qu'une seule particule. De plus, comme on néglige les interactions entre particules adsorbées, l'énergie d'adsorption est constante [28]. Dans notre cas, la vitesse d'adsorption est proportionnelle à la concentration en inhibiteur C_{inh} et à la fraction de sites d'adsorption non occupée $(1-\theta)$.

$$V_{ads} = k_{ads} (1-\theta) C_{inh} \quad I.1$$

Inversement, la vitesse de désorption est proportionnelle à la fraction de sites occupés par le gaz adsorbé:

$$V_{des} = k_{des} \theta \quad I.2$$

A l'équilibre, les deux vitesses sont égales.

$$k_{ads} (1-\theta) C_{inh} = k_{des} \theta \quad I.3$$

Un réarrangement donne la fraction de sites occupés, aussi appelée taux de recouvrement de la surface :

$$\theta = \frac{k C_{inh}}{1+k C_{inh}} \quad I.4$$

Dans cette équation, K désigne le coefficient d'adsorption

➤ **Isotherme d'adsorption de Temkin :**

$$\theta = -\frac{\ln k}{2a} - \frac{\ln C}{2a} \quad \text{I.5}$$

➤ **Isotherme d'adsorption de Frumkin :**

$$\ln\left[\frac{\theta}{C(\theta-1)}\right] = \ln(k) + 2a\theta \quad \text{I.6}$$

Où a est une constante d'interaction entre particules adsorbées.

I-2-1-4-3 Vitesse d'écoulement

La performance d'inhibiteur est généralement affectée par une forte agitation. La vitesse de corrosion augmente avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement.

Une relation linéaire a été observée entre la vitesse du fluide et la vitesse de corrosion de l'acier au carbone en milieu HCL en présence des inhibiteurs commerciaux [27].

I-2-1-4-4 La nature de métal

L'action des inhibiteurs est sélective et dépend de la nature de métal à protéger, sa composition et son traitement métallique. Un inhibiteur qui est très efficace pour un métal peut ne pas être satisfaisant pour un autre. De nombreux inhibiteurs pour les métaux ferreux sont inefficaces pour les métaux non ferreux comme le zinc et l'aluminium. Toutefois, certains inhibiteurs ou leurs mélange protègent plus d'un métal [27].

I-2-1-4-5 L'électrolytes

La nature de l'électrolyte a un effet considérable sur la protection des inhibiteurs. Par exemple, la quinoléine et les amines retardent la vitesse de corrosion des aciers en milieu acide chlorhydrique beaucoup plus fortement que dans l'acide sulfurique [27].

I-2-1-4-6 Le pH

De nombreux inhibiteurs deviennent satisfaisants à un pH optimum. Par exemple, le benzoate de sodium n'est pas efficace dans des électrolytes avec pH inférieur à 5,5 [27].

I-2-1-5 Classification des inhibiteurs

Il existe plusieurs possibilité de classement des inhibiteurs, celle-ci se distinguant les unes des autres de diverses manières [28] :

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

I-2-1-5-1 Classement selon la nature de l'inhibiteur**➤ Les inhibiteurs organiques**

Les molécules organiques sont destinées à un développement plus que certain en termes d'inhibiteur de corrosion : leur utilisation est actuellement préférée, en dépit des inhibiteurs inorganiques pour des raisons d'écotoxicité essentiellement.

Il existe de très nombreux composés organiques susceptibles d'être utilisés comme inhibiteurs. À partir d'une molécule "mère" possédant une certaine efficacité, il est toujours possible de synthétiser des composés de plus en plus complexes dans le but par exemple d'améliorer l'efficacité inhibitrice ou encore certaines propriétés physiques (solubilité en milieu aqueux ou non aqueux, pouvoir mouillant, température d'ébullition,...). Par ailleurs, la commercialisation d'un produit dépend en grande partie de son prix de revient : la préférence est souvent donnée à des sous-produits de l'industrie pétrolière [25].

➤ Les inhibiteurs minéraux

Les molécules minérales sont utilisées le plus souvent en milieu proche de la neutralité, voire en milieu alcalin et plus rarement en milieu acide. Les produits se dissocient en solution et ce sont souvent leurs produits de dissociation qui assurent les phénomènes d'inhibition (anions et cations). Les cations inhibiteurs sont essentiellement Ca^{2+} et Zn^{2+} et ceux qui forment des sels insolubles avec certains anions tels que l'hydroxyle (OH^-). Les principaux anions inhibiteurs sont les oxo-anions de type XO_4 tels

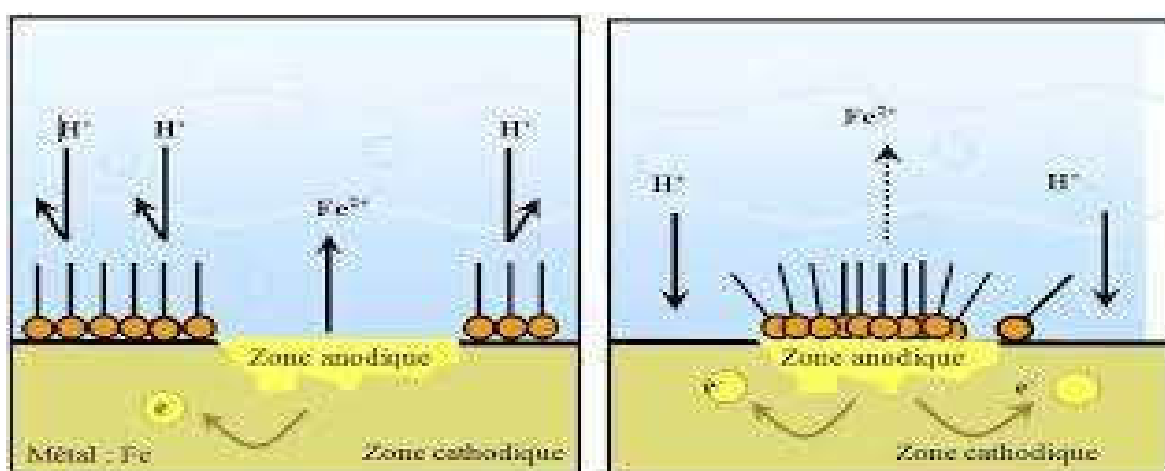
que les chromates, les molybdates, les phosphates, les silicates,... [29,30].

Le nombre de molécules en usage à l'heure actuelle va en se restreignant, car la plupart des produits efficaces présentent un côté néfaste pour l'environnement. Cependant, de nouveaux complexes organiques de chrome III et d'autres cations (Zn^{2+} etc....) efficaces contre la corrosion et non toxiques ont été développés [31].

I-2-1-5-2 Classement selon le mécanisme d'action

➤ Mécanisme d'action électrochimie

Les inhibiteurs de corrosion peuvent aussi être classés en fonction de leur mode d'action électrochimique. On distingue alors : les inhibiteurs anodique, cathodique ou mixte (regroupant alors les deux premières propriétés). L'inhibiteur de corrosion forme une couche barrière sur la surface métallique, qui modifie les réactions électrochimiques en bloquant soit les sites anodiques (siège de l'oxydation du métal), soit les sites cathodiques (siège de la réduction de l'oxygène en milieu neutre aéré ou siège de la réduction du proton H^+ en milieu acide) (Figure I.10) [32].



a) Blocage des sites cathodiques

b) Blocage des sites anodiques

Figure I.10 : Formation des couches barrières interférant avec les réactions électrochimiques, dans le cas d'une étude en milieu acide [25,33].

➤ Mécanismes d'action inter faciale

Une autre façon de classer les inhibiteurs est basée sur la manière dont ils se fixent à la surface métallique. Il existe deux types d'inhibiteurs : les inhibiteurs d'adsorption ou "d'interface" et les inhibiteurs d'interphase. Les inhibiteurs d'adsorption sont

principalement observés dans des environnements acides et fonctionnent en formant des films minces de molécules qui se fixent à la surface du métal. En revanche, les inhibiteurs d'interphase sont spécifiques des milieux neutres ou alcalins et créent des films tridimensionnels qui intègrent les produits issus de la dissolution du métal.

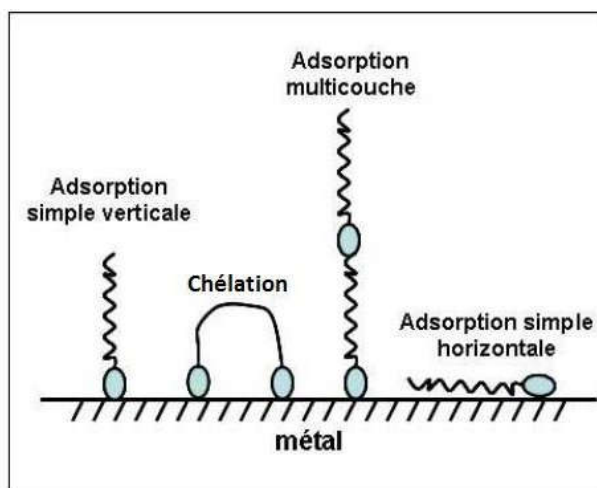


Figure I.11 : Représentation schématique des modes d'adsorption de molécules organiques inhibitrices sur une surface métallique.

L'adsorption est un phénomène commun à toutes les surfaces, car celles-ci sont composées d'atomes qui ne sont pas tous liés chimiquement de manière satisfaisante. En conséquence, ces surfaces ont tendance à attirer et retenir les atomes et les molécules se trouvant à proximité afin de combler ces liaisons manquantes. Deux principaux types d'interactions sont responsables de la liaison entre l'inhibiteur et la surface métallique : la physisorption, qui implique la formation de liaisons faibles, et la chimisorption. La nature et la charge du métal, la structure chimique du produit organique et le type d'électrolyte sont tous des facteurs qui influencent ces deux types d'adsorption. La figure 11 représente tous les modes d'adsorption possibles.

I-2-1-5-3 Classement selon le domaine d'application

➤ Inhibition en milieu acide

Les inhibiteurs en milieu acide sont employés pour éviter l'attaque de l'acier lors du décapage acide. Dans l'industrie pétrolière, on les ajoute aux fluides de forage [34]. Les inhibiteurs les plus fréquemment utilisés sont des molécules de type organique. Ces molécules s'adsorbent à la surface du métal et ralentissent ainsi la corrosion. Elles

contiennent une partie non polaire, hydrophobe et relativement volumineuse, constituée principalement d'atomes de carbone et d'hydrogène, et une partie polaire hydrophile, constituée d'un ou plusieurs groupes fonctionnels, tels $-NH_2$ (amine), $-SH$ (mercaptan), $-OH$ (hydroxyle), $-COOH$ (carboxyle), PO_3 (phosphate), et leurs dérivés. La molécule se lie (par adsorption) à la surface du métal avec son groupe fonctionnel, alors que sa partie non polaire bloque partiellement la surface active.

D'autres inhibiteurs forment des complexes peu solubles avec les ions métalliques provenant de la dissolution. Ces complexes précipitent à la surface et forment des couches superficielles ralentissant ainsi la dissolution du métal [35].

➤ **Inhibition en milieu neutre**

La corrosion en milieu neutre est normalement due à l'oxygène dissous. Les risques d'une attaque diminuent si l'on empêche l'oxygène d'accéder à la surface (inhibition cathodique). Alternativement, on peut diminuer la vitesse de la réaction partielle anodique en rendant le métal passif (inhibition anodique). On peut encore inhiber la corrosion par des substances, telles que les benzoates, les tartrates ou les salicylates etc. qui s'adsorbent à la surface et bloquent les sites de réaction [36].

➤ **Inhibition par passivation**

Elle sert notamment à protéger l'acier dans les circuits d'eau de refroidissement. Ce type d'inhibition peut être obtenu par les inhibiteurs oxydants et les agents tampons qui maintiennent le pH élevé au voisinage de la surface du métal [36].

➤ **Inhibition par précipitation**

En milieux neutres, de nombreux inhibiteurs forment des couches superficielles par précipitation, tels que les polyphosphates ($NaPO_3$) et les organo-phosphates. Agissant principalement sur la réaction cathodique (barrière de diffusion), ils réduisent la vitesse de corrosion en présence d'oxygène [36].

➤ **Inhibition en phase gazeuse**

Les inhibiteurs pour phases gazeuses sont généralement employés pour une protection temporaire de différents objets emballés pendant le transport et le stockage tels Les instruments de précision, les composants électriques, les machines, etc. Il s'agit le plus

souvent de composé organique ayant une pression de vapeur élevée, notamment certaines amines. Ces composés s'adsorbent sur la surface métallique et la protègent contre la corrosion atmosphérique [37].

➤ **Inhibiteurs pour peintures**

L'utilisation de ce type d'inhibiteurs permet la formation d'une barrière physique entre le milieu agressif et le métal à protéger. Les peintures contiennent des pigments inorganiques ou des tanins qui agissent comme inhibiteur de corrosion [36].

I-2-2 Les inhibiteurs verts

I-2-2-1 introductions

Les inhibiteurs verts de corrosion présentent un intérêt, car la prise de conscience Environnementale a augmenté et une modification de la réglementation limitant les Inhibiteurs de corrosion habituels en raison de leur toxicité. Les produits naturels sont une Bonne source d'inhibiteurs de corrosion écologiques, la plupart de leurs extraits contenant les éléments nécessaires tels que O, C, N et S, qui sont actifs dans les composés organiques, facilitant l'adsorption de ces composés sur des métaux ou des alliages pour former un film qui protège la surface et empêche la corrosion. Le développement de la chimie verte et des technologies de la chimie verte offre de nouvelles méthodes de synthèse différentes substances (polymère, extrait de plante, acide aminé, liquide ionique...), considérées comme de nouveaux inhibiteurs de corrosion (Figure 12).

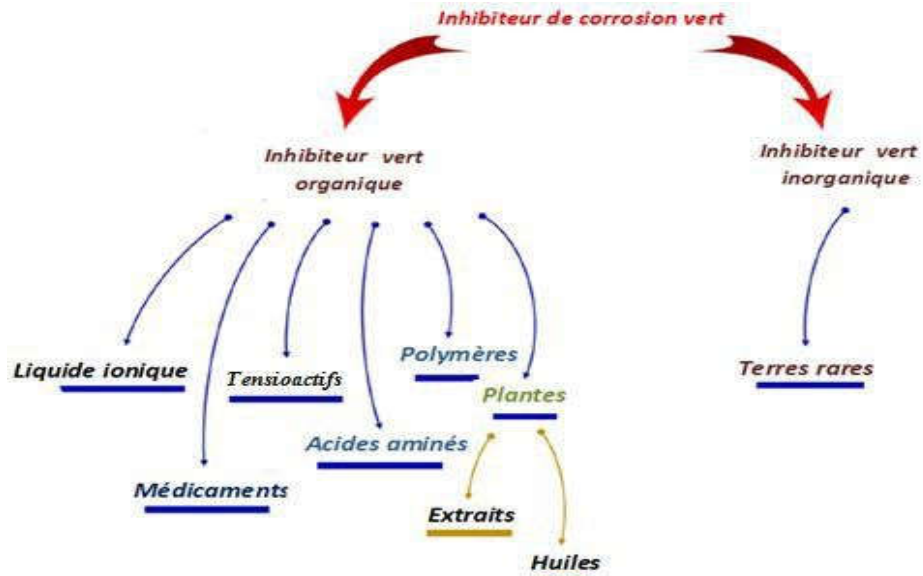












Figure I.12 : Différents classes des inhibiteurs verts de corrosion.


Tableau I.2 : L’effet inhibiteur de corrosion des extraits naturels de plantes sur les aciers dans différents milieux acides.


Réf.	Inhibiteur	Milieu	Métal	Techniques	E (%)	Année
Milieu HCl						
[37]	OLEA EUROPAEA 	2M HCl	Acier au carbone	Gravimétrie , PPD, VC	93% à 900ppm	2007



<p>[38]</p>	<p>MURRAYA KOENIGII</p> 	<p>1M HCl</p>	<p>Acier ordinaire</p>	<p>Gravimétrie , PPD, SIE</p>	<p>84.6%</p>	<p>2010</p>
<p>[39]</p>	<p>SIPARUNA GUIANENSIS</p> 	<p>0.1M HCl</p>	<p>Acier au carbone</p>	<p>SIE, PPD, SR</p>	<p>Feuilles : 79% à 50mg/L</p> <p>Tiges : 86% à 50mg/L</p>	<p>2011</p>
<p>[40]</p>	<p>ARGANIA SPINOSA</p> 	<p>1M HCl</p>	<p>Acier ordinaire</p>	<p>Gravimétrie , SIE, PPD</p>	<p>97,3% à 5 g/L</p>	<p>2012</p>




[41]	<p>ACALYPHA TORTA</p> 	1M HCl	Acier ordinaire	Gravimétrie , SIE, PPD	91% à 1000ppm	2013
[42]	<p>GEISSOSPERMUM</p> 	1M HCl	Acier au carbone	SIE, PPD, MEB	92% à 100 mg/L	2015
[43]	<p>PHOENIX DACTYLIFERA</p> 	1M HCl	Acier au carbone	Gravimétrie , PPD, SIE, MEB.	88.08% à 2g/L	2015




<p>[44]</p>	<p>TABERNAEMONTANA DIVARICAT</p> 	<p>1M HCl</p>	<p>Acier au carbone</p>	<p>Gravimétrie , SIE, PPD, MEB, EDX</p>	<p>95% à 500ppm</p>	<p>2016</p>
<p>[45]</p>	<p>THYMUS VULGARI</p> 	<p>1M HCl</p>	<p>acier inoxydable</p>	<p>SIE, PPD, EH</p>	<p>62.15% à 2% (v/v)</p>	<p>2017</p>
<p>[46]</p>	<p>ROLLINIA OCCIDENTALIS</p> 	<p>1M HCl</p>	<p>Acier au carbone</p>	<p>Gravimétrie , SIE, PPD, MEB</p>	<p>85.7% à 1g/L</p>	<p>2018</p>




[47]	CANNON AMURICATA 	0.5M H ₂ SO ₄	Acier au carbone	Gravimétrie , PPD, SIE	95.1%	2018
		1M HCl			94.1%	




<p><i>Milieu</i> H₂SO₄</p>						
[48]	COMBRETUM BRACTEOSUM LEAVES 	H ₂ SO ₄	Acier ordinaire	Gravimétrie, HE	74.76% à 4g/L	2009




<p>[49]</p>	<p>RUTA CHALEPENSI</p> 	<p>2 M H₂SO₄</p>	<p>Acier ordinaire</p>	<p>HE, gravimétrie, PPD, SIE, MEB</p>	<p>99.86% à 1.6 10⁻¹ (m/v)</p>	<p>2010</p>
<p>[50]</p>	<p>NAUCLEA LATIFOLIA</p> 	<p>1M H₂SO₄</p>	<p>Acier ordinaire</p>	<p>Gravimétrie</p>	<p>feuille : 94.26%</p> <p>écorce : 91.58%</p> <p>racine : 75.26% à 0.4 g/l</p>	<p>2013</p>




<p>[51]</p>	<p>NYPA FRUTICANS WURMB</p> 	<p>0.1M H₂SO₄</p>	<p>Acier ordinaire</p>	<p>Gravimétrie</p>	<p>74.47% à 0.5 g/L</p>	<p>2014</p>
<p>[52]</p>	<p>TAGETES ERECTA</p> 	<p>0.5M H₂SO₄</p>	<p>Acier ordinaire</p>	<p>Gravimétrie, SIE, PPD</p>	<p>98.19% à 1 g/L</p>	<p>2014</p>
<p>[53]</p>	<p>ALOE VERA</p> 	<p>1M H₂SO₄</p>	<p>Acier inoxydable</p>	<p>BE, SIE, PPD MEB, HPLC</p>	<p>98% à 30%v/v</p>	<p>2015</p>




<p>[54]</p>	<p>NICOTIANA TABACUM</p> 	<p>2M H₂SO₄</p>	<p>Acier ordinaire</p>	<p>Gravimétrie, DFT</p>	<p>94.13% à 10g/L</p>	<p>80.92% à 10g/L</p>	<p>2015</p>
<p>[55]</p>	<p>CASSIA TORA</p> 	<p>0.5M H₂SO₄</p>	<p>Acier ordinaire</p>	<p>Gravimétrie, FTIR, MEB</p>	<p>95.44% à 400 ppm</p>	<p>2016</p>	
<p>[56]</p>	<p>POUPARTIA BIRREA BACK</p> 	<p>0.5M H₂SO₄</p>	<p>Acier ordinaire</p>	<p>Gravimétrie</p>	<p>70%</p>	<p>2017</p>	

[57]	<p>SIDA CORDIFOLIA</p> 	0.5M H ₂ SO ₄	Acier ordinaire	Gravimétrie , SIE, PPD, MEB, AFM	98.96% à 500 mg/L	2018
[58]	<p>LANNEA COROMANDELICA</p> 	1M H ₂ SO ₄	Acier ordinaire	Gravimétrie , SIE, PPD, FTIR, MEB, AFM	93.8% à 250 mg/L	2017
[59]	<p>AGAVE AMERICANA</p> 	0.5 M H ₂ SO ₄	Acier ordinaire	Gravimétrie, PPD, SIE, FT-IR, MEB	81.87% à 2000 ppm	2019

<i>Milieu</i> <i>H₃PO₄</i>						
[60]	ZENTHOXYLUM ALATUM 	20 %(v/v) 50 %(v/v) 88%(v/v) H ₃ PO ₄	Acier ordinaire	Gravimétrie, SIE, PPD, FT-IR, XPS	98% à 3200 ppm	2004
[61]	ARTEMISIA 	2M H ₃ PO ₄	Acier au carbone	Gravimétrie, PPD, SIE	79% à 6g/l	2006
[62]	ROSEMARY 	2M H ₃ PO ₄	Acier au carbone	Gravimétrie , PPD, SIE	73% à 10g/L	2006

[63]	<p>MANGROVE TANNINS</p> 	NaCl et H ₃ PO ₄	Acier au carbone	PPD, XRD, MEB	90.1%	2008
[64]	<p>TRIBULUS TERRESTRIS L</p> 	1N H ₃ PO ₄	Acier ordinaire	Gravimétrie, FT-IR, PPD	83.2%	2010
[65]	<p>ACALYPHA INDICA L. ALCOHOLIC</p> 	1N H ₃ PO ₄	Acier ordinaire	Gravimétrie, FT-IR, PPD	90.38% à 5mg à 30°C	2010

<p>[66]</p>	<p>BAMBOO</p> 	<p>0.1M H₃PO₄</p>	<p>Acier au carbone</p>	<p>Gravimétrie, PPD, SIE, Chimie Quantique</p>	<p>95.7% à 100 mgL⁻¹</p>	<p>2014</p>
<p>[67]</p>	<p>EUPHORBIA FALCATA.L</p> 	<p>1N H₃PO₄</p>	<p>Acier au carbone</p>	<p>Gravimétrie,</p>	<p>93% à 3g.L⁻¹ à 40°C</p>	<p>2015</p>
<p>[68]</p>	<p>MUSA ACUMINATA</p> 	<p>1N H₃PO₄</p>	<p>Acier ordinaire</p>	<p>Gravimétrie</p>	<p>62% à 2 %(v/v)</p>	<p>2015</p>

[69]	<p>RED ONION</p> 	0.75M H ₃ PO ₄	Acier au carbone	HE, gravimétrie, MEB	86.18% à 5 ml	2016
[70]	<p>ZIZIPHUS LOTUS</p> 	5.5M H ₃ PO ₄	Acier au carbone	PPD, SIE	70.5% à 3g/L	2018
[71]	<p>BORAGO OFFICINALIS. L</p> 	1M H ₃ PO ₄	Acier ordinaire	HE, gravimétrie, PPD SEM- EDX	84.29% à 1g.L ⁻¹	2018

Chapitre II

Condition et méthode expérimentale

Introduction

Dans ce chapitre présente une description générale des différentes techniques et conditions expérimentales employées dans le cadre de cette étude.

Le but de notre travail est d'étudier le comportement inhibiteur de l'huile essentielle et de l'extrait polyphénole de la plante *Allium triquetrum L* sur l'acier carbone A106/A.

II-1 Généralité sur la plante

II-1-2 Description

II-1-2-1 Feuilles et tige florifère

Allium triquetrum L est une plante vivace, herbacée d'une hauteur de 15-50 centimètres qui varie en fonction de la provenance et des conditions environnementales.

Le nombre de feuilles diffère et chaque plante se compose généralement de 2-5 feuilles et de 1-3 tige florifère par bulbe (figure II-1). Les feuilles sont larges de 5-15 millimètres, vertes, planes, glabres, lancéolées, caduc ayant une odeur d'ail forte lorsqu'elles sont coupées ou écrasées.

Le pédoncule est un peu épais, triangulaire, dressé découlant directement du bulbe et le plus souvent plus long que les feuilles. Il se termine par une ombelle contenant chacune 6-10 fleurs [72].



Figure II-1 : Les feuilles et la tige florifère d'*Allium triquetrum L*.

II-1-2-2 Bulbes

Les bulbes tunique sont des organes de stockage souterrains lorsque le feuillage disparaît et forment les jeunes plantes pour la prochaine saison de croissance. Les bulbes et les bulbilles d'*Allium triquetrum* sont habituellement petits, ovoïdes, blanc-crème, de 4 à 22 mm de diamètre et de 0,5 à 2 cm de long, avec une forte odeur semblable à l'oignon. Les bulbes se situent à la base de la tige triquète avec des racines blanches qui ne se propagent pas profondément, mais qui peuvent s'étendre jusqu'à 30 cm de long selon la saison et le type du sol [73].



Figure II-2 : Les bulbes d'*Allium triquetrum* L [72].

II-1-2-3 fleurs

Les fleurs de l'*Allium triquetrum* sont en forme de clochettes pendantes. Elles sont regroupées en ombelles et sont entourées par une enveloppe formée par des bractées fusionnées appelée spathe. Chaque ombelle contient généralement de 5 à 10 fleurs hermaphrodites. Les pétales des fleurs sont de couleur blanche avec une bande verte au centre. Les pédoncules des fleurs sont plus longs que les fleurs elles-mêmes. Les fleurs sont symétriques et présentent une structure appelée actinomorphie. Le pistil, ou gynécée, est composé d'un ovaire supérieur à trois compartiments, d'un style court et d'un stigmate divisé en trois parties. Chaque compartiment de l'ovaire contient un ou deux ovules. Les fleurs sont ouvertes même lorsque les anthères (parties mâles produisant du pollen) sont encore fermées, selon les observations de Garcia et al. (2006). L'androcée, qui désigne l'ensemble des organes reproducteurs mâles, est composé de six étamines qui sont fusionnées à la base des tépales. Parmi ces étamines, trois sont internes et plus longues, tandis que trois sont externes et plus petites. Cette différence de taille diminue après la floraison, passant d'environ 1,2 mm à 0,5

mm. Les étamines longues se dressent presque à la verticale lors de l'épanouissement de la fleur, puis se courbent vers le bas. Les étamines sont plus longues que le style, qui est la partie supérieure du pistil.

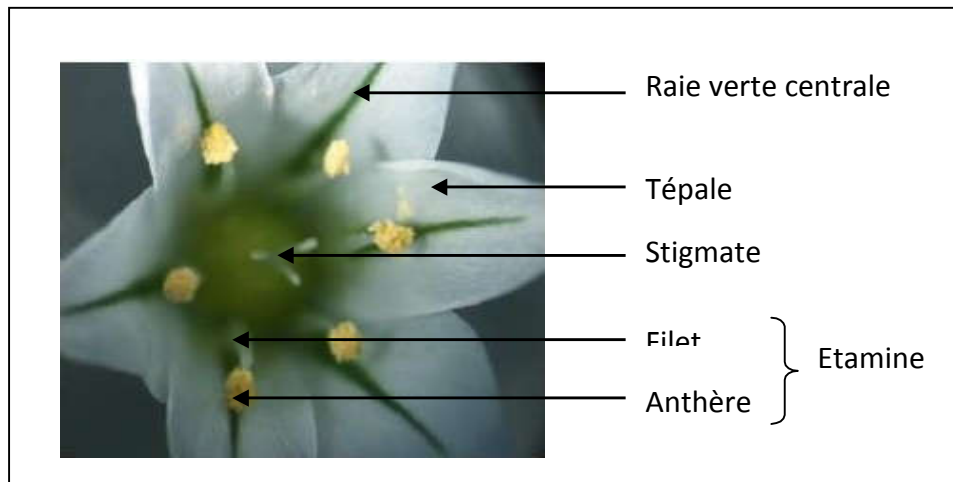


Figure II-3 : Détails de la fleur d'*Allium triquetrum* [73].

II-1-2-4 Fruits et graines

Après fécondation, les fleurs se transforment en fruits qui sont sous forme de capsules globulaires, vertes, de 3 à 6 mm de diamètre et contenant les graines. Celles-ci sont généralement en nombre de six par capsule, noires et oblongues de 2 à 3 mm de long. Les graines ont une courte durée de vie (1 an) et chaque plante peut produire jusqu'à 50 graines par saison [73].



Figure II-4 : Fruits et graines d'*Allium triquetrum* L [73].

II-1-2-5 Principe active

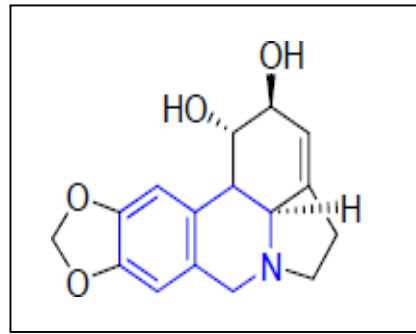


Figure II-5 : Exemple d'alcaloïde isoquinoléique d'*Amaryllidaceae* [74].

II-1-3 Origine et habitat

Selon Parsons et Cuthbertson (2001), *Allium triquetrum* est une plante originaire des régions méditerranéennes, de l'Afrique et de l'Europe occidentale et centrale. Elle s'est naturalisée sur les îles britanniques et dans le sud de l'Australie [72].

En Algérie, *Allium triquetrum* est une plante commune dans le nord du pays, principalement dans la région du Tell. Elle est relativement rare dans l'ouest de l'Algérie [72].

II-1-4 Appellations

Nom vernaculaires de l'ail triquètre [72]:

- Anglais : angled onion, triangle onion, onion weed, triquetrous gralic.
- Français : ail triquètre, ail à tirage triquètre ail à trois angles, ail sauvage.
- Arabe : Thoum elghaba, bassal edzib
- Kabyle : Bibras ou vivras.

II-1-5 Classification et utilisations

Tableau II-1 : Classification d'*Allium triquetrum* L classique et phylogénétique [75,76].

Classification classique des Angiospermes	Classification phylogénétique des Angiospermes
Règne : Plantes Sous-règne : <i>Tracheobionta</i> - Plantes vasculaires Embranchement : Spermaphytes-Plante à graines Classe : Liliopsida-Monocotylédones Sous-classe : Liliidées Ordre : Liliales Famille : Liliacées Sous-famille : Alliacees Genre : <i>Allium</i> Espèce : <i>Allium triquetrum</i> L	Règne : Plantes Sous-embranchement : Angiospermes Classe : Monocotylédones Ordre : Asparagales Famille : Amaryllidacées Sous-famille : Allioidées Genre : <i>Allium</i> Espèce : <i>Allium triquetrum</i> L

Allium triquetrum L est une plante à la fois comestible et ornementale. En Italie, elle est couramment utilisée comme ingrédient principal dans les salades et les soupes en raison de son goût doux, qui rappelle celui de l'oignon.

En Algérie, certaines régions comme la Kabylie et Blida ont la tradition de consommer la plante entière, sous forme d'omelette ou en l'utilisant pour aromatiser les galettes de pian ou assaisonner les salades. Les feuilles jeunes sont consommées crues ou cuites et peuvent être ajoutées à d'autres légumes dans le couscous pour accompagner le plat.

D'après diverses études ethnobotaniques, on considère *Allium triquetrum* L comme une plante à la fois condimentaire et médicinale. Elle est connue pour ses propriétés anti-inflammatoires, antiseptiques et antiparasitaires. Le bulbe de la plante est reconnu pour ses effets hypotenseurs et vermifuges. La plante entière, y compris les fleurs, est utilisée pour prévenir les problèmes rénaux et intestinaux, et elle présente également des effets calmants pour favoriser le sommeil.

II-1-6 Procédé d'extraction**➤ Huile essentielle**

Nous avons placé les 40 g de poudre de plante *Allium triquetrum L.*, puis nous avons ajouté 200 ml d'hexane dans le bécher et mélangé doucement avec agitateur pendant environ 15 minutes. Cette étape permet à l'hexane d'extraire les huiles essentielles de la poudre de plante. Ensuite, préparé un système de filtration en plaçant un papier filtre dans un entonnoir et connecté-le à une pompe à vide. Versé la solution d'hexane et de poudre de plante dans l'entonnoir et activé la pompe à vide pour filtrer la solution. Cela séparera les résidus solides de la solution liquide. Recueilli la solution filtrée dans un récipient propre. Ensuite, utilisé un distillateur pour évaporer l'hexane de la solution filtrée. Chauffé doucement la solution pour permettre la séparation de l'hexane des huiles essentielles. La vapeur d'hexane se condensera et sera récupérée dans un réceptacle, tandis que les huiles essentielles, plus légères, flotteront à la surface. Nous avons transféré délicatement les huiles essentielles récupérées dans un flacon en verre foncé pour le stockage.

➤ Polyphénole

Dans un premier temps, nous avons mettre la quantité de poudre mélangée avec de l'hexane dans une bécher. Ensuite, ajouté 80 ml de méthanol et 20 ml d'eau à la bécher. Utilisé un absorbant pour prélever 1 ml du mélange, puis ajouté 1 ml d'acide acétique. Mélangé doucement avec un agitateur pendant environ 15 minutes. Répété cette étape trois fois afin d'extraire les polyphénols de la poudre de plante à l'aide du méthanol. Ensuite, préparé un système de filtration en plaçant un papier filtre dans un entonnoir et connecté-le à une pompe à vide. Versé la solution d'hexane et de poudre de plante dans l'entonnoir, puis activé la pompe à vide pour filtrer la solution. Cette étape permettra de séparer les résidus solides de la solution liquide. Assurons-nous de recueilli la solution filtrée dans un récipient propre. Une fois la filtration terminée, utilisé un distillateur pour évaporer l'hexane de la solution filtrée. Chauffé doucement la solution pour permettre la séparation des polyphénols. La vapeur de méthanol se condensera et pourra être récupérée dans un réceptacle, tandis que les polyphénols, étant plus légers, flotteront à la surface. Soyons prudent en transférant délicatement les polyphénols récupérés dans un flacon en verre foncé, car ils sont sensibles à la lumière. Ce flacon en verre foncé assurera un stockage adéquat des polyphénols pour une utilisation ultérieure.

II-1-6-1 Hydrodistillation

L'hydrodistillation est une méthode d'extraction d'huiles essentielles à partir de plantes qui implique l'utilisation de vapeur d'eau. La vapeur est passée à travers la plante, ce qui permet de libérer les huiles essentielles. Les vapeurs d'eau et d'huile sont ensuite refroidies et séparées, ce qui permet d'obtenir l'huile essentielle pure. Cette méthode est couramment utilisée pour extraire des huiles essentielles à partir de plantes. L'hydrodistillation est considérée comme une méthode d'extraction douce qui permet de préserver les propriétés chimique des huiles essentielles.

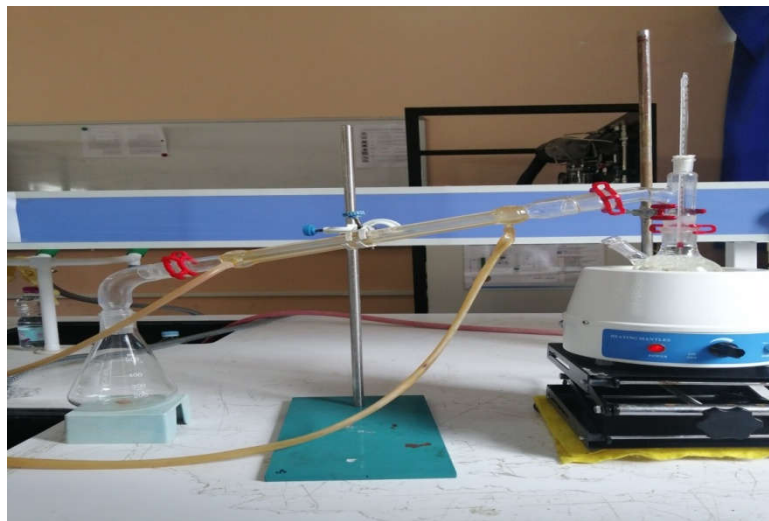


Figure II-6 : Montage de hydrodistillation.

II-2 Milieu d'essai

II-2-1 Préparation de la solution corrosive (NaCl 3%)

Le milieu de corrosion est une solution de chlorure de sodium NaCl à 3%, préparée au niveau du laboratoire. Dissolvez 30 grammes de cristaux de sel de chlorure de sodium dans 1 litre d'eau distillé, le pH est proche de l'alcalin et le test de température est le milieu environnant.



Figure II-7 : Préparation de la solution corrosive (NaCl 3%)

II-3 Description du matériau

II-3-1 Acier utilisé

Dans ce travail, nous avons utilisé des échantillons d'acier au carbone A106/A, c'est les tuyaux ASTM A106 utilisé pour des applications à haute température. Ce tuyau est largement utilisé dans les industries du pétrole et du gaz, de la pétrochimie. Le tube A106 est particulièrement adapté chaque fois que le fluide transporté a une haute température ou une haute pression.

II-3-2 Composition chimique

La composition chimique de l'acier au carbone A106/A est représenté dans le tableau suivant :

Tableau II-2 : La composition chimique de l'acier au carbone A106/A

Composition chimique, %	
Carbone, max	0,25
Manganèse	0,27-0,93
Phosphoreux	0,035
Soufre	0,035
Silicone	0,10
Chrome	0,4
Copper	0,4
Molybdène	0,15
Nickel	0,4
Vanadium	0,08

II-3-3 Caractéristiques mécaniques

Tableau II-3 : La composition mécanique de l'acier au carbone A106/A

Acier A106/6	Caractéristiques mécaniques		
	Résistance à la traction (MPa)	Limite d'élasticité (MPa)	Élongation %
	330	250	35

II-4 Préparation des échantillons

Le métal utilisé dans nos travaux est de l'acier A106/A les échantillons testés lors de nos tests ont été découpés sur 1cm^2 . Les formes des échantillons utilisés dans les essais sont données sur (figure II-7).



Figure II-8 : Echantillon de l'acier A106/A.

II-5 Techniques expérimentales

II-5-1 Technique de perte de masse

La méthode de perte de masse est calculée sur la base de la différence de poids avant et après l'ajout de différentes concentrations d'inhibiteurs à l'échantillon dans la solution de chlorure de sodium.

Cette technique a été utilisée pour étudier l'effet de l'inhibition de la corrosion sur l'acier au carbone dans des environnements corrosifs.

II-5-1-1 Théorie et principe de la technique de perte de masse

L'intérêt de la mesure de la perte de masse réside dans l'évaluation de la vitesse de corrosion, qui est définie comme la perte de poids par unité de surface et de temps, exprimée en (g/cm²/an). Le taux de corrosion est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$V = \Delta M / S \cdot t \text{ avec } \Delta M = m_i - m_f$$

m_i : masse de l'échantillon avant l'essai en (g),

m_f : masse de l'échantillon après l'essai en (g),

S : surface de l'échantillon en (cm²),

t : temps de séjour du substrat dans la solution.

L'efficacité inhibitrice d'un composé organique est donnée par la relation suivant :

$$E(\%) = (V - V_{\text{inb}})$$

Ou V et V_{inb} représenté respectivement les valeurs de la vitesse de corrosion de l'acier après immersion en absence et en présence de l'inhibiteur.

II-6 Isothermes d'adsorption

Les isothermes d'adsorption ont été tracées selon les équations suivantes :

L'isotherme d'adsorption de Langmuir

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K} C \quad \text{II.1}$$

L'isotherme d'adsorption de Temkin

$$\theta = \left(\frac{1}{f}\right) \ln K_{\text{ads}} C \quad \text{II.2}$$

L'isotherme d'adsorption de Frumkin

$$\ln \frac{\theta}{(1-\theta)C} = \ln K_{\text{ads}} + 2a\theta \quad \text{II.3}$$

Sachant que :

$$\theta = \frac{i_0 - i}{i_0} \times 100 \quad \text{II.4}$$

II-7 Mode opératoire

Lorsque la surface de l'échantillon a été préparés et pesée pour une masse m_i , nous avons apporté 5 béchers d'une capacité de 250ml et les avons remplis séparément comme suit :

1. 200ml d'une solution contienne le chlorure de sodium 3% seul (sans inhibiteur).
2. 200ml d'une solution contienne le chlorure de sodium 3% plus 250ppm de l'inhibiteur testé.
3. 200 ml d'une solution contienne le chlorure de sodium 3% plus 500ppm de l'inhibiteur testé.
4. 200 ml d'une solution contienne le chlorure de sodium 3% plus 750ppm de l'inhibiteur testé.
5. 200 ml d'une solution contienne le chlorure de sodium 3% plus 1000ppm de l'inhibiteur testé.

Nous avons utilisé quatre béchers pour ajouter les différentes concentrations d'inhibiteur. Ensuite, nous avons complètement immergé les pièces en acier au carbone dans les cinq béchers. Pour le temps d'immersion initial de 1 heure, ainsi que pour les autres temps d'immersion (4 heures, 8 heures, 12 heures, 24 heures, 48 heures), nous avons utilisé deux béchers. Dans le premier bécher, vous avez ajouté la concentration optimale de l'inhibiteur, tandis que dans le deuxième bécher gardé comme un référence (sans inhibiteur).

NB : Ce protocole a été répété pour les deux inhibiteurs testées, l'huile essentielle et polyphénole.



Figure II-9: Echantillons d'acier A106/A placés dans des béchers contenant une solution de NaCl à 3%.

Chapitre III

Résultats et discussions

Introduction

Ce chapitre vise à présenter les résultats et les discussions pour les deux inhibiteurs testés soit l'huile essentielle d'*Allium triquetrum*, soit le polyphénole d'*Allium triquetrum* dans le milieu NaCl 3% sur la corrosion de l'acier au carbone A106/A.

Les résultats ont été obtenus par l'utilisation de la méthode gravimétrique. Cette étude a été complétée par le tracé d'isotherme d'adsorption.

III-1 Méthode de la perte de masse

Dans cette partie de l'étude, nous avons effectué des mesures gravimétriques a fin d'évaluer l'effet inhibitrice des extraits de la plante d'*Allium triquetrum* sur la corrosion de l'acier au carbone A106/A dans un milieu corrosif NaCl 3%.

III-1-2 Effet de la concentration de l'inhibiteur de l'huile essentielle

Les paramètres de corrosion calculés par gravimétrie après 1h en fonction des différentes concentrations de l'inhibiteur huile essentielle et à la température ambiante sont illustrés dans le tableau et la figure suivant :

Tableau III-1 : les paramètres de corrosion mesurés par gravimétrie de l'acier A106/A dans NaCl 3% pendant 1h en absence et en présence des différentes concentrations de l'inhibiteur.

Concentration (ppm)	Δm (g)	Vitesse de corrosion (g/cm ² .h)	Efficacité %
0	0,0061	0,0061	-
250	0,0051	0,0051	16,39
500	0,0037	0,0037	39,34
750	0,0026	0,0026	57,37
1000	0,0012	0,0012	80,32

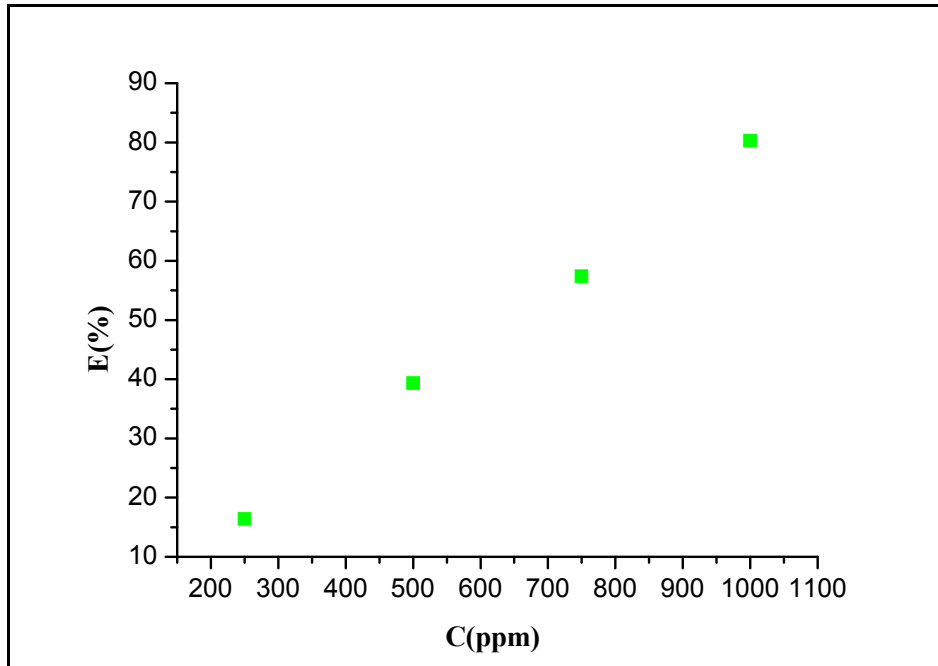


Figure III-1 : Efficacité inhibitrice de l'acier A106/A en fonction différentes concentration d'inhibiteur.

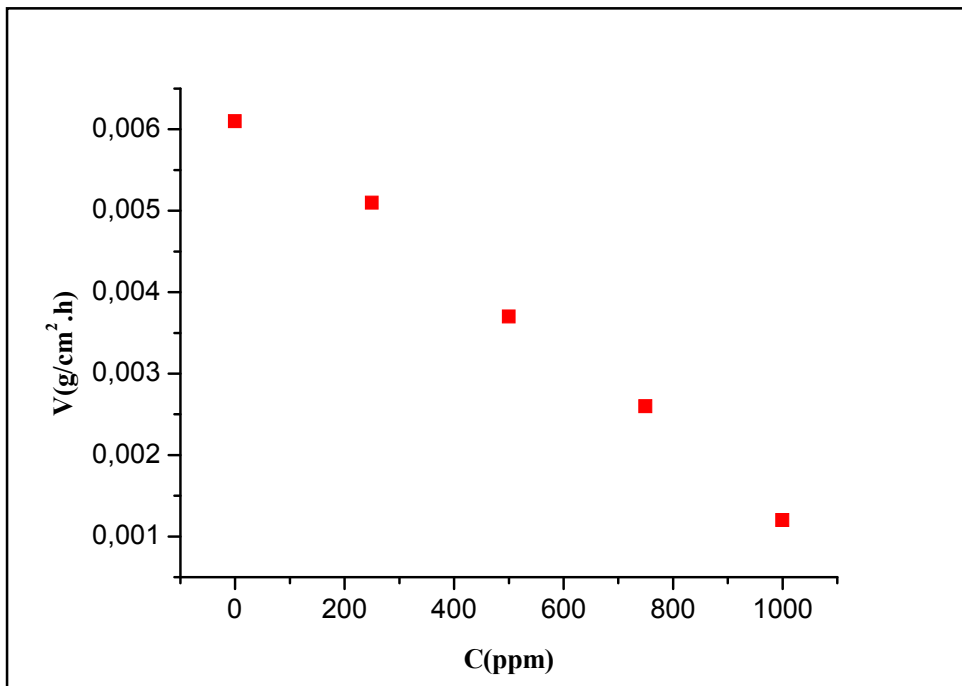


Figure III-2 : Variation de la vitesse de corrosion en fonction de la concentration d'inhibiteur d'huile essentielle.

➤ Discussion

D'après le tableau III-1 et la figure III-1 et la figure III-2 qui représente la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier A106/A en fonction de différentes

concentrations d'huile essentielle pendant 1h dans NaCl 3% et température ambiante, on observe que la vitesse de corrosion diminue jusqu'à atteindre 0,0012 (g/cm².h) et l'efficacité inhibitrice de corrosion augment avec l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur. L'efficacité inhibitrice atteint une valeur de 80,32% pour une concentration en inhibiteur de 1000ppm. Ce comportement peut être attribué à l'adsorption de ce composé sur la surface métallique [77].

III-1-3 Influence du temps d'immersion pour huile essentiel

Nous avons tracé la courbe de la vitesse de corrosion en fonction du temps d'immersion ainsi que celle de l'efficacité en fonction du temps d'immersion, étant donné l'importance de ce paramètre. Nous avons choisi une concentration d'inhibiteur de 1000ppm, car à cette concentration, l'efficacité est maximale.

Tableau III-2 : La variation de la vitesse de corrosion de l'acier A106/A dans NaCl à 3%, sans et avec une concentration optimal d'huile, en fonction du temps d'immersion.

C (ppm)	1h	4h	8h	12h	24h
	V _{corr} (g/cm ² .h)				
0	0,0061	0,0039	0,0031	0,0029	0,0022
1000	0,0006	0,0006	0,0004	0,0003	0,0002

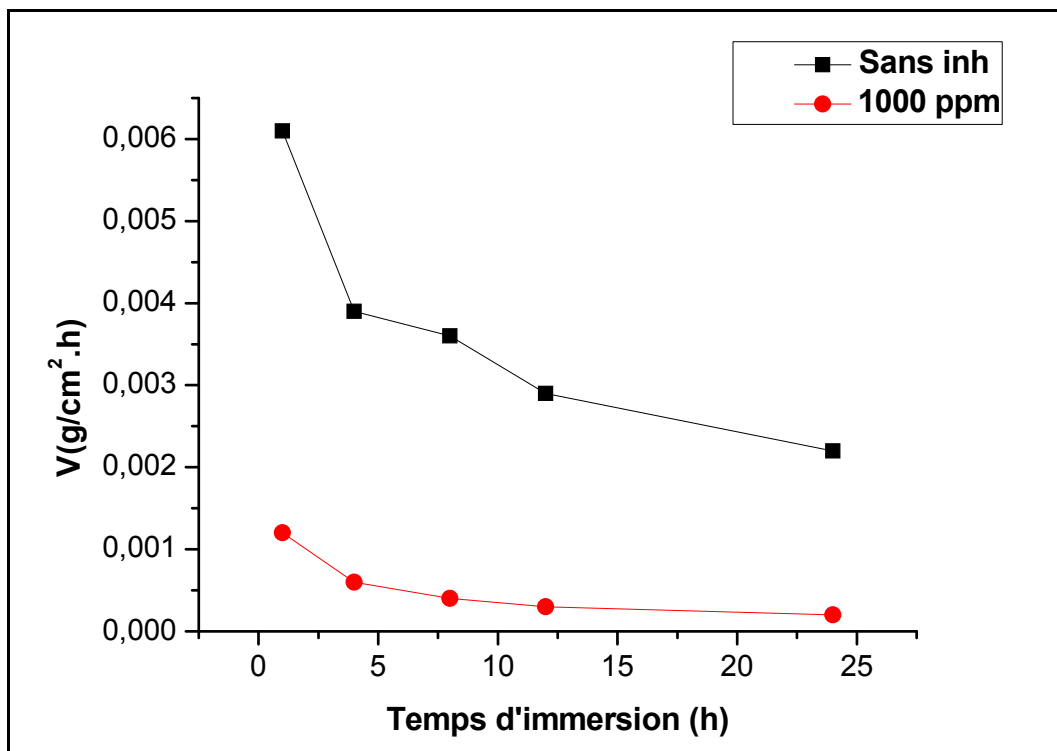


Figure III-3 : Représentation de la vitesse de corrosion en fonction de temps d'immersion.

➤ Discussion

L'analyse des résultats dans le tableau III-2 et la figure III-3, qui représente la vitesse de corrosion en fonction du temps d'immersion sans et avec une concentration de 1000 ppm d'huile essentielle, montre clairement que la vitesse de corrosion diminue avec l'augmentation du temps d'immersion. Cette diminution est due à la formation spontanée d'une couche protectrice adsorbée à la surface du métal, ce qui réduit sa dissolution [77].

Tableau III-3 : La variation de l'efficacité inhibitrice de corrosion l'acier A106/A à concentration optimal d'huile dans NaCl à 3%, en fonction de temps d'immersion.

C (ppm)	1h	4h	8h	12h	24h
	E(%)				
1000	80,32	84,61	87,09	89,28	90,90

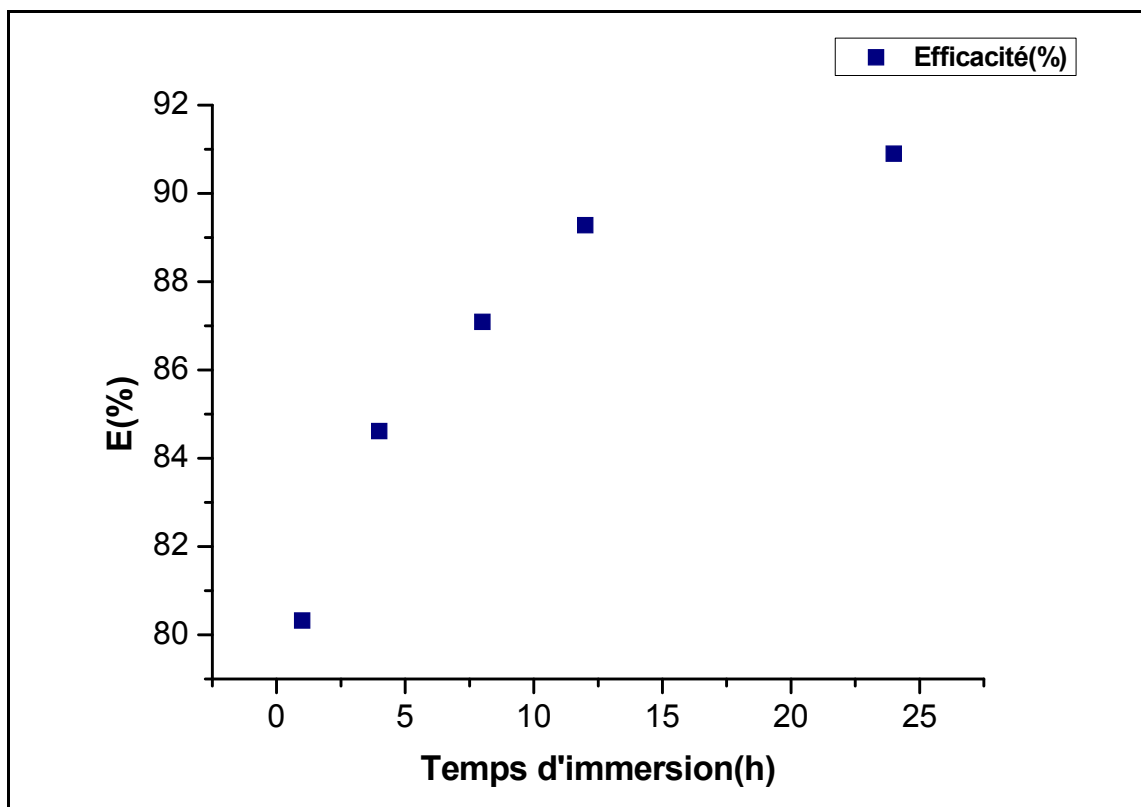


Figure III-4 : Variation de l'efficacité inhibitrice d'huile essentielle en fonction de temps d'immersion.

➤ Discussion

À partir du tableau III-3 et de la figure III-4 qui représente la variation de l'efficacité de l'huile en fonction du temps d'immersion à une concentration de 1000 ppm dans une solution de NaCl à 3% à température ambiante, on remarque que l'efficacité inhibitrice augmente avec l'augmentation du temps d'immersion. L'efficacité est atteinte après 24 heures d'immersion, où elle prend une valeur de 90,90%, ce temps probablement suffisant pour former une couche protectrice homogène sur la surface du métal [77].

III-1-4 Isotherme d'adsorption pour huile essentiel

Les isothermes d'adsorption donnent des informations sur l'interaction entre les molécules adsorbées ainsi que leur interaction avec la surface de l'électrode. Des mesures ont été effectuées afin de déterminer le type d'adsorption de l'inhibiteur utilisé. Dans la littérature, on trouve différents modèles d'isothermes telles que Langmuir, Temkin, Frumkin, et bien d'autres.

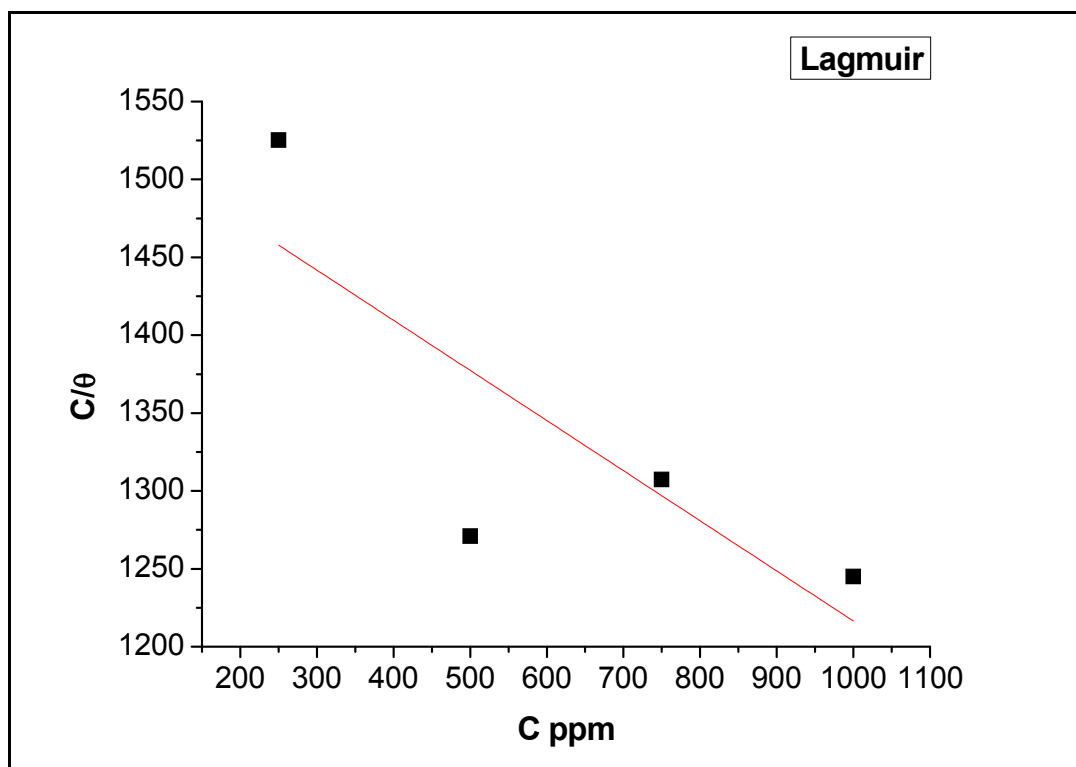


Figure III-5 : Isotherme de Langmuir obtenu à différents concentration en huile essentielle dans NaCl 3%.

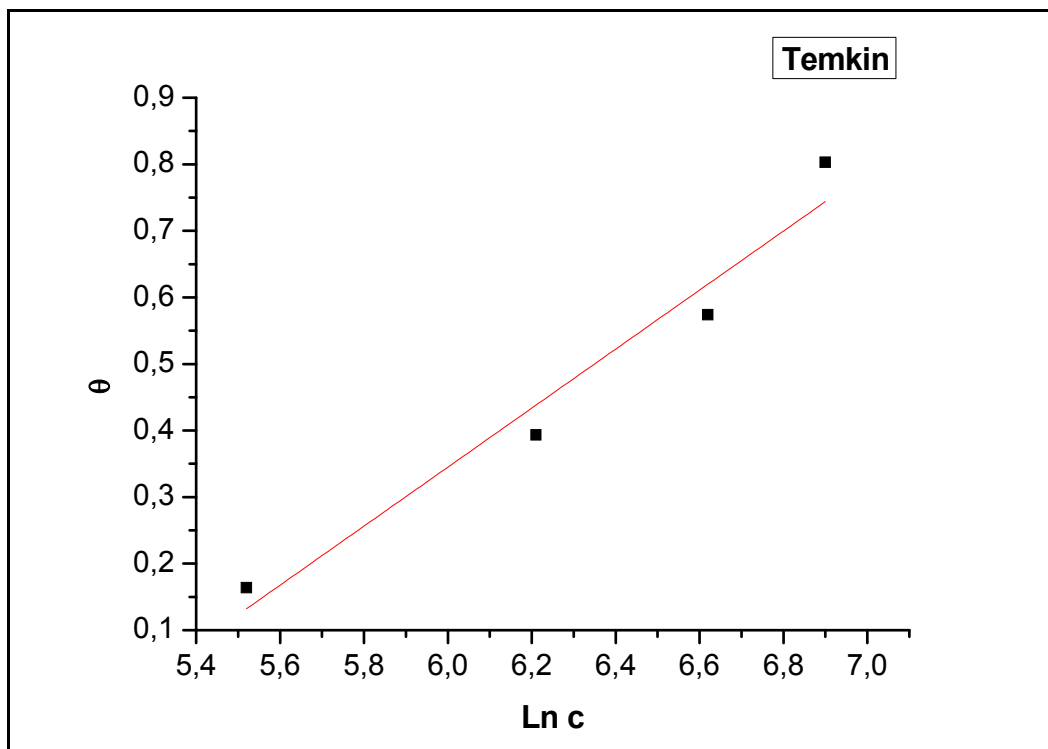


Figure III-6 : Isotherme de Temkin obtenu à différents concentration en huile essentielle dans NaCl 3%.

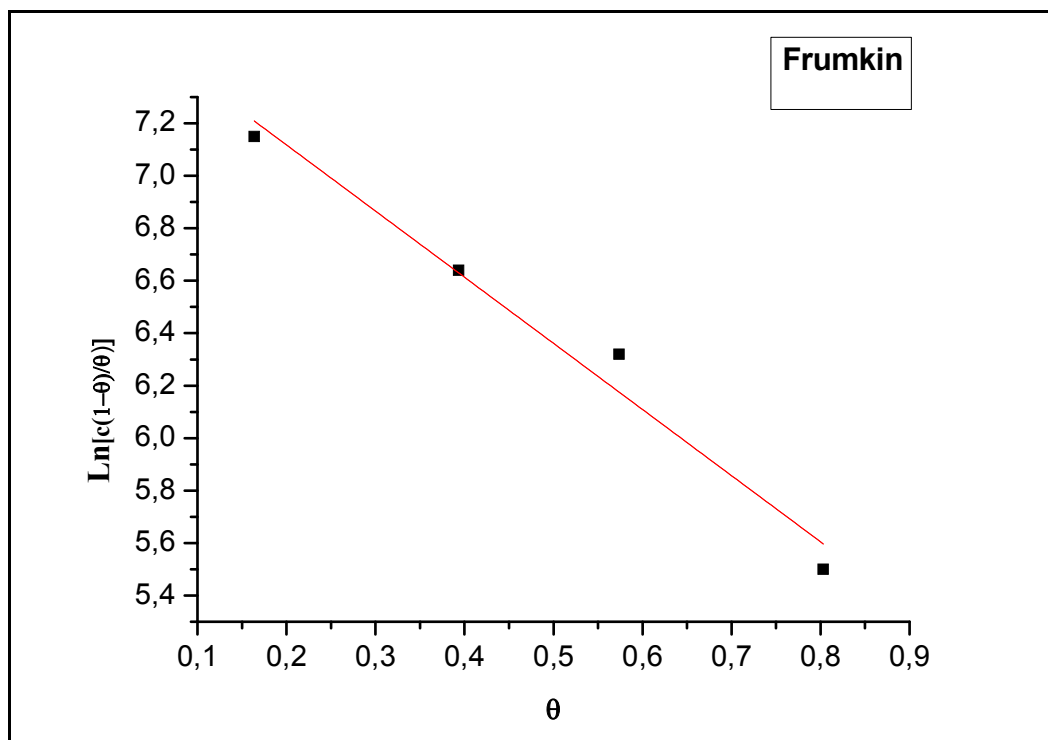


Figure III-7 : Isotherme de Frumkin obtenu à différents concentration en huile essentielle dans NaCl 3%.

Tableau III-4 : Les valeurs de coefficient de corrélation pour les différentes isothermes (huile).

R ² Inhibiteur	Langmuir	Temkin	Frumkin
Huile essentielle	0,65875	0,96317	0,97646

D'après les résultats obtenus dans le tableau III-4 nous avons remarqué que la valeur maximale du coefficient de régression linéaire $R^2 = 0,97646$, correspondant à l'isotherme de Frumkin. L'isotherme de Frumkin tient compte de l'interaction entre les molécules adsorbées, permettant ainsi une adsorption multicouche.

III-1-4-1 Les paramètres thermodynamiques

Pour calculer la constante d'adsorption K_{ads} et l'énergie d'adsorption ΔG°_{ads} , nous devons utiliser l'équation suivante :

$$\Delta G^\circ = -RT (\ln 55.5 \cdot K_{ads})$$

III.1

Tel que :

- T : la température est 298°K ;
- R : la constante des gaz parfait R est : 8,314 J/°K.mol.

En règle générale, lorsqu'on observe des valeurs d'énergie libre d'adsorption ΔG°_{ads} d'environ -20 Kj.mol⁻¹, cela correspond à une adsorption de type physisorption. En revanche, des valeurs d'environ -40 Kj.mol⁻¹ ou plus négatives sont généralement associées à des cas d'adsorption chimisorption [78].

Tableau III-5 : Les paramètres thermodynamiques relatifs à l'adsorption d'inhibiteur huile essentielle sur la surface de l'acier au carbone dans NaCl 3% pour le temps immersion (1h).

Paramètres	Pente	Intersection	R ²	K _{ads}	ΔG°_{ads}
Huile essentielle	-2,52155	7,6218	0,97646	2042,23	-28,81

➤ Discussion

D'après la valeur de l'enthalpie libre d'adsorption ($\Delta G^\circ = -28.81$ Kj.mol⁻¹) obtenu à partir

de l'équation III.1, nous avons remarqué que la valeur est proche de -20 KJ.mol^{-1} donc l'inhibiteur est physisorbé à la surface du métal [77].

Pour obtenus les valeurs de l'enthalpie standard (ΔH°) et de l'entropie standard (ΔS°) on appliquée les équations suivants :

$$\Delta H^\circ = -RT \ln K_{\text{ads}} \quad \text{III.2}$$

$$\Delta S^\circ = \frac{\Delta H^\circ - \Delta G^\circ}{T} \quad \text{III.3}$$

Les valeurs de l'enthalpie standard (ΔH°) et de l'entropie standard (ΔS°) sont respectivement $-18,87 \text{ KJ.mol}^{-1}$ et $0,033 \text{ KJ.mol}^{-1}$ La réaction d'adsorption de l'huile essentielle sur la surface du métal est exothermique.

III-1-5 Effet de la concentration de l'inhibiteur de polyphénole

Tableau III-6 : les paramètres de corrosion mesurés par gravimétrie de l'acier A106/A dans NaCl 3% pendant 1h en absence et en présence des déférentes concentration de l'inhibiteur.

Concentration (ppm)	Δm (g)	Vitesse de corrosion (g/cm ² .h)	Efficacité %
0	0,0086	0,0086	-
250	0,0061	0,0061	29,06
500	0,005	0,005	44,44
750	0,0031	0,0031	61,72
1000	0,0013	0,0013	84,88

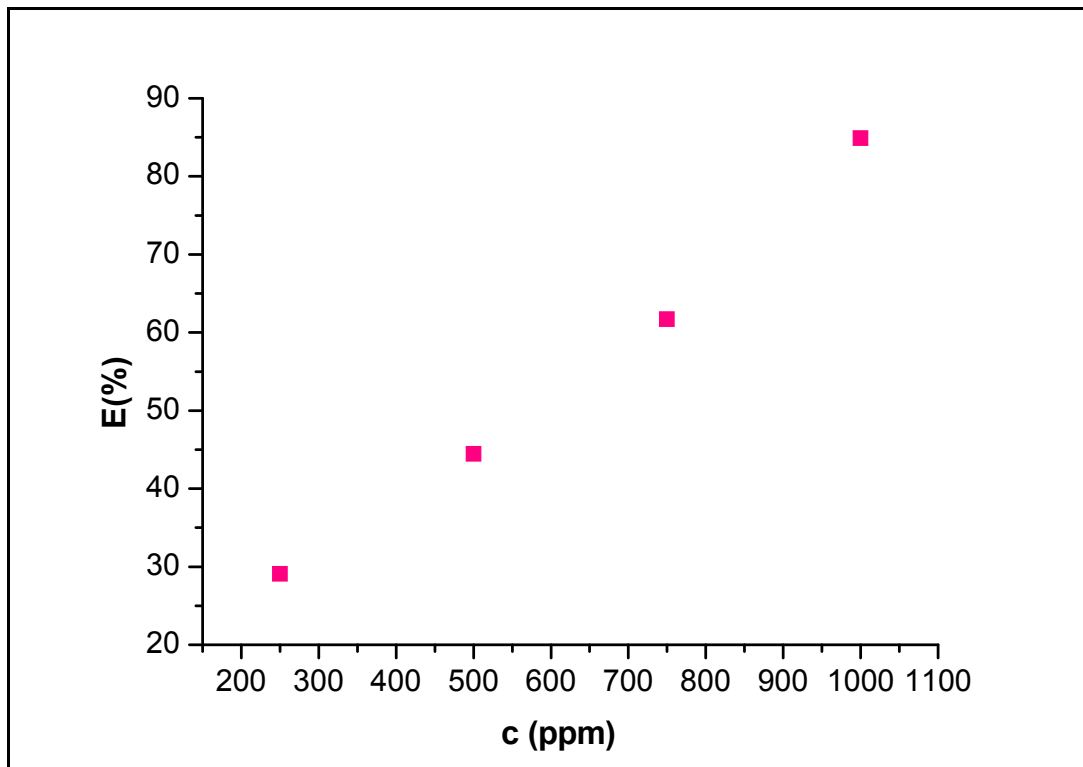


Figure III-8 : Efficacité inhibitrice de l'acier A106/A en fonction différentes concentration d'inhibiteur de polyphénole.

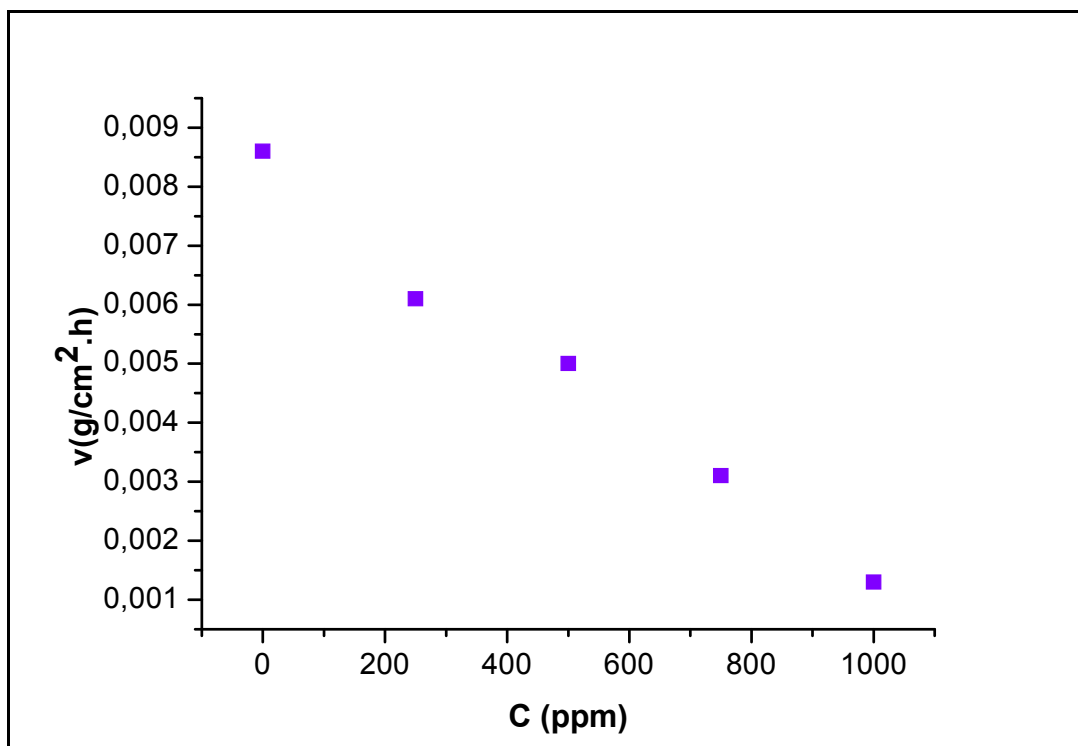


Figure III-9 : Variation de la vitesse de corrosion en fonction de la concentration d'inhibiteur de polyphénole.

➤ Discussion

D’après le tableau III-6 et la figure III-8 et la figure III-9 qui représente la vitesse de corrosion et l’efficacité inhibitrice de l’acier A106/A en fonction des différentes concentrations de polyphénole pendant 1h dans NaCl 3% et température ambiante, on observe que la vitesse de corrosion diminue jusqu’à atteindre 0,0013 (g/cm².h) et l’efficacité inhibitrice de corrosion augment avec l’accroissement de la concentration de l’inhibiteur. L’efficacité inhibitrice atteint une valeur de 84,88% pour une concentration en inhibiteur de 1000ppm. Ce comportement peut être attribué à l’adsorption de ce composé sur la surface métallique [77].

III-1-6 Influence du temps d’immersion pour polyphénole

Tableau III-7 : La variation de la vitesse de corrosion de l’acier A106/A dans NaCl à 3%, sans et avec une concentration de 1000 ppm d’inhibiteur polyphénole, en fonction du temps d’immersion.

C (ppm)	1h	4h	8h	12h	24h	48h
	V _{corr} (g/cm ² .h)					
0	0,0086	0,005	0,0045	0,004	0,0033	0,0039
1000	0,0013	0,0006	0,0005	0,0004	0,0002	0.0005

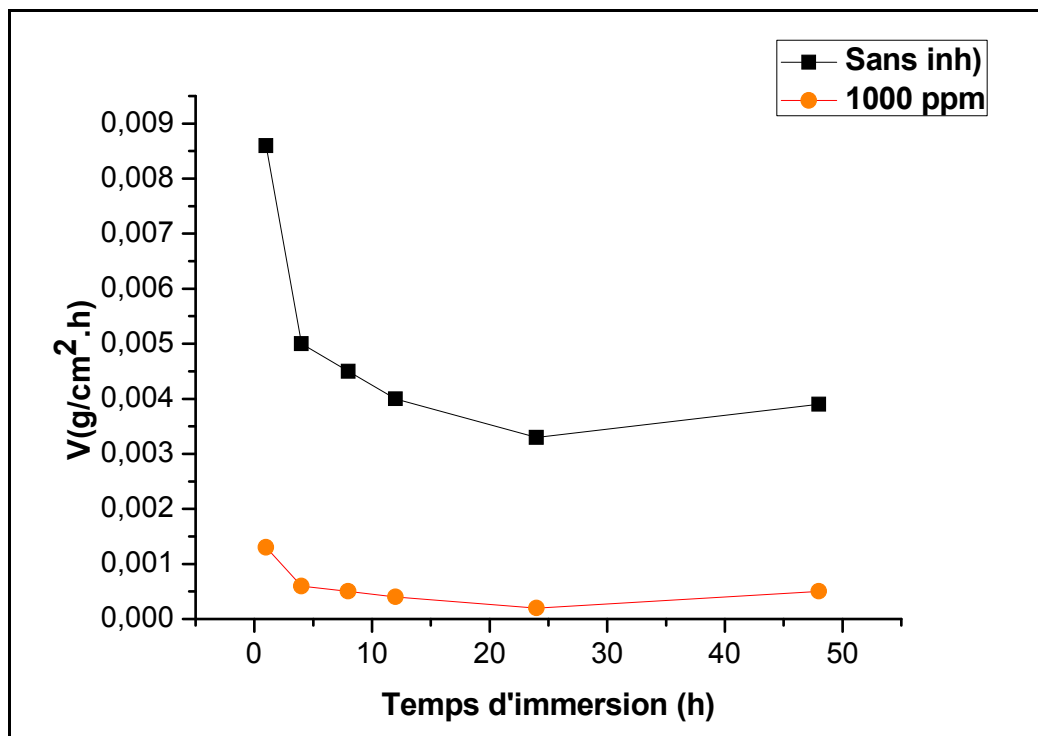


Figure III-10 : Variation de la vitesse de corrosion en fonction de temps d’immersion.

➤ Discussion

Selon le tableau III-7 et la représentation de la variation de la vitesse de corrosion en fonction du temps d'immersion sans et avec une concentration de 1000 ppm de l'inhibiteur polyphénol (figure III-10), Nous remarquons clairement que la vitesse de corrosion diminue avec l'augmentation du temps d'immersion jusqu'à 24 heures, puis encore, le taux d'usure augmente à 48 heures. Cette diminution est due à la formation spontanée d'une couche protectrice adsorbée à la surface du métal durant les 24heurs, puis aux 48 heurs, cette couche tend vers a détérioré à cause de la destruction des liaisons formées préalablement [77].

Tableau III-8 : La variation de l'efficacité inhibitrice de corrosion l'acier A106/A à concentration de 1000ppm d'inhibiteur polyphénole dans NaCl à 3%, en fonction de temps d'immersion.

C (ppm)	1h	4h	8h	12h	24h	48h
	E(%)					
1000	84,88	88	91,11	92,75	93,93	87,17

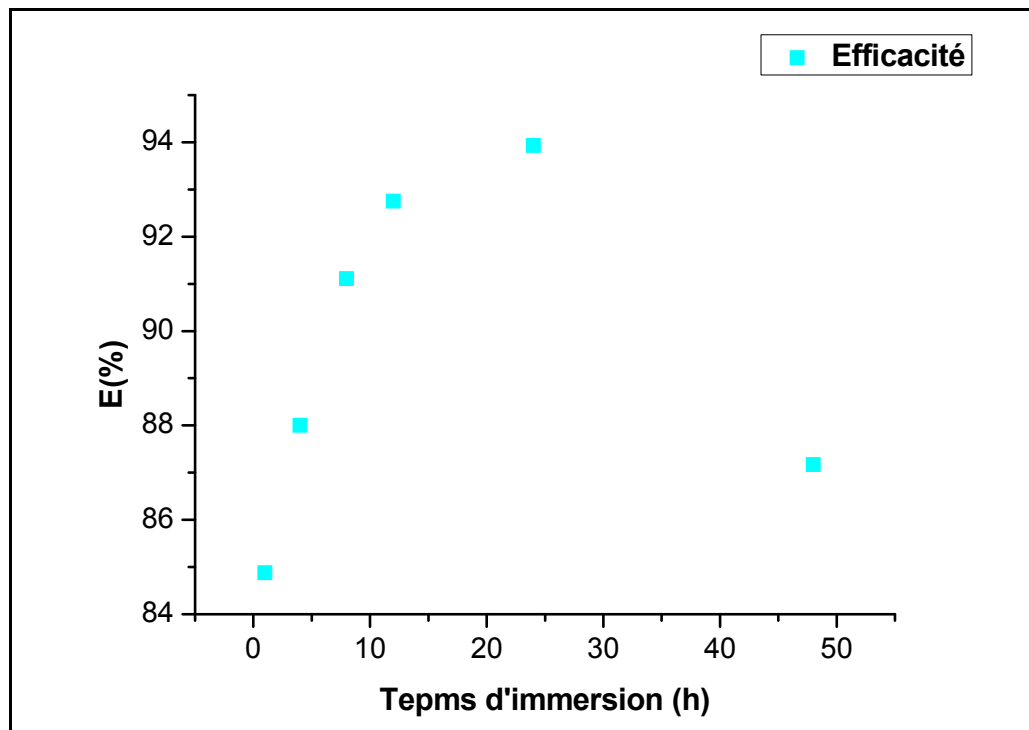


Figure III-11: variation de l'efficacité inhibitrice de polyphénols en fonction de temps d'immersion.

➤ Discussion

À partir du tableau III-8 et de la figure III-11 qui représentent la variation de l'efficacité de polyphénols en fonction du temps d'immersion à une concentration de 1000 ppm dans une solution de NaCl à 3% à température ambiante, nous avons montrés que l'efficacité inhibitrice augmente avec l'augmentation du temps d'immersion, puis il diminue au temps de 48 heures. L'efficacité est atteinte après 24 heures d'immersion, où ayant une valeur de 93,93%.

III-1-7 Effet de la température

La température joue un rôle crucial dans la durabilité d'un inhibiteur dans un environnement corrosif. Les procédures de décapage sont généralement réalisées à des températures élevées. L'élévation de la température peut entraîner la libération de l'inhibiteur et conduire à une dissolution rapide des composés organiques ou des complexes formés, ce qui affaiblit la résistance à la corrosion.

Pou évaluer l'effet de la température sur l'évolution de la vitesse de corrosion, nous avons effectué plusieurs mesures qui sont résumées dans le tableau III-9

Tableau III-9 : Variation de la vitesse de corrosion en fonction de la température dans le milieu NaCl 3% ($t_{im}=1h$).

T (°K)	V_{corr} sans inhibiteur	V_{corr} avec inhibiteur	E(%)
298	0,0081	0,0013	84,88
308	0,0108	0,0022	79,62
318	0,0313	0,0101	68,05
328	0,0373	0,0142	61,93

➤ Discussion

D'après le tableau III-9 ainsi que les figures III-12 et III-13 qui représentent respectivement la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier A106/A en fonction des différentes températures, il ressort que la vitesse de corrosion augmente avec l'élévation de la température. Cela s'explique par le fait que la température accélère la cinétique des réactions. En revanche, l'efficacité inhibitrice diminue avec l'augmentation de la température [77].

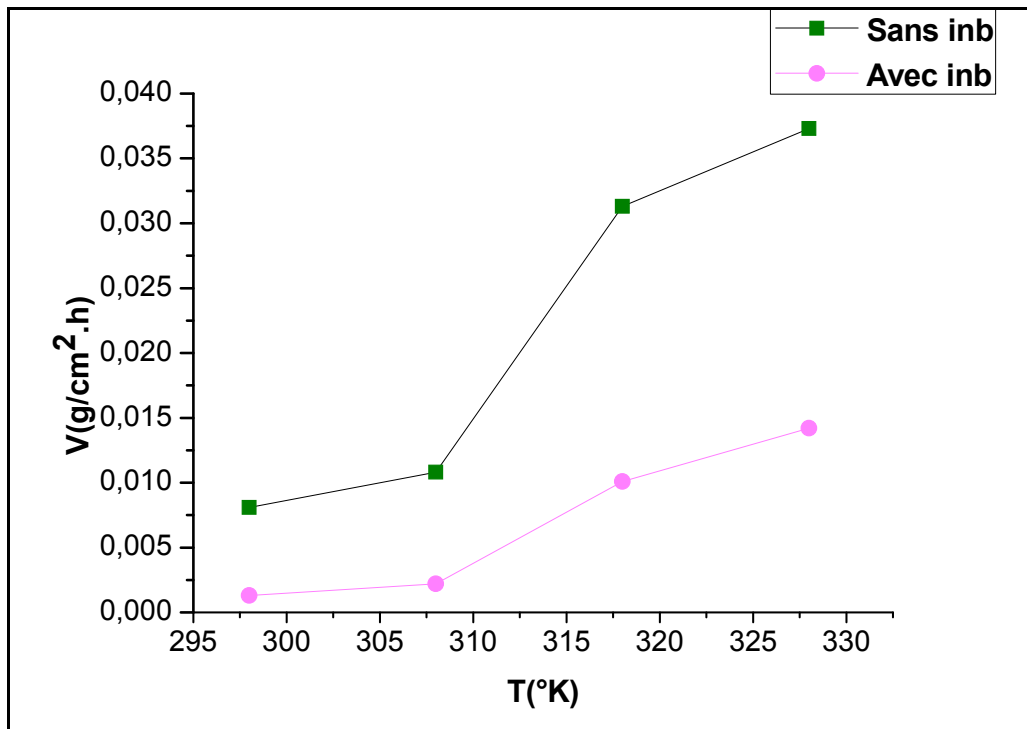


Figure III-12 : Evolution de la vitesse de corrosion en fonction de la température dans NaCl 3%.

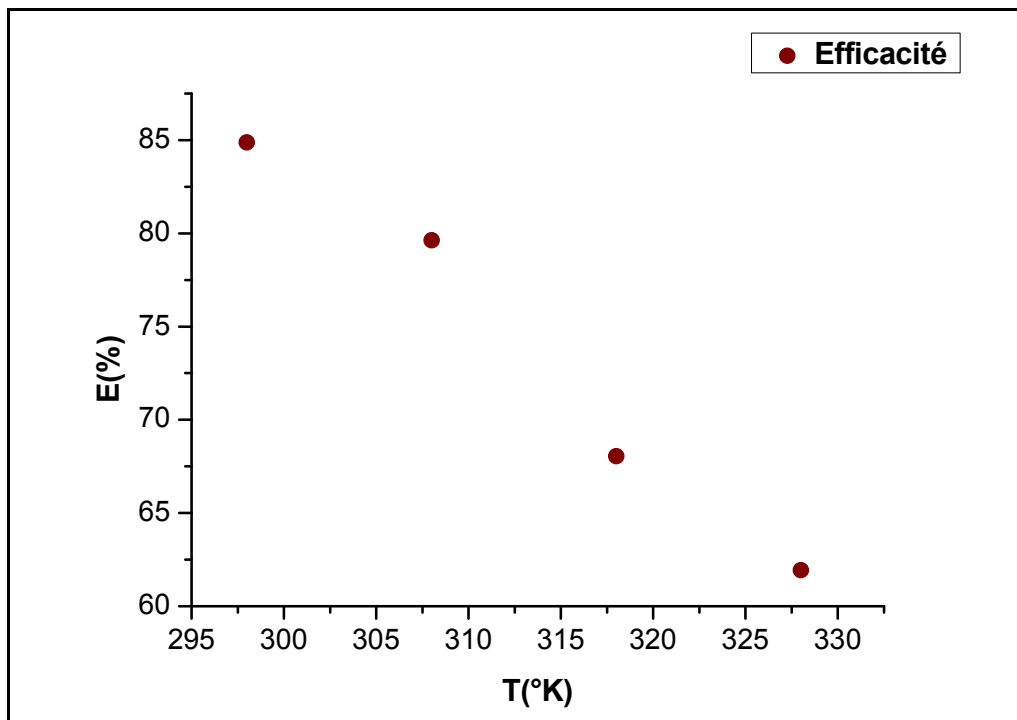


Figure III-13 : Effet de la température sur l'efficacité de l'acier en milieu NaCl 3% contenant 1000ppm de l'inhibiteur polyphénole.

En utilisant la variation de température, nous avons été déterminé l'énergie d'activation du processus de corrosion à différentes températures, à la fois en l'absence et en présence de polyphénole, selon la relation III.4 [79] :

$$\ln V = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad \text{III.4}$$

E_a : Energie d'activation de la réaction

A : Facteur préexponentiel

R : Constante des gaz parfaits ($R=8,314 \text{ J.mol}^{-1} . \text{°K}^{-1}$)

T : Température en kelvin

A partir des droites $\ln V = f(1/T)$ on peut déterminer l'énergie d'activation en utilisant des régressions linéaires simples de forme $y = ax + b$ où a (pente) = $-E_a/R$

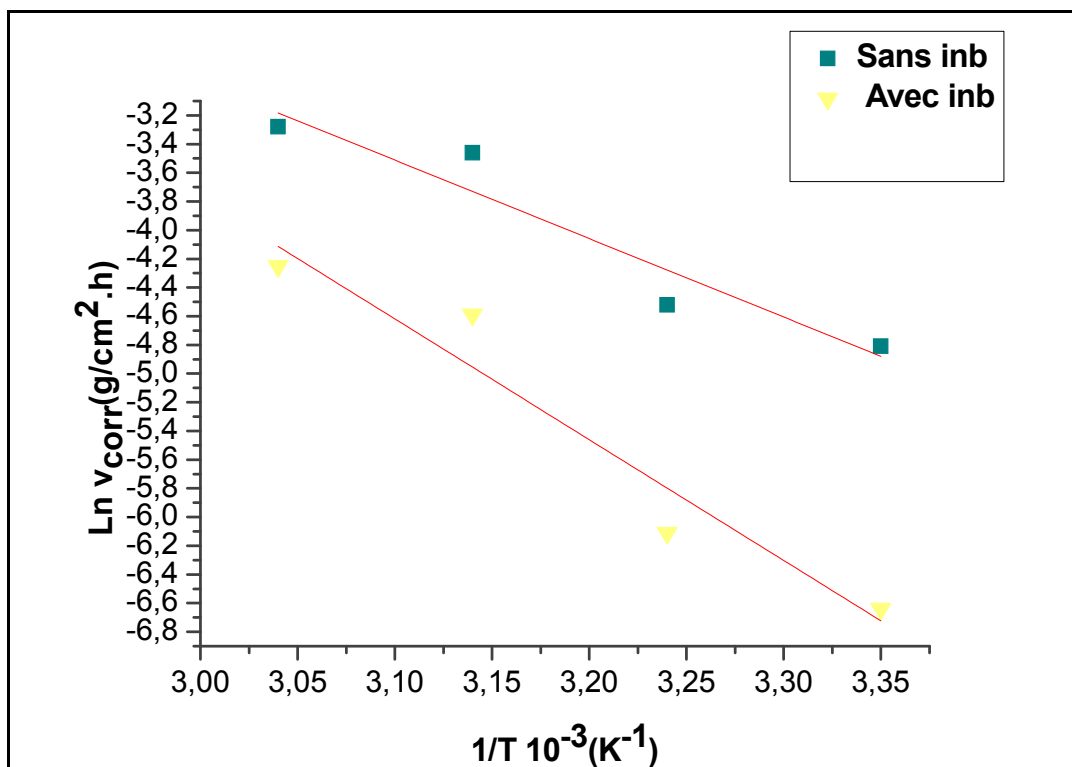


Figure III-14 : Droites d'Arrhenius de $\ln V$ en fonction de la température sans et avec inhibiteur.

Tableau III-10 : Variation de l'énergie d'activation (E_a) de polyphénole sur la surface de l'acier A106/A à différentes températures pour $t_{im} = 1$ heure.

	La pente $-\frac{E_a}{RT}$	E_a (Kj.mol ⁻¹)
Sans inhibiteur	-5,47197	13,55
Avec inhibiteur	-8,42063	20,86

➤ D'après le tableau III-10, On remarque que l'énergie d'activation avec l'inhibiteur est supérieure à l'énergie d'activation sans inhibiteur. L'inhibiteur se lie au substrat par des liaisons de nature électrostatique, qui sont des liaisons faibles. Cependant, ces liaisons sont sensibles à la température, ce qui signifie qu'elles deviennent moins efficaces pour lutter contre la corrosion lorsque la température augmente [80].

La corrosion est un processus qui implique des changements thermodynamiques tels que l'enthalpie (ΔH_a) et l'entropie (ΔS_a). Ces paramètres ont été déterminés en utilisant l'équation d'état de transition (III.5) :

$$W = \frac{RT}{NH} \exp\left(\frac{\Delta S^{\circ}a}{R}\right) \exp\left(-\frac{\Delta H^{\circ}a}{RT}\right) \quad \text{III.5}$$

Dans cette équation, où h représente la constante de Planck, N est le nombre d'Avogadro, ΔH°_a est l'enthalpie d'activation et ΔS°_a est l'entropie d'activation.

La relation entre la variation de $\ln(W / T)$ et l'inverse de la température forme une ligne droite, avec une pente de $(-\Delta H^{\circ}_a / 2,303R)$ et une ordonnée à l'origine égale à $(\ln R / NH) + (\Delta S^{\circ}_a / 2,303R)$.

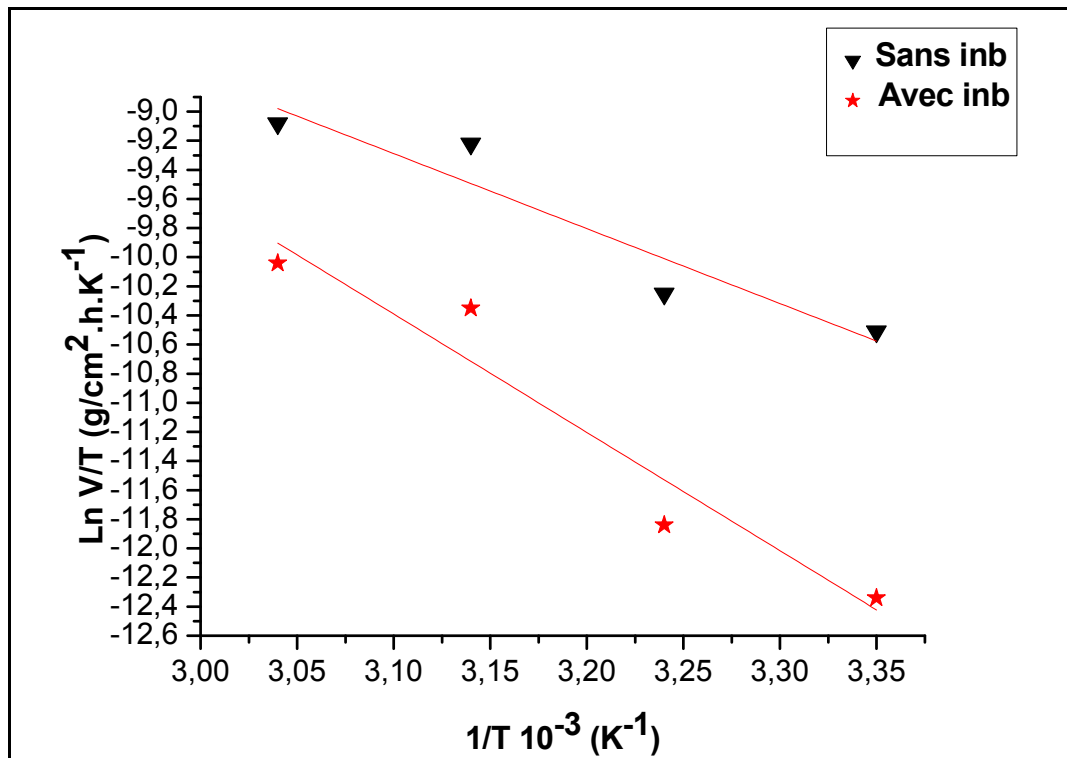


Figure III-15 : Variation de Ln (V/T) en fonction de l'inverse de la température.

Tableau III-11 : Enthalpie $\Delta H^{\circ a}$ et entropie $\Delta S^{\circ a}$ d'activation pour l'acier dans NaCl 3% en absence et présence d'inhibiteur.

	$\Delta H^{\circ a}$ (KJ/mol)	$\Delta S^{\circ a}$ (KJ/mol)
Sans inhibiteur	98,64	-326,93
Avec inhibiteur	155,65	-171,30

- Les enthalpies ($\Delta H^{\circ a}$) positives indiquent la nature endothermique du processus de dissolution de l'acier. Les valeurs élevées et négatives de l'entropie ($\Delta S^{\circ a}$) suggèrent que le complexe actif dans l'étape déterminante de la vitesse est plus susceptible d'être une association plutôt qu'une dissociation, ce qui signifie qu'il y a une diminution du désordre lors de la transformation des réactifs en complexe activé [81,82].

III-1-8 Isotherme adsorption pour polyphénole

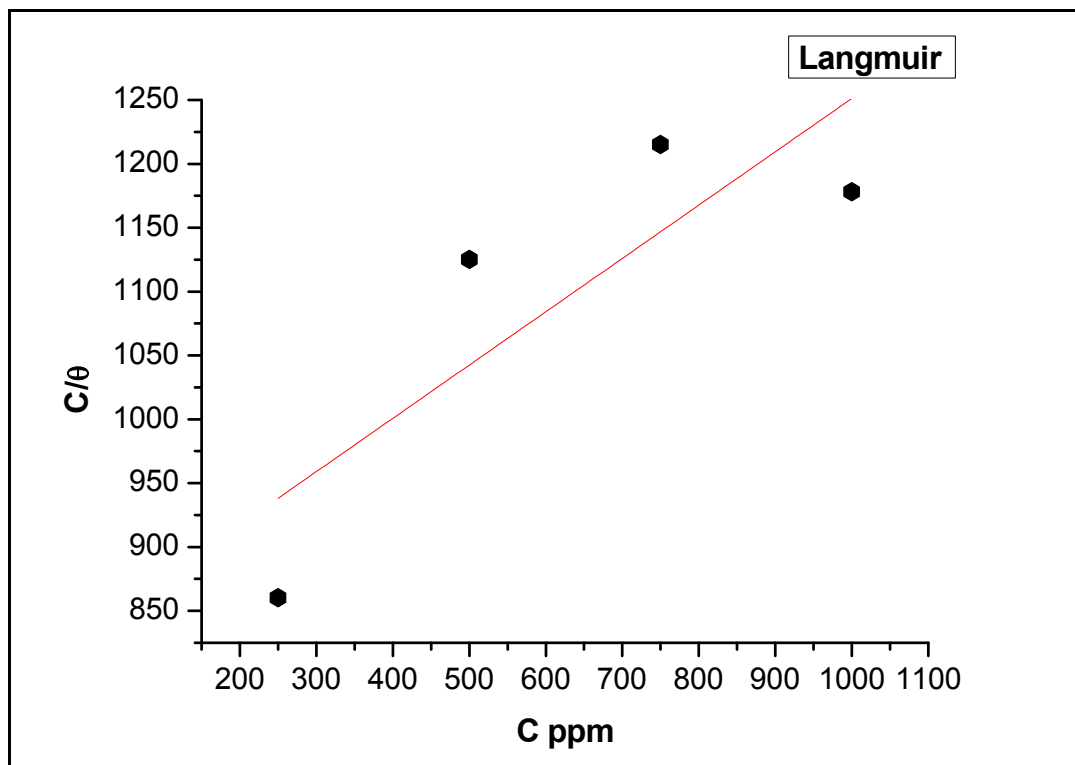


Figure III-16 : Isotherme de Langmuir obtenu à différents concentration en polyphénole dans NaCl 3%.

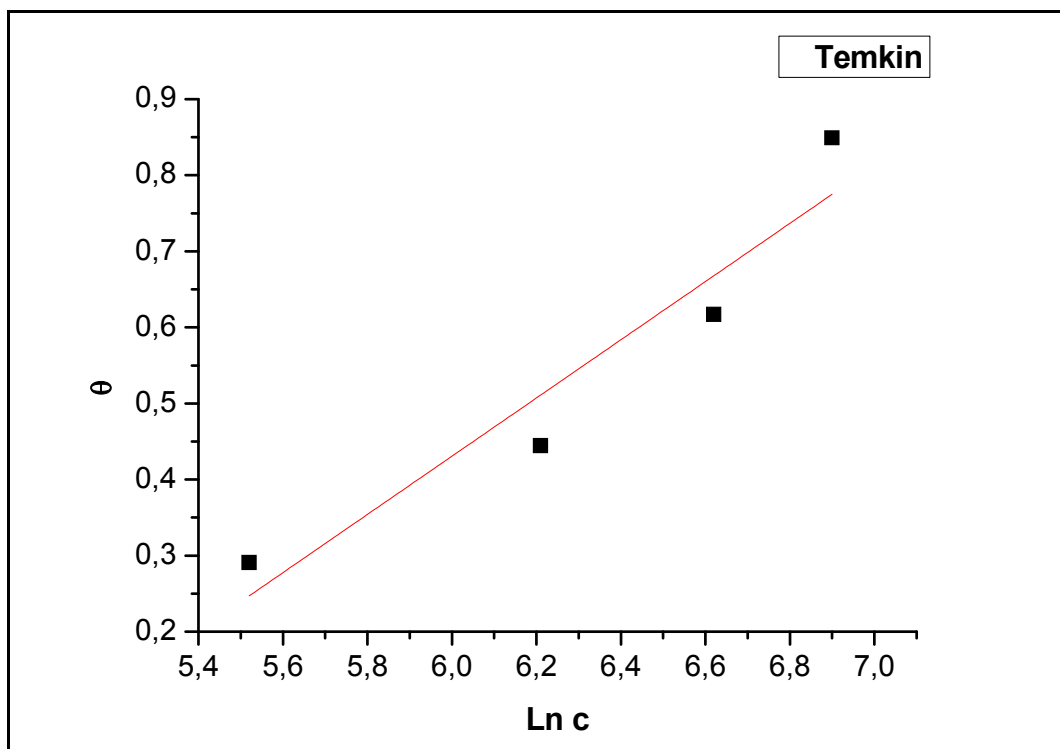


Figure III-17 : Isotherme de Temkin obtenu à différents concentration en polyphénole dans NaCl 3%.

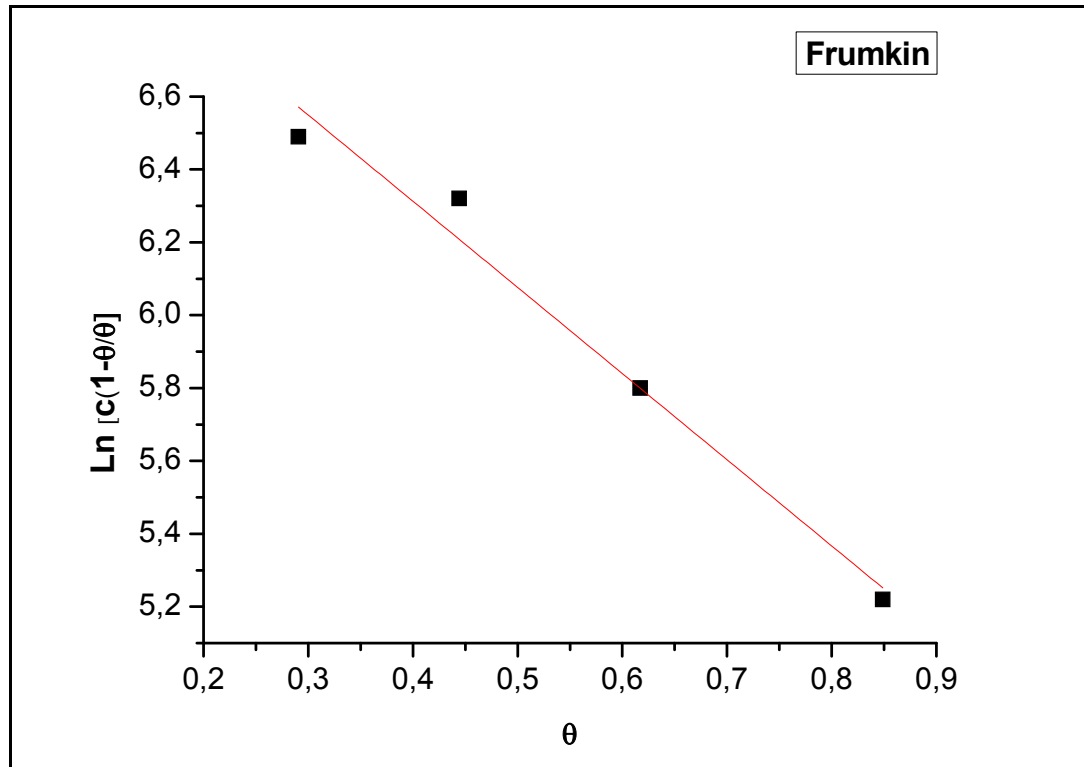


Figure III-18 : Isotherme de Frumkin obtenu à différentes concentrations en polyphénole dans NaCl 3%.

Tableau III-12 : Les valeurs de coefficient de corrélation pour les différentes isothermes (polyphénole).

R ² Inhibiteur	Langmuir	Temkin	Frumkin
Polyphénole	0.70402	0.91668	0,98967

Tableau III-13 : Les paramètres thermodynamiques relatifs à l'adsorption d'inhibiteur polyphénole sur la surface de l'acier au carbone dans NaCl 3% pour le temps immersion (1h).

Paramètres	Pente	Intersection	R ²	K _{ads}	ΔG° _{ads}
Polyphénole	-2,36511	7,6812	0,98967	2167,2	-28,95

➤ **Discussion**

D'après la valeur de l'enthalpie libre d'adsorption ($\Delta G^\circ = -28.95 \text{ KJ.mol}^{-1}$) obtenue à partir de l'équation III.1, nous avons remarqué que la valeur est proche de -20 KJ.mol^{-1} donc l'inhibiteur est physisorbé à la surface du métal [77].

Les valeurs de l'enthalpie standard (ΔH°) et de l'entropie standard (ΔS°) sont respectivement $-19,03 \text{ KJ.mol}^{-1}$ et $0,033 \text{ KJ.mol}^{-1}$ obtenus à partir des équations III.2 et III.3 La réaction d'adsorption de l'huile essentielle sur la surface du métal est exothermique.

III-2 Etude comparative

III-2-1 Comparaison entre les deux inhibiteurs testés dans un milieu NaCl 3% à temps d'immersion 1h

Tableau III-14 : comparaison de la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice entre l'huile et polyphénole en fonction des différentes concentrations d'inhibiteur dans un milieu NaCl 3% pendant 1h.

C (ppm)	$V_{\text{huile}}(\text{g/cm}^2.\text{h})$	$V_{\text{poly}}(\text{g/cm}^2.\text{h})$	$E_{\text{huile}}(\%)$	$E_{\text{poly}}(\%)$
0	0,0061	0,0086	-	-
250	0,0051	0,0061	16,39	29,06
500	0,0037	0,005	39,34	44,44
750	0,0026	0,0031	57,37	61,72
1000	0,0012	0,0013	80,32	84,88

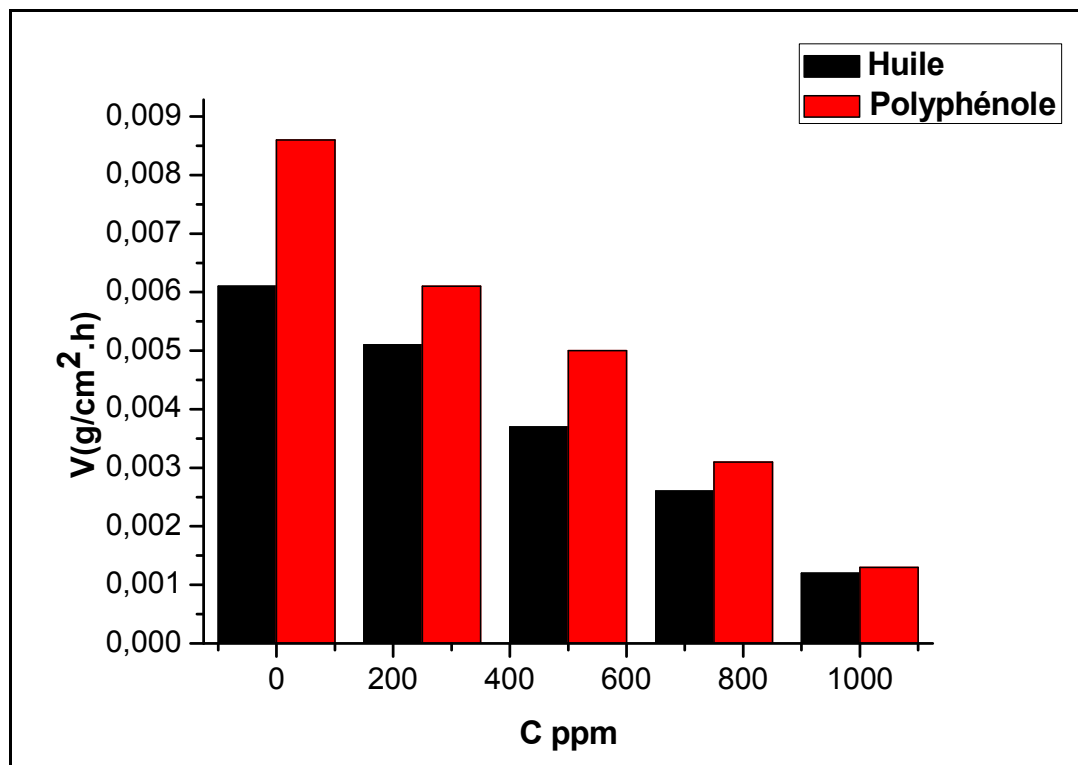


Figure III-19 : histogramme comparatif entre la vitesse de corrosion obtenu par l'huile essentiel et le polyphénole.

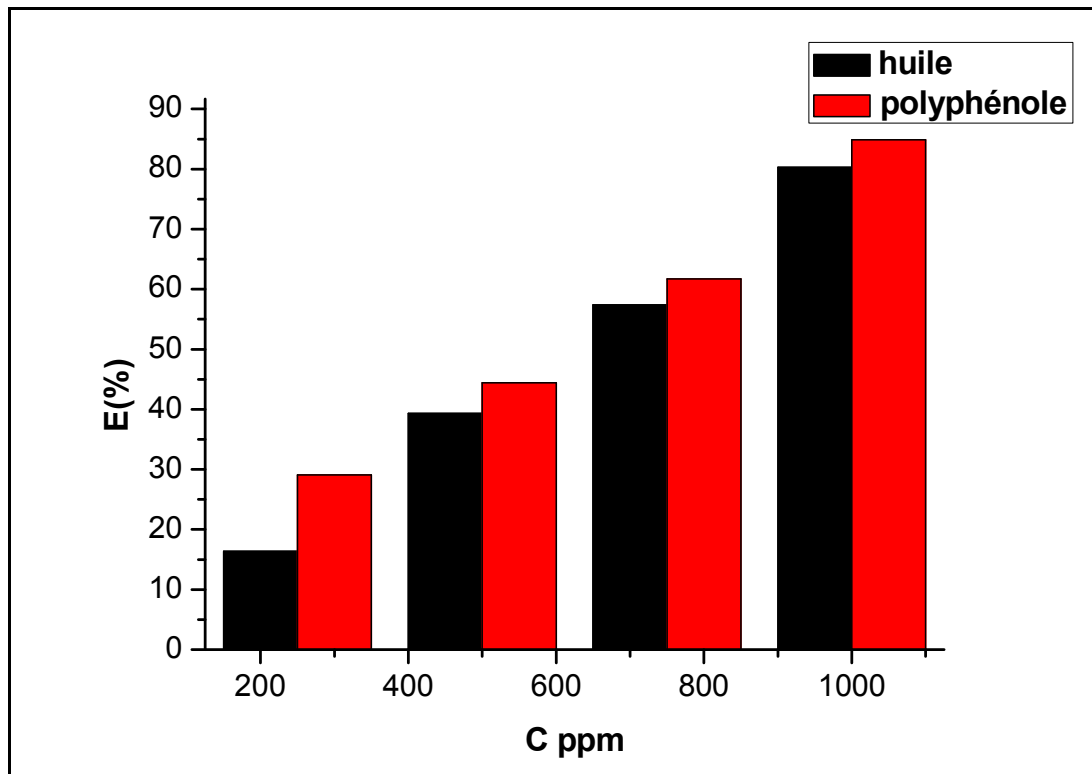


Figure III-20 : histogramme comparatif entre l'efficacité obtenue par l'huile essentiel et le polyphénole.

D'après les deux histogrammes, nous avons remarquées que le polyphénole est mieux efficace que l'huile essentiel, concernant la protection du A106 /A dans l'NaCl 3%.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

L'utilisation de substances inhibitrices de corrosion est largement reconnue comme l'une des méthodes les plus courantes pour protéger contre la corrosion.

En raison des inquiétudes grandissantes concernant l'environnement, les huiles essentielles et les extraits de plantes sont de plus en plus reconnus comme une option privilégiée pour les inhibiteurs de corrosion respectueux de l'environnement. Ces substances sont biodégradables et préservent l'équilibre écologique.

L'objectif principal de ce travail est l'étude de l'action inhibitrice de l'huile essentielle et polyphénole de la plante *Allium triquètre* sur la corrosion de l'acier au carbone A106/A dans milieu NaCl 3%.

Suite à notre investigation nous nous sommes parvenu aux résultats suivants :

- En fonction de la concentration, les efficacités maximales obtenues avec 1000ppm pour chaque inhibiteur sont de 80,32% et 84,88% pour l'huile et polyphénole respectivement.
- En fonction de temps immersion, les efficacités maximales obtenues après 24h d'immersion, sont 90,90% et 93,93% respectivement à l'huile et polyphénole avec la même concentration optimale de 1000ppm.
- Dans le milieu NaCl 3%, l'augmentation de la température favorise la diminution de l'efficacité.
- L'énergie d'activation avec l'inhibiteur est supérieure à l'énergie d'activation sans inhibiteur, sont 20,86 et 13,55 respectivement.
- L'adsorption de l'huile et polyphénole suit le modèle Frumkin.
- L'adsorption de l'huile et de polyphénole, sont spontanées avec des valeurs de l'enthalpie libre standards de $-28,81$ et $-28,95$ respectivement, qui ont induit à un phénomène de physisorption des molécules inhibitrices.
- nous avons remarquées que le polyphénole est mieux efficace que l'huile essentiel, concernant la protection du A106 /A dans l'NaCl 3%.

**Référence
bibliographique**

Référence Bibliographique

- [1] J. Bard, L. Faulkner, *Électrochimie, Principes, méthodes et applications*, Paris, **1983**.
- [2] F. Dabosi, G. Beranger, B. Baroux, livre corrosion localisée page 05.
- [3] site officiel de la NACE : www.NAC-engennering.com.
- [4] F. Ziani, M. Benyahia. « L'inhibition de la corrosion de l'acier au carbone par les huiles essentielles en milieu acide sulfurique ». Mémoire de Master. Université de Saida (Algérie), **2014**.
- [5] I. Khelfaoui. « Etude de l'efficacité d'inhibiteurs de corrosion organique en milieu HCl ». Mémoire de Master. Université de Biskra (Algérie), **2019**.
- [6] Bencheham A., Hamrouni S., *Etude de l'Effet Inhibiteur de corrosion des extraits aqueux de quelques plantes*. Mémoire de Master. Université de Ouargla, Algérie, **2007**.
- [7] Suedile F., *Extraction, caractérisation et étude électrochimique de molécules actives issues de la forêt amazonienne pour la protection du zinc contre la corrosion*, Thèse de Doctorat, Université des Antilles et de la Guyane Institut d'Enseignement Supérieur de la Guyane, France, **2014**.
- [8] Haroune B., Kaim S., *Effet d'un polysavon 80C12 réducteur de frottement hydrodynamique sur le comportement électrochimique de l'acier en milieux agressifs*, Mémoire de fin d'étude, Université A. Mira, Bejaia, **2019**.
- [9] Landolt D., *Corrosion et chimie de surfaces des métaux*, vol. 12 PPUR presses polytechniques, **1997**.
- [10] Col A., Colombié M., *Matériaux métalliques, Phénomènes de Corrosion, 4ième partie. Les différentes formes de corrosion aqueuse*. Dunod, **2010**.
- [11] C. Defontaine, « Mécanismes de corrosion, systèmes de protection et vieillissement accéléré », Journée thématique, **2011**.
- [12] H. BENSABRA, « Cours de Corrosion et Protection des Métaux », Département de Génie des Procédés – Université de Jijel, Algérie, **2016**.
- [13] O. Amel, « effets des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers ordinaires dans deux milieux acides », Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhter, **2019**.
- [14] Etude de l'influence du couplage entre les caractéristiques mécaniques et les sollicitations

Référence Bibliographique

appliquées sur le comportement en fatigue des alliages d'aluminium. - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Corrosion-intergranulaire-de-l'alliage-2024-T351-apres-24-h-d'immersion-dans-une_fig12_326266423 [accessed 4 Jun, **2023**].

- [15] Guillaume VERWAERDE, Alexis LAHUTTE et Hugo WALISSON de l'ENSCL lors d'un projet de laboratoire piloté par Maxime DELBOVE. (Unité Matériaux Et Transformations).
- [16] S. Nariman, «Etude physicochimique de l'inhibition de la corrosion d'un acier au carbone en milieu acide sulfurique », Mémoire de fin d'étude, Université Larbi Tébessi-Tébessa, **2016**.
- [17] K.C. Pillai, R. Narayan, the corrosion of mild steel in 0.01M, 1M and 3M HCl, 22 vol, Great Britain, **1982**.
- [18] 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**.
- [19] Kh. Faiza, «Etude de l'efficacité de deux inhibiteurs de corrosion dans les milieux multiphasiques (Eau, huile et gaz) », Mémoire de fin d'étude, Université M'Hamed Bougara-Boumerdas, **2008**.
- [20] P. BOUMERSBACH, C. DUMONT, J.P. MILLET, "electrochemical characterization of a corrosion inhibitor: influence of temperature on the inhibition mechanism." 207th meeting of the electrochemical society, 15-20 mai 2005, Quebec City (Canada).
- [21] E. S. Ivanov, Inhibitors for Metal Corrosion in Acid Media, Metallurgy, Moscow **1986**.
- [22] D.D.N. Singh, R. S. chadhary, B. Prakash, C. V. Agrawal, Br. Corros. J. 14, 235 **1979**.
- [23] P. Olav Gartland, "Choosing the right positions for corrosion monitoring on oil and gas pipelines", Corr Ocean USA, Paper, Nace, Houston, 1998.
- [24] H. Hamani, Synthèse, caractérisation et étude du pouvoir inhibiteur de nouvelles molécules base de Schiff, Thèse de doctorat, Université de Sétif 1. p.4, **2015**.
- [25] C. Fiaud, C. Lemaitre, N. Pebere, Inhibiteurs de corrosion, In : G. Beranger, H. Mazille, Corrosion et anticorrosion (pratique industrielle), Mécanique et ingénierie des matériaux, Lavoisier, Paris, Hermès Science Publication, **2002**.

Référence Bibliographique

- [26] K. Rahmouni, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie CURIE. Paris VI. Déc2005.
- [27] Cao C., *on electrochemical techniques for interface inhibitor research*, *Corros. Sci.* 38 2073-2082, (1996).
- [28] Landolt D., *Corrosion et Chimie de Surface des Métaux*, 1st Edn, Alden Press, Oxford, 495 (1993).
- [29] I.L. Rozenfeld, *Corrosion Inhibitors*, McGraw-Hill, 1981.
- [30] C.C. Nathan, *Corrosion Inhibitors*, NACE, Houston, 1973.
- [31] S. Locquet, M. Lagrenée, J. Bonnans, F. Bentiss, Patent Wo, 10179, 2002.
- [32] I.N. Putilova., S.A. Balezin, V.P. Barranik, *Metallic Corrosion Inhibitors*, Pergamon, Oxford, 1960.
- [33] A. Zelinski, E. Renaud, Puiggali et Al, *Effects of Tempers on Environmental-Assisted Failure on an Al-Zn-Mg-Cu Alloy*, *Journal of Materials Processing Technology*, 1995.
- [34] Bentiss F., *synthèses et études physicochimiques des inhibiteurs organiques de corrosion en milieu acide*, thèse de Doctorat, Université de Lille, 1999.
- [35] Firas A., Sersa A., *Etude de l'efficacité de deux inhibiteurs de la corrosion d'un acier x70*, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider, Biskra, 2020.
- [36] Aliouali A., *Etude du comportement à la corrosion de l'aluminium dans différents milieu*, thèse de Magister, université de Batna 2, 2017.
- [37] A. E. Etre, «Inhibition of acid corrosion of carbon steel using aqueous extract of olive leaves,» *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 314, p. 578–583, 2007.
- [38] M. Quraishi, A. Singha, D. K. Y. Vinod. Kumar. Singha et A. K. Singh, «Green approach to corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid and sulphuric acid solutions by the extract of *Murraya koenigii* leaves,» *Materials Chemistry and Physics*, vol. 122, pp. 114-122, 2010.
- [39] A. Lecante, F. Robert, M. Lebrini et C. Roos, «Inhibitive Effect of *Siparuna Guianensis* Extracts on the Corrosion of Low Carbon Steel in Acidic Media,» *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 6, pp. 5249-5264, 2011.

Référence Bibliographique

- [40] A.Elmourahidi, Z.Zapata-Benabithe, F.Carrasco-Marín et C.Moreno-Castilla, «Activated carbons from KOH-activation of argan (*Argania spinosa*) seed shells as supercapacitor electrodes» *Bioresource Technology*, vol. 111, pp. 185-190, **2012**.
- [41] P. M. Krishnegowda, T. V. Venkatesha, P. K. M. Krishnegowda et a. S. Shivayogiraju, «*Acalypha torta* Leaf Extract as Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel in Hydrochloric Acid Solution,» *Ind. Eng. Chem. Res*, vol. 52, pp. 722-728, **2013**.
- [42] M.Faustin, A.Maciuk, P.Salvin, C.Roos et M.Lebrini, «Corrosion inhibition of C38 steel by alkaloids extract of *Geissospermum laeve* in 1 M hydrochloric acid: Electrochemical and phytochemical studies,» *Corrosion Science*, vol. 92, pp. 287-300, **2015**.
- [43] S. Umoren, Z. Gasem et I. Obot, «Date palm (*Phoenix dactylifera*) leaf extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for carbon steel in 1M hydrochloric acid solution,» *Anti-Corrosion Methods and Materials*, vol. 62, pp. 19-28, **2015**.
- [44] K. Rose, B.Kim, K.Rajagopal, S.Arumugam et K.Devarayan, «Surface protection of steel in acid medium by *Tabernaemontana divaricata* extract: Physicochemical evidence for adsorption of inhibitor, » *Journal of Molecular Liquids*, vol. 214, pp. 111-116, **2016**.
- [45] A.Ehsani, M.G.Mahjani, M.Hosseini, R.Safari, R.Moshrefi et H. Shiri, «Evaluation of *Thymus vulgaris* plant extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for stainless steel 304 in acidic solution by means of electrochemical impedance spectroscopy, electrochemical noise analysis and density functional theory,» *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 490, pp.444-451, **2017**.
- [46] P. E.Alvarez, M. V. Fiori-Bimbi, A. Neske, S. A.Brandán et C.A.Gervasi, «*Rollinia occidentalis* extract as green corrosion inhibitor for carbon steel in HCl solution,» *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 58, pp. 92-99, **2018**.
- [47] A. Kanu, «Performance Evaluation of Corrosion Inhibitors in Pipelines using *Cannon Amuricata* (CM) and *Cassuttidifilifurmis* Leaf (CF) Plant Extracts,» *Federal University of Technology, Owerri, Thèse de doctorat. , 2018*.
- [48] P.C.Okafor, I. Uwah, O.O.Ekerenam et U.J.Ekpe, «*Combretum bracteosum* extracts as eco- friendly corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium,» *Pigment and Resin Technology*, vol. 38, pp. 236-241, **2009**.
- [49] A.M.Al-Turkustani, S.T.Arab et L.S.S.Al-Qarni, «The use of *Ruta chalepensis* corrosion inhibitor for steel corrosion in 2M sulphuric acid solution, » *Oriental Journal of*

Référence Bibliographique

- Chemistry, vol. 26, pp. 437-454, **2010**.
- [50] I.E.Uwah, P.C.Okafor et V.E.Ebiekpe, «Inhibitive action of ethanol extracts from *Nauclea latifolia* on the corrosion of mild steel in H₂SO₄ solutions and their adsorption characteristics,» *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 6, p. 285293, **2013**.
- [51] N. C. Michael et J. A.Olubunmi, «The corrosion inhibition of mild steel in sulphuric acid solution by flavonoid (catechin) separated from *Nypa fruticans* Wurmb leaves extract,» *Science Journal of Chemistry*, vol. 2, pp. 27-32, **2014**.
- [52] Punita.Mourya, Sitashree.Banerjee et M.M.Singh, «Corrosion inhibition of mild steel in acidic solution by *Tagetes erecta* (Marigold flower) extract as a green inhibitor,» *Corrosion Science*, vol. 85, pp. 352-363, **2014**.
- [53] M.Mehdipour, B.Ramezanzadeh et S.Y.Arman, «Electrochemical noise investigation of Aloe plant extract as green inhibitor on the corrosion of stainless steel in 1 M H₂SO₄,» *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 21, pp. 318-327, **2015**.
- [54] J. Bhawsar, P.K.Jain et P. Jain, «Experimental and computational studies of *Nicotiana tabacum* leaves extract as green corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium,» *Alexandria Engineering Journal*, vol. 54, pp. 769-775, **2015**.
- [55] A. SINGH, «Cassia tora Leaves Extract as Mild Steel Corrosion Inhibitor in Sulphuric Acid Solution, » *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, vol. 2, pp. 698-701, **2016**.
- [56] H. Louis, J. Japari, A. Sadia, M. Philip et A. Bamanga, «Photochemical screening and corrosion inhibition of *Poupartia birrea* back extracts as a potential green inhibitor for mild steel in 0.5 M H₂SO₄ medium,» *World News of Natural Sciences*, vol. 10, pp. 95-100, **2017**.
- [57] S. Akhil, P. Dwarika, H.Rajesh, S. Gurmeet et K. Akshay, «Use of *Sida cordifolia* extract as green corrosion inhibitor for mild steel in 0.5 M H₂SO₄,» *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 6, pp. 694-700, **2018**.
- [58] P.Muthukrishnan, B.Jeyaprabha et P.Prakash, «Adsorption and corrosion inhibiting behavior of *Lanea coromandelica* leaf extract on mild steel corrosion,» *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 10, pp. s2343-s2354, **2017**.
- [59] S. Athmani, S. Abderrahmane, F. Benachour et G. Kardas, «A study of the effect of

Référence Bibliographique

- Agave Americana extract inhibitor on the corrosion of mild steel in 0.5 M H₂SO₄,» Materials research express, vol. 6, pp. 1-16, **2018**.
- [60] G. Gunasekaran et L.Chauhan, «Eco friendly inhibitor for corrosion inhibition of mild steel in phosphoric acid medium, » Electrochimica Acta, vol. 49, pp. 4387-4395, **2004**.
- [61] M.Benabdellah, M.Benkaddour, B.Hammouti, M.Bendahhou et A.Aouniti, «oil, Inhibition of steel corrosion in 2 M H₃PO₄ by artemisia, » Applied Surface Science, vol. 252, pp. 6212- 6217, **2006**.
- [62] M. Bendahou, M. Benabdellah et B. Hammouti, «A study of rosemary oil as a green corrosion inhibitor for steel in 2 M H₃PO₄,» Pigment & Resin Technology, vol. 35, pp. 95-100, **2006**.
- [63] A. A.Rahim, E.Rocca, J.Steinmetz et M. Kassim, «Inhibitive action of mangrove tannins and phosphoric acid on pre-rusted steel via electrochemical methods,» Corrosion Science, vol. 50, pp. 1546-1550, **2008**.
- [64] M. Sivaraju et K. Kannan, «Eco-friendly inhibitor (Tributes terrestris L) for mild steel corrosion in 1N Phosphoric acid,» Asian Journal of Chemistry, vol. 22, pp. 233-244, **2010**.
- [65] M.Sivaraju et K. Kannan, «Inhibitive properties of plant extract (Acalypha indica L.) On mild steel corrosion in 1N Phosphoric acid, » International Journal of ChemTech Research, vol. 2, pp. 1243-1253, **2010**.
- [66] L. Xianghong, D. Shuduan, F. Hui et X. Xiaoguang, «Synergistic inhibition effects of bamboo leaf extract/major components and iodide ion on the corrosion of steel in H₃PO₄ solution,» Corrosion Science, vol. 78, pp. 29-42, **2014**.
- [67] A. E. bribri, H. E. attari, M. SINIT et M. Tabyaoui, «Temperature effects on the corrosion inhibition of carbon steel in 1N H₃PO₄ solution by methanolic extract of Euphorbia Falcata.L.,» Journal of Chemistry, vol. 3, pp. 286-297, **2015**.
- [68] N. Gunavathy et S.C.Murugavel, «Thermodynamic Properties and Inhibitor Adsorption Behaviour of Musa acuminata Flower Extract on Mild Steel in Phosphate Environment,» Chemical Science Review and Letters, vol. 4, pp. 711-718, **2015**.
- [69] A. Ehteram, A. E. Moubaraki, A. A. Zahrani et M. Hubani, «Testing and Comparing the Inhibitory Action of Red Onion Seeds and Peels Extracts on the Corrosion of Steel in

Référence Bibliographique

- Phosphoric Acid,» International Journal of Electrochemical science, vol. 11, pp. 6523-6539, **2016**.
- [70] W.Belmaghraoui, A. Mazkour, M. Harir et S. ElHajjaji, «Investigation of corrosion inhibition of C38 steel in 5.5 M H₃PO₄ solution using Ziziphus lotus oil extract: an application model,» Anti-Corrosion Methods and Materials, pp. 1-6, **2018**.
- [71] A. A. Moubaraki, «otential of borage flowers aqueous extract, Borago officinalis L., against the corrosion of mild steel in phosphoric acid,» Anti-Corrosion Methods and Materials, vol. 65, pp. 53-65, **2018**.
- [72] M. HIMED Hayat, « Etude des activités antioxydante et antibactérienne des polyphénols d'Allium triquetrum L. en vue de leur application sur la sardine commune », Mémoire de Master. Université Mentouri de Constantine, **2015**.
- [73] Tehranchian, P., “Biological control of an Australian noxious weed «Angled Onion» (Allium triquetrum L.) using Molecular and Traditional Approaches”, Thèse de Doctorat, Biotechnology & Biosciences Discipline, School of Applied Sciences, RMIT University, Australia, **2011**, 4-17.
- [74] Epifano, F., Genovese, S., Menghini, L., Curini M., “Chemistry and pharmacology of oxyprenylated secondary plant metabolites”, Phytochemistry, vol. 68, **2007**, 939-958.
- [75] Corea, G., Fattorusso E., Lanzotti V., “Saponins and flavonoids of Allium triquetrum”, Journal of natural products, vol. 66, **2003**, 1405-1411.
- [76] Cronquist, A., “An integrated system of classification of flowering plants”. Columbia University Press, New York, **1981**.
- [77] Dob K., Etude électrochimique de l'efficacité inhibitrice de substances vertes sur la corrosion de l'acier au carbone dans un milieu aqueux, Thèse de Doctorat, Université 20 août 1955, Skikda, **2018**.
- [78] Yadav, M. kumar, S. Tiwari, N. Bahadur, I. Ebenso, E.E., “Experimental and quantum chemical studies of synthesized triazine derivatives as an efficient corrosion inhibitor for N80 steel in acidic medium”, Journal of Molecular Liquids, vol. 212, pp 151-167. **2015**.
- [79] Ben Hmamou, D.Salghi, R. Zarrouk, A. Zarrouk, H. Touzani, R. Hammouti, B. El Assry, A.(2015) ,”Investigation of corrosion inhibition of carbon steel in 0.5 M H₂SO₄ by new bipyrazole derivative using experimental and theoretical approaches”, Journal of

Référence Bibliographique

Environmental Chemical Engineering , vol.3 No. 3, pp. 2031-2041.

[80] O.Radovico, proc. 7th th European Symposium on Corrosion Inhibitors, Ann. Univ. Ferrara,Italy, **1990** p.330.

[81] J. Marsh, Advanced Organic Chemistry, 3 Edition, Wiley Eastern, New Delhi, **1988**.

[82] S. Martinez, I. Stern, Thermodynamic characterization of metal dissolution and inhibitor adsorption processes in the low carbon steel/mimosa tannin/sulfuric acid system, Applied Surface Science, Volume 199, ssues 1-4, 30 October **2002**, pages 83-89.