



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الشاذلي بن جديد - الطارف
Université Chadli Bendjedid – El Tarf

كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الكيمياء
Département de Chimie

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences de la matière

Filière : Chimie

Spécialité : Chimie Analytique

Thème

**Etude de l'effet inhibiteur de la plante
Taraxacum officinalis (pissenlit) sur la
corrosion d'un acier ordinaire dans un
milieu acide**

Présenté par :
Lalaymia Imen

Devant le Jury :

Pr. BENRABAA Rafik

Dr. BOUASLA Nabila

Dr. ATHMANI Sameh

Dr. ZERNIZ Nawel

Pr. ABDERRAHMANE Sihem

Pr

MCB

MCB

MCB

Pr

Univ. Chadli Bendjedid El Tarf

Univ. Chadli Bendjedid El Tarf

CRAPC-Annaba

Univ. Chadli Bendjedid El Tarf

Univ. Annaba

Président

Rapporteur

Co-encadreur

Examinatrice

Membre invité

Année Universitaire 2021-2022

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

Pour mes parents, puissant-ils le chérir.

En espérant recevoir les fruits de leurs sacrifices.

Mon père

Tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que je te porte, ni la profonde gratitude que je te témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que tu n'as cessé de consentir pour mon instruction et mon bien-être. Tu m'as enseigné la droiture, le respect et la conscience du devoir. Puisse Dieu, le tout puissant, te procurer santé, bonheur et longue vie...

Ma mère

L'école de la vie qui m'a enseigné mes premiers pas. Maman, je ne connais pas une personne aussi adorable, tendre que toi, tu as été toujours à mes côtés comme un ange guidant mes pas à chaque moment de ma vie, me couvrant de ta tendresse et de ton amour éternel. Tes prières m'ont été d'une aide précieuse et m'ont permis d'atteindre le but désiré. Que Dieu tout-puissant vous donne la santé et la longue vie pour que je puisse accomplir à mon tour...

✻ Que Dieux me les protègent ✻

*A tous mes frères **Billel, Zin-Eddine et Karim**, à mes sœurs **Karima, Linda** et à **Imene** la femme de mon frère, que Dieu le tout puissant, vous garde et vous procure santé, bonheur et longue vie.*

*Une pensée à la mémoire de notre cher et regretté mon frère **Chafik Lalaymia**. Puisse Dieu le Tout Puissant accorder au défunt Sa sainte Miséricorde et l'accueillir en Son Vaste Paradis.*

*A ma copine **ZEGGARI Amina** qui je partage avec elle ma vie universitaire.*

*A mes professeurs Qui m'ont enseigné depuis ma première scolarité. Trouvez
ici l'expression de mes respects et mon éternelle reconnaissance.
À tous ceux qui ont pris place dans mon cœur, mes amis, mes collègues et toute
ma promotion en chimie analytique Que tous vos rêves soient exaucés et la
réussite comble votre vie.*

M^{lle}. LALAYMIA Imen

Remerciements

Je tiens à remercier avant tous, le bon Dieu qui m'a donné la force et la patience tout au long de ce travail de recherche scientifique.

Je tiens à remercier Professeur ABDERRAHMANE Sihem, la directrice du laboratoire d'Ingénierie des Surfaces (L.I.S) à l'Université Badji Mokhtar-ANNABA, pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire. Je la remercie aussi pour ses conseils au cours de la réalisation de ce travail.

Je remercie infiniment mon encadreur Dr. BOUASLA Nabila pour son assistance précieuse, ses conseils et ses encouragements, pendant la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à adresser mes plus vifs remerciements à mon Co-encadreur Dr. ATHMANI Samah du Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico-chimiques (CRAPC) pour son aide et sa disponibilité.

Je tiens à témoigner ma reconnaissance au Pr. BENRABAA Rafik, pour avoir accepté de présider mon jury de projet de fin d'étude.

Je remercie Madame ZERNIZ Nawel pour avoir accepté d'examiner mon travail de projet de fin d'étude.

Je tiens à remercier M^{lle} MOUSSAOUI Kamilia Doctorante à l'Université Badji Mokhtar-ANNABA pour son aide et ses conseils.

Je remercie également l'équipe de laboratoire d'ingénierie des surfaces à l'université Badji Mokhtar-ANNABA, sans oublier les enseignants du département de chimie de l'université Chadli Bendjedid-Eltarf.

Je tiens à remercier également les enseignants du département de chimie.

Enfin j'adresse mes remerciements les plus sincères à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.

الغرض من هذا العمل هو دراسة الطاقة المثبطة لمستخلص أوراق نبات الهندباء الذي تم تحضيره عن طريق النقع، على تآكل الفولاذ العادي X70 في محلول حمض كلور الهيدروجين، وذلك باستخدام طريقة فقدان الكتلة والطرق الكهروكيميائية. تم استخدام المجهر الضوئي لوصف حالة سطح الفولاذ في محلول حمض كلور الهيدروجين ذو تركيز 1 مول / ل، في غياب وجود مستخلص أوراق نبات الهندباء. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن الكفاءات القصوى عند 4% (حجم / حجم) هي 93.49% و 63.08% و 71.82%، وفقاً لفقدان الكتلة والتحليل الطيفي للمقاومة الكهروكيميائية والاستقطاب الديناميكي على التوالي.

الكلمات المفتاحية: التآكل، الفولاذ العادي X70، المثبط، الهندباء، حمض كلور الهيدروجين.

Résumé

Le but de ce travail est l'étude du pouvoir inhibiteur de l'extrait des feuilles de la plante *Taraxacum officinalis* (E.T.O) préparé par macération, sur la corrosion de l'acier ordinaire X70 en milieu acide chlorhydrique, en utilisant la perte de masse et des méthodes électrochimiques. Le microscope optique (MO) a été utilisé pour caractériser l'état de la surface de l'acier dans HCl à 1M, en l'absence et en présence de l'E.T.O. Les résultats obtenus montrent que les efficacités maximales à 4% (V/V) sont 93,49%, 63,08% et 71,82%, respectivement selon la perte de masse, la spectroscopie d'impédance électrochimique et la potentiodynamique.

Mots clés : corrosion, acier ordinaire X70, inhibiteur, *Taraxacum officinalis*, acide chlorhydrique.

Abstract

The aim of this work is the study of the inhibitory power of the leaves extract of the plant *Taraxacum officinalis* (E.T.O) prepared by maceration, on the corrosion of ordinary steel X70 in hydrochloric acid medium, using the mass loss and electrochemical methods. The optical microscope (OM) was used to characterize the surface condition of the steel in 1M HCl, in the absence and presence of E.T.O. The results obtained show that the maximum efficiencies at 4% (V/V) are 93.49%, 63.08% and 71.82%, according to mass loss, electrochemical impedance spectroscopy and potentiodynamics respectively.

Key words: corrosion, ordinary steel X70, inhibitor, *Taraxacum officinalis*, hydrochloric acid.

Abréviations

pH	Potentiel d'Hydrogène
API	American Petroleum Institute
Psi	Pound per square inch
V_{corr}	Vitesse de corrosion
E (%)	Efficacité inhibitrice
S.I.E	Spectroscopie d'Impédance Electrochimique
E.T.O	Extrait de Taraxacum Officinalis
Inh	Inhibiteur
FTIR	Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier
MO	Microscope Optique
C_{inh}	Concentration d'inhibiteur
CEE	Circuit Electrique Equivalent
Re	Résistance de l'électrolyte
C_{dl}	Capacité de la double couche
R_{ct}	Résistance de transfert de charge
n	Facteur d'homogénéité
E_{corr}	Potentiel de corrosion
i_{corr}	Densité de courant de corrosion
ba	Branche anodique
bc	Branche cathodique
DRX	Diffraction des rayons X
MEB	Microscopie électronique à balayage
AFM	Microscopie à force atomique

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure I.1	Plante Origanum Compactum Benth.	9
Figure I.2	Plante Allium Jesdianum.	9
Figure I.3	Plante Paederia Foetida.	9
Figure I.4	Plante jack fruit pectin (JP).	9
Figure I.5	Plante Garcinia livingstonei.	10
Figure I.6	Plante Allamanda cathartica.	10
Figure I.7	Plante Lavandula mairei.	10
Figure I.8	Plante origanum compactum.	10
Figure I.9	Plante Thaumtococcus daniellii.	10
Figure I.10	Plante Amorphophallus paeoniifolius.	11
Figure I.11	Plante Chamomile.	11
Figure I.12	Le pissenlit (<i>Taraxacum officinalis</i>).	12
Figure II.1	Feuilles de taraxacum officinalis avant (A) et après séchage (B).	13
Figure II.2	Moulinette électrique.	14
Figure II.3	Matériels utilisés pour la macération.	16
Figure II.4	Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel.	18
Figure II.5	Acier X70.	19
Figure II.6	Polisseuse et papier abrasif.	20
Figure II.7	L'acier X70 avant (A) et après le polissage (B).	20
Figure II.8	Matériels utilisées pour les essais de la perte de masse.	21
Figure II.9	Chaîne de corrosion.	22
Figure II.10	Electrode de travail.	22
Figure II.11	Spectroscopie FTIR.	23
Figure II.12	Microscope optique.	23
Figure III.1	Composés présents dans les feuilles de <i>Taraxacum officinalis</i> .	24
Figure III.2	Test des alcaloïdes (a) avant (b) après.	25

Figure III.3	Test des flavonoïdes (a) avant (b) après.	25
Figure III.4	Test des saponines (a) avant (b) après.	25
Figure III.5	Test des huiles volatiles (a) avant (b) après.	25
Figure III.6	Test des tanins (a) avant (b) après.	25
Figure III.7	Test des anthocyanes (a) avant (b) après.	26
Figure III.8	Test des phénols (a) avant (b) après.	26
Figure III.9	Test des quinones (a) avant (b) après.	26
Figure III.10	Test des cardénolides (a) avant (b) après.	26
Figure III.11	Variation de la vitesse de corrosion de l'acier ordinaire X70 en fonction de différentes concentrations de l'E.T.O après 5h d'immersions dans HCl à 1M.	28
Figure III.12	Variation de l'efficacité inhibitrice de l'acier ordinaire X70 après 5h d'immersion dans HCl à 1M en fonction de différentes concentrations de l'E.T.O.	29
Figure III.13	Variation de la vitesse de corrosion de l'acier ordinaire X70 après 24h d'immersions dans HCl à 1M en absence et en présence de différentes concentrations de l'E.T.O.	29
Figure III.14	Variation de l'efficacité inhibitrice de l'acier ordinaire X70 après 24h d'immersion dans HCl à 1M en absence et en présence de différentes concentrations de l'E.T.O.	30
Figure III.15	Diagrammes d'impédance électrochimique de l'acier ordinaire X70 dans HCl à 1M en absence et en présence de l'E.T.O à différentes concentrations.	31
Figure III.16	Circuit électrique équivalent de l'acier X70 dans HCl à 1M en absence et en présence de l'E.T.O à différentes concentrations.	31
Figure III.17	Courbes de polarisation de l'acier ordinaire X70 dans HCl à 1M en absence et en présence de l'E.T.O à différentes concentrations.	33
Figure III.18	Spectre FTIR de l'E.T.O.	34
Figure III.19	Micrographie de l'acier ordinaire X70 en absence d'inhibiteur après immersion pendant 24h.	35
Figure III.20	Micrographie de l'acier ordinaire X70 en présence de 4% (V/V) d'inhibiteur après immersion de 24h.	35

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau I.1	Principaux facteurs de corrosion.	4
Tableau I.2	Extraits de feuilles utilisés comme inhibiteurs de corrosion des aciers dans différents milieux électrolytiques.	9
Tableau II.1	Composition chimique de l'acier X70.	19
Tableau III.1	Résultats de screening phytochimiques des feuilles de <i>Taraxacum officinalis</i> .	25
Tableau III.2	Vitesses de corrosion de l'acier ordinaire X70 dans HCl à 1M, après 05h et 24h d'immersion en absence et en présence de l'E.T.O.	27
Tableau III.3	Paramètres électrochimiques déduits des diagrammes de Nyquist de l'acier ordinaire X70 dans 1M HCl en absence et en présence de l'E.T.O à différentes concentrations et efficacités inhibitrices calculées.	32
Tableau III.4	Paramètres électrochimiques déduits des courbes de polarisation de l'acier ordinaire X70 dans HCl à 1M en absence et en présence de l'E.T.O à différentes concentrations et efficacités inhibitrices calculées.	34

Sommaire

Dédicace	II
Remerciements	IV
Résumé	V
ملخص	V
Abstract	V
Abréviations	VI
Liste des figures	VII
Liste des tableaux	IX
Sommaire	X
Introduction	1

Chapitre I :

Aperçu Bibliographique

I.1. La corrosion	2
I.1.1. Définition	2
I.1.2. Les modes de corrosion	2
I.1.2.1. La corrosion chimique (corrosion sèche)	2
I.1.2.2. La corrosion biochimique	2
I.1.2.3. La corrosion électrochimique (corrosion humide)	2
I.1.3. Les formes de la corrosion	2
I.1.3.1. La Corrosion uniforme	2
I.1.3.2. La Corrosion localisée	3
I.1.4. Facteurs de corrosion	3
I.1.5. La lutte contre la corrosion	4
I.1.5.1. Protection par inhibiteur	5
I.1.5.2. Les inhibiteurs verts	5
1. Inhibiteurs verts organiques	5
2. Inhibiteurs verts inorganiques (minéraux)	6

I.2. Les aciers	6
I.2.1. Définition	6
I.2.2. Les caractéristiques des aciers	6
I.2.3. Les aciers ordinaires	7
I.2.4. Les aciers X70	7
I.2.4.1. Nomenclature de l'acier X70	7
I.2.5. Corrosion des aciers	7
I.2.6. Inhibition de corrosion des aciers par les extraits de plantes	8
I.3. Le pissenlit	11

Chapitre II :

Partie Expérimentale

II.1. Introduction	13
II.2. Matériel végétal	13
II.2.1. Préparation de la plante	13
II.3. Produits chimiques	14
II.4. Screening phytochimique de taraxacum officinalis	14
II.4.1. Test des alcaloïdes	14
II.4.2. Test des flavonoïdes	14
II.4.3. Test des saponines	14
II.4.4. Test des huiles volatiles	15
II.4.5. Test des tanins	15
II.4.6. Test des anthocyanes	15
II.4.7. Test des phénols	15
II.4.8. Test des quinones	15
II.4.9. Test des cardénolides	16
II.5. Préparation de l'extrait de la plante	16
II.6. Méthodes d'étude de la corrosion de l'acier X70 dans un milieu acide	16
II.6.1. La perte de masse	16
II.6.2. Méthodes électrochimiques	17

II.6.2.1. La spectroscopie d'impédance électrochimique (S.I.E)	17
II.6.2.2. Courbes de polarisation potentiodynamique (Tafel)	18
II.7. Procédures Expérimentales	19
II.7.1. Conditions expérimentales	19
II.7.1.1. Milieu corrosif, matériau et inhibiteur d'étude	19
II.7.1.2 Préparation de la surface	19
II.7.1.3. Essais de perte de masse	20
II.7.1.4. Essais électrochimiques	21
II.8.Méthodes de Caractérisations	22
II.8.1. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)	22
II.8.2. Le microscope optique	23

Chapitre III :

Résultats et Discussion

III.1. Résultats phytochimiques	24
III.2. Etude de l'effet inhibiteur de l'E.T.O par la méthode de la perte de masse	27
III.3. Etudes électrochimiques	30
III.3.1. Spectroscopie d'impédance électrochimique (S.I.E)	30
III.3.2. Courbes de polarisation potentiodynamique	32
III.4. Caractérisations	34
III.4.1. Caractérisations de l'E.T.O par FTIR	34
III.4.2. Caractérisation de l'acier X70 par microscope optique.....	35
Conclusion	37
Références Bibliographiques	39

Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La corrosion est la dégradation des matériaux causée par des interactions physico-chimiques avec leur environnement, qui se traduit par une modification des caractéristiques du métal, laquelle est fréquemment suivie d'une dégradation fonctionnelle de ce dernier (altération de ses propriétés mécaniques, électriques, ...etc.).

L'acier ordinaire est l'un des matériaux les plus utilisés dans les pipelines (transport de pétrole et de gaz), les infrastructures (bâtiments et ponts) et les tubages de fond de puits, en raison de son faible coût, de ses caractéristiques mécaniques importantes et de sa facilité de mise en œuvre [1, 2]. A cet effet il est soumis à différents degrés de corrosion dans ses environnements d'application.

L'utilisation d'inhibiteurs de corrosion est la solution la plus recommandée, pour assurer la protection de l'acier ordinaire et ses alliages. Cependant un grand nombre de ces inhibiteurs sont dangereux tant pour l'homme que pour l'environnement.

Afin de résoudre ce problème, l'orientation vers les huiles essentielles et les extraits de plantes, considérés comme une source d'inhibiteurs de corrosion verts, est devenue une véritable alternative [3-5].

Dans ce travail de master, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'effet inhibiteur de l'extrait des feuilles de la plante *Taraxacum officinalis* (pissenlit) contre la corrosion de l'acier ordinaire X70 dans une solution HCl à 1M en utilisant des méthodes électrochimiques et la méthode de perte de masse.

Ce mémoire de master constitue d'une introduction, de trois chapitres et une conclusion.

- ✓ **Le premier chapitre** est consacré à un aperçu bibliographique sur la corrosion, les aciers, les inhibiteurs verts, les inhibiteurs verts de corrosion utilisés pour la protection des aciers dans différents milieux et une description de l'inhibiteur utilisé dans notre étude qui est la plante *Taraxacum officinalis* (pissenlit).
- ✓ **Le deuxième chapitre** présente l'ensemble des techniques et les conditions expérimentales de cette étude, ainsi que les méthodes de caractérisation utilisées.
- ✓ **Le troisième chapitre** présente une discussion des résultats expérimentaux obtenus.

Enfin, une conclusion rassemble les résultats les plus importants et les perspectives de cette étude.

Chapitre I. Aperçu Bibliographique

I.1. La corrosion

I.1.1. Définition

La corrosion est un processus destructeur inéluctable et désagréable, qui endommage irréversiblement les métaux et les alliages par des réactions chimiques et électrochimiques avec l'environnement [6,7]. De nombreux métaux et alliages utilisés dans diverses activités humaines, sont soumis à des mécanismes de corrosion distincts en raison de leur sensibilité aux divers environnements agressifs [8].

I.1.2. Les modes de corrosion

I.1.2.1. La corrosion chimique (corrosion sèche)

La corrosion chimique correspond à la réaction du matériau métallique avec une phase gazeuse ou une phase liquide [9]. Dans le premier cas on parle de corrosion sèche et il se forme un dépôt solide plus ou moins protecteur. Pour la corrosion liquide, on peut citer l'exemple de la réaction d'un métal avec un autre métal liquide, comme lors de la formation d'un amalgame entre le mercure liquide et des métaux tels que le cuivre, le cadmium,...etc.

I.1.2.2. La corrosion biochimique

C'est l'attaque bactérienne des métaux en particulier dans les canalisations enterrées. Le mécanisme de ce mode de corrosion peut être de plusieurs types [10].

I.1.2.3. La corrosion électrochimique (corrosion humide)

La corrosion électrochimique se produit en milieu humide, c'est-à-dire lorsque l'humidité relative excède 60%. Ces environnements sont neutres, acides ou alcalins [11].

I.1.3. Les formes de la corrosion

I.1.3.1. La Corrosion uniforme

Cette catégorie de corrosion se produit lorsqu'une surface métallique se corrode à la même vitesse. Lorsqu'un métal est placé dans un milieu corrosif, les sites oxydants (zones anodiques) se déplacent vers des positions différentes jusqu'à ce que toute la surface métallique soit anodique en même temps [12].

I.1.3.2. La Corrosion localisée

a. Corrosion par érosion

Elle désigne la corrosion provoquée par une vitesse relative élevée entre un environnement corrosif et la surface métallique. Elle a lieu souvent, sur des métaux exposés à un écoulement d'un fluide (air, eau,... etc.) [13].

b. Corrosion par piqûres

Elle représente une attaque très localisée sur la surface, résultant de trous qui pourraient s'étendre pour creuser à l'intérieur d'un métal [14].

c. Corrosion inter-granulaire

L'intra-microstructure d'un métal se compose de grains. Ces grains sont séparés par des limites. La corrosion inter-granulaire peut être définie comme une attaque localisée survenue entre ces limites ou à proximité [15].

d. Corrosion galvanique

Ce type de corrosion s'est produit lorsque deux métaux dissemblables existent dans un certain électrolyte de corrosion, l'un d'eux est noble par rapport à l'autre. La corrosion galvanique dépend des potentiels standards des métaux existants disposés dans la série galvanique [16].

e. La corrosion caverneuse

La corrosion caverneuse est principalement produite par un manque de circulation d'oxygène dans les composants d'une structure métallique donnée, ce qui entraîne la formation d'une pile électrochimique. Le métal est sélectivement attaqué au niveau des fissures et autres zones mal oxygénées. La corrosion caverneuse peut être provoquée par la présence d'un fluide corrosif dans de petites cavités [17].

I.1.4. Facteurs de corrosion

Les facteurs importants qui peuvent avoir un impact sur le processus de corrosion sont résumés dans le **tableau I.1**.

Chapitre I. Aperçu Bibliographique

Tableau I.1. Principaux facteurs de corrosion [18].

Facteurs relatifs au milieu et définissant le mode d'attaque	Concentration du réactif. Teneur en oxygène, en impuretés, en gaz dissous. Acidité du milieu, salinité, température, pression. Présence de bactéries.
Facteurs métallurgiques	Composition de l'alliage, hétérogénéités cristallines. Impuretés dans l'alliage, inclusions. Traitements thermiques, mécaniques. Additions protectrices.
Facteurs définissant les conditions d'emploi	Etat de surface, défaut de fabrication. Emploi d'inhibiteurs. Croûtes d'oxydes superficielles. Force électromotrice extérieure (électrolyte).
Facteurs dépendant du temps	Vieillessement. Température. Modalité d'accès de l'oxygène ou autres gaz dissous. Application d'un dépôt (calcaire ou autre).

I.1.5. La lutte contre la corrosion

La prévention de la corrosion doit être envisagée dès la phase de conception d'une installation. En effet, des mesures préventives prises au bon moment, permettent d'éviter de nombreux problèmes lorsqu'il s'agit de garantir une certaine durée de vie à un objet, notamment pour des industries telles que : le nucléaire, l'industrie chimique ou l'aéronautique, où les risques d'accident peuvent avoir des conséquences particulièrement graves pour les personnes et l'environnement.

La lutte contre la corrosion englobe plusieurs méthodes [19] :

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

I.1.5.1. Protection par inhibiteur

Le mot « inhiber » est dérivé du latin **inhibere** qui signifie arrêté retenir. Le mot « inhibition » est employé en chimie et en corrosion depuis 1907 [20].

En général, un inhibiteur de corrosion est une substance solide ou liquide qui diminue la corrosivité des milieux agressifs et la vitesse de dissolution des métaux lorsqu'elle est ajoutée en quantité appropriée dans un environnement corrosif [21]. En fonction de leur nature chimique, les inhibiteurs peuvent être divisés en groupes organiques et inorganiques [22].

L'action des inhibiteurs de corrosion peut être décrite de plusieurs façons. Le principe actif de la molécule inhibitrice peut former un film protecteur ou une couche d'inhibiteur adsorbée à la surface de l'acier, stoppant ainsi l'effet des ions agressifs du milieu ; tamponner le pH dans les sites de corrosion ; ou encore réduire l'effet de l'oxygène dissous dans la solution aqueuse.

I.1.5.2. Les inhibiteurs verts

Le terme « inhibiteur vert » ou « inhibiteur écologique » désigne les substances qui ont une biocompatibilité dans la nature [23].

Généralement, les inhibiteurs verts sont d'excellents inhibiteurs dans divers environnements corrosifs pour la plupart des métaux. La non-toxicité et la biodégradabilité sont les principaux avantages pour ces inhibiteurs. Cependant, ils ont des limites de performance. Les inhibiteurs de corrosion verts sont biodégradables et ne contiennent pas de métaux lourds ou d'autres composés toxiques [24]. C'est pourquoi, aujourd'hui, l'attention des chercheurs s'est portée sur l'utilisation d'inhibiteurs verts [25].

Les produits ou des substances tels que les extraits de plantes, les acides aminés, les médicaments, les composés de métaux de terres rares, les tensioactifs, liquides ioniques, etc. sont considérés comme des inhibiteurs de corrosion verts [26].

Les inhibiteurs verts peuvent être regroupés en deux catégories :

1. Inhibiteurs verts organiques

Les inhibiteurs verts organiques sont les flavonoïdes, les alcaloïdes et d'autres produits naturels obtenus à partir de sources naturelles comme les plantes [27]. Il comprend également des composés synthétiques dont la toxicité est négligeable.

Les extraits de plantes sont des sources riches en composés organiques naturels tels que les composés poly-phénoliques, les glucides, les alcaloïdes, les flavonoïdes, les acides aminés et les protéines, y compris les groupes fonctionnels polaires avec des atomes de N, O ou S, les groupes non polaires tels que les cycles aromatiques, les chaînes aliphatiques, les cycles hétérocycliques et les groupes fonctionnels qui agissent comme les principaux sites d'adsorption

[28]. Ces composés peuvent s'adsorber sur la surface du métal et l'isoler des milieux corrosifs, ce qui a pour effet de diminuer l'attaque par la corrosion [29].

La plupart des composés extraits de plantes, sont principalement utilisés comme inhibiteurs de corrosion et dans les produits pharmaceutiques et les biocarburants [30]. L'utilisation de substances naturelles est intéressante vu que celles-ci sont biodégradables, écologiques, peu onéreuses et sont abondantes.

2. Inhibiteurs verts inorganiques (minéraux)

Les molécules minérales se dissocient en solution, les anions et cations assurent en fait l'inhibition. Les chromates, les molybdates, les silicates, les phosphates sont les plus importants inhibiteurs minéraux. Actuellement, l'emploi de la plupart de ces produits est réglementé, car ils créent des problèmes pour l'environnement. Ces inhibiteurs minéraux sont utilisés le plus souvent en milieu proche de la neutralité, voire en milieu alcalin, et plus rarement en milieu acide [31].

I.2. Les aciers

I.2.1. Définition

L'acier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone, dans des proportions comprises entre 0,02% et 2% en masse pour le carbone. C'est essentiellement la teneur en carbone qui confère à l'alliage, les propriétés du métal qu'on appelle « acier ». Il existe d'autres métaux à base de fer qui ne sont pas des aciers comme les fontes et les ferro-alliages par exemple [32].

I.2.2. Les caractéristiques des aciers

L'acier de par ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques occupe une place importante dans l'industrie des métaux ferreux. Il est utilisé pour la fabrication des pipelines (gazoducs et oléoducs) pour acheminer des quantités importantes d'hydrocarbures sur de longues distances depuis leurs gisements vers les zones de consommation et de transformation.

L'acier est un alliage essentiellement composé de fer, sa densité varie donc autour de celle du fer (7,32 à 7,86), suivant sa composition chimique et ses traitements thermiques. Les autres propriétés varient énormément en fonction de leur composition, du traitement thermomécanique et des traitements de surface auxquels ils ont été soumis [33].

I.2.3. Les aciers ordinaires

L'acier ordinaire a de nombreuses applications dans les activités industrielles en raison d'attributs importants tels que sa disponibilité, son faible coût et ses importantes capacités mécaniques [34-36]. Parmi ces applications figure le processus de nettoyage à l'acide, en particulier avec des acides forts tels que HCl, H₂SO₄, HNO₃ et H₃PO₄ ; il s'agit d'une application industrielle populaire dans le monde entier, basée sur des opérations de nettoyage, de décalaminage et de décapage [37-43]. Le principal problème des structures métalliques des aciers ordinaires est leur mauvaise performance dans les solutions acides, ce qui facilite les attaques de corrosion et est suivi du coût exorbitant du dépannage ou du remplacement [44]. En général, l'utilisation de ces acides (en particulier l'acide chlorhydrique) dans ces opérations est directement liée à l'utilisation d'un inhibiteur de corrosion pour réduire la vitesse de corrosion de l'acier ordinaire [45,46].

I.2.4. Les aciers X70

Les aciers de type X70 présentent une microstructure de type ferritoperlitique. Ils sont faiblement alliés à plus basse teneur en carbone (0,12% C). L'acier X70 possède une grande ductilité et bonne ténacité, ce qui convient pour les pipelines [47].

I.2.4.1. Nomenclature de l'acier X70

L'acier répond à la spécification imposée par la norme API (American Petroleum Institute).

- X70 signifie : le grade de l'acier. Les autres grades sont, par exemple, A, B, X60.
- Le chiffre 70 signifie : 70000 psis, c'est la limite élastique de l'acier en psi « pound per square inch » (livre par pouce carré) [48].

I.2.5. Corrosion des aciers

Le phénomène de corrosion des aciers est un phénomène naturel et artificiel déclaré par leur utilisation et l'exploitation de ces métaux. Dans les secteurs de l'industrie et de la métallurgie (automobile, construction, etc.), la surface des tôles en acier est revêtue afin de les protéger contre les attaques de corrosion qui surviennent, par exemple, pendant le stockage des tôles ou sur des véhicules (pluie, sels de déneigement...) [49].

La corrosion des métaux est due à une réaction d'oxydo-réduction irréversible entre le métal et un agent oxydant contenu dans l'environnement. L'oxydation du métal implique la réduction de l'agent oxydant [50].



La corrosion du fer est la résultante d'un processus qui peut être schématisé par l'équation suivante :







Cette équation signifie simplement que les atomes du métal (Fe) sous l'action d'un Processus de corrosion se transforment en ions positifs (Fe^{2+}) qui quittent le métal pour passer dans le milieu [51].

I.2.6. Inhibition de la corrosion des aciers par les extraits de plantes






Certaines études ont utilisé des inhibiteurs de corrosion verts pour l'acier ordinaire dans des solutions acides et ont montré un excellent effet inhibiteur, contribuant à réduire considérablement la toxicité de leurs homologues non verts [52-57]. Plusieurs autres extraits de feuilles ont été étudiés comme inhibiteurs de corrosion, dont certains les énumérer dans le **tableau I.2.**



Chapitre I. Aperçu Bibliographique

Tableau I.2. Extraits de feuilles utilisés comme inhibiteurs de corrosion des aciers dans différents milieux électrolytiques.

Source de l'inhibiteur	Photo	Le milieu	L'efficacité	Remarque	Référence
Extrait d'Organum Compactum Benth (fleurs, feuilles et tige)	 <p>Figure I.1. Plante Organum Compactum Benth</p>	HCl 1 M	Une efficacité de 92% obtenue à une concentration de 0.4 g/L.	Un inhibiteur mixte	[58]
Extrait d'Allium Jesdianum	 <p>Figure I.2. Plante Allium Jesdianum</p>	HCl 1 M	Une efficacité de 96.18% obtenue à une concentration de 800 ppm.	Un inhibiteur mixte	[59]
Extrait de feuilles de Paederia Foetida	 <p>Figure I.3. Plante Paederia Foetida</p>	HCl 1 M	Une efficacité de 73.77% obtenue lors de l'utilisation de Paederia Foetida.	-	[60]
Extrait de jack fruit pectin (JP)	 <p>Figure I.4. Plante jack fruit pectin (JP)</p>	HCl 0.5 M	Une efficacité de 89.75% obtenue à une concentration de 1000 ppm.	Un inhibiteur mixte	[61]

Chapitre I. Aperçu Bibliographique

Extrait de feuilles de <i>Garcinia livingstonei</i>	 Figure I.5. Plante <i>Garcinia livingstonei</i>	HCl 1 M	Une efficacité de 95.23% obtenue à une concentration de 4.0 g/L.	Un inhibiteur mixte	[62]
Extrait de feuilles d' <i>Allamanda cathartica</i>	 Figure I.6. Plante <i>Allamanda cathartica</i>	H ₂ SO ₄ 1 M	Une efficacité de 72.54% obtenue à une concentration de 1.0% (V/V).	Un inhibiteur mixte	[63]
Extrait de <i>Lavandula mairei</i>	 Figure I.7. Plante <i>Lavandula mairei</i>	HCl 1 M	Une efficacité de 92% obtenue à une concentration de 0.4 g/L.	-	[64]
Huile essentielle d' <i>origanum compactum</i>	 Figure I.8. Plante <i>origanum compactum</i>	HCl 1 M	Une efficacité de 90% obtenue à une concentration de 1.0 g/L.	Un inhibiteur mixte	[65]
Extrait de feuilles de <i>Thaumatococcus daniellii</i>	 Figure I.9. Plante <i>Thaumatococcus daniellii</i>	HCl 1 M	Une efficacité de 82% obtenue à une concentration de 10 ⁴ ppm.	-	[66]

Extrait de feuilles d'Amorphophallus paeoniifolius	 Figure I.10. Plante Amorphophallus paeoniifolius	HCl 1 M	Une efficacité de 98%.	Un inhibiteur mixte	[67]
Extrait de fleurs de Chamomile	 Figure I.11. Plante Chamomile	HCl	Une efficacité de 92.49% obtenue à une concentration de 10% (V/V).	Un inhibiteur mixte	[68]

I.3. Le pissenlit

Le pissenlit (**figure I.12**) est une plante herbacée vivace, de la famille des Composées ou Astéracées du genre *Taraxacum* (elle ne produit pas de tige et les feuilles émergent d'un seul bourgeon situé au niveau du sol). Cette plante est médicinale, son nom vient de deux mots grecs qui signifient « remède à tous les maux ». Elle porte plusieurs noms : florion d'or, laitue des chiens (Terre-Neuve), pissenlit (Québec), pisse-au-lit, couronne de moine, salade de taupe. Il est également connu sous le nom de dent-de-lion, lié à la forme incurvée de ses feuilles. Originaire d'Europe, d'Asie, d'Amérique et d'Afrique. Le nom botanique du pissenlit est *Taraxacum officinalis*.

Le pissenlit est devenu une plante nuisible tenace des jardins et des fermes. Cependant, les abeilles raffolent du nectar produit par ses fleurs et le miel du pissenlit est très apprécié pour sa forte richesse en vitamines et oligo-éléments. Une grande partie de la plante est comestible. Les feuilles sont l'une des sources les plus connues de cuivre et sont riches en vitamines A, C et D, en fer, manganèse, phosphore, calcium, potassium, en acides gras ou en antioxydants. Les propriétés médicinales du pissenlit sont intéressantes, il a été utilisé comme diurétique et comme remède contre les maladies du foie, l'anémie, l'eczéma et pour stimuler la digestion. Il est largement utilisé pour ses puissantes vertus cholérétiques et cholagogues ainsi que comme purifiant et diurétique [69-71].



Figure I.12. Le pissenlit (*Taraxacum officinalis*).

➤ Composants principaux de la plante

Les composants du pissenlit sont [72] :

- Fructose.
- Inuline.
- Lactones sesquiterpéniques autrefois appelées “taraxacine”.
- Germacranolides : glucopyranosides, acide taraxinique, acide dihydrotaraxinique, taraxacoside.
- Eudesmanolides : tétrahydroridentine B, taraxacolide-glucopyranoside.
- Alcools triterpéniques pentacycliques : taraxastérol = alpha-lactucérol, pseudotaraxastérol = isolactucérol, arnidiol, faradiol, bêta-amyrine, cycloarténol.
- Flavonoïdes : lutéoloside, cosmosioside, glucosides d’apigénine, de quercétol, lutéoline-rutinoside.
- Stérols : sitostérol, stigmastérol, (taraxastérol et pseudotaraxastérol).
- Acides phénoliques : acide caféique, acide p-coumarique, acide férulique, acide protocatéchique, acide para-hydroxyphénylacétique, acide para-hydroxybenzoïque, acide cichorique, isomères de l’acide caffeoylquinique.
- Coumarines : scopolétol, esculétol, ombelliférone.
- Bêta-fructofuranosidases (productrices de fructo-oligosaccharides).
- Potassium (4,5% dans la plante entière, 2,5% dans la racine).
- Vitamine C et bêta-carotène dans les feuilles.

Chapitre II. Partie Expérimentale

II.1. Introduction

Ce chapitre décrit le matériel, les méthodologies et les paramètres expérimentaux utilisés pour réaliser le screening phytochimique et étudier le phénomène de corrosion d'un acier ordinaire (X70) dans un milieu acide.

Pour étudier la corrosion de l'acier X70, un suivi de la perte de masse dans le temps et des méthodes électrochimiques ont été utilisés.

Le microscope optique a été utilisé pour identifier le film adsorbé sur la surface de l'acier X70. Les groupes fonctionnels de l'inhibiteur vert ont été identifiés par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR).

II.2. Matériel végétal

II.2.1. Préparation de la plante

La plante pissenlit (*Taraxacum officinalis*) a été récoltée de l'université Badji Mokhtar-Annaba (Campus Sidi Amar) en février 2020. Les feuilles fraîches de cette plante ont été séchées dans un endroit sombre (**figure II.1**) à une température ambiante pendant d'un mois, ensuite elles ont été passées au broyage à l'aide d'une moulinette électrique (**figure II.2**), jusqu'à obtention d'une poudre. La poudre a été scellée dans une bouteille en verre teinté pour la préserver de la lumière, de l'humidité et de la chaleur.



Figure II.1. Feuilles de *Taraxacum officinalis* avant (A) et après séchage (B).



Figure II.2. Moulinette électrique.

II.3. Produits chimiques

Les produits chimiques utilisés dans cette étude proviennent des sociétés, Biochem Chemopharma, VWR International S.A.S, Rankem, et Aldrich.

II.4. Screening phytochimique de *taraxacum officinalis*

Le screening phytochimique est une méthode d'analyse qualitative des composés organiques naturelles des plantes. Ce terme (screening, c'est-à-dire une suite de nombreux essais) désigne une technique de criblage qui consiste à rechercher systématiquement des produits naturels tel que : les alcaloïdes, les saponines, les flavonoïdes, les quinones, contenus dans les plantes.

II.4.1. Test des alcaloïdes

Pour tester la présence des alcaloïdes dans les feuilles de *Taraxacum officinalis*, nous avons fait macérer 1g de la poudre de feuilles dans 10mL de HCl à 5% V/V pendant 15 minutes. Le mélange a ensuite été filtré, et quelques gouttes de réactif de Mayer ont été ajoutées au filtrat. La présence d'alcaloïdes est mise en évidence par un changement de couleur.

II.4.2. Test des flavonoïdes

Pour établir la présence ou l'absence de flavonoïdes dans les feuilles de *Taraxacum officinalis*, nous avons fait macérer 10g de la poudre de feuilles dans 150mL de HCl à 1% V/V. Après 24 heures, nous avons filtré le mélange et ajouté quelques gouttes de NaOH à 1M au filtrat. La présence de flavonoïdes est mise en évidence par la création d'une portion jaune clair sur la moitié supérieure du tube.

II.4.3. Test des saponines

Pour effectuer le test de saponine, nous avons placé 20mL d'eau distillée dans un bécher de 80mL, ajouté 1g de la poudre de feuilles, et laissé le mélange bouillir pendant 5 minutes. Après avoir filtré sur papier filtre, nous avons ajouté 10mL d'eau distillée au filtrat. Puis nous avons remué le mélange et l'avons laissé reposer pendant 30 minutes. La création d'une mousse dans la moitié supérieure du tube indique la présence de saponines.

II.4.4. Test des huiles volatiles

Pour effectuer le test des huiles volatiles, nous avons fait macérer 10g de la poudre de feuilles de *Taraxacum officinalis* dans 40mL d'eau distillée. Après 30 minutes d'agitation, nous avons filtré l'extrait, puis versé 2mL du filtrat dans un tube à essai et ajouté 0,1mL de NaOH et HCl dilués. La présence d'huiles volatiles est indiquée par la formation d'un précipité blanc.

II.4.5. Test des tanins

Le test du tanin s'est effectué comme suit : nous avons placé 10g de la poudre de feuilles dans 100mL de méthanol. Après 15 minutes, nous avons filtré la solution et ajouté quelques gouttes de FeCl₃ à 1% g/v. La présence de tanins est indiquée par le changement de couleur en vert bleu.

II.4.6. Test des anthocyanes

Pour tester la présence ou l'absence des anthocyanes, nous avons ajouté 5g de la poudre de feuilles de *Taraxacum officinalis* à 100mL d'eau bouillante. Après 15 minutes, nous avons filtré la solution et ajouté quelques gouttes de NaOH au filtrat. La présence d'anthocyanes est mise en évidence par un changement de couleur.

II.4.7. Test des phénols

Pour tester la présence ou l'absence de phénols dans les feuilles de *Taraxacum officinalis*, nous avons traité l'extrait méthanolique de cette plante, avec 3 à 4 du chlorure ferrique à une concentration de 2% g/v. La présence des phénols est indiquée par la création d'une couleur noire bleutée.

Nous avons préparé l'extrait méthanolique comme suit : nous avons mis 1g de feuilles de *Taraxacum officinalis* en poudre dans un bécher avec 100mL de méthanol. La solution obtenue est filtrée avec du papier filtre, après un temps d'agitation de 24 heures.

II.4.8. Test des quinones

Le test des quinones s'effectue de la manière suivante : on place dans un bécher 1g de la poudre de feuilles de *Taraxacum officinalis* et 30mL d'éther de pétrole. Ce mélange est agité pendant 24 heures avant d'être filtré. Le filtrat a ensuite été placé dans le rotavapor pour éliminer le solvant. Enfin, nous avons ajouté quelques gouttes de NaOH à 1M à la solution extraite. La présence de quinones est indiquée par un changement de couleur (jaune, rouge ou violet).

II.4.9. Test des cardénolides

Afin de tester la présence ou l'absence des cardénolides dans les feuilles de *Taraxacum officinalis*, nous avons fait macérer 1g de poudre de feuilles dans 20mL pendant 3 heures. Après nous avons recueilli 10mL du filtrat et l'avons mélangé avec 5mL de chloroforme et 5mL d'éthanol, puis nous avons séparé les phases organiques et aqueuses avec une ampoule à décanter. A l'aide d'un rotavapor, nous avons évaporé la phase organique, jusqu'à l'obtention d'un précipité. Ce dernier a ensuite été dissous dans 3mL d'acide acétique glacial. Enfin, nous avons ajouté quelques gouttes de FeCl_3 à 1% g/v et 1mL de H_2SO_4 . On obtient une couleur bleu vert s'il y a des cardénolides.

II.5. Préparation de l'extrait de la plante

L'extraction a été effectuée en utilisant la méthode de macération. Pour cela, 5g de poudre de la plante *Taraxacum officinalis* a été placée dans un bécher avec 500mL de HCl 1M. La solution obtenue a été agitée magnétiquement à température ambiante pendant 48 heures. Après filtration, le filtrat a été conservé dans un flacon à l'abri de la lumière.

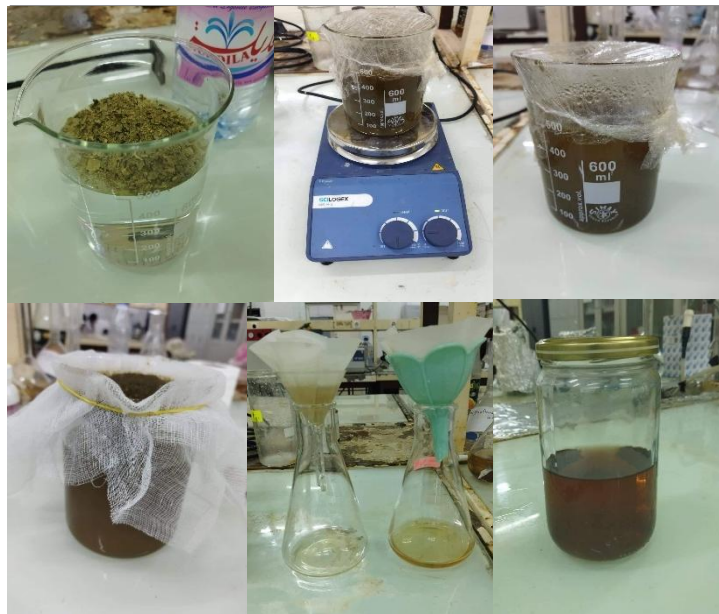


Figure II.3. Matériels utilisés pour la macération.

II.6. Méthodes d'étude de la corrosion de l'acier X70 dans un milieu acide

II.6.1. La perte de masse

La méthode de perte de masse consiste à exposer des échantillons de surface S à un milieu corrosif à une température constante pendant un temps déterminé t , et à mesurer la différence de masse des échantillons avant et après chaque essai [73].

Pour étudier la perte de masse, des coupons d'aciers polis, rincés, pesés avec précision et noté (m_1) ont été immergés dans la solution d'essai corrosive contenant différentes concentrations

d'inhibiteur utilisé. Après un certain temps d'immersion, les coupons seront retirés du milieu corrosif, lavés, séchés, puis repesés et noté (m_2). La perte de masses a été calculée en soustrayant le poids de l'échantillon avant et après l'immersion [61].

$$\Delta m = m_1 - m_2 \quad (1)$$

À partir de la perte de masse, la vitesse de corrosion (V_{corr}) a été calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$V_{corr} = \frac{\Delta m}{S.t} \quad (2)$$

Avec :

V_{corr} : la vitesse de corrosion en $g/h.m^2$.

Δm : représente la différence entre la masse initiale m_1 et la masse finale m_2 après un temps t en gramme.

S : la surface de la pièce en m^2 .

t : le temps d'immersion en heures.

Et par conséquent l'efficacité d'inhibition (%) est calculée par l'équation suivante :

$$E (\%) = \frac{V_{SI} - V_{AI}}{V_{SI}} \quad (3)$$

Avec :

$E (\%)$: l'efficacité inhibitrice.

V_{AI} : la vitesse de corrosion avec inhibiteur.

V_{SI} : la vitesse de corrosion sans inhibiteur.

II.6.2. Méthodes électrochimiques

Les méthodes électrochimiques utilisées permettant l'étude de phénomène de corrosion peuvent être divisées en deux catégories :

II.6.2.1. La spectroscopie d'impédance électrochimique (S.I.E)

La spectroscopie d'impédance électrochimique est une méthode non stationnaire (transitoire), consiste à mesurer la réponse de l'électrode face à une modulation sinusoïdale de faible amplitude du potentiel, en fonction de la fréquence. On peut superposer une telle modulation à un potentiel anodique ou cathodique imposé ou potentiel de corrosion. Une alternative consiste à moduler le courant et mesurer le potentiel.

L'analyse de la réponse du système conduit à disséquer les étapes élémentaires intervenant dans le processus électrochimique global. Précisément dans le domaine de la corrosion, la S.I.E présente plusieurs avantages :

- Permet la détermination précise de la vitesse de corrosion, même dans le cas où le métal est recouvert d'une couche protectrice.
- Permet l'évaluation du taux d'inhibition, la caractérisation des différents phénomènes de corrosion (dissolution, passivation, piqûration,...) et l'étude des mécanismes réactionnels à l'interface électrochimique [74].

II.6.2.2. Courbes de polarisation potentiodynamique (Tafel)

La courbe de polarisation potentiodynamique de l'interface métal-solution est une caractéristique fondamentale de la cinétique électrochimique. Pour déterminer une courbe de polarisation potentiodynamique, on applique à l'aide d'un potentiostat, différents potentiels entre l'électrode de travail et une électrode de référence. On mesure le courant stationnaire qui s'établit après un certain temps dans le circuit électrique entre cette électrode de travail et une contre-électrode. Cette méthode permet de déterminer d'une façon précise les paramètres électrochimiques d'un métal au contact de l'électrolyte à savoir : courant de corrosion (I_{corr}), le potentiel de corrosion (E_{corr}), les pentes de Tafel, les résistances de polarisations (R_p), elle donne des mesures rapides et sa mise en œuvre est relativement simple. La détermination de la vitesse de corrosion à partir des courbes de polarisation est étroitement liée à la cinétique régissant le processus électrochimique [75].

Pour déterminer expérimentalement les paramètres électrochimiques (I_{corr} , E_{corr}) une présentation logarithmique de la densité de courant est en général préférable, car elle met en évidence la relation linéaire entre le logarithme de la densité de courant et le potentiel (**figure II.4**).

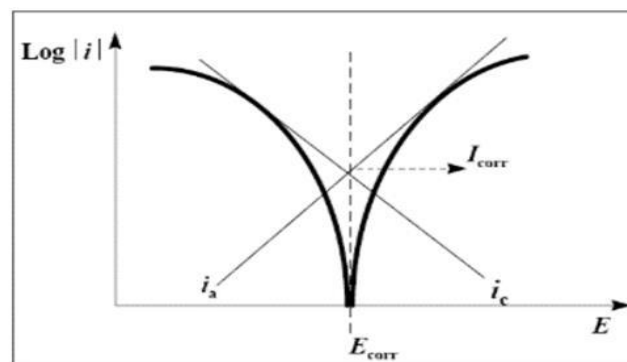


Figure II.4. Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel.

II.7. Procédures Expérimentales

II.7.1. Conditions expérimentales

II.7.1.1. Milieu corrosif, matériau et inhibiteur d'étude

Le **tableau II.1** indique la composition du matériau utilisé dans cette étude, qui est l'acier ordinaire X70 (**figure II.5**). La solution corrosive est une solution de chlorure d'hydrogène (HCl à 1M). L'inhibiteur de corrosion est un extrait de macération de la plante *Taraxacum officinalis* (E.T.O) (liquide vert).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0,078	0,28	1,854	0,016	0,007	0,032	0,019
Mo	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V
0,004	0,031	0,003	0,027	0,074	0,007	0,004

Tableau II.1. Composition chimique de l'acier X70.



Figure II.5. Acier X70.

II.7.1.2 Préparation de la surface

L'acier a été découpé en plusieurs coupons rectangulaires et poli mécaniquement sur une polisseuse à papier émeri de granulométries 120, 180, 320, 600, 800, 1000, 1200 et 1200/4000 (**figure II.6**). Avant chaque essai d'immersion, les échantillons ont été polis, rincés avec de l'eau distillée, nettoyés avec de l'acétone, rincés à nouveau avec de l'eau distillée, séchés avec un papier absorbant et un séchoir électrique à froid, et finalement pesés.



Figure II.6. Polisseuse et papier abrasif.

II.7.1.3. Essais de perte de masse

Les mesures de perte de masse ont été effectuées dans HCl 1M après 5 et 24 heures d'immersion en l'absence et en présence de diverses concentrations d'E.T.O [5h : 2, 3 et 4% (V/V)] [24 h : 1 à 5% (V/V)]. Nous avons utilisé des pièces d'acier ordinaire (X70) avec des surfaces variables. Après la préparation de la surface de ces pièces (**figure II.7**), elles ont été pesées avec une balance analytique à quatre chiffres décimaux et immergées dans le milieu corrosif. Après chaque temps d'immersion, les pièces ont été récupérées, lavées à l'eau distillée pour éliminer les produits de corrosion de la surface de l'acier, séchées et repesés (**figure II.8**).

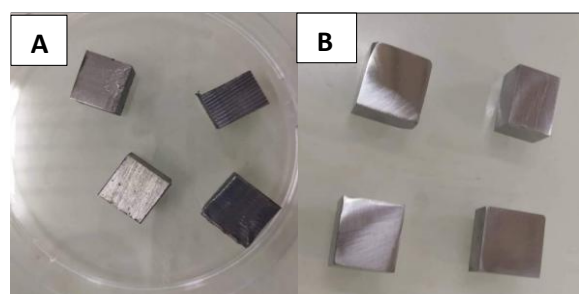


Figure II.7. L'acier X70 avant (A) et après le polissage (B).

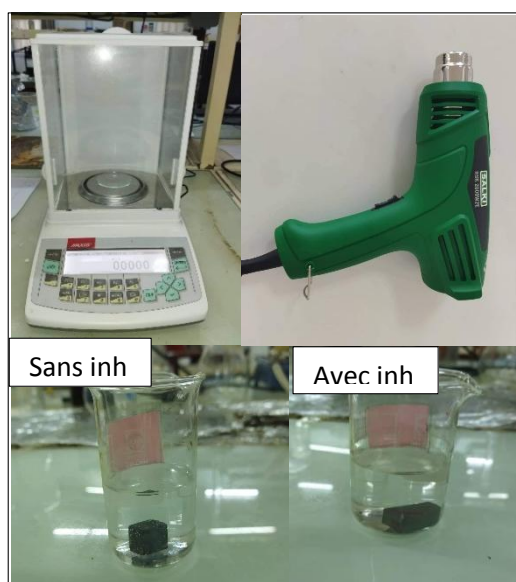


Figure II.8. Matériels utilisés pour les essais de la perte de masse.

II.7.1.4. Essais électrochimiques

L'étude électrochimique a été réalisée à l'aide d'un Potentiostat/Galvanostat de type biologic SP-150 (**figure II.9**), associé au logiciel EC-LAB, relié à une cellule électrochimique constituée de trois électrodes : une électrode de travail en acier ordinaire X70 (**figure II.10**), enrobée d'une résine époxy avec une surface de contact de 1cm^2 , une électrode de référence (Ag/AgCl) saturée au calomel (KCl 3M) et une électrode auxiliaire en platine à fil. Les concentrations utilisées sont 1, 2, 3,4 et 5% (V/V). Toutes les expériences ont été réalisées à une température de 25°C , dans un volume de 100mL de la solution corrosive.

Avant chaque essai électrochimique, l'électrode de travail est poli avec du papier abrasif de différentes granulométries : 120, 180, 320, 600, 800, 1000, 1200 et 1200/4000, puis rincée à l'eau distillée, nettoyée avec l'acétone, rincée à nouveau avec l'eau distillée, et enfin elle est séchée avec un séchoir à froid et immergée dans la solution corrosive pendant 24 heures.

Pour les mesures d'impédance électrochimique, le balayage a été effectué, des hautes fréquences (HF) (100kHz) aux basses fréquences (BF) (10mHz) avec une perturbation sinusoïdale de 5mV par décade.

Les mesures potentiodynamiques, ont été effectuées dans un intervalle de potentiel de $\pm 0,250\text{V}$ avec une vitesse de balayage de $0,5\text{mV/s}$.

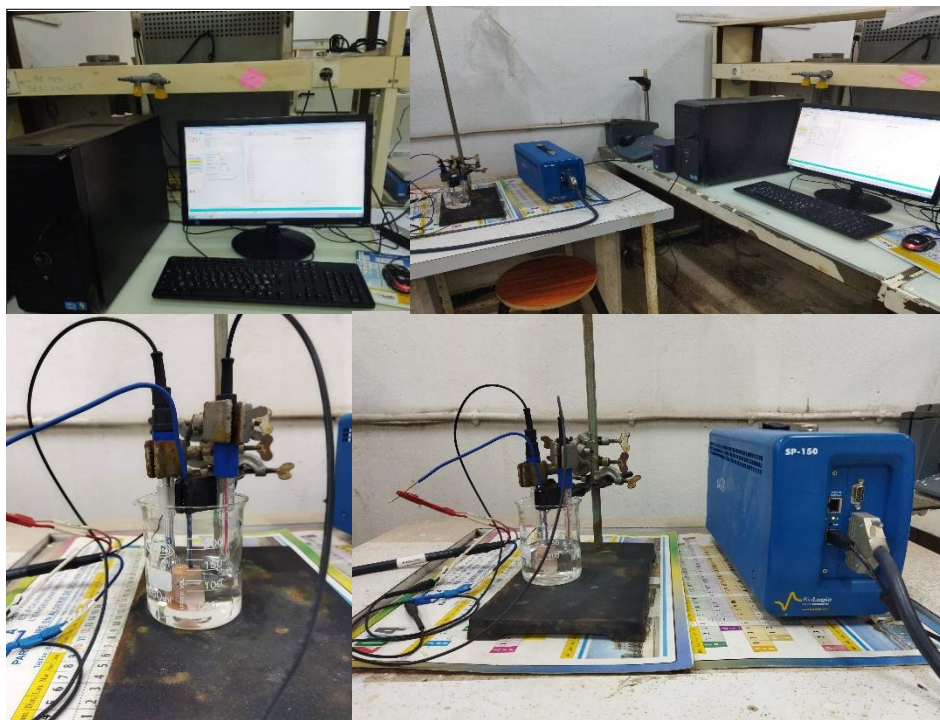


Figure II.9. Chaîne de corrosion.

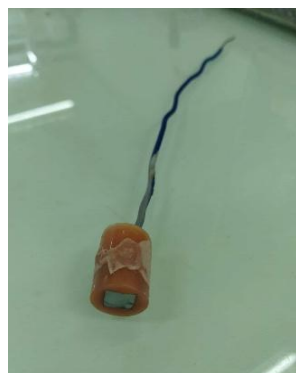


Figure II.10. Electrode de travail.

II.8. Méthodes de caractérisations

II.8.1. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier est une technique d'analyse basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Elle permet via la détection de certaines vibrations de déterminer les fonctions chimiques présentes dans le matériau. Lorsque l'énergie apportée par le faisceau lumineux est voisine de l'énergie de vibration de la molécule, cette dernière va absorber le rayonnement et on enregistrera une diminution de l'intensité réfléchi ou transmise. Le domaine IR entre 4000 et 400cm^{-1} correspond au domaine d'énergie de vibrations des molécules [76].

Dans cette étude la caractérisation de l'E.T.O est effectuée à l'aide d'un spectromètre FTIR de type PerkinElmer (**figure II.11**).



Figure II.11. Spectroscopie FTIR.

II.8.2. Le microscope optique

Le microscope optique nous permet d'observer des échantillons invisibles à l'œil humain ou difficilement observables. Il se base sur les lentilles pour obtenir une image agrandie de ces échantillons.

Le microscope optique possède donc deux lentilles. La première : l'objectif, sert à grossir l'image et fonctionne comme une lentille convergente. La deuxième : l'oculaire, sert à former une image qui ne nécessite pas d'effort pour l'œil humain [77].

Dans notre étude pour effectuer une observation en microscopie, nous avons utilisé un microscope optique de type Nikon LV150 N (**figure II.12**). Pour cela les échantillons ont été polis avec la polisseuse aux papiers abrasifs de 600 et 1200/4000, puis ils sont immergés dans la solution corrosive de HCl à 1M, en absence et en présence de l'E.T.O à 4% (V/V) pendant 24h.



Figure II.12. Microscope optique.

Chapitre III. Résultats et discussions

III.1. Résultats phytochimiques

Les constituants phytochimiques présents dans les feuilles de la plante *Taraxacum officinalis* ont été évalués par des tests qualitatifs standards.

Le screening phytochimique a été effectué à l'aide de réactifs de révélation spécifiques basés sur des réactions de précipitation ou un changement de couleur spécifique.

Les résultats de l'analyse phytochimique sont classés en fonction de diverses observations.

- ✓ Réaction négative : si le réactif ne produit pas de précipitation ou de coloration.
- ✓ Réaction positive : si le réactif provoque un précipité ou une coloration, indiquant l'existence des composants chimiques recherchés.

D'après le **tableau III.1**, on remarque que les feuilles de la plante *Taraxacum officinalis* contiennent des tanins, des cardénolides, des huiles volatiles et des composés phénoliques (**figure III.1**). La majorité de ces substances ont des effets inhibiteurs importants. Ces composants s'adsorbent sur la surface de l'acier ordinaire, empêchant ainsi la corrosion. Par conséquent, la corrosion peut être atténuée sur la surface du métal car les espèces végétales naturelles contenues dans les feuilles se lient au métal et réduisent la zone vulnérable à la corrosion [62].

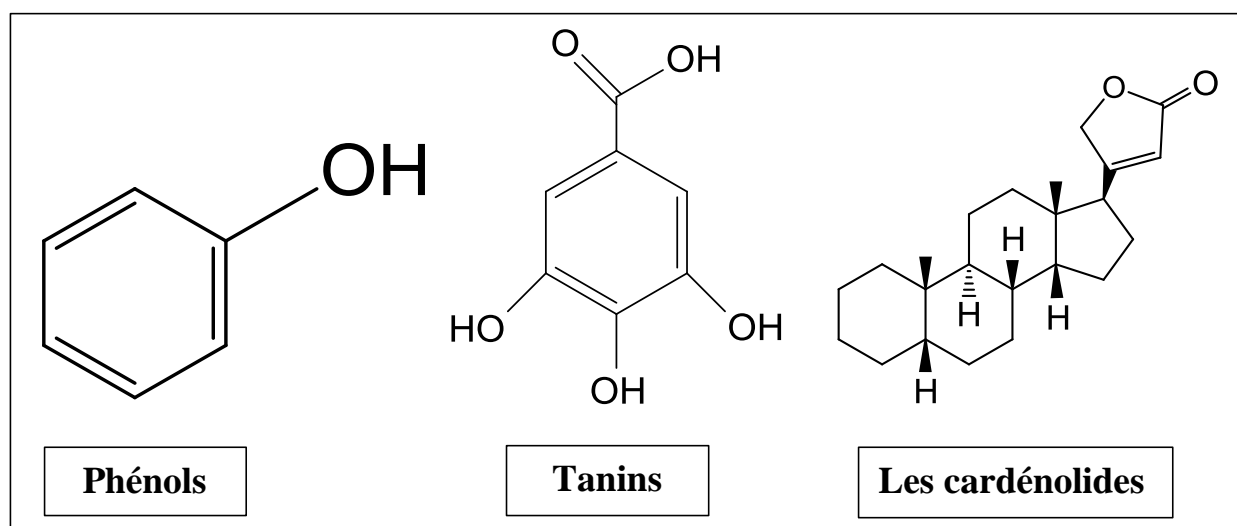
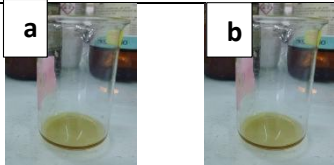
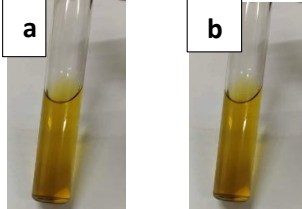
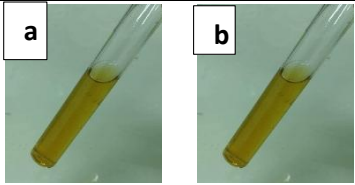
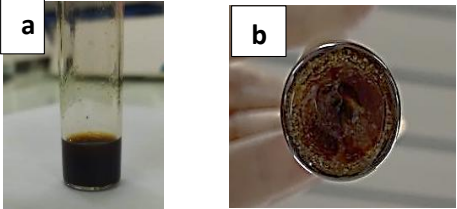
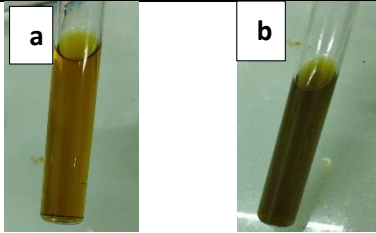


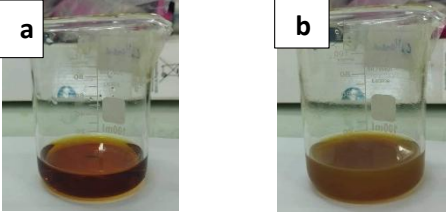
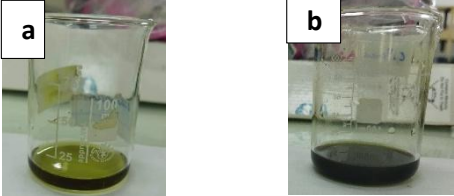
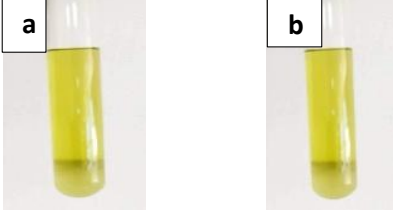
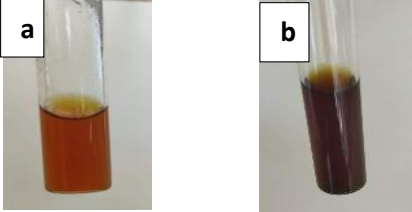
Figure III.1. Composés présents dans les feuilles de *Taraxacum officinalis*.

Chapitre III. Résultats et Discussions

Tableau III.1. Résultats de screening phytochimiques des feuilles de *Taraxacum officinalis*.

Test	Résultat	Remarque
Alcaloïdes	Négatif (-)	 <p>Figure III.2. Test des alcaloïdes (a) avant (b) après.</p>
Flavonoïdes	Négatif (-)	 <p>Figure III.3. Test des flavonoïdes (a) avant (b) après.</p>
Saponines (test de mousse)	Négatif (-)	 <p>Figure III.4. Test des saponines (a) avant (b) après.</p>
Huiles volatiles	Positif (+)	 <p>Figure III.5. Test des huiles volatiles (a) avant (b) après.</p>
Tanins	Positif (+)	 <p>Figure III.6. Test des tanins (a) avant (b) après.</p>

Chapitre III. Résultats et Discussions

Anthocyanes	Négatif (-)	 Figure III.7. Test des anthocyanes (a) avant (b) après.
Phénols	Positif (+)	 Figure III.8. Test des phénols (a) avant (b) après.
Quinones	Négatif (-)	 Figure III.9. Test des quinones (a) avant (b) après.
Cardénolides	Positif (+)	 Figure III.10. Test des cardénolides (a) avant (b) après.

Chapitre III. Résultats et Discussions

III.2. Etude de l'effet inhibiteur de l'E.T.O par la méthode de la perte de masse

Tableau III.2. Vitesses de corrosion de l'acier ordinaire X70 dans HCl à 1M, après 05h et 24h d'immersion en absence et en présence de l'E.T.O.

Paramètre Temps d'immersions	Concentrations % (V/V)	Δm (g)	Vitesse de corrosion V_{corr} (g/m ² . h)	Efficacités (%)
Temps d'immersions 5h	Sans inhibiteur	0,0025	0,6345	/
	2	0,0005	0,1240	80,57
	3	0,0002	0,0496	92,18
	4	0,0003	0,0914	85,59
Temps d'immersions 24h (Essai 1)	Sans inhibiteur	0,0218	1,2460	/
	1	0,0054	0,2984	76,05
	2	0,0043	0,2289	81,63
	3	0,0024	0,1587	87,26
	4	0,004	0,1412	88,67
	5	0,0047	0,1779	85,72
Temps d'immersions 24h (Essai 2)	Sans inhibiteur	0,0241	1,3775	/
	1	0,0038	0,2100	84,75
	2	0,0034	0,1837	86,66
	3	0,0028	0,1851	86,56
	4	0,0053	0,2064	85,02
	5	0,0035	0,1363	90,11
Temps d'immersions 24h (Essai 3)	Sans inhibiteur	0,0175	1,0170	/
	1	0,0049	0,2801	72,46
	2	0,0034	0,1837	81,94
	3	0,0025	0,1653	83,75
	4	0,0017	0,0662	93,49
	5	0,0022	0,0823	91,91

Chapitre III. Résultats et Discussions

Le **tableau III.2** regroupe les vitesses de corrosion de l'acier ordinaire X70 dans HCl à 1M en absence et en présence de l'E.T.O après 5h et 24h d'immersions.

Les **figures III.11, III.12, III.13, III.14**, présentent l'évolution de la vitesse de corrosion et de l'efficacité inhibitrice en fonction de la concentration de l'E.T.O après 5h et 24h d'immersion.

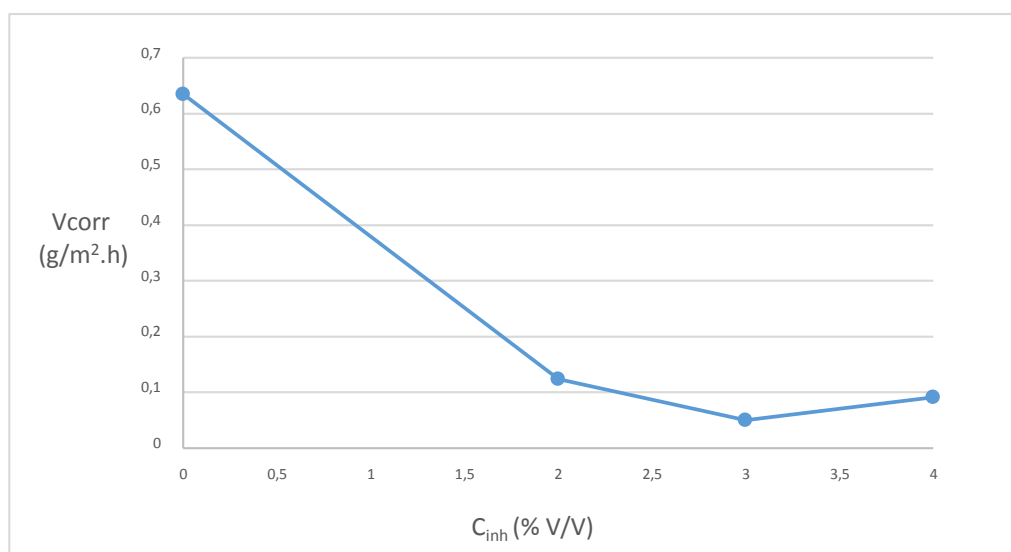


Figure III.11. Variation de la vitesse de corrosion de l'acier ordinaire X70 en fonction de différentes concentrations de l'E.T.O après 5h d'immersions dans HCl à 1M.

La **figure III.11**, présente l'effet du temps d'immersion (5h), sur l'évolution de la vitesse de corrosion de l'acier ordinaire X70 dans HCl à 1M en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur. Les résultats obtenus montrent qu'en absence d'inhibiteur la vitesse de corrosion est de 0.6345g/m².h. En revanche l'ajout de l'inhibiteur provoque la diminution de la vitesse de corrosion jusqu'à 0.0496g/m².h, induisant ainsi l'augmentation de l'efficacité inhibitrice jusqu'à 92.18% à 3% (V/V) de l'inhibiteur (**figure III.12**).

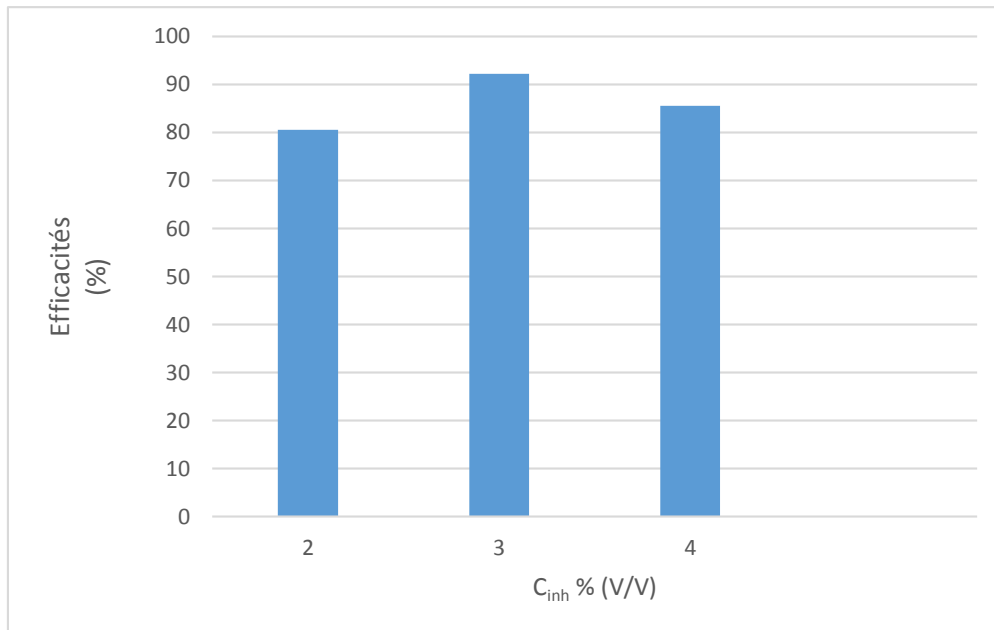


Figure III.12. Variation de l'efficacité inhibitrice de l'acier ordinaire X70 après 5h d'immersion dans HCl à 1M en fonction de différentes concentrations de l'E.T.O.

Afin d'évaluer la stabilité du film inhibiteur adsorbé sur la surface de l'acier ordinaire X70 dans le temps, des mesures de perte de masse ont été effectuées en absence et en présence de l'E.T.O à différentes concentrations pendant **24h d'immersion** dans HCl à 1M.

NB : Pour la reproductibilité des résultats l'expérience a été répétée 03 fois (**figure III.13** et **figure III.14**).

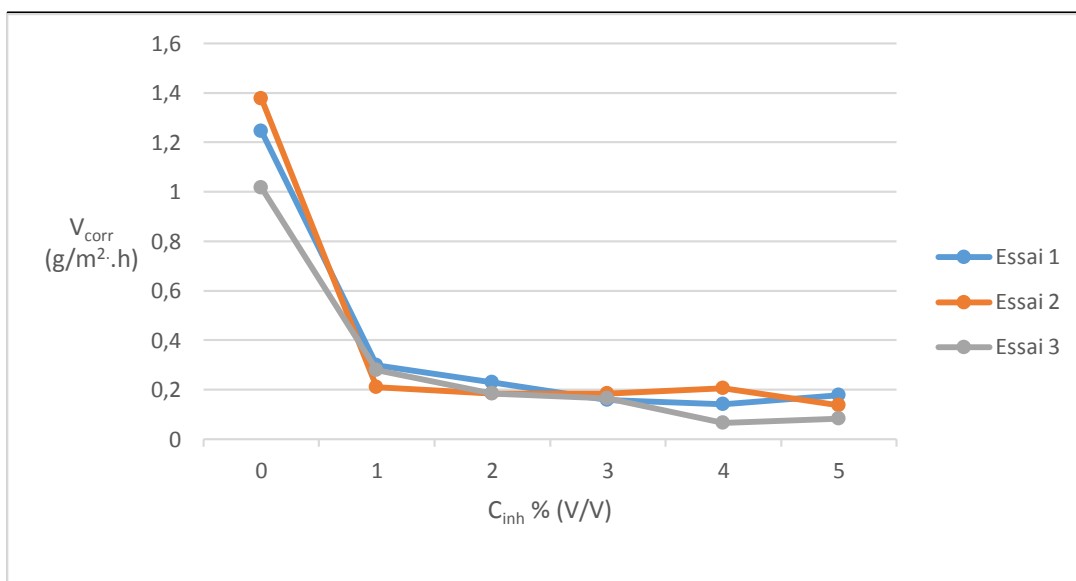


Figure III.13. Variation de la vitesse de corrosion de l'acier ordinaire X70 après 24h d'immersions dans HCl à 1M en absence et en présence de différentes concentrations de l'E.T.O.

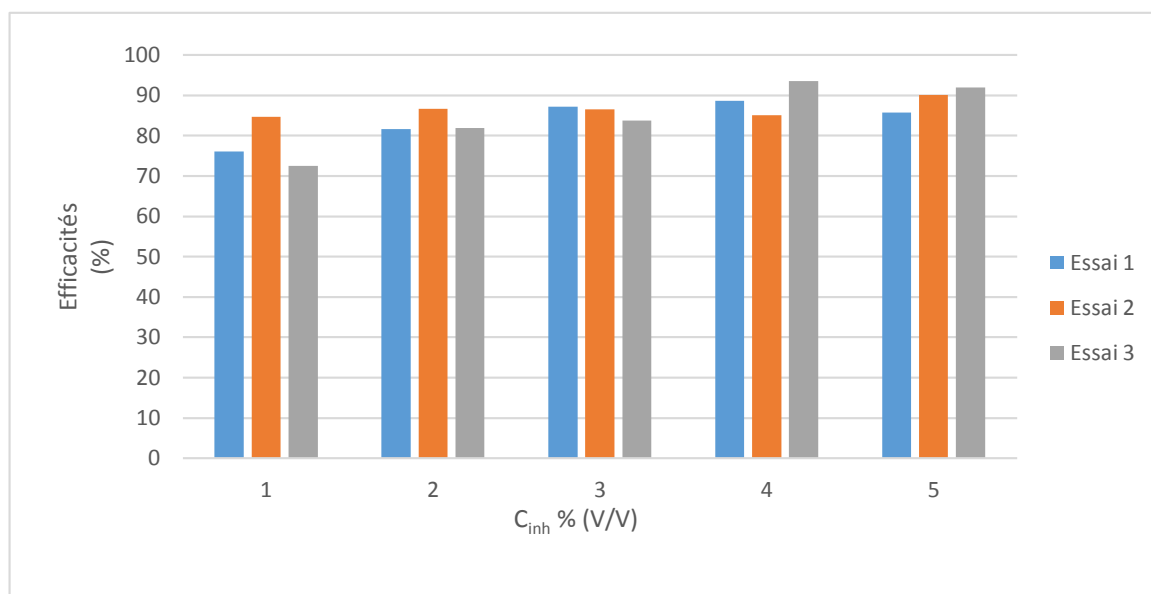


Figure III.14. Variation de l'efficacité inhibitrice de l'acier ordinaire X70 après 24h d'immersion dans HCl à 1M en absence et en présence différentes concentrations de l'E.T.O.

En augmentant le temps d'immersion (24h), les résultats obtenus (**tableau III.2**), montrent d'une part qu'en absence d'inhibiteur, une augmentation de la vitesse de corrosion, tandis qu'en présence de différentes concentrations de l'E.T.O la vitesse de corrosion diminue par rapport à celle obtenue en absence d'inhibiteur. D'autre part l'efficacité inhibitrice augmente jusqu'à 93.49% à 4% (V/V) après 24h d'immersion.

Sur la base des résultats obtenus par la méthode de perte de masse nous pouvons conclure que l'efficacité inhibitrice augmente avec l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur, ce comportement confirme bien l'existence d'un film inhibiteur du *Taraxacum officinalis*, qui protège la surface de l'acier contre la corrosion dans HCl à 1M [63].

III.3. Etudes électrochimiques

III.3.1. Spectroscopie d'impédance électrochimique (S.I.E)

Des tests de spectroscopie d'impédance électrochimique (S.I.E) ont été effectués pour étudier le processus d'atténuation de la corrosion en relation avec le comportement résistif et capacitif à l'interface électrode/électrolyte.

La **figure III.15** présente les spectres d'impédance électrochimique (S.I.E) obtenues dans HCl à 1M de l'acier ordinaire X70, en absence et en présence de différentes concentrations de l'E.T.O.

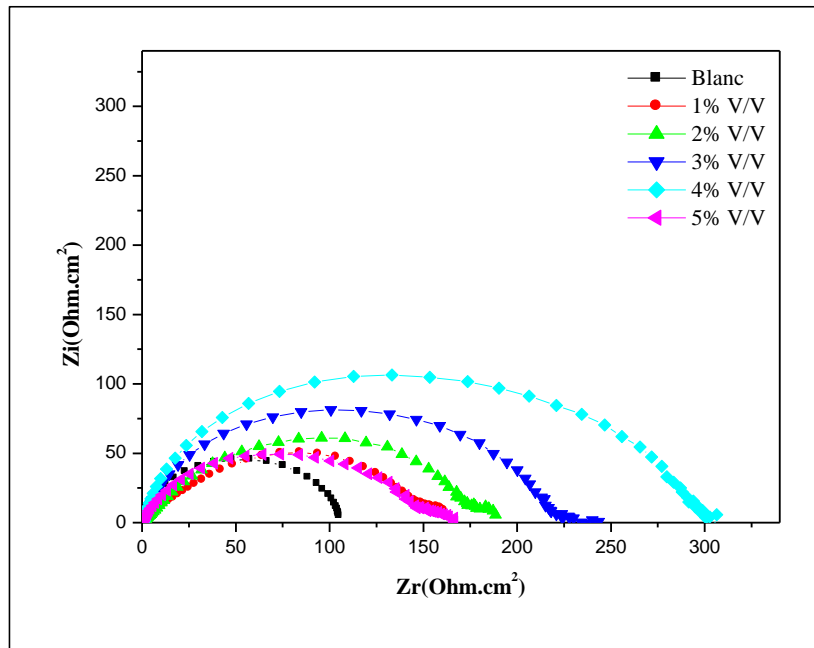


Figure III.15. Diagrammes d'impédance électrochimique de l'acier ordinaire X70 dans HCl à 1M en absence et en présence de l'E.T.O à différentes concentrations.

Les diagrammes de Nyquist en absence et en présence d'inhibiteur montrent l'existence d'une seule boucle capacitive pour les différentes concentrations de l'E.T.O, dont la taille augmente avec l'augmentation de la concentration jusqu'à 4% (V/V) de l'E.T.O, due à la formation progressive d'un film protecteur sur la surface du métal, indiquant ainsi l'inhibition du processus de corrosion, qui est contrôlé par le phénomène de transfert de charge [78].

Le circuit électrique équivalent (CEE), obtenu à l'aide du logiciel de simulation EC-LAB, est représenté sur la **figure III.16**.

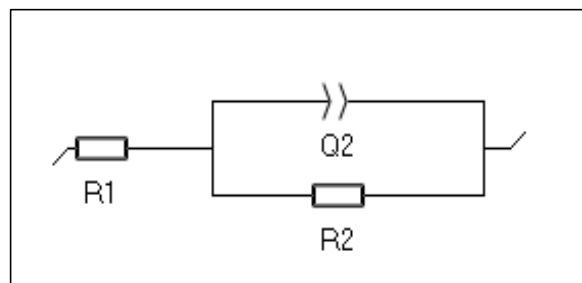


Figure III.16. Circuit électrique équivalent de l'acier X70 dans HCl à 1M en absence et en présence de l'E.T.O à différentes concentrations.

L'efficacité inhibitrice a été calculée selon l'équation suivante :

$$E(\%) = \frac{R_{ct} - R_{ct0}}{R_{ct}} 100 \quad (1)$$

Chapitre III. Résultats et Discussions

Où :

R_{ct0} : Résistance de transfert de charge en absence d'inhibiteur.

R_{ct} : Résistance de transfert de charge en présence d'inhibiteur.

Tableau III.3. Paramètres électrochimiques déduits des diagrammes de Nyquist de l'acier ordinaire X70 dans 1M HCl en absence et en présence de l'E.T.O à différentes concentrations et efficacités inhibitrices calculées.

Paramètres C % (V/V)	Re ($\Omega.cm^2$)	Cdl (F.cm ²)	n	Rct ($\Omega.cm^2$)	E (%)
Blanc	1,133	$0,6861.10^{-3}$	0,9062	105,9	/
1	0,9634	$1,006.10^{-3}$	0,6704	157,6	32,80
2	0,9899	$0,5986.10^{-3}$	0,7109	184,6	42,63
3	0,9454	$0,1665.10^{-3}$	0,8585	219,6	51,81
4	0,7649	$0,1089.10^{-3}$	0,8873	286,7	63,08
5	0,8378	$0,207.10^{-3}$	0,8153	149,1	28,97

D'après le **tableau III.3**, nous constatons que l'augmentation de la concentration jusqu'à 4% (V/V) de l'E.T.O induit une augmentation de la résistance de transfert de charge (R_{ct}), à une valeur maximale de ($286,7 \Omega.cm^2$), cette dernière est peut être attribuée à la formation d'un film protecteur à la surface qui correspond à la meilleure efficacité inhibitrice de (63,08%). Ainsi une diminution de la capacité du double couche (C_{dl}) qui peut être attribuée à l'adsorption des molécules organiques présentes dans l'E.T.O sur les sites actifs de la surface métallique [79].

III.3.2. Courbes de polarisation potentiodynamique

Les courbes de polarisation de l'acier ordinaire X70 dans HCl à 1M après 24 heures d'immersion à 25°C, en absence et en présence de l'E.T.O à différentes concentrations sont présentées sur la **figure III.17**.

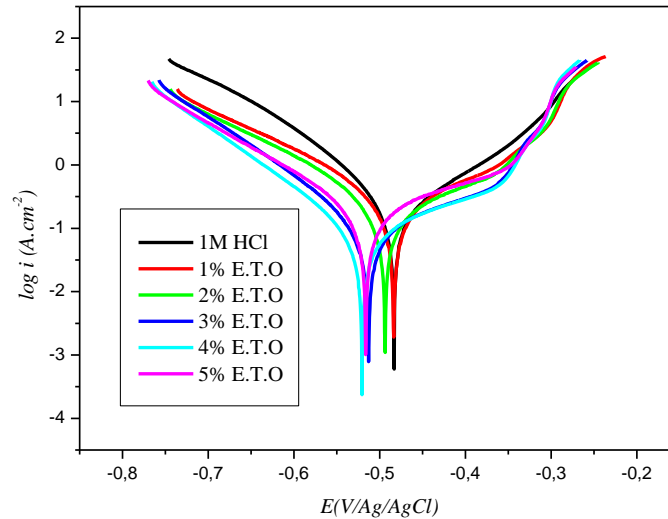


Figure III.17. Courbes de polarisation de l'acier ordinaire X70 dans HCl à 1M en absence et en présence de l'EPM à différentes concentrations.

A partir des courbes de polarisation (**figure III.17**) nous observons que, les branches cathodiques en présence de l'inhibiteur à différentes concentration diminuent par rapport à celles obtenues en absence de l'inhibiteur, ainsi le potentiel de corrosion se déplace vers des valeurs négatives c'est-à-dire vers l'anoblissement du potentiel, cela se traduit par la formation d'une couche protectrice.

Les paramètres électrochimiques déduits des courbes de polarisation de l'acier ordinaire X70 dans HCl à 1M en absence et en présence d'inhibiteur sont regroupés dans le **tableau III.4**.

L'efficacité inhibitrice a été calculée selon l'équation suivante :

$$E(\%) = \left(\frac{i_0 - i}{i_0} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

Où : i_0 et i sont respectivement les densités de courant de corrosion en absence et en présence de l'inhibiteur.

Chapitre III. Résultats et Discussions

Tableau III.4. Paramètres électrochimiques déduits des courbes de polarisation de l'acier ordinaire X70 dans HCl à 1M en absence et en présence de l'E.T.O à différentes concentrations et efficacités inhibitrices calculées.

Paramètre C % (V/V)	E _{corr} (mV/ECS)	i _{corr} ($\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$)	b _a (mV.dec ⁻¹)	b _c (mV.dec ⁻¹)	E (%)
blanc	-482,452	135,957	112,5	77,9	/
1	-490,872	86,218	118,0	67,7	36,58
2	-491,711	68,162	110,7	81,1	49,86
3	-514,068	41,001	119,03	71,7	69,84
4	-520,744	38,305	132,9	89,6	71,82
5	-515,906	85,308	146,9	107,2	37,25

D'après les valeurs des paramètres électrochimiques (**tableau III.4**), nous observons que la densité de courant de corrosion I_{corr} diminue avec l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur jusqu'à une concentration de 4% (V/V) de l'E.T.O, avec une efficacité inhibitrice maximale de 71.82%. Ces diminutions sont dues à l'adsorption des molécules de l'E.T.O, qui bloquent les sites actifs sur la surface métallique du l'acier [61].

III.4. Caractérisations

III.4.1. Caractérisations de l'E.T.O par FTIR

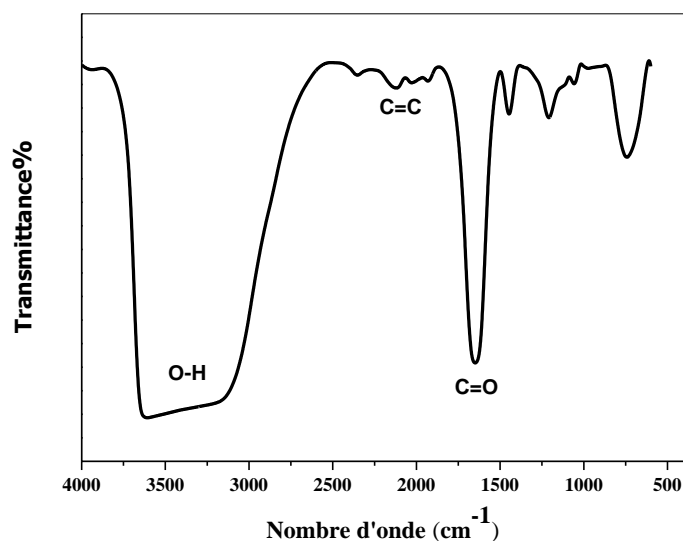


Figure III.18. Spectre FTIR de l'E.T.O.

La **figure III.18**, représentant le spectre FTIR de l'E.T.O, montre l'apparition d'une large bande d'absorption à 3386cm^{-1} attribuée au groupe O-H du solvant qui est l'eau dans notre cas. Une bande à 2098cm^{-1} correspondant aux doubles liaisons d'un cycle aromatique et bande à 1642cm^{-1} indiquant la présence d'un carbonyle.

Les résultats de l'analyse du spectre FTIR confirment la présence des groupes fonctionnels tels que : C=C, C=O dans de nombreux composants majeurs de l'E.T.O qui ont été considérés comme des centres actifs pour l'inhibition de la corrosion [59].

III.4.2. Caractérisation de l'acier X70 par microscope optique

Les **figures III.19** et **III.20** représentent respectivement les micrographies obtenues de la surface de l'acier ordinaire X70 en absence et en présence d'extrait de l'E.T.O à la concentration optimale 4% (V/V) après immersion de 24h dans la solution agressive (HCl à 1M).

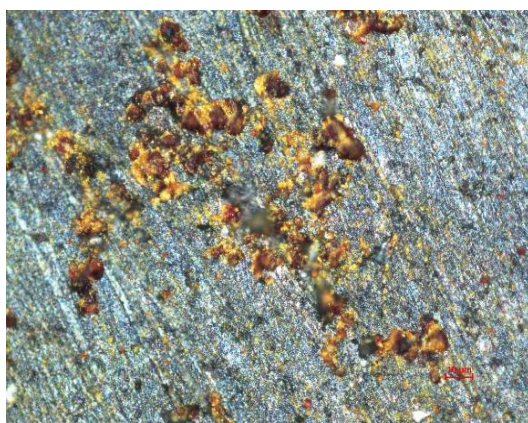


Figure III.19. Micrographie de l'acier ordinaire X70 en absence d'inhibiteur après immersion pendant 24h.

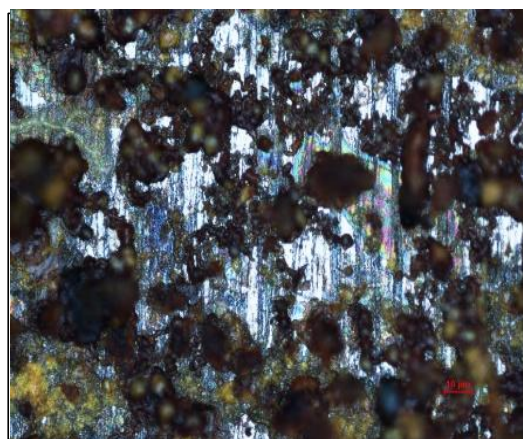


Figure III.20. Micrographie de l'acier ordinaire X70 en présence de 4% (V/V) d'inhibiteur après immersion de 24h.

Chapitre III. Résultats et Discussions

La **figure III.19** présente la surface de l'acier X70 après 24h d'immersion dans une solution d'HCl à 1M en absence d'inhibiteur. Nous observons que la surface est fortement endommagée corrodée et détériorée par l'apparition des piqûres, ce qui confirme que nous sommes en présence d'une corrosion par piqûres.

Tandis qu'en présence de 4% (V/V) de l'E.T.O (**figure III.20**), nous remarquons que la surface est moins corrodée par rapport à celle de l'acier en absence d'inhibiteur grâce à la formation d'un film inhibiteur qui couvre et protège la surface de l'acier [80].

Conclusion générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail s'est concentré sur l'étude de l'action inhibitrice de l'extrait des feuilles de la plante *Taraxacum officinalis* (E.T.O), qui a été utilisé comme un inhibiteur vert, bénéfique pour l'environnement et aisément disponibles, contre la corrosion de l'acier ordinaire X70 en milieu acide chlorhydrique à 1M. Pour cela un screening phytochimique a été mené sur les feuilles de cette plante, suivi d'une étude de l'évaluation du pouvoir inhibiteur de l'E.T.O.

Ce travail a été réalisé par la méthode de perte de masse, la spectroscopie d'impédance électrochimique et la polarisation potentiodynamique.

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) a été utilisée pour caractériser l'inhibiteur, de même que le microscope optique pour caractériser la surface de l'acier en l'absence et en présence de l'inhibiteur.

- ✓ Les tests du screening phytochimique ont révélé la présence des tanins, des cardénolides, des huiles volatils et des composés phénoliques.
- ✓ Le spectre FTIR a montré la présence des groupements C=O et C=C.
- ✓ L'évolution de la vitesse de corrosion ainsi que de l'efficacité inhibitrice au cours d'un temps d'immersion de 24h, par la perte de masse, ont montré que l'introduction de 4% (V/V) d'E.T.O, induit la diminution de la vitesse de corrosion conduisant et une augmentation de l'efficacité inhibitrice jusqu'à 93,49%.
- ✓ Les spectres d'impédance ont une boucle capacitive unique, lors de la présence de l'E.T.O, qui est liée au phénomène de transfert de charge. La plus grande efficacité inhibitrice obtenue est de 63,08% à une concentration de 4% (V/V).
- ✓ Les courbes de polarisation ont révélé que la présence de l'E.T.O entraîne une diminution de la densité de courant cathodique, ce qui indique que l'E.T.O agit comme un inhibiteur cathodique. À 4% (V/V) d'E.T.O, la plus grande efficacité inhibitrice obtenue est de 71,82%.
- ✓ Les micrographies du microscope optique, en absence de l'E.T.O ont montré que l'acier X70 présente une corrosion par piqûre. En présence de l'E.T.O il y a la formation d'un film inhibiteur.

En perspective, il est intéressant de réaliser les points suivant :

- La caractérisation du film inhibiteur par la diffraction des rayons X (DRX), la microscopie électronique à balayage (MEB) et la microscopie à force atomique (AFM).
- Etude de l'effet de température sur le pouvoir inhibiteur de la corrosion de l'E.T.O.
- Etude de l'effet synergique avec l'iodure de potassium.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] **I. Ahamad, R. Prasad, & M. A. Quraishi, (2010).** Thermodynamic, electrochemical and quantum chemical investigation of some Schiff bases as corrosion inhibitors for mild steel in hydrochloric acid solutions. *Corrosion Science*, 52(3), 933-942.
- [2] **X. Xu, A. Singh, Z. Sun, K. R. Ansari, & Y. Lin, (2017).** Theoretical, thermodynamic and electrochemical analysis of biotin drug as an impending corrosion inhibitor for mild steel in 15% hydrochloric acid. *Royal Society open science*, 4(12), 170933.
- [3] **K. El Yousfi, H. Greche, H. Misbahi, & R. B. Cheikh, (2020).** Phytochemical evaluation and vasodilatory activity of *O. elongatum*, *C. salviifolius* and *C. laurifolius*. *Moroccan Journal of Chemistry*, 8(1), 8-1.
- [4] **Y. El Ouadi, A. Beladjila, A. Bouyanzer, Z. Kabouche, H. Bendaif, F. Yousfi, ... & B. Hammouti, (2017).** The Palm oil from seed of *Phoenix dactylifera* (Oil of both Deglet Nour and Kentichi) as a natural antioxidants and Environment-Friendly inhibitors on the Corrosion of mild Steel in HCl 1M. *Moroccan Journal of Chemistry*, 5(1), 5-1.
- [5] **A. Salhi, A. Bouyanzer, A. Chetouani, S. El Barkany, H. Amhamdi, I. Hamdani, ... & J. Costa, (2017).** Chemical composition of essential oil and antioxidant and anti-corrosion activity of extract and essential oil of Pennyroyal Mint (*Mentha pulegium*, MP). *Moroccan Journal of Chemistry*, 5(1), 5-1.
- [6] **D. Kesavan, M. Gopiraman, & N. Sulochana, (2012).** Green inhibitors for corrosion of metals: a review. *Chem. Sci. Rev. Lett*, 1(1), 1-8.
- [7] **P. B. Raja, & M. G. Sethuraman, (2008).** Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media—a review. *Materials letters*, 62(1), 113-116.
- [8] **M. Ismail, A. S. Abdulrahman, & M. S. Hussain, (2011).** Solid waste as environmental benign corrosion inhibitors in acid medium. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 3(2), 1742-1748.
- [9] **R. Perrin, & J. P. Scharff, (1999).** *Chimie industrielle*, ED 2, 240.
- [10] <https://www.univ-biskra.dz/enseignant/densaada/corrosion.pdf> (2022)
- [11] <https://www.econologie.com/fichiers/partager3/1357466155jdSYXP.pdf> (2022)
- [12] **S. Metals, (2000).** High-performance alloys for resistance to aqueous corrosion. *SM Aqueous Corrosion Book*, 28, 68.

- [13] Dr. D. H. Uster, "Corrosion for Engineers", (10-1)-(10-5).
- [14] P. Maaß and P. Peißker, (2011). 'Hand book of Hot-dip Galvanization', WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, (3).
- [15] G. Biresaw and K. L. Mittal, (2014). "Surfactants in Tribology", Volume 4, CRC Press, (390).
- [16] Z. Li, (2009). BRANZ Corrosion Scientist, "Galvanic corrosion".
- [17] S. ATHMANI, (2019). Etude de l'efficacité inhibitrice de l'agave americana sur la corrosion d'un acier ordinaire dans 0,5 M H₂SO₄ par des techniques électrochimiques, (Doctoral dissertation, Université Badji Mokhtar – Annaba).
- [18] B. Laidi, (2015). Comportement à la corrosion de l'alliage binaire Cu-Zn en milieu NaCl 3% et son inhibition par le Carbonate de cerium-Characterisation de surface (Doctoral dissertation, Université du 20 Août 1955).
- [19] H. Benkihoul, T. Barka, (2020). 'Méthodes de protection contre la corrosion', Mémoire de Master, université Mohamed Boudiaf – M'sila,
- [20] C. Vargel, (2002) 'Corrosion de l'aluminium', Ed. Dunod, ISBN 2-10-006569-6, P : 528.
- [21] M. A. Malik, M. A. Hashim, F. Nabi, S. A. Al-Thabaiti, & Z. Khan, (2011). Anti-corrosion ability of surfactants: a review. Int. J. Electrochem. Sci, 6(6), 1927-1948.
- [22] I. M. Chung, S. H. Kim, V. Hemapriya, K. Kalaiselvi, & M. Prabakaran, (2019). Inhibition behavior of *Tragia involucrata* L. phenolic compounds against acidic medium corrosion in low carbon steel surface. Chinese Journal of Chemical Engineering, 27(3), 717-725.
- [23] D. Kesavan, M. Gopiraman, & N. Sulochana, (2012). Green inhibitors for corrosion of metals: a review. Chem. Sci. Rev. Lett, 1(1), 1-8.
- [24] B. E. Rani, & B. B. J. Basu, (2012). Green inhibitors for corrosion protection of metals and alloys: an overview. International Journal of corrosion.
- [25] M. P. Casaletto, V. Figà, A. Privitera, M. Bruno, A. Napolitano, & S. Piacente, (2018). Inhibition of Cor-Ten steel corrosion by "green" extracts of *Brassica campestris*. Corrosion science, 136, 91-105.
- [26] K. M. Emran, S. M. Ali, & H. A. A. Lehaibi, (2018). Green methods for corrosion control. Corrosion inhibitors, principles and recent applications. In Tech, London, 61-77.
- [27] P. B. Raja, & M. G. Sethuraman, (2008). Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media—a review. Materials letters, 62(1), 113-116.

- [28] **S. Deng, & X. Li, (2012).** Inhibition by Ginkgo leaves extract of the corrosion of steel in HCl and H₂SO₄ solutions. *Corrosion Science*, 55, 407-415.
- [29] **V. V. Torres, R. S. Amado, C. F. De Sá, T. L. Fernandez, C. A. da Silva Riehl, A. G. Torres, & E. D'Elia, (2011).** Inhibitory action of aqueous coffee ground extracts on the corrosion of carbon steel in HCl solution. *Corrosion Science*, 53(7), 2385-2392.
- [30] **M. H. H. Nkunya, (2002).** Natural chemicals for disease and insect management. Professorial Inaugural Lecture, University of Dar Salaam.
- [31] **F. Constantin, (2011).** Etude de l'efficacité d'inhibiteurs de corrosion utilisés dans les liquides de refroidissement (Doctoral dissertation, INSA de Lyon; Universitatea din Pitești. Facultatea de Litere (România)).
- [32] **H. BOUHAFS, (2016).** 'Contribution à l'étude des causes de dégradation des conduites du transport d'eau industrielle '. Mémoire de Master, université Badji Mokhtar, Annaba.
- [33] **A. REMMA, & S. BENDARA, (2021).** Contrôle Qualité des Soudures de l'Acier X70 Réalisées par les Procédés SAW et SMAW (Doctoral dissertation, جامعة غرداية).
- [34] **N. G. Thompson, M. Yunovich, & D. Dunmire, (2007).** Cost of corrosion and corrosion maintenance strategies. *Corrosion Reviews*, 25(3-4), 247-262.
- [35] **Y. Qiang, S. Zhang, B. Tan, & S. Chen, (2018).** Evaluation of Ginkgo leaf extract as an eco-friendly corrosion inhibitor of X70 steel in HCl solution. *Corrosion Science*, 133, 6-16.
- [36] **F. Fu, (2020).** Fire induced progressive collapse potential assessment of steel framed buildings using machine learning. *Journal of Constructional Steel Research*, 166, 105918.
- [37] **M. Regel-Rosocka, (2010).** A review on methods of regeneration of spent pickling solutions from steel processing. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1-3), 57-69.
- [38] **A. Salmasifar, M. Edraki, E. Alibakhshi, B. Ramezanzadeh, & G. Bahlakeh, (2021).** Theoretical design coupled with experimental study of the effectiveness of the inhibitive molecules based on *Cynara scolymus* L extract toward chloride-induced corrosion of steel. *Journal of Molecular Liquids*, 332, 115742.
- [39] **C. Verma, J. Haque, M. A. Quraishi, & E. E. Ebenso, (2019).** Aqueous phase environmental friendly organic corrosion inhibitors derived from one step multicomponent reactions: a review. *Journal of Molecular Liquids*, 275, 18-40.
- [40] **R. Nabah, F. Benhiba, Y. Ramli, M. Ouakki, M. Cherkaoui, H. Oudda... & A. Zarrouk, (2018).** Corrosion inhibition study of 5, 5-diphenylimidazolidine-2, 4-dione for mild

steel corrosion in 1M HCl solution: experimental, theoretical computational and Monte Carlo simulations studies.

[41] **A. Dehghani, G. Bahlakeh, & B. Ramezanzadeh, (2019).** A detailed electrochemical/theoretical exploration of the aqueous Chinese gooseberry fruit shell extract as a green and cheap corrosion inhibitor for mild steel in acidic solution. *Journal of Molecular Liquids*, 282, 366-384.

[42] **M. Abd El-Raouf, E. A. Khamis, M. T. Abou Kana, & N. A. Negm, (2018).** Electrochemical and quantum chemical evaluation of new bis (coumarins) derivatives as corrosion inhibitors for carbon steel corrosion in 0.5 M H₂SO₄. *Journal of Molecular Liquids*, 255, 341-353.

[43] **X. Li, S. Deng, T. Lin, X. Xie, & G. Du, (2017).** 2-Mercaptopyrimidine as an effective inhibitor for the corrosion of cold rolled steel in HNO₃ solution. *Corrosion Science*, 118, 202-216.

[44] **A. Sedik, D. Lerari, A. Salci, S. Athmani, K. Bachari, İ. H. Gecibesler, & R.Solmaz, (2020).** Dardagan Fruit extract as eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel in 1M HCl: Electrochemical and surface morphological studies. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 107, 189-200.

[45] **K. Cherrak, F. Benhiba, N. K. Sebbar, E. M. Essassi, M. Taleb, A. Zarrouk, & A. Dafali, (2019).** Corrosion inhibition of mild steel by new Benzothiazine derivative in a hydrochloric acid solution: Experimental evaluation and theoretical calculations. *Chemical Data Collections*, 22, 100252.

[46] **M. El Faydy, M. Rbaa, L. Lakhrissi, B. Lakhrissi, I. Warad, A. Zarrouk, & I. B. Obot, (2019).** Corrosion protection of carbon steel by two newly synthesized benzimidazol-2-ones substituted 8-hydroxyquinoline derivatives in 1M HCl: experimental and theoretical study. *Surfaces and Interfaces*, 14, 222-237.

[47] **I. Abassi, (2020).** Etude microstructurale d'un joint soudé par procédé SMAW d'acier X70, université Mohamed Khider, Biskra, 2020.

[48] **M. DJELLAB, (2019).** Corrosion des installations pétrolières: Effet de la synergie des ions iodures et des inhibiteurs naturels sur la protection contre la corrosion de l'acier API 5L X70 en milieux acides (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).

[49] **B. Kerboua, (2021).** 'ANALYSE DE LA CORROSION DES ACIERS ET LEUR PROTECTION', Abou Bakr Belkaid University of Tlemcen.

- [50] **D. Landolt**, (1997). Corrosion et chimie de surfaces des métaux, presses Polytechniques et Universitaire Romands. Lausanne, 386-388.
- [51] **H. Laiadhi**, (2020) 'Protection de l'acier API 5L X70 contre la corrosion par un inhibiteur organique', Mémoire de Master, université Mohamed Khider, Biskra.
- [52] **M. H. Hussin, M. J. Kassim, N. N. Razali, N. H. Dahon, & D. Nasshorudin**, (2016). The effect of *Tinospora crispa* extracts as a natural mild steel corrosion inhibitor in 1M HCl solution. *Arabian Journal of Chemistry*, 9, S616-S624.
- [53] **A. R. Shahmoradi, N. Talebibahmanbigloo, C. Nickhil, R. Nisha, A. A. Javidparvar, P. Ghahremani, ... & B. Ramezanzadeh**, (2021). Molecular-MD/atomic-DFT theoretical and experimental studies on the quince seed extract corrosion inhibition performance on the acidic-solution attack of mild-steel. *Journal of Molecular Liquids*, 346, 117921.
- [54] **M. H. Hussin, & M. J. Kassim**, (2011). The corrosion inhibition and adsorption behavior of *Uncaria gambir* extract on mild steel in 1M HCl. *Materials Chemistry and Physics*, 125(3), 461-468.
- [55] **N. Asadi, M. G. Ramezanzadeh, Bahlakeh, & B. Ramezanzadeh**, (2019). Utilizing Lemon Balm extract as an effective green corrosion inhibitor for mild steel in 1M HCl solution: A detailed experimental, molecular dynamics, Monte Carlo and quantum mechanics study. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 95, 252-272.
- [56] **G. Ji, S. Anjum, S. Sundaram, & R. Prakash**, (2015). *Musa paradisica* peel extract as green corrosion inhibitor for mild steel in HCl solution. *Corrosion Science*, 90, 107-117.
- [57] **M. H. Shahini, M. Keramatnia, M. Ramezanzadeh, B. Ramezanzadeh, & G. Bahlakeh**, (2021). Combined atomic-scale/DFT-theoretical simulations & electrochemical assessments of the chamomile flower extract as a green corrosion inhibitor for mild steel in HCl solution. *Journal of Molecular Liquids*, 342, 117570.
- [58] **A. Berrissoul, A. Ouarhach, F. Benhiba, A. Romane, A. Guenbour, H. Outada, ... & A. Zarrouk**, (2021). Exploitation of a new green inhibitor against mild steel corrosion in HCl: Experimental, DFT and MD simulation approach. *Journal of Molecular Liquids*, 349, 118102.
- [59] **H. Kahkesh, & B. Zargar**, (2021). Corrosion protection evaluation of *Allium Jesdianum* as a novel and green source inhibitor for mild steel in 1M HCl solution. *Journal of Molecular Liquids*, 344, 117768.
- [60] **N. Hossain, M. A. Chowdhury, A. P. Iqbal, M. S. Islam, N. Y. S. Omar, & A. Z. A.Saifullah**, (2021). *Paederia Foetida* leaves extract as a green corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid solution. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4, 100191.

- [61] **K. O. Shamsheera, A. R. Prasad, M. Arshad, & A. Joseph, (2022).** A sustainable method of mitigating acid corrosion of mild steel using jackfruit pectin (JP) as green inhibitor: Theoretical and electrochemical studies. *Journal of the Indian Chemical Society*, 99(1), 100271.
- [62] **M. R. Rathod, S. K. Rajappa, & A. A. Kittur, (2022).** *Garcinia livingstonei* leaves extract influenced as a mild steel efficient green corrosion inhibitor in 1M HCl solution. *Materials Today: Proceedings*, 54, 786-796.
- [63] **A. M. Banu, B. A. Farzana, & K. R. Ahamed, (2021).** Evaluation of inhibitive performance of *Allamanda cathartica* leaves extract as a green corrosion inhibitor on mild steel in acid medium. *Materials Today: Proceedings*, 47, 2036-2047.
- [64] **A. Berrissoul, A. Ouarhach, F. Benhiba, A. Romane, A. Zarrouk, A. Guenbour, ... & A. Dafali, (2020).** Evaluation of *Lavandula mairei* extract as green inhibitor for mild steel corrosion in 1M HCl solution. Experimental and theoretical approach. *Journal of Molecular Liquids*, 313, 113493.
- [65] **J. Lazrak, E. H. El Assiri, N. Arrousse, F. El-Hajjaji, M. Taleb, Z. Rais, ... & B. Hammouti, (2021).** *Origanum compactum* essential oil as a green inhibitor for mild steel in 1M hydrochloric acid solution: Experimental and Monte Carlo simulation studies. *Materials Today: Proceedings*, 45, 7486-7493.
- [66] **J. A. Aigbogun, & M. A. Adebayo, (2021).** Green inhibitor from *Thaumatococcus daniellii* Benn for corrosion mitigation of mild steel in 1M HCl. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4, 100201.
- [67] **A. M. Guruprasad, & H. P. Sachin, (2021).** Novel cost-effective aqueous *Amorphophallus paeoniifolius* leaves extract as a green corrosion inhibitor for mild steel corrosion in hydrochloric acid medium: A detailed experimental and surface characterization studies. *Chemical Data Collections*, 34, 100734.
- [68] **M. H. Shahini, M. Keramatinia, M. Ramezanzadeh, B. Ramezanzadeh, & G. Bahlakeh, (2021).** Combined atomic-scale/DFT-theoretical simulations & electrochemical assessments of the chamomile flower extract as a green corrosion inhibitor for mild steel in HCl solution. *Journal of Molecular Liquids*, 342, 117570.
- [69] https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/717630/tab/fiche (2022)
- [70] <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/pissenlit> (2022)
- [71] **M. A. Mulo, (2005).** *Secrets d'une herboriste: 315 plantes médicinales, 100 maladies courantes, conseils de beauté, adresses utiles:[la bible des plantes]*. Ed. Du dauphin.
- [72] <http://www.wiki phyto.org/wiki/Pissenlit> (2022)

- [73] **L. Lavigne, (1991)**. Évaluation d'essais de corrosion réalisés en laboratoire et dans un épurateur humide. Université du Québec à Chicoutimi.
- [74] **L. Jaubert, (2004)**. Etude de la corrosion uniforme d'aciers non alliés et inoxydables: utilisation conjointe de l'émission acoustique et des techniques électrochimiques (Doctoral dissertation, Lyon, INSA).
- [75] **F. Boumeguet, Dj. Iabbassen, (2017)** 'Etude de l'inhibition de la corrosion de zinc dans l'acide chlorhydrique par l'extrait de la plante d'Ortie', Mémoire de fin d'études, Université A. MIRA – BEJAIA.
- [76] **M. Akouche, (2016)**. Synthèse prébiotique de Ribonucléotides sur des surfaces minérales (Doctoral dissertation, Paris 6).
- [77] <https://sites.google.com/site/ladivisoncellulairedesplantes/travaux-pratiques-physique-image-donnee-par-une-lentille-convergente/principe-du-fonctionnement-du-microscope-optique> (2022)
- [78] **A. Berrissoul, A. Ouarhach, F. Benhiba, A. Romane, A. Zarrouk, A. Guenbour, ... & A. Dafali, (2020)**. Evaluation of *Lavandula mairei* extract as green inhibitor for mild steel corrosion in 1M HCl solution. Experimental and theoretical approach. *Journal of Molecular Liquids*, 313, 113493.
- [79] **N. N. Taheri, B. Ramezanzadeh, M. Mahdavian, & G. Bahlakeh, (2018)**. In-situ synthesis of Zn doped polyaniline on graphene oxide for inhibition of mild steel corrosion in 3.5 wt. % chloride solution. *Journal of industrial and engineering chemistry*, 63, 322-339.
- [80] **M. Yadav, R. R. Sinha, S. Kumar, I. Bahadur, & E. E. Ebenso, (2015)**. Synthesis and application of new acetohydrazide derivatives as a corrosion inhibition of mild steel in acidic medium: Insight from electrochemical and theoretical studies. *Journal of molecular liquids*, 208, 322-332.