



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



Université Larbi TEBESSI-Tébessa
Facultés des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

Département: Science de la matière

MEMOIRE DE MASTER

Domaine: Science de la matière

Filière: Chimie

Option: Chimie des produits naturels

Thème:

**Etude de L'inhibition contre la corrosion
par un extrait de la plante
*Pituranthos scoparius.***

présenter par:

ABDELMALEK Chourouk

Devant le jury:

HANINI Karima	M.A.A	Université de Tébessa	Président
SOUDANI Kaouther	M.A.A	Université de Tébessa	Rapporteur
HAOUAM Chahrazed	M.A.A	Université de Tébessa	Examineur

Date de soutenance: 26 /06 /2019

Dédicace

Je dédie ce travail

A mon cher père

A ma très chère maman

A mes frères, mes sœurs et ma famille

A tous mes collègues et amis(es)

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier "**Dieu**", le tout-puissant, qui m'a aidé pour réaliser ce travail.

Ce travail a été effectué au laboratoire de pédagogie du département de science de la matière de l'université de Tébessa.

Je tiens à remercier vivement ma directrice de ce mémoire Madame SOUDANI Kaouther maitre-assistant à l'université de Tébessa, pour l'honneur en acceptant l'encadrement et la confiance qu'elle m'a fait.

Mes grands remerciements à Madame HANINI Karima maitre-assistant à l'université de Tébessa, pour ses conseils et son aide au cours de réalisation de ce travail, ainsi qu'elle me fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

J'adresse mes remerciements à Madame HAOUAM Chahrazed maitre-assistant à l'université de Tébessa d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Je remercie très sincèrement Monsieur BANAHMED Merzoug, le professeur à l'université de Tébessa pour son aide et ses conseils ainsi que sa gentillesse.

Sans oublier de remercier vivement tous les enseignants et les fonctionnaires de la science de la matière qui ont contribué à la formation et l'encadrement dont nous avons bénéficié tout au long de nos études.

Enfin, je tiens remercier tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Table des matières

Introduction générale.....	I
Références bibliographiques.....	4

CHAPITRE I: La corrosion des aciers au carbone

I. 1. Introduction.....	1
I. 2. Définitions de la corrosion	1
I. 3. Les types de corrosion.....	1
I. 3. 1. Corrosion sèche.....	1
I. 3. 2. Corrosion humide.....	2
I. 3. 3. Corrosion biochimique (bactérienne).....	2
I. 4. Les formes de la corrosion (Morphologie).....	2
I. 4. 1. Corrosion généralisée (uniforme ou continue).....	2
I. 4. 2. Corrosion localisée.....	3
I. 4. 2. 1. La Corrosion par piqûres.....	3
I. 4. 2. 2. La corrosion galvanique.....	4
I. 4. 2. 3. La corrosion par crevasse.....	4
I. 4. 2. 4. La corrosion sous contrainte.....	5
I. 4. 2. 5. Corrosion inter granulaire.....	5
I. 4. 2. 6. Corrosion par érosion.....	5
I. 5. La dégradation d'un acier au carbone (facteur de corrosion).....	6
I. 6. Effet de divers paramètres sur la corrosion	7
I. 6. 1. Effet de la température	7
I. 6. 2. Effet de l'acidité	7
I. 6. 3. Salinité.....	7
Références bibliographiques.....	8

CHAPITRE II : L'emploi des produits verts comme inhibiteur de corrosion

II. 1. Introduction.....	11
II. 2. Définition d'un inhibiteur.....	11
II. 3. Propriétés d'un inhibiteurs.....	11
II. 4. Les classes des inhibiteurs.....	11
II. 5. Inhibiteurs de corrosion d'origine naturelle.....	12
II. 5. 1. Inhibiteur à base des huiles.....	12
II. 5. 2. Inhibiteur à base d'extraits.....	13
II. 6. Adsorption des molécules inhibitrice à la surfaces métalliques.....	14
II. 6. 1. La physisorption	14
I. 6. 2. La chimisorption	14
II. 7. Description botanique.....	15
II. 7. 1. Classification botanique.....	15
Références bibliographiques	17

CHAPITRE III : Méthodes et techniques expérimentales

III. 1. Introduction.....	20
III. 2. Méthode gravimétrique.....	20
III. 3. Méthode électrochimique.....	21
III. 3. 1. Suivi du potentiel en circuit ouvert.....	21
III. 3. 2. Spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE).....	21
III. 3. 3. Courbes de polarisation.....	22
III. 4. Modèles d'isothermes d'adsorption.....	23
III. 4. 1. Isotherme de Langmuir.....	23
III. 4. 2. Isotherme de Freundlich	24
III. 4. 3. Isotherme de Temkin.....	24
III. 4.4. Isotherme de Frumkin.....	24
III. 5. Les principes actives.....	24
Références bibliographiques.....	27

CHAPITRE IV: Résultats et discussions

IV. 1. Introduction.....	30
IV. 2. Protocole expérimentale.....	30
IV. 2. 1. Matériau utilisé.....	30
IV. 2. 2. Solution corrosive.....	30
IV. 2.3. Electrolyte.....	30
IV. 2. 4. Préparation des extraits de la plante <i>Pituranthos scoparius</i>	31
IV. 3. Optimisation du temps d'immersion des essais de corrosion.....	33
IV. 4. Etude de l'efficacité inhibitrice de l'extrait n-butanol de la plante <i>Pituranthos scoparius</i>	33
IV. 4. 1. Méthode gravimétrique	33
IV. 4. 1. 1. Modèles d'isothermes d'adsorption d'EBPS.....	38
IV. 4. 1. 2. Mécanisme d'adsorption de l'EBPS.....	41
IV. 4. 1. 3. Paramètres thermodynamiques d'activation relatifs à la dissolution de l'acier API 5L Gr-B dans un solution HCl 1M.....	44
IV. 4. 1. 4. Conclusion partielle.....	47
IV. 4. 2. Techniques électrochimiques.....	48
IV. 4. 2. 1.Elaboration de l'électrode de travail.....	48
IV. 4. 2. 2 Suivi du potentiel de corrosion au cours du temps.....	49
IV. 4. 2. 3 Spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE).....	50
IV. 4. 2. 4 Courbes de polarisation.....	53
IV. 4. 2. 5 Conclusion partielle.....	55
IV. 4. 3: Etude comparative des résultats obtenus par les trois méthodes	55
Références bibliographiques.....	57
Conclusion générale.....	61
Perspectives.....	62

Tableau N ⁰	Titre	Page
I.1	les principaux facteurs de la corrosion	06
II.1	Inhibiteur de la corrosion par l'huile essentielle dans le milieu HCl	12
II.2	Inhibiteur de la corrosion par des extraits de plantes dans le milieu HCl	13
II.3	Place dans la systématique de la plante <i>Pituranthos scoparius</i>	15
III.1	Résultats des tests chimiques du <i>Pituranthos scoparius</i>	25
IV.1	La composition chimique de l'acier au carbone API 5L Gr-B	30
IV.2	influence de la concentration de l'EBPS sur l'efficacité inhibitrice à différentes températures (20°C-40°C)	35
IV.3	Coefficient de corrélation pour des différentes isothermes à différentes températures (20 °C à 40°C)	39
IV.4	Paramètre thermodynamique (ΔG°_{ads}) relatifs à l'adsorption de l'EBPS sur la surface de l'acier API 5L Gr-B à différentes températures	41

IV.5	Paramètres thermodynamiques relatifs à l'adsorption de l'EBPS sur la surface de l'acier API 5L Gr-B à différentes températures	43
IV.6	Paramètres d'activation de la dissolution de l'acier dans la solution HCl 1M en absence et en présence de l'EBPS à différentes températures	46
IV.7	Paramètres de la spectroscopie d'impédances électrochimique de l'acier API 5LGr-B sans et avec l'ajout de l'EBPS	51
IV.8	Paramètres électrochimiques, taux de recouvrement et l'efficacité inhibitrice de l'acier API 5L Gr-B dans HCl 1M sans et avec l'ajout de différentes concentrations de l'EBPS à la température 20°C	54

Figure N°	Titre	Page
I.1	Corrosion généralisée (uniforme)	2
I.2	Corrosion localisée	3
I.3	la corrosion par pique	4
I.4	la corrosion galvanique	4
I.5	La corrosion par crevasse	4
I.6	la corrosion sous contrainte	5
I.7	la corrosion par érosion(a) érosion du film,(b) corrosion de la surface métallique exposée au milieu,(c) formation d'une figure d'attaque	5
II.1	photographie de la plante <i>Pituranthos scoparius</i>	17
III.1	exemple du diagramme classique (coordonnées de Nyquist)	23
III.2	Détermination du courant de corrosion par la méthode des droites de Tafel	24
III.3	Structure générale des familles de molécules présente dans l'extrait (le Flavonoïde a gauche, coumarine a droite)	27
IV.1	Protocole d'extraction de la plante <i>pituranthos scoparius</i>	33
IV.2	Variation de la vitesse de corrosion en fonction du temps dans un milieu HCl.1M	34
IV.3	protocole suivie lors des essais gravimétriques	37

IV.4	Evolution de l'efficacité inhibitrice en fonction de la concentration de l'EBPS dans une solution HCl 1M à différentes températures	38
IV.5	Evolution de la vitesse de corrosion en fonction de la concentration de l'EBPS dans une solution HCl 1M à différentes températures	38
IV.6	Isothermes d'adsorption à différentes températures de: (a) Freundlich, (b) Langmuir(c) Temkin(d) Frumkin de l'EBPS sur la surface de l'acier API 5L Gr-B dans la solution HCl 1M à différentes températures	41
IV.7	Variation de $\ln K_{ads}$ en fonction de l'inverse de la température (1/T)	43
IV.8	la variation de $\ln V_{corr}$ en fonction de l'inverse de température à différentes concentration de l'EBPS	45
IV.9	le tracé d'Arrhenius de $\ln V_{corr}/T$ en fonction de 1/T a différentes concentration de l'EBPS	46
IV.10	Photographie du Dispositif des mesures électrochimiques	49
IV.11	Electrode de travail.	50
IV.12	Evolution du potentiel d'abandon en absence et en présence de l'EBPS à 20°C	50
IV.13	Les diagrammes d'impédance électrochimiques de l'acier API 5L Gr-B dans HCl 1M sans et avec différentes concentrations du l'EBPS à 20°C	51

IV.14	Evolution de la résistance de transfert de charge de l'acier API 5L Gr-B dans la solution HCl 1M en ajoutant l'EBPS à 20°C	53
IV.15	Evolution de la capacité de double couche de l'acier API 5L Gr-B dans un solution HCl 1M en ajoutant l'EBPS à 20°C	53
IV.16	Evolution de la densité de courant de l'acier API 5L Gr-B dans la solution HCl 1M en ajoutant l'EBPS à 20°C	54
IV.17	les courbes de polarisation potentiodynamiques de l'acier API 5L Gr-B dans HCl 1M sans et avec différentes concentrations du l'EBPS à température 20°C	54
IV.18	Efficacités inhibitrice obtenue par les trois techniques dans la solution 1M et à différentes concentration de l'EBPS et à 20°C	57

Symbole	Signification	Unité
T	Température	K
C	Concentration	(mg/l) ou (ppm)
t	Temps	Heure
V_{corr}	Vitesse de corrosion	mg/cm ² .h
S	Surface de l'acier	cm ²
θ	Taux de recouvrement	-
EI	Efficacité inhibitrice	%
E_{corr}	Potentiel de corrosion	V/ECS
Z	Impédance	Ohm .cm ²
E	Potentiel	V
Z_{Re}	Partie réelle de l'impédance	Ohm .cm ²
Z_{Im}	Partie imaginaire de l'impédance	Ohm .cm ²
R_{tc}	Résistance de transfert de charge	Ohm .cm ²
C_{dc}	Capacité de la double couche	μF/cm ²
i_{corr}	Densité du courant de corrosion	mA/cm ²
K	Constante d'équilibre de la réaction	L/mg
ΔE	Différence de potentiel	V
α	Paramètre qui tient compte de l'hétérogénéité de la surface	-
ΔG°_{ads}	Energie d'adsorption libre	J/mol

R	Constante des gaz parfait	J/K.mol
K_{ads}	Constante d'équilibre du processus d'adsorption	L.mg ⁻¹
ΔS°_{ads}	L'entropie standard d'adsorption	J/mol.K
ΔH°_{ads}	L'enthalpie standard d'adsorption	KJ/mol
ΔH°_a	L'enthalpie standard d'activation	KJ/mol
ΔS°_a	L'entropie standard d'activation	J/mol.K
E_a	Energie d'activation	KJ/mol
h	Constante de Planck	Atome/mol
N_a	Nombre d'Avogadro	J/K
β_a	Coefficient de Tafel anodique	mV
β_c	Coefficient de Tafel cathodique	mV
R_p	Résistance de polarisation	Ohm.cm ²

Abréviation	Signification
[1],[2].....	Désignation mentionnée dans la partie bibliographique
NACE	National Association of Corrosion Engineers
O, N, H, Cl ⁻	Oxygène ,azote,Hydrogène,chlorure
Fe	Fer
Ref	Reference
DCM	Dichloromethane
AcOEt	Acétate d'éthyle
n-BuOH	Butanol
K	Kelvin
Hz	Hertz
1M	Une fois Molaire
ECS	Electrode au Calomel Saturé
pH	Potentiel d'hydrogène
ppm	Partie par million
EBPS	Extrait butanolique de la plante pituranthos scoparius
OCP	Potentiel a Circuit Ouvert
EIS	Spectroscopie d'impédance électrochimique
API	American Petroleum Institute
HCl	Acide chlorhydrique

المخلص

تتم دراسة تثبيط تآكل الصلب الكربوني API 5L Gr- B في محلول حمض كلور الهيدروجين (1M) بواسطة المستخلص البيتانولي لنبته القزح وذلك باستخدام التقنيات الآتية:

فقدان الوزن، منحنيات الاستقطاب، مطيافية الممانعة الكهروكيميائية، حيث بينت النتائج أن تطور الكفاءة المثبطة تزداد مع زيادة تركيز حتى تصل إلى 1000 جزء من المليون من المستخلص ويتناقض مع زيادة درجة الحرارة.

تكشف منحنيات الاستقطاب أن المستخلص ذو سلوك مثبط من النوع المختلط.

الدراسة الديناميكية للحرارة وقيم الطاقة الحرة القياسية للامتصاص بينت حدوث إمتزاز فيزيائي للمستخلص البيتانولي على سطح المعدن ويتبع نموذج فرندليج

الكلمات المفتاحية

تثبيط التآكل، الصلب الكربوني، الإمتزاز، مستخلص البيتانولي .

Résumé

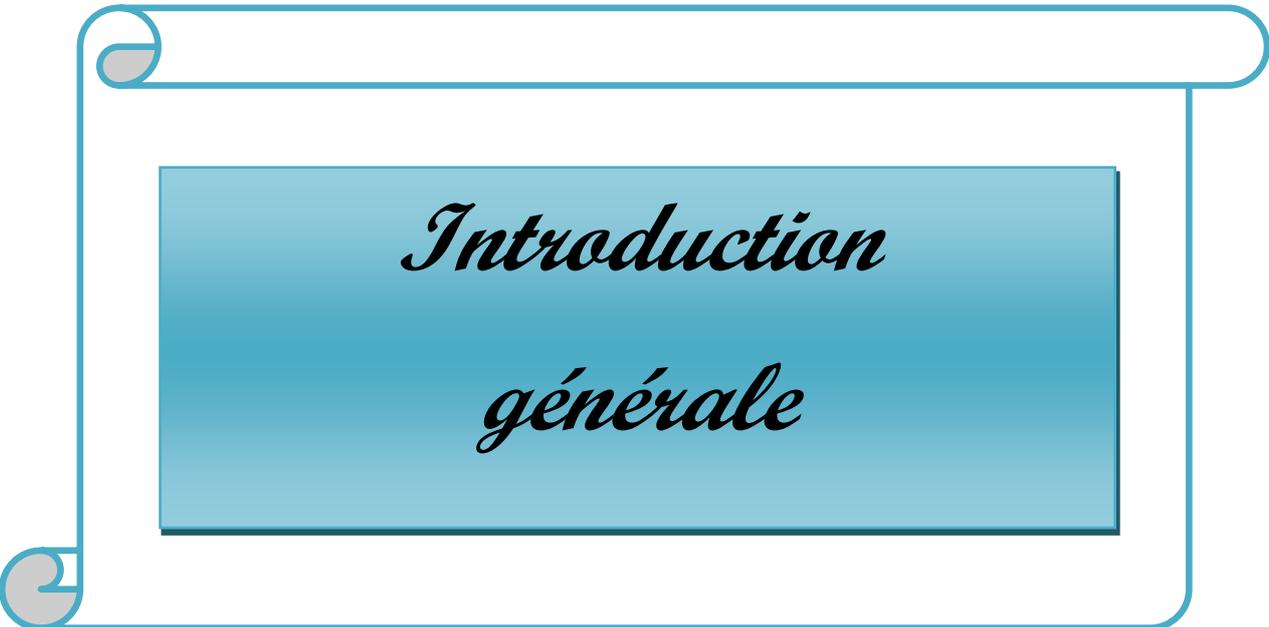
L'inhibition contre la corrosion de l'acier au carbone API 5L Gr-B dans la solution HCl (1M) est étudié par l'extrait butanolique de la plante *Pituranthos scoparius*. Cette étude est réalisé par les méthodes: perte en poids, les courbes de polarisation et la spectroscopie d'impédance. Les résultats montrent que l'évaluation de l'efficacité inhibitrice augmente avec l'augmentation de la concentration jusqu'à 1000 ppm de l'extrait et diminue avec l'accroissement de la température. Le tracé des courbes de polarisation révèle que l'inhibiteur est de type mixte, ainsi que. L'étude thermodynamique des énergies libres standards d'adsorption indique la physisorption de cette extrait et suit le modèle d'isotherme de Freundlich.

Mots clés: Acier au carbone, inhibition de la corrosion, adsorption, extrait butanolique de la plante.

Abstract

The corrosion inhibition of API 5L Gr-B carbon steel in HCl (1M) is studied by the butanolic extract of *pituranthos scoparius*. This study is carried out by the methods: Wight loss, polarization curves and impedance spectroscopy .The results show that ,the evaluation of the inhibitory efficiency increases with the increase of the concentration up to 1000 ppm of the extract and decreased with the increase of the temperature .The plot of the polarization curves reveals that the inhibitor is of mixed type. The thermodynamic study of the free standard energy of adsorption indicates the physisorption of this extract and follows the model of Freundlich isotherm.

Keywords: corrosion inhibition ,carbon steel ,plant extract butanolic ,adsorption.



*Introduction
générale*

I. Introduction général:

La corrosion est l'altération des métaux provoquée par l'action du milieu environnant et consiste plus précisément un processus spontané d'interface de nature chimique ou électrochimique. Ces phénomènes d'altération engendrent une dégradation rapide des ouvrages métalliques. En conséquence, l'industrie subit des pertes économiques énormes pour le remplacement des pièces endommagées [1].

Les aciers sont les alliages à base de fer les plus utilisés pour la construction des structures métalliques lesquelles sont souvent exposées aux milieux naturels agressifs. C'est en raison de leur faible coût, leur force mécanique élevée mais aussi leur disponibilité que les aciers sont privilégiés dans l'industrie. Toutefois, ils sont particulièrement vulnérables aux environnements variables (milieu aqueux, atmosphère, hautes températures), puisqu'ils offrent une faible résistance à la corrosion [2].

Les solutions acides sont largement utilisées dans l'industrie, les principaux domaines d'application étant le décapage ou le nettoyage des canalisations de pétrole, et l'élimination de dépôts localisés. L'agressivité de ces solutions acides conduit à l'utilisation d'inhibiteurs indispensables pour lutter contre la corrosion des matériaux métalliques. Parmi les acides disponibles commercialement, l'acide chlorhydrique est le plus fréquemment utilisé.

Les inhibiteurs de corrosion constituent un moyen à part entière de protection contre la corrosion métallique. Un inhibiteur est un composé chimique que l'on ajoute en faible quantité au milieu corrosif pour diminuer la vitesse de la corrosion des matériaux [3].

L'utilisation d'extraits de plantes, comme des inhibiteurs de corrosion, est une thématique de recherche en développement si on se fie au nombre de publications sortant chaque année. En effet, ces extraits naturels contiennent de nombreuses familles de composés organiques naturels (flavonoïdes, alcaloïdes, tannins...).

Pour y remédier, des recherches ont été récemment menées sur les propriétés inhibitrices de corrosion, de produits naturels de plantes qui se sont avérés généralement efficace concernant ces propriétés. L'intérêt de ce domaine de recherche est principalement au fait que les produits naturels n'agressent pas l'environnement et sont écologiquement satisfaisant.

Dans cette optique, des chercheurs sont intéressés à l'application des produits naturels non toxiques, ces produits sont utilisés sous forme d'extraits ou sous forme d'huiles essentielles [4].

Plusieurs méthodes de protection contre la corrosion ont été développés, parmi lesquels l'utilisation des inhibiteurs de corrosion organiques ou naturels est l'une des meilleures méthodes en raison de leur rentabilité et facilité d'application dans l'industrie [5]

L'objet de notre travail consiste d'étudier l'interaction entre l'extrait butanolique de la plante *Pituranthos scoparius* et la surface de l'acier au carbone dans un milieu acide.

Le mémoire est subdivisé en quatre chapitres essentielles:

Le premier chapitre est consacré à une étude théorique sur la corrosion des matériaux métalliques (définition, paramètres, facteurs, formes ...).

Et par un deuxième chapitre qu'on a affecté une étude théorique sur l'inhibition de la corrosion, suivie d'une revue bibliographique liée à l'utilisation des composés naturel a bases de plante comme inhibiteurs de corrosion des métaux en milieux agressifs.

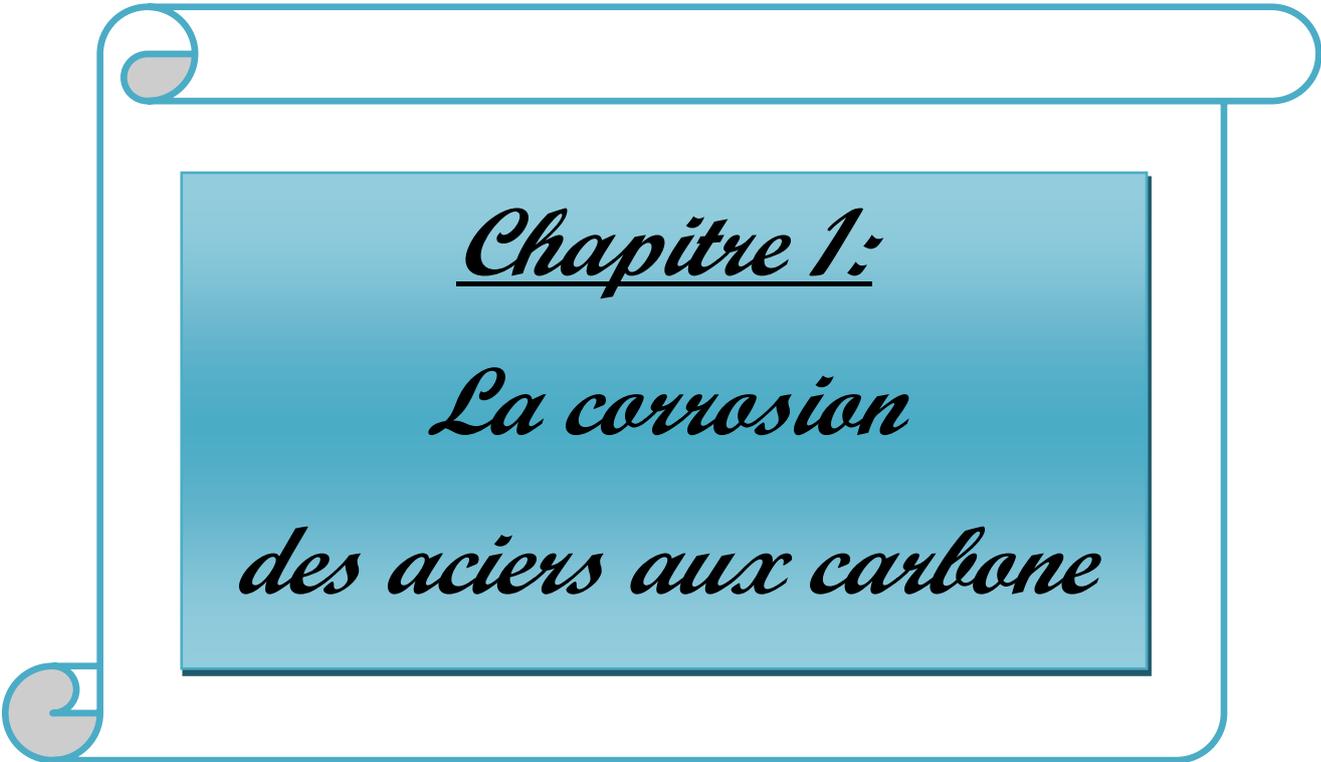
En suite un troisième chapitre qu'en a parlé de différentes méthodes chimiques et électrochimiques d'études de l'inhibiteur de corrosion au matériel et aux solutions que nous avons utilisé.

Enfin le dernière chapitre est accordé à la présentation des résultats expérimentaux obtenus et les analyses d'étude.

Et finalement une conclusion générale résumant l'essentiel des résultats et les perspectives à entreprendre pour approfondir l'étude.

References bibliographiques:

- [1] H. H. Ulich, R. W. Revie, "Corrosion and Corrosion Control" 3th ed", New York: John Wiley & Sons Ltd.(1985) p. 441.
- [2] T. H. Rogers, "Marine Corrosion", London: Newnes, (1968) p. 307.
- [3] H. Marmi, "Amélioration de résistance à la corrosion électrochimique des aciers par utilisation des inhibiteurs ", thèse de Doctorat, université Mohammed Khider –Biskra (2017).
- [4] A. Zaabar, "Utilisation de l'extrait de la plante d'Ortie (*Urtica dioica* L.) comme inhibiteur de corrosion de l'acier dans les milieux HCl 0,5 et NaCl 3%", thèse de Magister, université Abderrahmane Mira Bejaïa", (2010).
- [5] NACE Glossary of Corrosion Terms. Materials Protection, 4, (1965), PP.79.



Chapitre 1:
La corrosion
des aciers aux carbone

I. 1. Introduction:

Les différentes formes de corrosion sont les résultats d'une attaque d'un métal par réaction chimique et/ou électrochimique avec son environnement. Ce phénomène cause de grandes pertes économiques en provoquant la destruction des matériaux métalliques [1].

En général, l'origine de la corrosion est la formation d'une pile électrochimique, qui se forme lorsqu'il y a une différence de potentiel entre deux parties à la surface du métal [2].

Dans ce chapitre nous avons abordé des définitions de la corrosion, les différentes formes de la corrosion et nous présentons une liste de facteurs favorisant la corrosion.

I. 2. Définition de la corrosion

I. 2. a. Selon ISO 8044:

La corrosion est une interaction physico-chimique entre un métal et son environnement 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 [3].

N.B. Cette interaction est généralement de nature électrochimique.

I. 2. b. Selon NACE:

Selon NACE, la référence mondiale en matière de corrosion, NACE (National Association of Corrosion Engineers), définit la corrosion comme 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 dans les tuyères industrielles - chimique ou pétrochimique ou d'extraction pétrolière) [4].

I. 3. Les types de corrosion :

La corrosion se subdivise en deux types suivant le milieu qui entoure les métaux subissant une corrosion.

I. 3. 1. Corrosion sèche:

Se fait entre une phase solide (le métal) et une phase gazeuse (O_2 , air sec, SO_2 , NO_3).

Elle se produit par la transformation des métaux en oxydes en formant des couches superficielles où les atomes du métal forment directement des liaisons chimiques, avec l'oxydant qui arrache les électrons de valence des atomes métalliques.

I. 3. 2. Corrosion humide:

Appelée aussi (corrosion électrochimique): est le résultat de l'attaque d'un métal par un électrolyte. Cette forme est caractérisée par l'apparition de courant électrique c'est à dire il y a donc formation d'une pile et passage d'un courant de l'anode (réaction d'oxydation) vers la cathode (réaction de réduction) dans le réactif [5]

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

La corrosion bactérienne est due à la présence de colonies importantes de bactéries dites anaérobiques qui se développent dans les eaux contenant des sulfates.

La lutte contre cette forme de corrosion est à l'heure actuelle essentiellement d'ordre biologique, elle est réalisée par injection de produits bactéricides dans les milieux corrosifs [6].

I. 4. Les formes de la corrosion (Morphologie):

Les principales formes de corrosion sont regroupées en deux grandes familles : la corrosion généralisée et la corrosion localisée.

I. 4. 1. Corrosion généralisée (uniforme ou continue):

La corrosion uniforme se traduit par une perte de masse plus ou moins régulière sur toute la surface du métal .exemple la corrosion d'acier ou du zinc dans une solution d'acide sulfurique aérée [7].

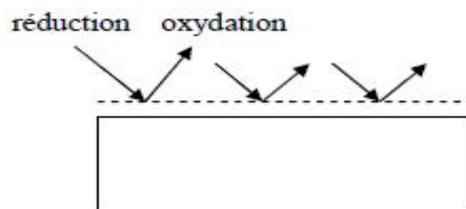


Figure I.1: Corrosion généralisée (uniforme)

I. 4. 2. Corrosion localisée:

La corrosion localisée est définie comme étant une attaque qui se déroule en un milieu spécifiquement anodique d'une surface d'un matériau. Dans ce cas de réaction, on distingue clairement les zones anodiques et cathodiques[8].

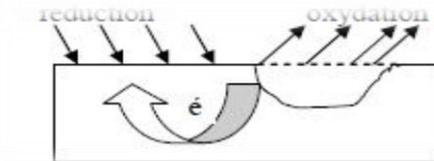


Figure I. 2. Corrosion localisée

Il existe différents types de corrosion localisée : La corrosion localisée en milieux corrosifs [9,10] regroupe :

- ✓ La corrosion sous contrainte
- ✓ La corrosion par piqûre
- ✓ La corrosion par crevasse
- ✓ La corrosion intergranulaire
- ✓ La corrosion galvanique

I. 4. 2. 1. La Corrosion par piqûres:

La corrosion par piqûres est caractérisée par une attaque très localisée en certains points de la surface et provoque des piqûres. Cette forme de corrosion est produite par certains anions notamment les halogénures (chlorures....) sur les métaux protégés par un film d'oxyde.

La corrosion par piqûres affecte en particulier les métaux et les alliages [11].

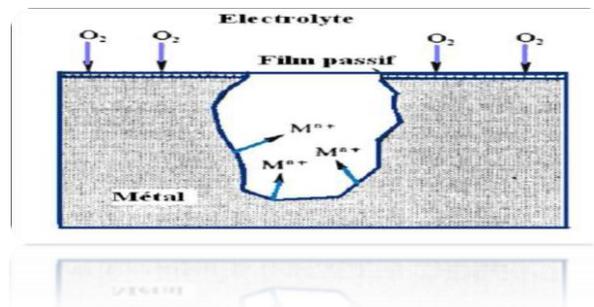


Figure I. 3: La corrosion par piqûre

I. 4. 2. 2. La corrosion galvanique:

Il s'agit de l'attaque préférentielle de la phase la moins noble d'un alliage comportant deux phases ou de la corrosion pouvant exister entre aux moins de matériaux métalliques placés dans le même environnement [12] .



Figure I.4: La corrosion galvanique

I. 4. 2. 3. La corrosion par crevasse

Appelée aussi corrosion caverneuse, est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure , créant ainsi une pile électrochimique .On observe une attaque sélective du métal dans les fentes et autre endroits peu accessibles à l'oxygène [13].



Figure I. 5: La corrosion par crevasse

I. 4. 2. 4. La corrosion sous contrainte:

La corrosion sous contrainte est une fissuration du métal qui résulte de l' action commune d' une contrainte mécanique et d' une réaction électrochimique [14].



Figure I. 6: La corrosion sous contrainte

I. 4. 2. 5. Corrosion intergranulaire:

Cette forme de corrosion se manifeste par une attaque localisée aux joints de grains du matériau les cas les plus fréquents de corrosion inter granulaire se développent dans le cas d'aciers inoxydables [15].

I. 4. 2. 6. Corrosion par érosion:

Elle est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de matière. Elle a souvent lieu sur des métaux exposés à l'écoulement rapide de fluide [16].

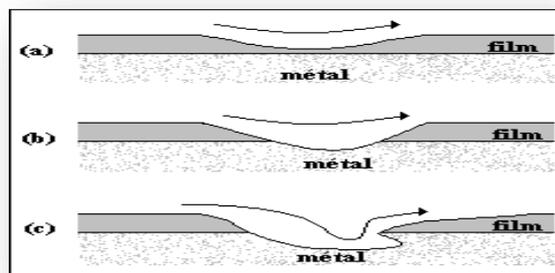


Figure I. 7: La corrosion par érosion (a) érosion du film, (b) corrosion de la surface métallique exposée au milieu, (c) formation d'une figure d'attaque

I. 5. La dégradation d'un acier au carbone (facteur de corrosion):

Les phénomènes de la corrosion dépendent de plusieurs facteurs, on peut classés en quatre groupes principaux selon le tableau suivant:

Tableau I.1: Les principaux facteurs de la corrosion

Facteurs du milieu corrosif	Facteurs métallurgiques	Facteurs définissant le condition d'emploi	Facteurs dépendants du temps
<ul style="list-style-type: none"> .Concentration du réactif .Teneur en oxygène pH du milieu .Température , Pression . impuretés 	<ul style="list-style-type: none"> .Composition du métal ou de l'alliage .procédés d'élaboration .impuretés .traitement thermique .traitement mécanique 	<ul style="list-style-type: none"> . Etats de surface . moyens de protection . forme des pièces . emploi d'inhibiteur 	<ul style="list-style-type: none"> .vieillessement . Température .Tension mécanique .Modification des revêtements protecteurs

I. 6. Effet de divers paramètres sur la corrosion :

Les phénomènes de corrosion influés par plusieurs facteurs tels que:

I. 6. 1. Effet de la température :

Généralement l' augmentation de la température accélère les phénomènes de corrosion car elle diminue les domaines de stabilité des métaux et accélère les cinétique de réaction et de transport des molécules [17].

I. 6. 2. Effet de l' acidité :

La susceptibilité du matériau à la corrosion est relatif au pH de l' électrolyte . Une forte concentration en protons dans la solution augment l'agressivité du milieu ,ce qui modifié les équilibres des réactions chimiques et électrochimiques Alors la diminution des valeurs du pH du milieu augmente la corrosion [18].

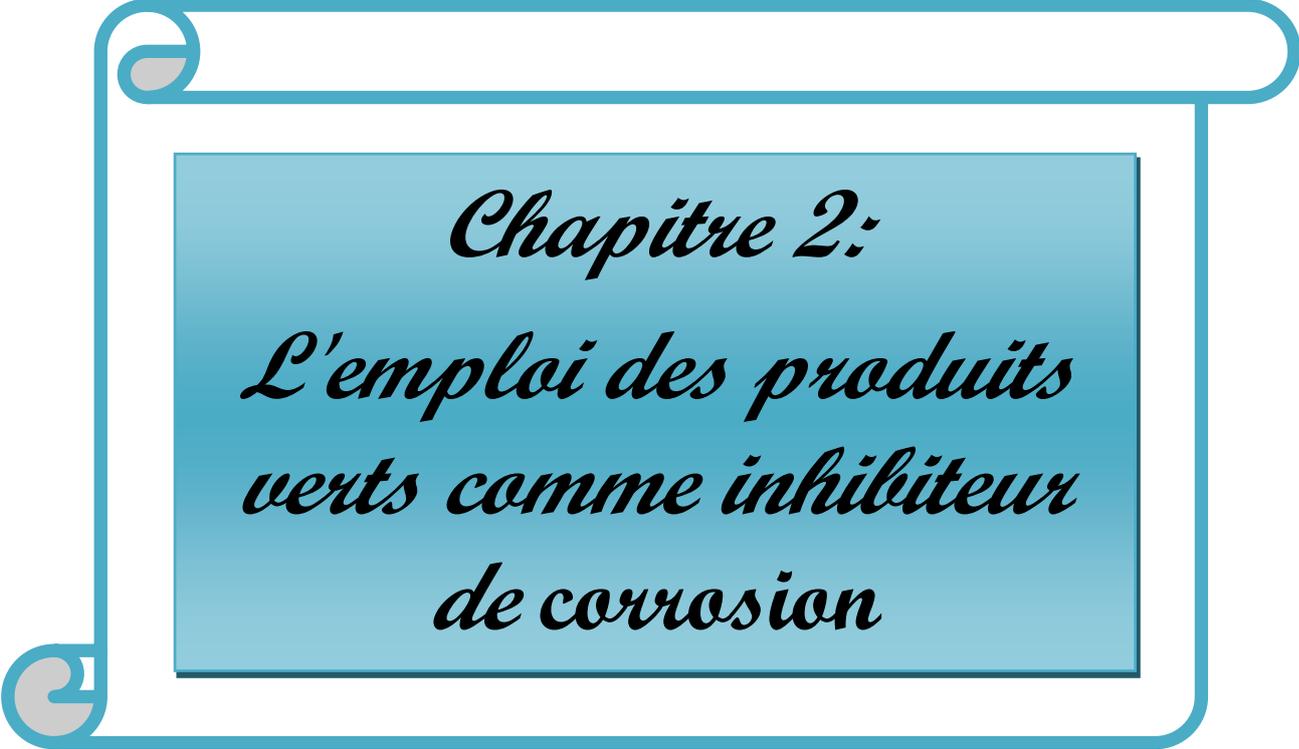
I. 6. 3. Salinité:

Les chlorures sont des ions agressifs, souvent à l'origine de corrosion localisée, leur présence en solution s'accompagne d'effets complémentaires, d'une part, leur concentration locale induit une acidification du milieu et d'autre part l'influence de la salinité sur la conductivité du milieu aqueux [19].

Références Bibliographiques:

- [1] M.G. Fontana, "Corrosion engineering", Mc Graw-Hill. Book. Company N. Y, (1986).
- [2] Kh. M. Lakhder, "Détérioration des canalisations sous l'effet des différents facteurs de la corrosion", Mémoire de Magister, université Mohammed Khider-Biskra, (2014).
- [3] C. Fiaud, C. Lemaitre, N. Pébére, "corrosion et anticorrosion", chapitre 13. Lavoisier, Paris, (2002).
- [4] NACE Glossary of corrosion Terms. Materials Protection, 4, 79, (1965).
- [5] H. Marmi, "Amélioration de résistance à la corrosion électrochimique des aciers par utilisation des inhibiteurs", thèse de Doctorat, université Mohammed Khider –Biskra, (2017).
- [6] K. Rouibah, "Contribution à l'étude du comportement électrochimique du couple galvanique acier au carbone/anodes de zinc dans l'eau de mer naturelle", Mémoire de Magister, (2003).
- [7] T. Lanez, "cours de corrosion, "chapitre 1 "université Kasdi Merbah Ouargla, (2010).
- [8] F. Dabosi, G. Béranger, B. Baroux, "corrosion localisée" les éditions de physique, (1994).
- [9] G. P. Legry, A. Pourbaix, "corrosion localisée", les éditions de physique, (1994).
- [10] L.L. Shreir's, "corrosion chap. localized corrosion", Ed. Newnes, (1976), pp1-130.
- [11] Melle, K. Meddahi, "Contribution à l'étude de l'incompatibilité entre un inhibiteur de corrosion et un inhibiteur de dépôt, "université M'Hamed Bougara-Boumerdes, mémoire de Magister, (2013-2014).
- [12] B. Grosgeat, P. Colon, "cours de corrosion", université Médicale Virtuelle Francophone, (2009-2010).
- [13] D. Landolt, corrosion et chimie de surfaces des métaux, traité des matériaux, Presses polytechniques et Universitaires Romande, (2003).

- [14] A.Zielinski, E.Renauld, M.Puiggali, J.M.Oliv, M.Cid, D.Desjardins, "Effects of temperature on environmental- assisted failure on an Al_Zn_Mg, Cu alloy", Journal of materials processing technology, Vol,53,P491-498, (1995).
- [15] O.M,Vololonirina, "contribution à l'évaluation des capacités des glycérophosphates pour la maintenance dans le béton armé, "thèse de doctorat, Toulouse France, (2011).
- [16] S.BENSAADA, "Cours de Corrosion", édition OPU, (2011).
- [17] P.Boumersbach, C.Alemany-Dumont, J.P.Millet, "electrochemical characterization of a corrosion inhibitor influence of temperature on the inhibition mechanism.207th meeting of electrochemical society, "Quebec, City Canada, 15_20 mai (2005).
- [18] R.D.Kane, S.Srinivasan, "experience survey on corrosion monitoring and mitigation technique for sweet well production, "CLI International, INC HOUSTON,TX, (1996), <http://www.corrosion source .com / inter Corr /96>.
- [19] N.Boudieb, "Evaluation des performances des peintures par des techniques électrochimiques", mémoire de magister, (2008).



*Chapitre 2:
L'emploi des produits
verts comme inhibiteur
de corrosion*

II. 1. Introduction:

En matière de protection, les inhibiteurs constituent un moyen original pour lutter contre la corrosion. Pour protéger les matériaux contre la corrosion, plusieurs procédés peuvent être utilisés : les inhibiteurs synthétiques ou naturels, la modification de la surface du matériau, en fonction de son environnement, par des traitements thermo-chimiques, des revêtements, de la peinture....., ou par utilisation des inhibiteurs de corrosion [1].

II. 2. Définition d'un inhibiteur:

La définition d'un inhibiteur de corrosion n'est pas unique, néanmoins 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 » [2].

II. 3. Propriétés d'un inhibiteur:

En dehors de tout mécanisme d'action, un inhibiteur de corrosion doit vérifier un nombre de propriétés fondamentales [3]:

- ❖ Diminuer la vitesse de corrosion d'un métal, sans modifier les caractéristiques physico-chimiques, en particulier la résistance mécanique.
- ❖ Être stable en présence des autres constituants du milieu, en particulier vis-à-vis des oxydants.
- ❖ Être stable aux températures d'utilisation.
- ❖ Être efficace à faible concentration.
- ❖ Être compatible avec les normes de non-toxicité

II. 4. Les classes des inhibiteurs:

Il existe plusieurs possibilités pour classer les inhibiteurs [4]:

- ❖ 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.

II. 5. Inhibiteurs de corrosion d'origine naturelle:

En générales, l'inhibiteurs utilisées pour protéger les métaux contre la corrosion, où la plupart des inhibiteurs sont toxique ou cancérigène, plusieurs chercheurs se sont intéressés à la recherche de nouvelle voies d'inhibition de la corrosion basées sur les extraits de plantes, les huiles, et les extraits sont obtenus des différentes parties d'une plante des feuilles des graines des écorces et des racines ou d'autres structures spéciales. Leur composition est complexe puisqu'elle est constituée d'un mélange de composés qui appartiennent aux différentes classes de la chimie organique, telle que les phénols, les hydrocarbures, les alcools, les aldéhydes, et les cétones etc [5].

II. 5. 1. Inhibiteur à base des huiles:

Quelques études sur l'inhibiteur de la corrosion par les huiles essentielles dans le milieu HCl sont rapportées dans le tableaux suivant:

Tableau II. 1: Inhibiteur de la corrosion par l'huile essentielle dans le milieu HCl

Source de l'inhibiteur	Concentration du Milieu (HCl)	Type de Métal exposée	Concentration critique	T(K)	Efficacité maximale	ref
L'huile des graines de <i>Prickly Pear</i>	1M	Acier C38	5g/l	298	90%	[6]
L'huile du (<i>Chamonil la Recutita</i>)	1M	Acier C38	2 g/l	298	90%	[6]

L'huile du (<i>Mentha Spicata.L</i>)	1M	Acier	2 g/l	298	97%	[7]
L'huile essentielle de (<i>L'Artemisia</i>)	1M	Acier	19 g/l	343	87%	[8]
L'huile essentielle de (<i>Jojoba</i>)	1M	Fer	0,515 g/l	298	100%	[9]
L'huile du Fennel (<i>Foeniculum Vulgare</i>)	1M	Acier au carbone	3 g/l	298	76%	[10]

II. 5. 2. Inhibiteur à base d'extraits:

Quelques études sur l'inhibiteur de la corrosion par des extraits dans le milieu HCl sont rapportées dans le tableaux suivant:

Tableau II. 2: Inhibiteur de la corrosion par des extraits de plantes dans le milieu HCl

Produit Vert	Concentration de milieu HCl	Métal exposé	Concentration Critique	T (K)	Efficacité maximale	ref
Extrait éthanoïque du (<i>Ananas Satium</i>)	1M	Aluminium Type AA (1060)	0,5g/l	333	96,09%	[11]
Extrait de (<i>Black pepper</i>)	1M	AcierC38	2g/l	308	95,8%	[12]

Extrait de (<i>citrus Autantium</i>)	1M	Acier doux	1200ppm	308	88,1%	[13]
Extrait de (<i>Moringa Oleifera</i>)	1M	Acier doux	300ppm	308	98,2%	[13]
Extrait de graine (<i>Pongania Pinnata</i>)	1M	Acier doux	400ppm	308	98%	[14]
Extrait de (<i>Azadirachta Indica</i>)	1M	Acier inoxydable	2g/l	293	87%	[15]
Extrait éthanoïque des feuilles de (<i>Pachycormus Discolor</i>)	1M	Acier inoxydable	2% v.v	293	94,52%	[16]

II. 6. Adsorption des molécules inhibitrice à la surfaces métalliques:

L'adsorption est un processus intervenant lors de la fixation de molécules d'adsorbat (gaz ou liquide) sur une surface solide (adsorbant). On distingue généralement deux types de processus d'adsorption en fonction des chaleurs de réaction mises en jeu :

II. 6. 1. La physisorption : fait intervenir des liaisons faibles de type forces de Van der Waals lors de la fixation adsorbat-adsorbant et engendre une chaleur de réaction faible (quelques kilocalories). Ces interactions vont permettre une possible adsorption en mono et multicouches. L'adsorption physique a lieu de façon rapide, sans modification de la structure des molécules physisorbées et est réversible rendant ainsi les molécules adsorbées facilement désorbables[17].

I. 6. 2. La chimisorption : ce type d'adsorption résulte d'une interaction chimique accompagnée par la formation de liens chimiques entre les molécules d'adsorbat et la surface

d'adsorbant et avec une valeur importante d'enthalpie de l'ordre d'une centaine de kilocalories. La fixation des molécules à la surface se faisant par liaisons de valence, ou liaison ionique [17].

II. 7. Description botanique:

La *Pituranthos scoparius* (nom arabe: **Guezzah**) est une espèce endémique d'Afrique du Nord et très répandue en Algérie.

C'est une plante vivace, sans feuilles ou presque, à tiges hautes de 50-80 cm pendant l'évolution et jaunâtre au cours de la vieillesse, en forme de joncs, ramifiées dans le haut seulement, simples et parallèles entre elles dans leur moitié inférieure, portant des ombelles latérales; pédoncules souvent courts; pétales blancs à nervures étroites [18].

II. 7. 1. Classification botanique:

D'après Quézel et Santa (1963) "*Pituranthos scoparius*" est classée comme suit :

Tableau II. 3: Place dans la systématique de la plante *Pituranthos scoparius* [19].

Règne	Végétale
Ordre	<i>Apiales</i>
Famille	<i>Apiacées</i>
Genre	<i>Pituranthos</i>
Espèce	<i>Pituranthos scoparius</i>

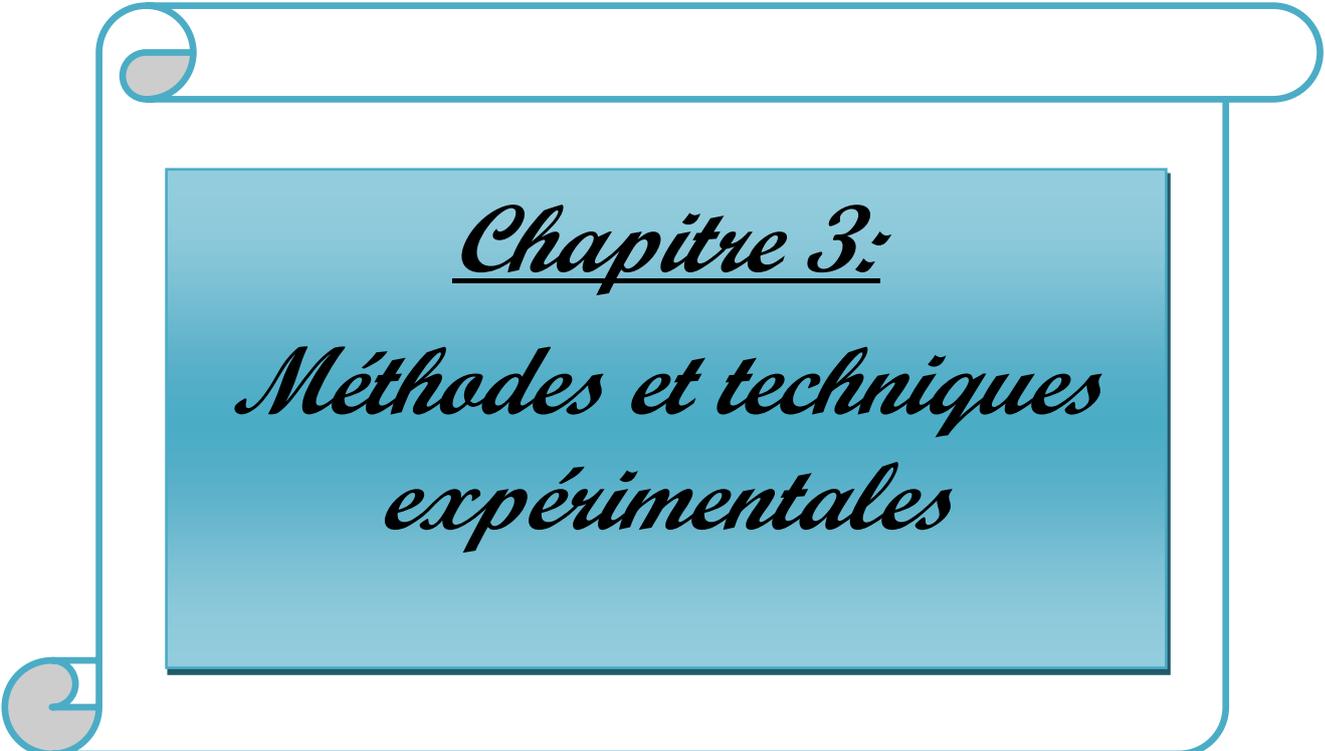


Figure II. 1: Photographie de la plante *Pituranthos scoparius* (les tiges, fleurs)

Références Bibliographiques:

- [1] K. Abderrahime, "Etude de pouvoir filmer et de l'efficacité inhibitrice L'ASCOTECO-FU et de la tetrathiafulvalene sur la corrosion de cuivre en milieu salin aqueux", thèse de doctorat, université Badji Mokhtar Annaba (2017).
- [2] NACE Glossary of Corrosion Terms . Materials Protection,4,(1965),79 .
- [3] D. Landolt, "Corrosion et Chimie de Surface des Métaux", traité des matériaux, Presses polytechnique et Universitaires Romande, (2003).
- [4] H. Hamani, "Synthèse caractérisation et étude du pouvoir inhibiteur de nouvelles molécules bases de schiff, "thèse de doctorat, université Ferhat Abbas Sétif _1,(2015).
- [5] D.Benmessaoud Left, M.Zertoubi, A.Irhzo, M.Azzi, J Mater Environ Sci,4(6), (2013) p. 855-866.
- [6] D. Ben Hmamou, R.Salghi, A.Zarrouk, B.Hammouti, S.S.Al-Deyab, Lh.Bazzi, H.Zarrok, A.Chakir, L.Bammou, *Int. J. Electrochem. Sci*, 7,(2012),2361–2373
- [7] M. Znini, M.Bouklah, L.Majidi, S.Kharchouf, A.Aouniti, A.Bouyanzer, B.Hammouti, J.Costa, S.S.Al-Deyab, *Int.J. Electrochem. Sci*, 6,(2011), 691–704.
- [8] A. Bouyanzer, B.Hammouti, *Pigment & Resin Technology*,33,(2004), 287–292.
- [9] A. Chetouani, B.Hammouti, M.Benkaddour, *Pigment & Resin Technology* ,33,(2004) p 26–31.
- [10] N. Lahhit, A.Bouyanzer, J.M.Desjobert, B.Hammouti, R.Salghi, J.Costa, C. Jama, F.Bentiss, L. Majidi, *.Portugaliae Electrochimica Acta*, 29 ,(2011), 127-138.
- [11] E. I. Ating, S.A. Umoren, I.I.Udousoro, E.E.Ebenso, A.P.Udoh, *Green Chemistry Letters and Reviews*, 3, (2010), 61-68.
- [12] M. Dahmani, A.Et-Touhami, S.S.Al-Deyab, B.Hammouti, A.Bouyanzer, *Int.J. Electrochem. Sci.*, 5, (2010),1060–1069.
- [13] A. Singh, V.K. Singh, M.A. Quraishi, *J. Mater. Environ. Sci.*,1, (2010), 162-174 .
- [14] A. Singh, I. Ahamad, V.K. Singh, &M.A.Quraishi, *J Solid State Electrochem*, 15 , (2011), 1087–1097.

- [15] A. Nahlé, I.Abu-Abdoun, I.Abdel-Rahman, M.Al-Khayat, *International Journal of Corrosion*, Volume (2010) doi:10.1155/2010/460154.
- [16] R. GInzunza, B.V. Salas, R. Kharshan, A.Furman, M.SchorrWiener, *International Journal of Corrosion* Volume, (2012), doi:10.1155/2012/980654.
- [17] C. Rill, Z.I. Kolar, G.Kickelbick, H.T.Wolterbeek, A.Joop, Kinetics and thermodynamics of adsorption on hydroxyapatite of the [160Tb] Terbium complexes of the bone-targeting ligands *DOTP and BPPED*, *Langmuir*, 25(4), (2009) ,2294-2301.
- [18] P. Ozenda, *Flore et Végétation du Sahara*, Ed. CNRS Paris France, (1991).
- [19] H. Adida, "Etude des propriétés antioxydantes et antimicrobiennes de *Pituranthos scoparius* Benth et Hook "Guezzeh" : plante médicinale endémique de Sahara ", université Aboubeker Belkaid–Tlemcen ,thèse de doctorat, (2014-2015).



Chapitre 3:
*Méthodes et techniques
expérimentales*

III. 1. Introduction:

L'évaluation de l'efficacité des inhibiteurs de corrosion et la caractérisation du comportement électrochimique des matériaux ont été réalisées par des méthodes électrochimiques stationnaires (suivi du potentiel en fonction de temps, courbes de polarisation). Et non stationnaires (spectroscopie d'impédance électrochimique) [1]. En plus de la méthode gravimétrique basé sur la détermination de la perte de masse au cours du temps.

Dans ce chapitre nous avons présenté ci-dessous les méthodes et techniques expérimentales utiliser dans cette études.

III. 2. Méthode gravimétrique:

Cette méthode présente l'avantage d'être d'une mise en œuvre simple ,il nécessite pas un appareillage important, en utilise cette méthode pour savoir l'efficacité de notre inhibiteur .

Son principe repose sur la mesure de la perte de poids Δm subie par un échantillon de surface S pendant le temps d'immersion t dans une solution corrosive maintenue à température constante [2]. La vitesse de corrosion (V_{corr}) peut être exprimé en $mg/cm^2.h$ est donnée par la relation suivante:

$$V_{corr} = \frac{\Delta m}{S.t} \dots \dots \dots (III.1)$$

$$\Delta m = m_1 - m_2 \dots \dots \dots (III.2)$$

Où m_1 : masse de l'échantillon avant l'essai en mg.

m_2 : masse de l'échantillon après l'essai en mg.

S : surface totale de l'échantillon en cm^2 .

t : temps d'immersion d' échantillon dans la solution en h.

Le taux de recouvrement θ et calculer par la relation suivante:

$$\theta = \frac{V^{\circ}_{corr} - V^{inhi}_{corr}}{V^{\circ}_{corr}} \dots \dots \dots (III.3)$$

L'efficacité inhibitrice est donnée par la relation suivante:

$$EI(\%) = \theta * 100 \dots \dots \dots (III.4)$$

Où :

V_{corr}° et V_{corr}^{inhi} les vitesses de corrosion de l'échantillon après l'immersion dans le milieu corrosif sans et en présence de l'extrait sont respectivement

III. 3. Méthode électrochimique:

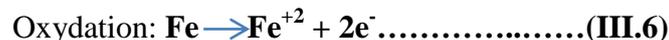
Il est également possible de définir le courant de corrosion par des techniques électrochimiques. Les trois méthodes suivantes sont les plus utilisées:

III. 3. 1. Suivi du potentiel en circuit ouvert:

Appelé aussi potentiel d'abondant ou potentiel à circuit ouvert noté E_{ocp} (Open Circuit Potentiel). Cette technique simple apporte des informations préliminaires sur la nature des processus se produisant à l'interface métal/électrolyte. Au bout d'un temps suffisamment long pour qu'un régime stationnaire soit établi, l'électrode métallique prend, par rapport à la solution, un potentiel appelé potentiel de corrosion (E_{corr}) [3]. Cette méthode permet la mesure du potentiel $E = f(t)$.

Cette mesure est effectuée entre l'électrode de travail et l'électrode de référence. Ce potentiel dépend des conditions expérimentales liées au milieu (nature, concentration, température pH) et à l'état de surface du métal (substrat) [4].

La valeur de potentiel dépend des réactions d'électrodes suivantes :



III. 3. 2. Spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE):

La Spectroscopie d'impédance électrochimique est une méthode non-stationnaire (transitoire) qui permet d'avoir des informations sur les étapes élémentaires qui constituent le processus électrochimique global. Cette dernière présente plusieurs avantages. Elle permet la détermination précise de la vitesse de corrosion même dans le cas où le métal est recouvert d'une couche protectrice. aussi permet l'évaluation du taux d'inhibition, la caractérisation des différents phénomènes de corrosion (dissolution, passivation) ainsi que l'étude des mécanismes réactionnels à l'interface électrochimique.

La représentation graphique d'une impédance $Z = Z_{Re} + jZ_{Im}$ dans le plan complexe pour différentes fréquences est appelée diagramme de Nyquist, en plaçant les valeurs Z_{Re} en abscisse et $-Z_{Im}$ en ordonnée [5].

L'efficacité d'inhibition est calculée à partir des valeurs de la résistance de transfert de charge R_t selon la relation :

$$EI(\%) = \frac{R_{tc}^{inhi} - R_{tc}^0}{R_{tc}^{inhi}} \times 100 \dots \dots \dots (III.7)$$

Où R_{tc}^{inhi} et R_{tc}^0 sont respectivement les valeurs de la résistance de transfert de charges de laiton avec et sans addition d'inhibiteur [6].

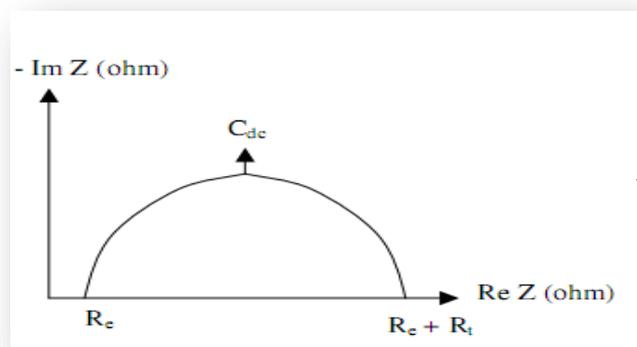


Figure III. 1: Exemple du diagramme classique (coordonnées de Nyquist)

L'exploitation du diagramme obtenu à partir de l'expression de l'impédance électrochimique donne accès à plusieurs paramètres représentatifs du système.

- ✓ La résistance de la solution (R_s).
- ✓ La résistance de transfert de charges (R_{tc}).
- ✓ La capacité de double couche (C_{dc}).

III. 3. 3. Courbes de polarisation:

Les courbes courant-tension stationnaires ont permis d'estimer la vitesse de corrosion et d'appréhender la formation du film inhibiteur. En effet, la présence du film formé peut se caractériser sur ces courbes par l'invariance du courant sur un large domaine de surtension

appliquée. Les courbes de polarisation sont déterminées en appliquant un potentiel entre une électrode de travail et une électrode de référence (ECS). Un courant stationnaire s'établit après un certain temps. Il est mesuré entre l'électrode de travail et une contre-électrode (ou électrode auxiliaire). D'un point de vue cinétique, deux modes de contrôle sont à distinguer selon l'étape réactionnelle limitant [7].

L'efficacité d'inhibition est calculée à partir des valeurs de la densité de courant i selon la relation :

$$EI(\%) = \frac{i_{\text{corr}}^{\circ} - i_{\text{inhi}}^{\circ}}{i_{\text{corr}}^{\circ}} \dots \dots \dots \text{(III.9)}$$

i_{inhi}° et i_{corr}° sont les valeurs de densité de courant de corrosion avec et sans inhibiteur respectivement .

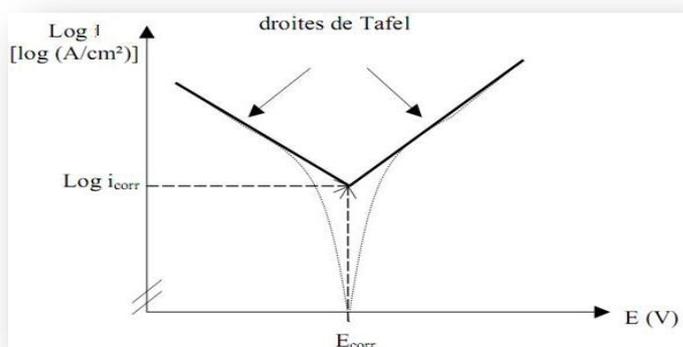


Figure III.2: Détermination du courant de corrosion par la méthode des droites de Tafel

III. 4. Modèles d'isothermes d'adsorption:

L'isotherme d'adsorption, est d'étudier le mécanisme d'adsorption de l'inhibiteur. Le processus d'adsorption dépend des caractéristiques électroniques de l'inhibiteur, la nature de surface des métaux, la température, les effets stériques et les divers degrés de l'activité d'un site[8].

III. 4. 1. Isotherme 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 [9].

L'équation de l'isotherme de Langmuir est:

$$\frac{c}{\theta} = \frac{1}{K} + C \dots\dots\dots(\text{III.10})$$

D'où θ : Taux de recouvrement.

K : La constante d'équilibre.

III. 4. 2. Isotherme de Freundlich :

L'isotherme de Freundlich s'applique généralement lorsque les quantités adsorbées sont très faibles. Ce modèle qui est un modèle empirique considère de possibles interactions entre les molécules adsorbées tout en prenant en compte l'hétérogénéité de surface). Et s'exprime par la relation suivante [10] :

$$\log\theta = \log K + \alpha \log C \dots\dots\dots(\text{III.11})$$

III. 4. 3. Isotherme de Temkin:

Dans le modèle de Temkin, l'énergie libre d'adsorption de l'adsorbat est une fonction linéaire du taux de recouvrement θ et les constantes de vitesse chimiques sont fonction de θ . Il y a attraction ou répulsion entre espèces adsorbées à la surface [11].

L'équation de l'isotherme de Temkin est:

$$\theta = \frac{1}{\alpha} \log k + \alpha \log C \dots\dots\dots(\text{III.12})$$

D'où: α est un paramètre qui tient compte l'hétérogénéité de la surface et des interactions intermoléculaire dans la couche adsorbée.

III. 4.4. Isotherme de Frumkin:

L'isotherme de Frumkin est représentée après réarrangement par l'expression suivante:

$$\ln \left\{ \frac{\theta}{C(1-\theta)} \right\} = \ln K + \alpha \theta \dots\dots\dots (\text{III.13})$$

l'isotherme de Frumkin se rapproche de l'isotherme de Langmuir [11].

III. 5. Les principes actives:

Les dernières décennies y a eu un intérêt croissant pour l'étude des plantes médicinales et leur utilisation traditionnelle, pour le traitement des diverses maladies. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'activité antioxydant des extraits organiques et aqueux de la plante *Pituranthos scoparius*.

Les résultats obtenus concernant le pouvoir antioxydant des extraits de *Pituranthos scoparius* ont montré une activité intéressante de cette plante notamment pour l'extrait hydrométhanolique et la fraction acétate d'éthyle de cette plante renferme de polyphénols et de flavonoïdes [12].

Les résultats que nous avons obtenus ont montré que la *Pituranthos scoparius* contient des composés actifs capables d'agir comme agent antimicrobien et antioxydant dont les tanins, les coumarines, les flavonoïdes, les stérol et les terpènes. Ce qui explique son utilisation en traditionnelle pour le traitement de diverse maladies[13].

Les tests chimiques préliminaires effectués sur la plante *Pituranthos scoparius* ont révélé la présence des métabolites secondaires rapportés dans le tableau ci-dessous:

Tableau III. 1: Résultats des tests chimiques du *Pituranthos scoparius*[14]

Familles chimiques	Observations
Tannins	+
Saponosides	+
Huiles essentielles	+
Stéroïdes	+
Alcaloïdes	-
flavonoïdes	+
Glycosides cardiaques	-

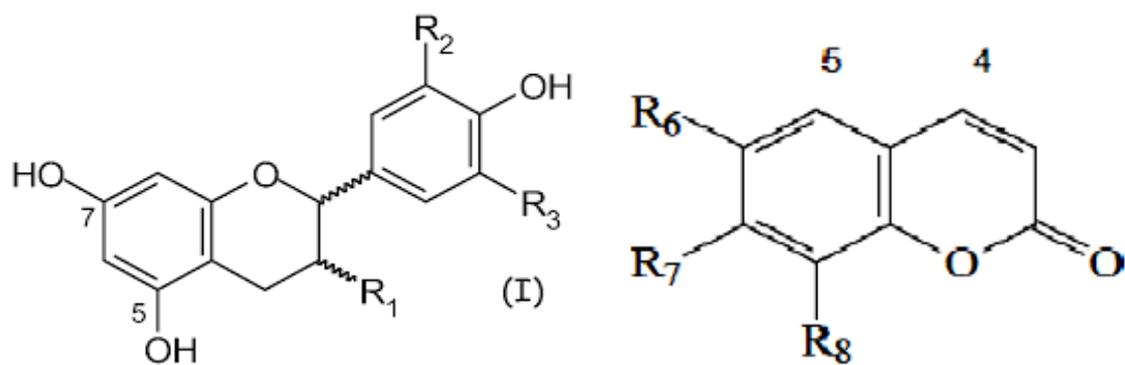


Figure III.3. Structure générale des familles de molécules présente dans l'extrait (Flavonoïde a gauche, coumarine a droite)

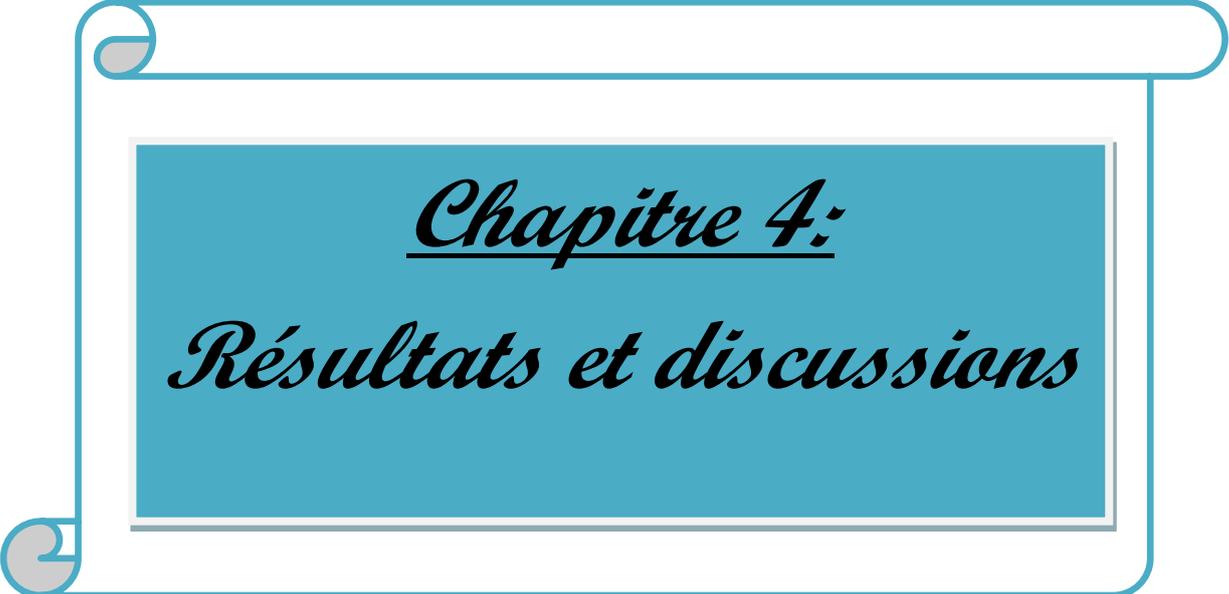
Références Bibliographiques:

- [1] Kh.Meddahi, "Contribution à l'étude de l'incompatibilité entre un inhibiteur de corrosion et un inhibiteur de dépôt, "université M'Hamed Bougara-Boumerdes, mémoire de Magister, (2013-2014).
- [2] M.Serghini Idrissi, "Etude du comportement électrochimique de l'acier C38 et l'acier inoxydable UR45N dans différents milieux, "université Mohammed V Faculté des sciences Rabat, thèse de doctorat, (2016).
- [3] B.Mokhtar, "inhibition de la corrosion d'un acier ordinaire par les chromates et les molybdate , "université Hadji Lakhdar Batna ,mémoire de Magister (2012-2013).
- [4] H.Messaoudi, "Nouvelle voie d'inhibition de la corrosion du cuivre par la caféine: corrélation entre la simulation par la DFT et l'étude expérimentale", université 20 Aout 1955 Skikda, mémoire de Magister, (2014).
- [5] S.Kertit, B.Hammouti, *Appl. Surf. Sci.* 93, (1996) ,59.
- [6] S.Tazi, I.Raissouni, F.Chaoukat, D.Bouchta, A.Dahdouh, R.Elkhamliclu ,H.Douhri, J.Mater Environ Sci. 7(5), (2016), 1646-1647 .
- [7] A.J.Bard, L.R.Faulkner, *Electrochimie–Principes, Méthodes et Applications*, Ed.Masson, Paris, (1983).
- [8] F.Yaunyuan ,C.Shenhao, G.Wenjuan, Z.Yuexing, L.Guangzeng. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 602,(2007),115-122,
- [9] D. Landolt, "Corrosion et Chimie de Surface des Métaux ", 1st Edition, AldenPress, Oxford, 489(1993).
- [10] P.Pascaud " Apatites nanocristallines biomimétiques comme modèles de la réactivité osseuse : Etude des propriétés d'adsorption et de l'activité cellulaire d'un bisphosphonate, le tiludronate", université, Toulouse III - Paul Sabatier, thèse de doctorat (2012).
- [11] H.Hamani," Synthèse caractérisation et étude du pouvoir inhibiteur de nouvelles molécules bases de Schiff ", université, Ferhat –Abbas Setif 1, thèse de doctorat (2015).

[12] H. Adida , N. Benariba , A. Bechiri , E. Chekroun , R. Djaziri , "étude phytochimique et évaluation du pouvoir antiradicalaire des extraits de *Pituranthos scoparius*" ,14, (4), (2015), 207-212.

[13] H.Adida, "Etude des propriétés antioxydantes et antimicrobiennes de *Pituranthos scoparius* Benth et Hook "Guezzeh" : plante médicinale endémique de Sahara ", université Aboubeker Belkaid–Tlemcen ,thèse de doctorat, (2014-2015).

[14] A. Kalla, " Etude et valorisation des principes actifs de quelques plantes du sud algérien :*Pituranthos scoparius*, *Rantherium adpressum* et *Traganum nudatum*", université, Mentouri-Constantine, thèse de doctorat (2012).



Chapitre 4:
Résultats et discussions

IV. 1. Introduction:

L'efficacité inhibitrice de l'EBPS obtenue par l'extraction de la plante *Pituranthos scoparius* sur la corrosion de l'acier au carbone API 5L Gr-B en milieu HCl 1M, a été évalué par les méthodes gravimétriques (perte en poids), et électrochimiques (courbe de polarisation et la spectroscopie d'impédance électrochimiques).

Dans ce chapitre on va présenter et interprétés les résultats obtenue a partir de ces méthodes

IV. 2. Protocole expérimentale:**IV. 2. 1. Matériau utilisé:**

Le matériau utilisé de notre études est un acier au carbone de type API 5L Gr-B le plus employé dans l'industrie des hydrocarbures pour couvrir les tubes de canalisation, les tuyaux de classe B API 5L sont plus efficaces que les types de tuyaux API 5L.

La composition chimique de l'acier API 5L Gr-B présenter dans le tableau suivant:

Tableau IV. 1: La composition chimique de l'acier au carbone API 5L Gr-B

Eléments	C	Mn	P	S	Fe
%massique	0.27	1.15	0.03	0.03	Balance

IV. 2. 2. Solution corrosive:

L'électrolyte est une solution d'acide chlorhydrique une fois molaire HCl 1M, obtenue par dilution avec l'eau distillé de l'acide commercialisé à (37 %)

IV. 2.3. Electrolyte:

Les essais ont été effectuée dans la solution HCl 1M, avec l'ajout de différentes concentrations de l'extrait: n-butanol obtenue par la plante *Pituranthos scoparius*, on utilisant la relation de la dilution suivante:

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2$$

IV. 2. 4. Préparation des extraits de la plante *Pituranthos scoparius*:

La récolte de la plante qu'elle a été séché à l'ombre plusieurs semaines, puis découpé en très petits morceaux. On a commencé par la macération, dans un mélange hydrométhanolique (70%/30%) en volume pendant 24 heures et plus. L'opération est répétée trois fois, puis on a évaporé sous vide la solution jusqu'à l'obtention d'un liquide visqueux, on a ajouté de l'eau bouillant, ce mélange était filtré. Le filtrat est soumis à une extraction liquide-liquide on utilisant plusieurs solvants selon l'ordre de polarité croissant, commençant par le dichlorométhane, la phase liquide était évaporé et obtenir un extrait dichlorométhane de masse 0.9505g, et ainsi de suite récupéré la phase organique et refaire le même travail avec le solvant qui reste, on résulte un extrait butanolique de masse 4.8885g, ce dernier on le dissout dans un minimum de méthanol, et puis l'ajout de l'eau distillé pour avoir le volume désiré de la solution mère.

Schéma présenter l'extraction de la plante *Pituranthos scoparius*

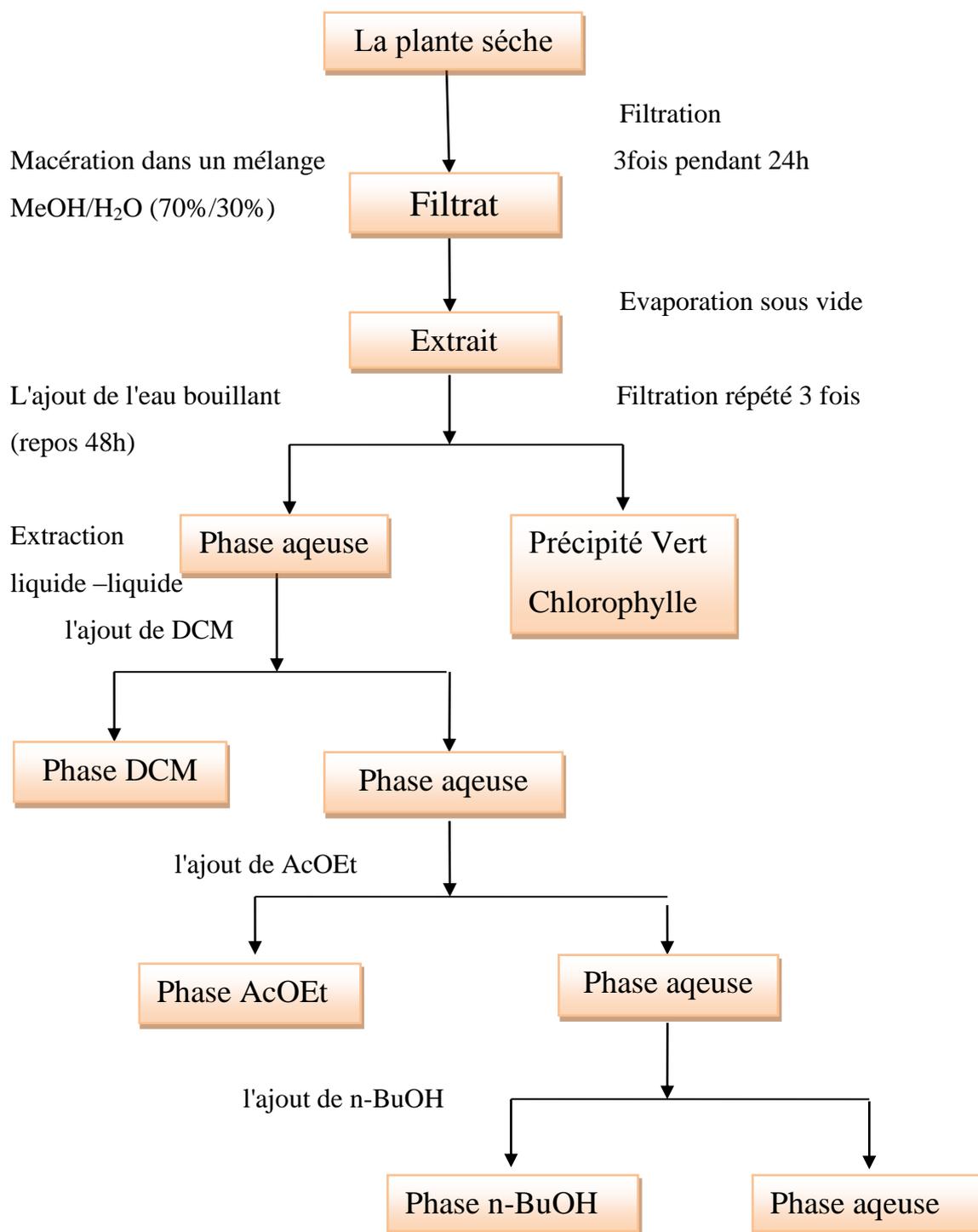


Figure IV. 1: Protocole d'extraction de la plante *Pituranthos scoparius*

IV. 3. Optimisation du temps d'immersion des essais de corrosion:

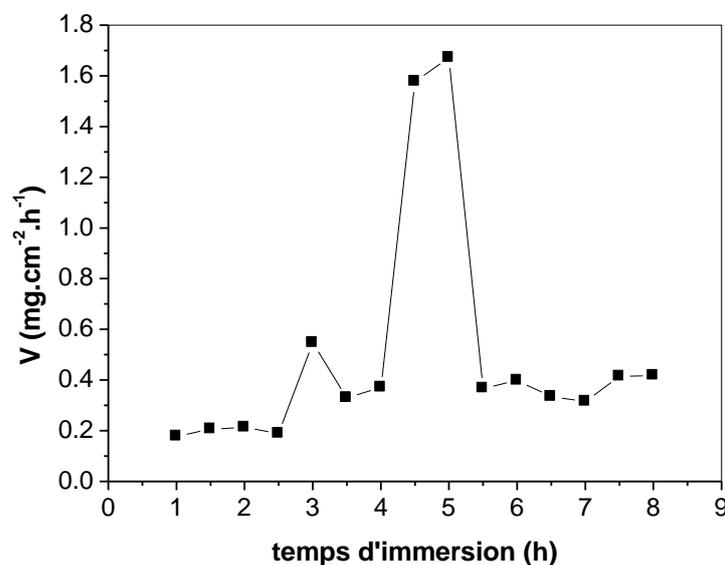


Figure IV. 2: Variation de la vitesse de corrosion en fonction du temps dans un milieu HCl.1M

Pour faire la technique gravimétrie, on a effectué une expérience pour choisir le temps adéquat d'immersion de l'acier au carbone API 5L Gr-B comme suit:

Les échantillons d'acier API 5L Gr-B sont totalement immergés dans la solution HCl (1M) à l'air libre à différentes périodes de 1h jusqu'à 8h. Après cette essai on a calculé la vitesse de corrosion, le taux de recouvrement et l'efficacité inhibitrice pour chaque échantillon. D'après le tracé de la courbe présentée dans la figure IV.2, on observe que la vitesse de corrosion de valeur maximale d'ordre $1.67\text{mg.cm}^{-2}.\text{h}^{-1}$ après un temps d'immersion de cinq heures, alors le temps adéquat d'immersion pour les essais gravimétriques sont été de l'ordre de 5 heures.

IV. 4. Etude de l'efficacité inhibitrice de l'extrait n-butanol de la plante *Pituranthos scoparius*:

IV. 4. 1. Méthode gravimétrique:

Cette technique a été utilisée pour étudier l'efficacité de l'inhibiteur contre la corrosion de l'acier dans une solution agressive.

Les échantillons d'acier subissent un polissage aux papiers abrasifs de granulométrie décroissante (du grain 200, 400, 800, 1500 et 2000), Après le calcul de leur surface de les

échantillons, ces derniers ont été rincés avec l'eau distillée et lavés avec l'acétone, enfin un séchage. Les échantillons sont pesés après et avant chaque essai.

Chaque échantillon a été immergé dans un bécher contenant une solution corrosive pendant 5 heures sans ou avec inhibiteur de différentes concentrations de l'EBPS à différentes températures allant de 20°C à 40°C. Finalement, les échantillons sont pesés afin de déterminer la masse perdue et la vitesse de corrosion, le taux de recouvrement, l'efficacité inhibitrice de chaque solution.

La vitesse de corrosion, le taux de recouvrement, l'efficacité inhibitrice calculée à partir des formules suivantes:

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

$$\theta = \left(\frac{V_{corr}^0 - V_{corr}^{inhi}}{V_{corr}^0} \right) \dots\dots\dots(\text{IV.2})$$

$$EI(\%) = \left(\frac{V_{corr}^0 - V_{corr}^{inhi}}{V_{corr}^0} \right) \times 100 \dots\dots\dots(\text{IV.3})$$

D'où: V_{corr} : la vitesse de corrosion en $\text{mg.cm}^{-2}.\text{h}^{-1}$

Δm : différence de masse en (mg).

S: la surface des échantillons en cm^2 .

t: le temps d'immersion des échantillons dans la solution en heure.

V_{corr}^0 et V_{corr}^{inhi} : la vitesse de corrosion en absence et en présence de l'extrait.

EI(%): l'efficacité inhibitrice.

Les résultats regroupés dans le tableau suivante :

Tableau IV. 2: Influence de la concentration d'EBPS sur l'efficacité inhibitrice à différentes températures (20°C-40°C)

C (ppm)	Température											
	20°C				30°C				40°C			
	V_{corr} (mg.cm ⁻² .h ⁻¹)	θ	EI (%)		V_{corr} (mg.cm ⁻² .h ⁻¹)	θ	EI (%)		V_{corr} (mg.cm ⁻² .h ⁻¹)	θ	EI (%)	
0	0,0854	-	-		0,1795	-	-		0,2466	-	-	
200	0,0501	0,4125	41,25		0,1100	0,3869	38,69		0,1703	0,3093	30,93	
400	0,0423	0,5047	50,47		0,1029	0,4268	42,68		0,1510	0,3877	38,77	
600	0,0339	0,6021	60,21		0,0909	0,4935	49,35		0,1367	0,4455	44,55	
800	0,0305	0,6421	64,21		0,0786	0,5617	56,17		0,1172	0,5247	52,47	
900	0,0297	0,6521	65,21		0,0651	0,6372	63,72		0,1016	0,5880	58,80	
1000	0,0115	0,8652	86,52		0,0433	0,7584	75,84		0,0650	0,7362	73,62	

Protocole expérimentale de la méthode gravimétrique :



Rinçage avec l'eau distillée, acétone et séchage

Préparation des solution mère corrosifs



Immersion des échantillon pendant 5h



Prélèvement, séchage et pesé les échantillons

Figure IV. 3: Protocole suivie lors des essais gravimétriques

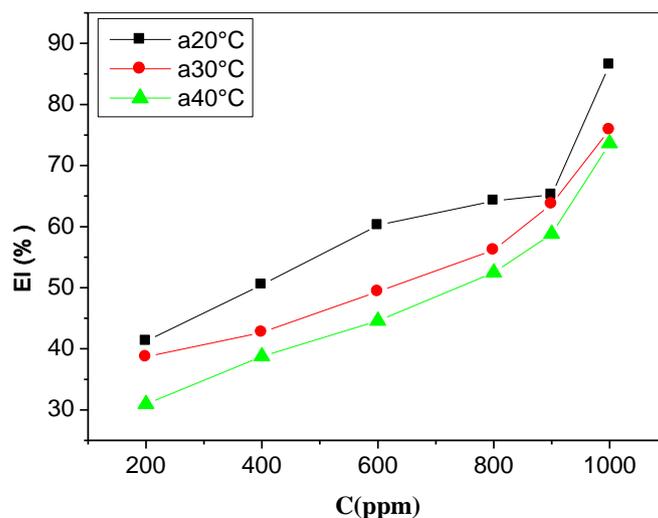


Figure IV. 4: Evolution de l'efficacité inhibitrice en fonction de la concentration de l'EBPS dans une solution HCl à différentes températures

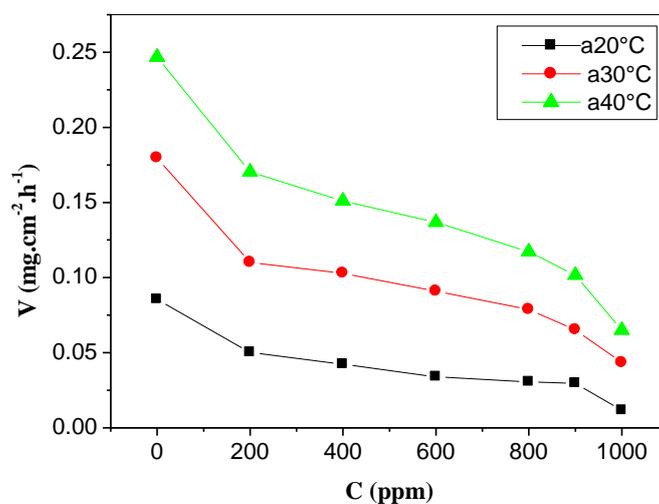


Figure IV. 5: Evolution de la vitesse de corrosion de L'EBPS en fonction de la concentration dans une solution HCl 1M à différentes températures

Discussions:

D'après les résultats présentés dans le tableau IV.2 et l'analyse des figures IV.4 et IV.5 on peut conclure qu'il y a:

- ✓ L'analyse des résultats présentés dans le tableau IV.2 montre clairement que l'EBPS possède d'excellentes propriétés inhibitrices de la corrosion de l'acier API 5L Gr-B en milieu HCl 1 M.
- ✓ L'augmentation de l'efficacité inhibitrice à une valeur maximale de l'ordre de 86.52% avec l'augmentation de la concentration de l'EBPS à 1000 ppm dans la solution HCl 1M.
- ✓ la diminution de la vitesse de corrosion est due à l'augmentation de la concentration de l'EBPS (Figure IV.5). Cela indique qu'il y a une formation d'un film protecteur de cet extrait sur la surface de l'acier afin de bloquer les sites actifs corrodés [1].
- ✓ Par contre la vitesse de corrosion augmente par l'accroissement de la température, ceci explique que cet extrait n'est pas stable dans la gamme de la température étudiée [2].

IV. 4. 1. 1. Modèles d'isothermes d'adsorption d'EBPS:

L'inhibition de la corrosion des métaux par les molécules de l'extrait est expliquée par leur adsorption sur la surface métallique. Les isothermes d'adsorption sont alors un complément important susceptible de déterminer le mécanisme électrochimique qui conduit à l'adsorption de ces molécules sur la surface. Pour identifier le type d'adsorption correspondant à la présente étude. Des différents types d'isothermes ont été testés: Langmuir, Freundlich, Temkin et Frumkin [3].

$$\text{Langmuir : } \frac{C}{\theta} = \frac{1}{K} + C \dots\dots\dots(\text{IV.4})$$

$$\text{Freundlich: } \log\theta = \log K + \alpha \log C \dots\dots\dots(\text{IV.5})$$

$$\text{Temkin: } \theta = \frac{1}{\alpha} \log k + \alpha \log C \dots\dots\dots(\text{IV.6})$$

$$\text{Frumkin : } \ln \left\{ \frac{\theta}{C(1-\theta)} \right\} = \ln K + \alpha \theta \dots\dots\dots(\text{IV.7})$$

où: α est un paramètre qui tient compte l'hétérogénéité de la surface et des interactions intermoléculaire dans la couche adsorbée.

Après le tracé des différentes isothermes à différentes température, les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV.3 suivant:

Tableau IV. 3: Coefficient de corrélation pour des différentes isothermes à différentes températures (20 °C à 40°C)

Extrait n-butanolique	Modèles d'isotherme	Coefficient de corrélation (R^2)		
		20°C	30°C	40°C
	Langmuir	0,93116	0,92091	0,89155
	Freundlich	0,93935	0,92121	0,9501
	Temkin	0,88961	0,88089	0,89861
	Frumkin	0,4883	0,17474	0,33531

D'après les résultats rassemblés dans le tableau IV.3 et les tracés présentés par les figures IV. 6 (a. b. c. d) des différentes isothermes, nous avons optés que l'adsorption de l'EBPS sur la surface de l'acier API 5L Gr-B en milieu HCl obéit à l'isotherme d'adsorption de Freundlich dans le domaine des concentrations et des température étudiées, où le coefficient de régression (coefficient de corrélation) est très proche de l'unité par rapport aux autres isothermes.

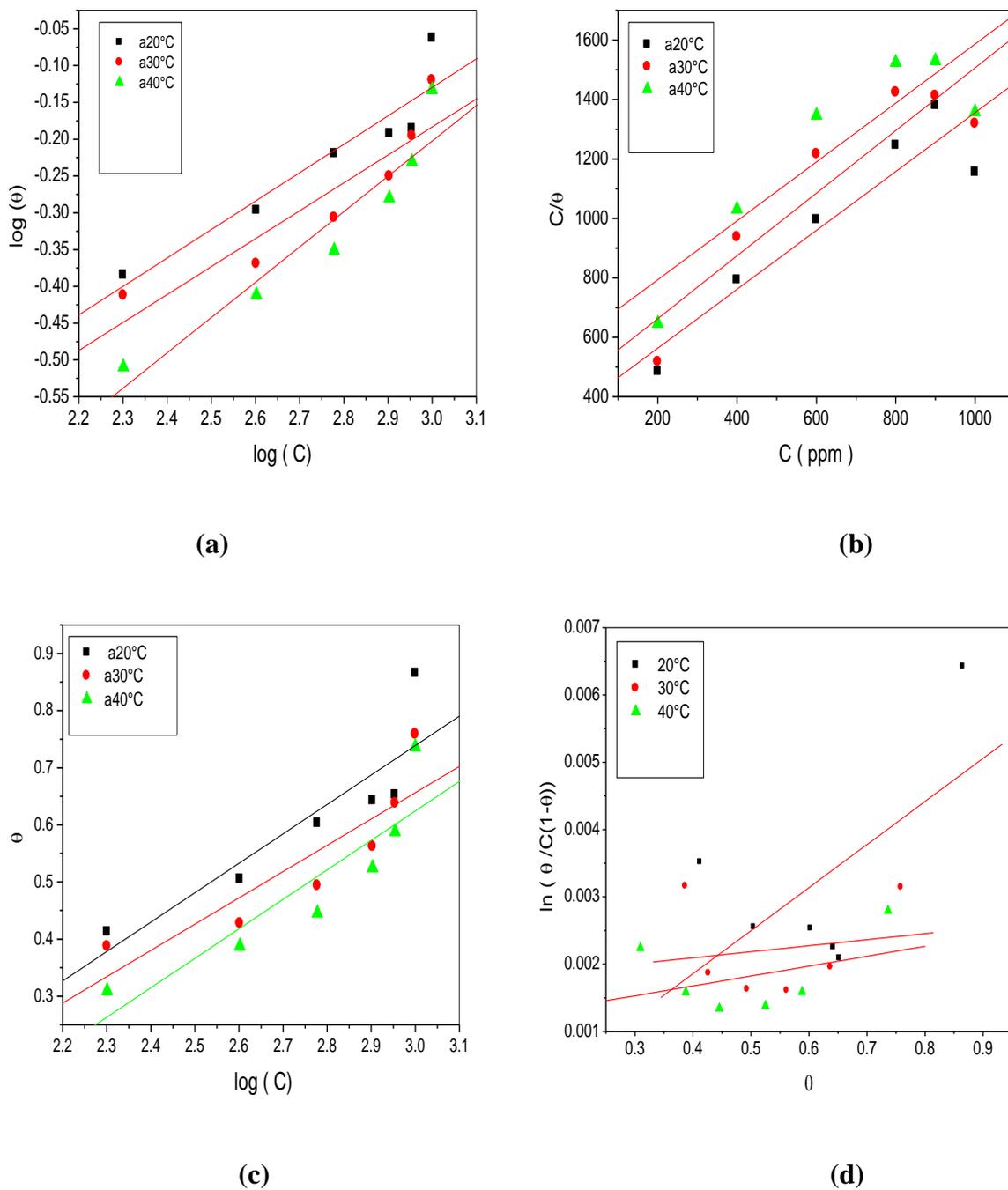


Figure IV. 6. Isothermes d'adsorption à différentes températures de: (a) Freundlich, (b) Langmuir(c), Temkin(d), Frumkin de l'EBPS sur la surface de l'acier API 5L Gr-B dans la solution HCl 1M à différentes températures

IV. 4. 1. 2. Mécanisme d'adsorption de l'EBPS:

L'énergie libre d'adsorption (ΔG°_{ads}) donnée par la relation:

$$\Delta G^{\circ}_{ads} = -RT \ln (K_{ads} C_{\text{solvant}}) \dots\dots\dots(\text{IV.8})$$

R : est la constante des gaz parfaits = 8,314 J. K⁻¹. mol⁻¹

T : est la température en Kelvin.

C : est la concentration de l'eau est 10⁶ mg.l⁻¹ ou (ppm)

K_{ads} : Constante d'équilibre de processus d'adsorption (ΔG°_{ads}) [4].

Tableau IV. 4: Paramètre thermodynamique (ΔG°_{ads}) relatifs à l'adsorption de l'EBPS sur la surface de l'acier API 5L Gr-B à différentes températures

Température(°C)	R ²	K _{ads} (L.mg ⁻¹)	ΔG°_{ads} (KJ.mol ⁻¹)
20°C	0,93935	0,05140	-26,42
30°C	0,92121	0,0476	-27,13
40°C	0,9501	0,0227	-26,10

D'après les résultats rassemblés dans le tableau IV.4 les valeurs négatives de ΔG°_{ads} indiquent la spontanéité du processus d'adsorption de l'inhibiteur sur la surface métallique [5-6].

Généralement, les valeurs de ΔG°_{ads} , voisines de -20 kJ/mol ou moins négatives, sont liées à des interactions électrostatiques entre les molécules chargées et le métal chargé cela indique que le mode d'adsorption est de type physique (physisorption)[7], alors que celles proches de -40 kJ/mol ou plus négatives impliquent un transfert de charge entre les molécules organiques et la surface métallique, cela indique que le mode d'adsorption est de type chimique (Chimisorption) [7].

Après les calculs qu'on a fait, les valeurs de ΔG°_{ads} , obtenues sont voisines de (-27,13 et -26,10 kJ .mol⁻¹), ce qui indique que l'adsorption de l'EBPS sur la surface de l'acier est de type physique à différentes températures.

Les valeurs de l'enthalpie libre standard de l'adsorption (ΔH°_{ads}) peut être calculée en utilisant l'équation de Van't Hoff [8]:

$$\frac{d \ln K_{ads}}{dT} = - \frac{\Delta H^\circ_{ads}}{RT^2} \dots \dots \dots (IV.9)$$

Par intégrations l'équation donner comme suit :

$$\ln K_{ads} = - \frac{\Delta H^\circ_{ads}}{RT} + A \dots \dots \dots (IV.10)$$

K_{ads} : Constante d'équilibre d'adsorption.

A: Constante d'intégration .

La variation de $\ln K_{ads}$ en fonction de l'inverse de la température ($1/T$) est une droite avec une pente ($-\frac{\Delta H^\circ_{ads}}{R}$) (figure IV.7.) .

On peut calculer la valeur de l'enthalpie standard libre ΔH°_{ads} d'après la pente précédente.

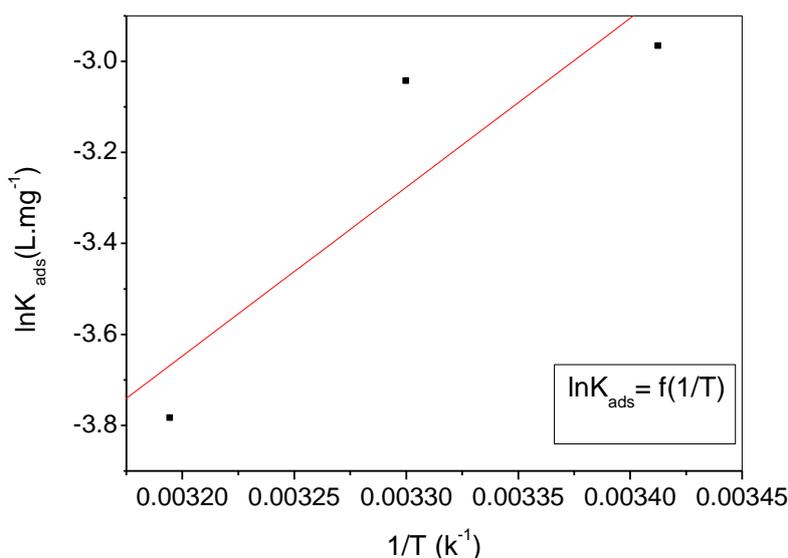


Figure IV. 7: Variation de $\ln K_{ads}$ en fonction de l'inverse de la température ($1/T$)

Les valeurs de l'entropie standard d'adsorption (ΔS°_{ads}) sont tirées à partir de la relation de Gibbs-Helmholtz:

$$\Delta G^\circ_{ads} = \Delta H^\circ_{ads} - T \Delta S^\circ_{ads} \dots \dots \dots (IV.11)$$

$$\text{Alors : } \Delta S^{\circ}_{ads} = \frac{\Delta H^{\circ}_{ads} - \Delta G^{\circ}_{ads}}{T} \dots\dots\dots \text{(IV.12)}$$

Les valeurs calculer des l'énergies standard d'adsorption (ΔG°_{ads}) et l'enthalpie standard (ΔH°_{ads}) et des l'entropies standard (ΔS°_{ads}) a différentes températures rassemblées dans le tableau suivant:

Tableau IV. 5: Paramètres thermodynamiques relatifs à l'adsorption de l'EBPS sur la surface de l'acier API 5L Gr-B à différentes températures

Température (°C)	ΔG°_{ads} (KJ.mol ⁻¹)	ΔH°_{ads} (KJ.mol ⁻¹)	ΔS°_{ads} J.mol ⁻¹ .K ⁻¹
20	-26,42	-30,86	-15,15
30	-27,13		-12,31
40	-26,10		-15,20

- ✓ Les valeurs des paramètres thermodynamiques d'adsorption, peuvent fournir des informations sur le mécanisme d'inhibition de corrosion. Tandis que :
- ✓ Le processus endothermique d'adsorption ($\Delta H^{\circ}_{ads} > 0$) est attribué à la chimisorption .
- ✓ Le processus exothermique d'adsorption ($\Delta H^{\circ}_{ads} < 0$) peut impliquer l'adsorption physique et/ou la chimisorption [9].
- ✓ D'après les résultats présentés dans le tableau ci-dessus, on remarque que la valeur de l'enthalpie (ΔH°_{ads}) calculée à partir de l'équation de Van't Hoff est de l'ordre de -30,86 kJ/mol pour l'extrait n-butanolique ce qui montre le caractère exothermique de l'adsorption de ce dernier sur la surface de l'acier .

Ce qui confirme le résultat précédent (les molécules de cet extrait sont physisorbées sur la surface de cet acier), cela peut être aussi expliquer par la diminution de l'efficacité inhibitrice en augmentant la température [10].

Les valeurs de l'entropie ΔS°_{ads} en présence de l'EBPS sont négatives, impliquent que le complexe activé dans l'étape déterminante de la vitesse représente une association plutôt qu'une

dissociation, signifiant qu'il y a diminution du désordre lors de la transformation des réactifs en complexe activé [11,12].

IV. 4. 1. 3. Paramètres thermodynamiques d'activation relatifs à la dissolution de l'acier API 5L Gr-B dans un solution HCl 1M:

Nombreux auteurs [10,12] utilisent l'équation d'Arrhenius pour rendre compte à l'effet de la température (T) sur la vitesse de corrosion, et considèrent donc que le logarithme de la vitesse de corrosion $\ln V_{corr}$ est une fonction linéaire de l'inverse de la température (1/T):

$$\ln V_{corr} = \left(-\frac{\Delta E_a}{RT}\right) + \ln A \dots \dots \dots (IV.13)$$

ΔE_a : est l'énergie d'activation .

A : le paramètre pré-exponentiel d'Arrhenius.

Le tracé $\ln (V_{corr})$ en fonction de l'inverse de la température $\left(\frac{1}{T}\right)$ de la solution de HCl 1M sans et avec l'ajout de l'EBPS (figure IV.8). donne une droite linéaire. La pente de cette droite donne la valeur de $\left(-\frac{\Delta E_a}{R}\right)$.

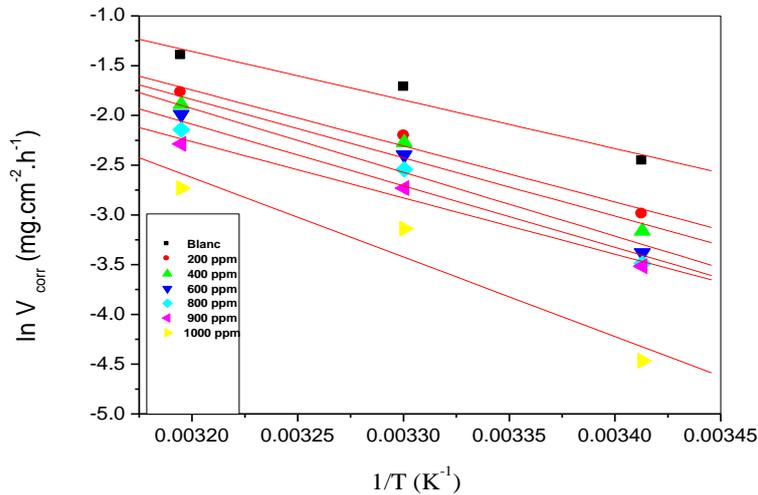


Figure IV. 8: La variation de $\ln V_{corr}$ en fonction de l'inverse de la température a différentes concentration de l'EBPS

Une formule alternative de l'équation d'Arrhenius permet la détermination de l'enthalpie d'activation ΔH°_a et l'entropie d'activation ΔS°_a selon l'équation suivante [13].

$$\ln \frac{V_{corr}}{T} = \left[\ln \frac{R}{N_A h} + \frac{\Delta S^{\circ}_a}{R} \right] - \frac{\Delta H^{\circ}_a}{RT} \dots \dots \dots \text{(IV.14)}$$

Où: ΔS°_a : entropie d'activation

ΔH°_a : enthalpie d'activation

R: constante des gaz parfaits (J/mol.K)

T: Température en K

h: Constante de Planck $6,023.10^{23}$ atome /mol

N_A : Nombre d'Avogadro $6,626.10^{-34}$ J/K

La figure IV. 9. Illustrent la variation du $\ln \frac{V_{corr}}{T}$ en fonction de l'inverse de température $\left(\frac{1}{T}\right)$ a différentes concentration. Les droites obtenues ont une pente égale à $\left(-\frac{\Delta H^{\circ}_a}{R}\right)$ et une ordonnée à l'origine égale à $\left(\ln \frac{R}{N_A h} + \frac{\Delta S^{\circ}_a}{R}\right)$.

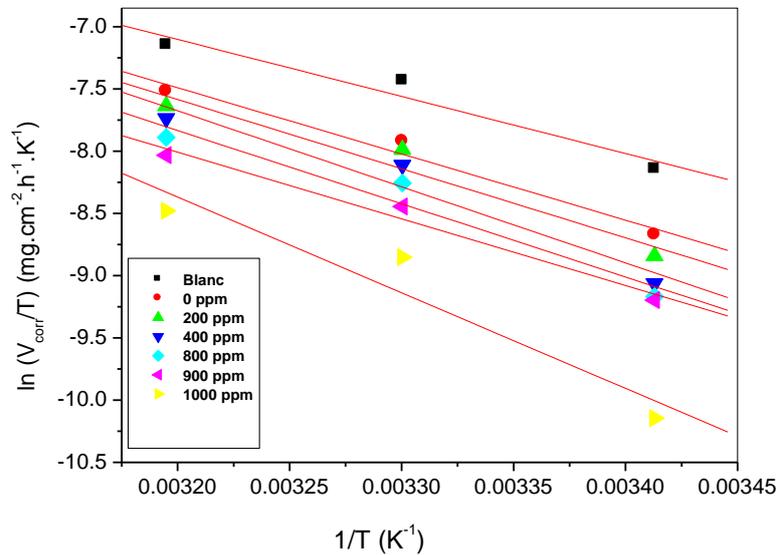


Figure IV. 9: Le tracé d'Arrhenius de $\ln V_{corr}/T$ en fonction de $1/T$ a différentes concentration de l'EBPS

Grace à ces droites, nous pouvons donc calculer les valeurs des enthalpies ΔH_a° et des entropies ΔS_a° , ces valeurs sont données dans le tableau IV.6 suivant :

Tableau IV. 6. Paramètres d'activation de la dissolution de l'acier dans la solution HCl 1M en absence et en présence de l'EBPS à différentes températures

C (ppm)	ΔE_a (KJ.mol ⁻¹)	ΔH_a (KJ.mol ⁻¹)	ΔS_a (J.mol ⁻¹ .k ⁻¹)
0	40,589	38,072	248,122
200	46,728	42,211	264,540
400	48,706	46,189	270,081
600	53,298	50,781	284,020
800	51,440	48,923	276,763
900	47,005	44,489	261,118
1000	66,392	63,875	320,154

D'après les valeurs thermodynamiques d'adsorption rassemblés dans le tableau IV.6:

* on remarque une augmentation de l'énergie d'activation apparente avec l'augmentation de la concentration jusqu'à atteindre la valeur maximale d'ordre 66,392 KJ.mol⁻¹ à 1000 ppm.

* L'augmentation de l'énergie d'activation E_a en présence l'inhibiteur peut être attribuée au phénomène de physisorption par des interactions électrostatiques entre les molécules de l'inhibiteur et la surface de l'acier [3]. Ce qui confirme une bonne concordance avec les résultats précédentes.

O.Radovici et P. Bommersbach [14,15] proposent un classement des inhibiteurs reposant sur la comparaison des énergies d'activation (E_a) obtenues en l'absence et en présence de l'inhibiteur (E_a^{inhi}), ils ont distingué:

1. Les inhibiteurs pour lesquels ($E_a^{inhi} > E_a$), qui s'adsorbent sur le substrat par des liaisons de nature électrostatique (liaisons faibles). Ce type de liaisons sensibles à la température ne permet pas de lutter efficacement contre la corrosion quand la température augmente.
2. Les inhibiteurs pour lesquels ($E_a^{inhi} < E_a$), Ces inhibiteurs présentent, quant à eux, une augmentation du pouvoir protecteur avec la température. Les molécules organiques de l'inhibiteur s'adsorbent à la surface métallique par liaisons fortes (chimisorption).
3. Les inhibiteurs pour lesquels ($E_a^{inhi} = E_a$), Cette catégorie ne présente pas d'évolution du pouvoir protecteur avec la température, très peu de composés appartiennent à cette dernière catégorie.

D'après les valeurs données dans le tableau IV.6 on a:

Dans notre cas, $E_a^{inhi} = 66,392 \text{ (KJ. mol}^{-1}\text{)} > E_a = 40,589 \text{ (KJ. mol}^{-1}\text{)}$ et l'efficacité inhibitrice diminue lorsque la température augmente. Ce comportement est rapporté comme étant caractéristique d'un phénomène de physisorption de l'inhibiteur à la surface de métal [16].

($\Delta H_a^\circ > 0$) indique le processus d'adsorption des molécules de l'EPBS est endothermique.

Le signes positifs avec l'augmentation des entropies ΔS_a° en présence de l'EBPS, ce comportement expliquer par le remplacement des molécules d'eau adsorbé par celle de l'extrait (molécules phytochimiques) pendant sont adsorption sur la surface de l'acier [17]. Provoquant une augmentation du désordre des molécules de l'EBPS qui se stabilisent lors de la formation du complexe métal/espèce adsorbé la même observation a été utilisée pour s'argumenter dans plusieurs étude reporter par plusieurs auteurs [18,19].

IV. 4. 1. 4. Conclusion partielle:

Les résultats obtenus par la méthode gravimétrique révèle que l'EBPS s'adsorbe bien à la surface de l'acier API 5L Gr-B dans un milieu HCl (1M).

On a observé que l'augmentation de la concentration de l'EBPS provoque une augmentation de l'efficacité inhibitrice jusqu'à atteint une valeur d'ordre 86,52% à 1000ppm.

Par contre l'augmentation de la température provoque une diminution de l'efficacité inhibitrice.

D'après le tracé des différentes isothermes (Langmuir, Freundlich Temkin et Frumkin) a montré que l'adsorption suit le modèle d'isotherme de Freundlich

Les résultats obtenus par l'études thermodynamiques (ΔG°_{ads} , ΔH°_{ads}) montrent que l'isotherme d'adsorption de l'EBPS de type physisorption et de caractère exothermique de l'adsorption de l'inhibiteur.

IV. 4. 2. Techniques électrochimiques:

Les essais électrochimiques apportent d'intéressantes indications quant au mécanisme d'action de l'inhibiteur, et dans la mesure qu'elles sont correctement interprétées sur la vitesse des processus de corrosion à l'instant où est faite la mesure, ce qui rend de toute façon nécessaire une étude en fonction du temps. Les méthodes électrochimiques utilisées dans notre travail peuvent être classées en deux groupes distincts: les méthodes stationnaires et les méthodes non-stationnaires dites transitoires [20].

Les mesures électrochimiques, y compris les courbes de polarisation potentiodynamique et la spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS) ont été réalisées à l'aide de l'appareil Voltalab, Potentiostat (PGZ 301) équipée d'un ordinateur, ce qui permet l'acquisition des données.

Ces derniers sont traités et enregistrés automatiquement grâce au logiciel "Vol-ta -Master 4" (Figure. IV.10.)

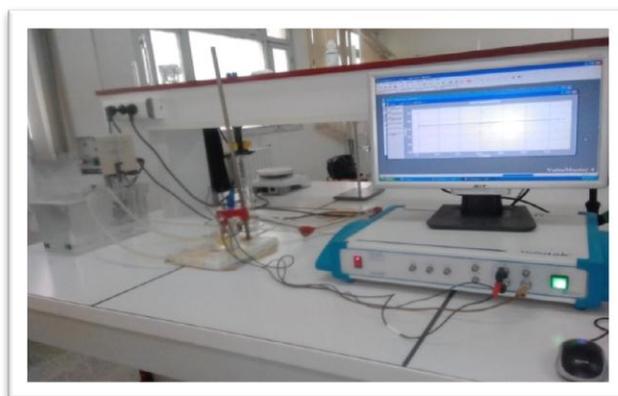


Figure IV.10: Photographie du dispositif des mesures électrochimiques

IV. 4. 2. 1. Elaboration de l'électrode de travail.

Le subjectile est un carré de 0.77cm^2 de surface utile. Il est lié à un fil conducteur en cuivre et enrobé à froid dans une résine thermodurcissable et inerte chimiquement (Figure IV. 11).

L'enrobage est réalisé dans un moule en plastique et abandonné à l'air libre et pendant 24 heures ou plus pour permettre à la résine de se solidifier.

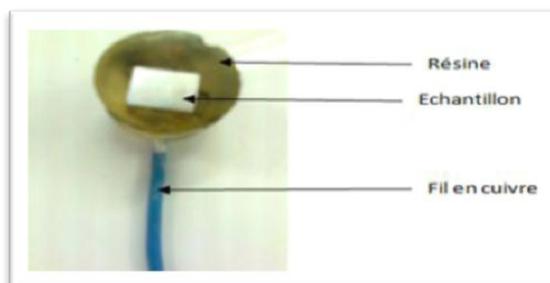


Figure IV. 11: Electrode de travail

.IV. 4. 2. 2 Suivi du potentiel de corrosion au cours du temps

Egalement désigné par potentiel en circuit ouvert ou potentiel libre. Avant d'étudier de manière approfondie le comportement à la corrosion de l'acier, il est intéressant de suivre d'abord l'évolution de son potentiel d'abandon en fonction du temps. En effet les valeurs mesurées de ce potentiel résultent des réactions qui se déroulent à l'interface métal/solution pour cela l'électrode de travail est immergée dans une solution de HCl sans et avec l'ajout l'EBPS, sans agitation, pendant une durée de 60 min. Cela permet d'obtenir un potentiel relativement stable indispensable pour le tracé des courbes de polarisation et les diagrammes d'impédance électrochimique

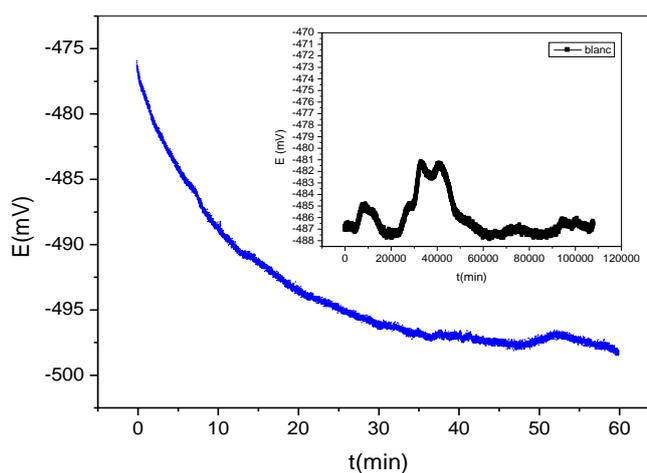


Figure IV. 12: Evolution du potentiel d'abandon en absence et en présence de l'EBPS à 20°C

La figure IV. 12 représente l'évolution du potentiel d'abandon en présence de l'EBPS au cours des temps, montre qu'avec l'ajout de l'EBPS le potentiel libre de corrosion débute à -476 mV et diminue jusqu'à atteindre la valeur de -498 mV. Ceci traduit par une dissolution du métal, qui rend le potentiel de moins en moins noble [21]. La stabilisation du potentiel libre -497 mV est atteinte après une 30 min d'immersion.

IV. 4. 2. 3 Spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) :

Des mesures d'impédance électrochimique sont effectuées au potentiel d'abandon dans le milieu corrosif en régime linéaire avec un signal sinusoïdal d'amplitude de 10 mV sur un domaine de fréquence de 100 kHz à 10 mHz, pour caractériser le comportement électrochimique de l'acier.

Les spectres d'impédance, en représentation de Nyquist, obtenus au potentiel de corrosion pour différentes concentrations en inhibiteur (figure III.1).

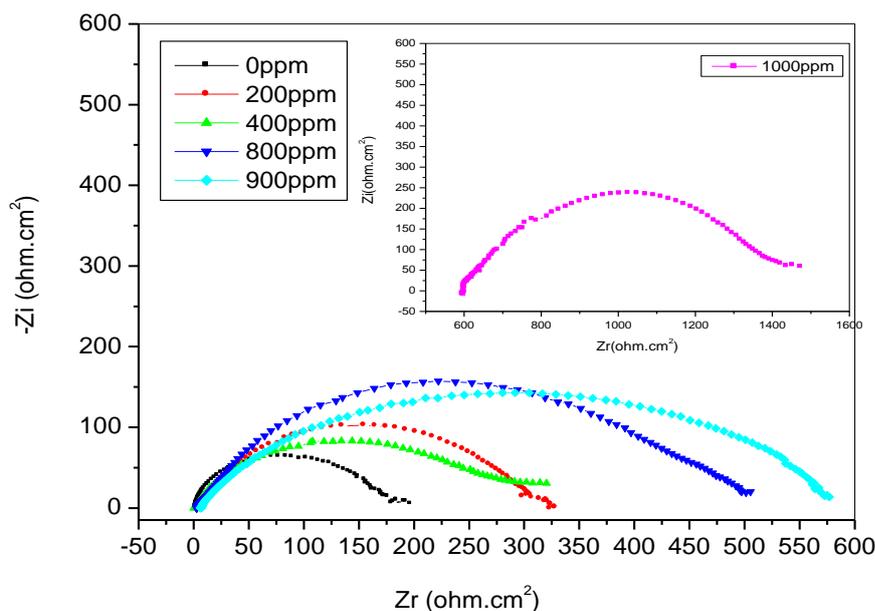


Figure IV. 13: Les diagrammes d'impédance électrochimiques de l'acier API 5L Gr-B dans HCl 1M sans et avec différentes concentrations du l'EBPS à 20°C

L'interprétation des diagrammes d'impédance électrochimiques présenter dans la figure IV. 13 permet de déterminer une seule boucle capacitive indique généralement que la

réaction de corrosion est contrôlée par un processus de transfert de charges sur une électrode solide de surface hétérogène et irrégulière. La forme générale des diagrammes est très semblable pour tous les essais. Ceci indique que presque aucun changement du mécanisme de corrosion ne s'est produit en raison de l'addition d'inhibiteur [22,23].

L'addition de l'EBPS à la solution conduit à l'augmentation de la taille du spectre d'impédance ayant la forme d'un demi-cercle plus au moins aplatie, caractérisant la formation d'une double couche de capacité C_{dc} , qui est diminuée en fonction de l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur. Ce résultat suggère la formation de film protecteur qui issue par l'addition de l'extrait [24].

Les valeurs des paramètres électrochimiques, le taux de recouvrement (θ) et l'efficacité d'inhibition (EI%) pour des différentes concentrations en inhibiteur obtenues par la spectroscopie d'impédance électrochimique sont présentées dans le tableau IV. 7:

Tableau IV.7. Paramètres de la spectroscopie d'impédances électrochimique de l'acier API 5L Gr-B sans et avec l'ajout de l'EBPS

Concentration (ppm)	R_{tc} ($\Omega.cm^2$)	C_{cd} ($\mu F/cm^2$)	θ	EI(%)
0	191,8	464,5	/	/
200	313,5	361,4	0,38819	38,81
400	384,1	331,4	0,50065	50,06
800	495,9	202,7	0,61322	61,32
900	583,1	152,8	0,67106	67,10
1000	987,4	72,21	0,80575	80,57

L'addition de l'EBPS diminue les valeurs de la capacité de la double couche C_{dc} et augmentent celle de la résistance de transfert de charge. La diminution de ces valeurs peut être attribuée par l'adsorption des molécules de l'inhibiteur à la surface de l'acier API 5L Gr-B formant une couche protectrice [25]. La double couche formée à l'interface électrode-solution est considérée comme un condensateur électrique, dont la capacité diminue en raison du déplacement

des molécules d'eau présent dans l'électrolyte en faveur des molécules d'inhibiteurs adsorbées à la surface de l'acier API 5L Gr-B, formant une couche protectrice qui diminue le nombre de sites actifs de corrosion [26].

On observe que la résistance de transfert de charge augmente quand la concentration de EBPS (tableau- IV. 7) augmente. Ceci peut s'expliquer par un renforcement des propriétés protectrices de la couche oxydes plus inhibiteur qui induit une augmentation des valeurs de R_{tc} .

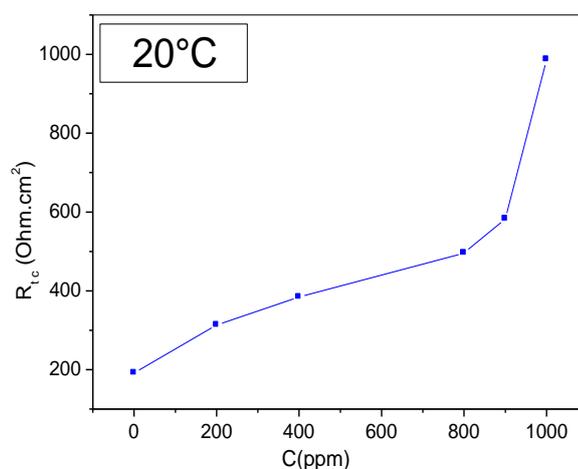


Figure IV. 14: Evolution de la résistance de transfert de charge de l'acier API 5L Gr-B dans la solution HCl (1M) en ajoutant l'EBPS à 20°C

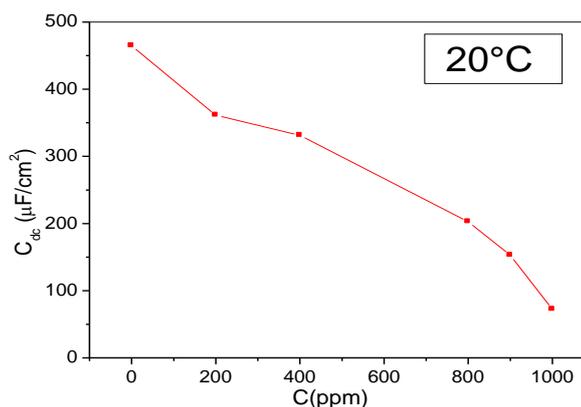


Figure IV. 15: Evolution de la capacité de double couche de l'acier API 5L Gr-B dans la solution HCl (1M) en ajoutant l'EBPS à 20°C

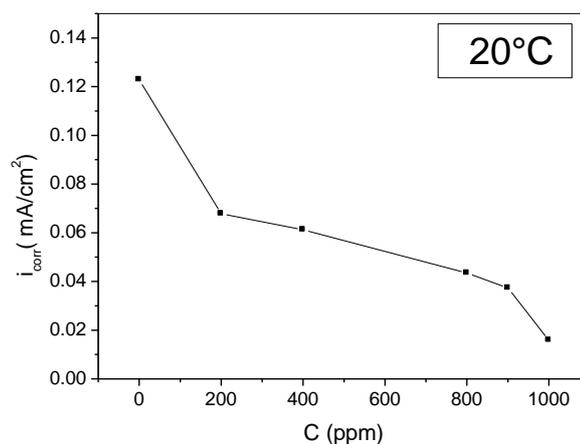


Figure IV. 16: Evolution de la densité de courant de l'acier API 5L Gr-B dans la solution HCl (1M) en ajoutant l'EBPS à 20°C.

IV. 4. 2. 4 Courbes de polarisation:

Les courbes de polarisation $E=f(i_{corr})$ consiste à balayer un potentiel dans un intervalle potentielle varie de ± 250 mV par rapport au potentiel en circuit ouvert (E_{ocp}) avec une vitesse de balayage du potentiel de 1 mV/s. Avant le tracé de ces courbes, l'électrode de travail est maintenue à son potentiel d'abandon (E_{ocp}) pendant 60 minutes.

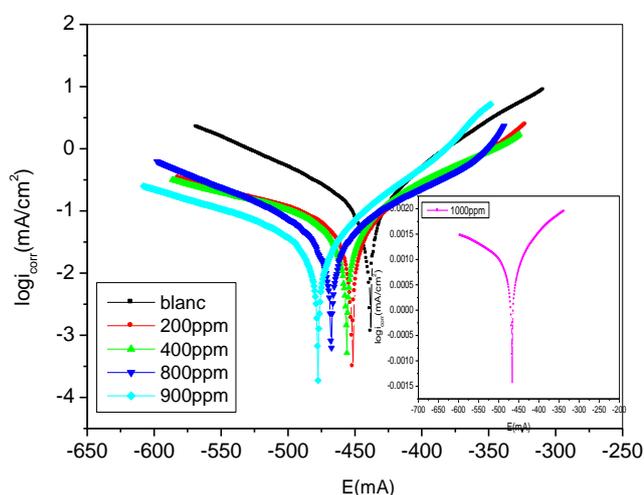


Figure IV. 17: Les courbes de polarisation potentiodynamiques de l'acier API 5L Gr-B dans HCl 1M à différentes concentrations de l'EBPS à 20°C

l'examen de ces courbe montre que :

Les diagrammes de polarisation potentiodynamique à différentes concentration l'EBPS sont constituées de deux branches :

- Dans la branche anodique : qui correspond à la cinétique de dissolution de l'acier selon la réaction suivante :



- Dans le branche cathodique : qui correspond à la réduction du cation hydrogène selon la réaction suivante:

Ces courbes ayant presque la même allure avec un décalage qui est provoqué par l'ajout des différentes concentration de l'EBPS.

L'action de l'extrait butanolique se traduit par une diminution des courants de corrosion. Ce résultat montre que l'addition des inhibiteurs réduit la dissolution anodique du l'acier et retarde l'évolution de la décharge des ions H⁺ [27].

Tableaux IV.8: Paramètres électrochimiques, taux de recouvrement et l'efficacité inhibitrice de l'acier API 5L Gr-B dans HCl 1M sans et avec l'ajout de différentes concentrations de l'EBPS à la température 20°C.

C(ppm)	$-E_{corr}$ (mV)	i_{corr} (mA/cm ²)	β_a (mV)	$-\beta_c$ (mV)	R_p	θ	EI(%)
0	419	0,1229	64,2	122,9	129,5	—	—
200	417,4	0,0678	92,9	194,1	144	0,44833	44,83
400	456,2	0,0612	83,5	186	317,23	0,50203	50,20
800	467,6	0,0435	94,4	112,5	423,4	0,64605	64,60
900	477,6	0,0373	62,1	158,3	502,75	0,69650	69,65
1000	466,5	0,01580	169,9	449,1	2910	0,87144	87,14

Selon les résultats présenter dans le tableaux IV.8 ci-dessus on constate que:

- La diminution de la densité du courant de corrosion avec l'augmentation de la concentration jusqu'à atteindre un minimum de $0,01580 \text{ mA/cm}^2$ à la concentration maximale de 1000ppm de l'EBPS est due à l'effet de blocage des sites actifs sur la surface métallique par les molécules adsorbées de l'extrait [28]. donnant une efficacité maximale de l'ordre de 87,14% .

D'après la littérature [29, 30], si la différence entre les valeurs de potentiel de corrosion E_{corr} en absence et en présence de l'inhibiteur est supérieure à 85 mV, l'inhibiteur peut être classé comme type cathodique ou anodique, par contre si cette différence est inférieure à 85 mV l'inhibiteur est de type mixte.

- Dans notre cas, le décalage maximal de la valeur du potentiel est de l'ordre de 58,6 mV, ce qui suggère que l'EBPS est un inhibiteur de type mixte.
 - Les valeurs de β_a et β_c ne varient pas d'une manière régulière, avec l'ajout de l'EBPS cela confirme le mode mixte d'inhibition de l'EBPS [31].
 - Les résultats obtenus par le tracé des courbes de polarisation, valident les résultats des mesures gravimétriques qu'ils sont en bonne concordance.

IV. 4. 2. 5 Conclusion partielle:

Les résultats électrochimique montrent que :

- ❖ la résistance de transfert de charge augmente en augmentant la concentration de l'EBPS, ceci est expliqué par la formation d'un film protecteur par contre la capacité de double couche diminue avec le croisement de la concentration de l'EBPS qui suggère que les molécules de l'inhibiteur sont adsorbées sur la surface de l'acier. L'EBPS présente une inhibition de type mixte dans le milieu HCl (1M)

IV. 4. 3: Etude comparative des résultats obtenus par les trois méthodes :

Les variations de l'efficacité inhibitrice obtenus par les trois techniques (la gravimétrie, la spectroscopie d'impédance électrochimique et les courbes de polarisation) en fonction de la différentes concentration de l'EBPS sont présentées dans la figure IV.18 suivante:

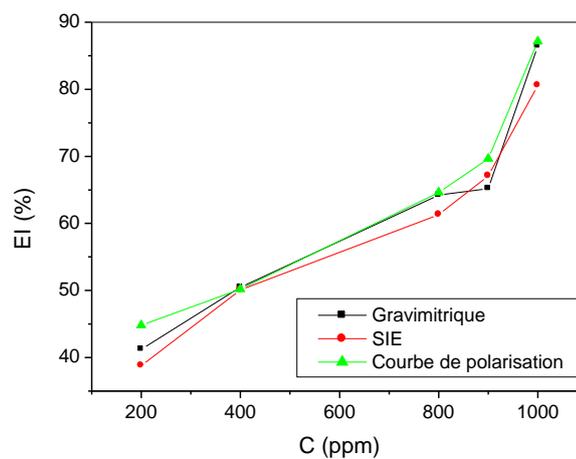


Figure IV. 18: Efficacité inhibitrice obtenue par les trois techniques dans la solution 1M et à différentes concentration de l'EBPS et à 20°C

D'après (la figure IV.18) on a constaté qu'il y a une bonne concordance des valeurs de l'efficacité inhibitrice obtenue à partir des trois techniques étudiées.

Références bibliographiques:

- [1] X. Li, D. Shuduan, F. H. M. Guannan, "Inhibition effect of 6-benzylaminopurine on the corrosion of cold rolled steel in H₂SO₄ solution. Corros", Sci, 51, (2009), 620-634.
- [2] M. H. GONZALEZ, "Etude d'un traitement multifonctionnel vert pour la protection contre la corrosion de l'acier au carbone API 5L-X65 en milieu CO₂", Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2011.
- [3] H. Hamani, "Synthèse, caractérisation et étude du pouvoir inhibiteur de nouvelles molécules bases de Schiff", thèse de doctorat, université, Ferhat –Abbas Setif 1, (2015).
- [4]. Lopes-Sesenes, Jose Gonzalo Gonzalez-Rodriguez, Gloria Francisca Dominguez-Patiño, Alberto Martinez-Villafaña, "Corrosion inhibition of carbon steel by extract of *Buddleia perfoliata*", J. Electrochem. Sci. Eng. 2(2), (2012), 77-90.
- [5] C. Kamal, M.G. Sethuraman, *Spirulina platensis*—A novel green inhibitor for acid corrosion of mild steel, Arabian Journal of Chemistry, 5, (2012), 155–161 .
- [6] A.Y. El-Etre, M. Abdallah, Z.E. El-Tantawy, Corrosion inhibition of some metals using lawsonia extract, Corr. Sci. 47 ,(2005), 385–395.
- [7] G. Hodaifa, J.M. Ochando-Pulido, S. Ben Driss Alami, S. Rodriguez-Vives, A. Martinez-Ferez, Kinetic and thermodynamic parameters of iron adsorption onto olive stones, Ind.Crop.Prod. 49 ,(2013), 526– 534.
- [8] S.A. Umoren, U.M. Eduok, M.M. Solomon, A.P. Udoh., Corrosion inhibition by leaves and stem extracts of *Sida acuta* for mild steel in 1 M H₂SO₄ solutions investigated by chemical and spectroscopic techniques, Arabian journal of chemistry, article in press (2011), doi: 10.1016/j.arabjc.2011.03.008.
- [9] M. Lebrini; "Synthèses et études physicochimiques de nouveaux thiadiazoles inhibiteurs de corrosion de l'acier en milieu acide", thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille (2006).
- [10] M. Lebrini et al, Corrosion inhibition of C38 steel in 1 M hydrochloric acid medium by alkaloid extract from *Oxandra asekii* plant, Corr. Sci. 53 , (2011), 687-695 .

- [11] A.Y. El-Etre, M. Abdallah, Z.E. El-Tantawy, Corrosion inhibition of some metals using lawsonia extract, *Corr. Sci.* 47, (2005) ,385–395 .
- [12] S. Papavinasam, *Journal of science and engineering*, Vol 62, n°1, NACE International, Houston, TX, (January 2006),.
- [13] W. Machu, Proc. 3rd European Symposium on Corrosion Inhibitors, *Ann. Univ. Ferrara, Italy*, Suppl. n°5 , 107 ,(1971).
- [14] O. Radovico, Proc. 7th European Symposium on Corrosion Inhibitors, *Ann. Univ. Ferrara, Italy*, 330, (1990).
- [15] P. Bommersbach, "Evolution des propriétés d'un film inhibiteur de corrosion sous l'influence de la température et des conditions hydrodynamiques caractérisation par techniques électrochimiques", Thèse de Doctorat Ecole doctorale Matériaux de Lyon (2005).
- [16] A. Fiala, "Synthèses et caractérisations de nouvelles molécules contenant du soufre et de l'azote, études de leur effet inhibiteur sur la corrosion des métaux de transition application à la protection du cuivre en milieux acides", Thèse de doctorat, Université Mantouri Constantine (2007).
- [17] Sh. Pournazari, Sh. Pournazari, M.H. Moayed, M. Rahimizadeh, *Corros Sci*, 71, (2013) 20-31.
- [18] M.A. Quraishi, MA Quraishi, HK Sharma, *Mater Chem Phys*, 122 (2010) 114–122.
- [19] M. Benahmed, N.Djeddi, S.Akkal, H.Laouer, *Int J Ind Chem*,7, 109-120 (2016).
- [20] K .DOB, "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 Aout 1955 Skikda, (2018).
- [21] E. Bayol, A.A.G, M. Dursun, K. Kayakırılmaz, *Acta physico-Chimicasinica*, and 24(12), 2236-2242.
- [22] L .Afia, R.Salghi, L. Bammou Lh., Bazzi, B. Hammouti, L. Bazzi, *Acta Metall. Sin.* 25 ,10 (2012).

- [23] A .Yurt, A.Balaban., S.UstÄun Kandemir, G. Bereket, B. Erk, *Mater. Chem. Phys.* 85, 420 (2004).
- [24] J. A. Dean, Lange's Handbook of Chemistry, Sd Edition, Mc Graw-Hill, 1973.
- [25] M. H. GONAZALEZ, "Etude d'un traitement multifonctionnel vert pour la protection contre la corrosion de l'acier au carbone API 5L-X65 en milieu CO₂", Thèse de doctorat de l'université de toulouse, 2011.
- [26] Laamar My Rachid., Les Technologies de laboratoire, 2010, N° 20.
- [27] K. Tebbji, N. Faska, A. Tounsi, H. Oudda, M. Benkaddour, B. Hammouti, The effect of some lactones as inhibitors for the corrosion of mild steel in 1 M hydrochloric acid. *Mater. Chem. Phys.* 106 (2007) ,260–267.
- [28] Li. Xianghong , " Inhibition effect of 6-benzylaminopurine on the corrosion of cold rolled steel in H₂SO₄ solution", *Corros. Sci.*, 51 (2009), 620-634.
- [29] A .Zarrouk, B.Hammouti, T.Lakhlifi, M..Traisnel, H.Vezin, F.Bentiss, New 1H-pyrrole-2, 5-dione derivatives as efficient organic inhibitors of carbon steel corrosion in hydrochloric acid medium: electrochemical, XPS and DFT studies. *Corrosion Science*, 2015. 90, p. 572-584.
- [28] C.B Verma, M. Quraishi, and A. Singh, 2-Aminobenzene-1, 3-dicarbonitriles as green corrosion inhibitor for mild steel in 1 M HCl: Electrochemical, thermodynamic, surface and quantum chemical investigation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2015. 49, p. 229-239.
- [31] K.V Kumar, M.S.N. Pillai, and G.R. Thusnavis, *Seed* extract of *Psidium guajava* as ecofriendly corrosion inhibitor for carbon steel in hydrochloric acid medium. *Journal of Materials Science & Technology*, 2011. 27(12),p. 1143-1149.



Conclusion générale

Conclusion générale:

L'objectif de notre travail a été consacré à l'étude de l'inhibition avec l'extrait butanolique issue de la plante *Pituranthos scoparius* contre la corrosion de l'acier au carbone API 5L Gr-B, dans un milieu agressif l'acide chlorhydrique 1M.

Les résultats obtenues, permet d'aboutir aux conclusions suivantes:

- ❖ L'efficacité inhibitrice de l'EBPS augmente avec l'accroissement de la concentration de l'EBPS jusqu'à l'obtention de la valeur maximale d'ordre 80,57% à 1000ppm et diminue avec la croissance de la température.
- ❖ Les résultats obtenus par la méthode gravimétrique montrent que l'EBPS s'adsorbe bien à la surface de l'acier API 5LGr-B et d'après l'étude de l'isotherme d'adsorption est de type physisorption.
- ❖ Le tracé des différentes isothermes (Langmuir, Freundlich , Temkin et Frumkin) a montré que l'adsorption de l' extrait de la plante *Pituranthos scoparius* obéit à l'isotherme de Freundlich .
- ❖ L'action de cet extrait est basé sur un mécanisme simple d'adsorption à la surface de l'acier, bloquant ainsi les sites actifs et par conséquent en diminuant les densités de courants de corrosion.
- ❖ Les diagrammes d'impédance électrochimique ont montré que l'inhibition de la corrosion est contrôlée par un processus de transfert de charge.
- ❖ L'augmentation de La résistance de transfert de charge augmente avec l'augmentation de la concentration de l'EBPS qui indique la formation d'un filme protecteur .
- ❖ Les courbe de polarisation indique que l'EBPS agissent comme inhibiteur de type mixte pour les réactions anodiques et cathodiques .
- ❖ Il y a une bonne concordance des valeurs de l'efficacité inhibitrice obtenue a partir des trois techniques étudiées.

Perspectives :

- Préparer d'autres extraits de la plante *Pituranthos scoparius* comme le dichlorométhane, acétate d'éthyle, et les étudiés autant que des inhibiteurs de corrosion.
- Tester ces extraits désirés (dichlorométhane, acétate d'éthyle, et butanolique) de la plante *Pituranthos scoparius* pour avoir une idée sur des nouveaux méthodes des activités biologique.