

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE 20 AOÛT 1955 SKIKDA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE DES PROCÉDÉS



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie Chimique

***APPLICATION DES INHIBITEURS VERTS CONTRE LA
CORROSION DES ÉQUIPEMENTS INDUSTRIELS***

Soutenu le/06/2023

Réalisé par : BOUFLIGHA Ranya

Encadré par: Dr.KHELFAOUI Malika

CHAÂBA Ahlem

MERDJAOUI Maïsa

Année Universitaire 2022- 2023

Je tiens tout d'abord à remercier Dr KHELFAOUI.M . mon encadreur pour l'aide témoignée lors du suivi de notre travail.

Mes remerciements vont aussi au président et le membre jury d'avoir accepté et critiquer ce mémoire.

Mes remerciements sont adressés aussi à notre chef de département. Feriel krid et responsable du laboratoire de génie chimique à l'université de Skikda pour son accueil.

Mes remerciements vont à tous mes amis (es) de la promotion de master 2022/2023 de génie chimique.

En fin, à toutes les personnes qui m'ont aidée de loin ou de près pour l'élaboration de ce travail.



Dédicace

Premièrement je remercie Dieu qui m'a donné la patience et le courage pour accomplir ce modeste travail.

e tiens à dédier cet humble travail à :

Qui est parti de ma vie qui est présent dans mon cœur avec un grand cœur, j'ai souhaité ta présence... Que Dieu ait pitié de toi, mon père

A celle qui est restée à mes côtés et m'a soutenue dans chaque détail de ma

journée et de mes études, ma chère mère, le sommet de ma tête:

Bariza

A mes très chères sœurs : Fariail, Refida

à mon fiancé: Walido

À ceux qui ont partagé mon rêve et mon espoir, tous mes amis

A toute La famille: Merdjaoui, Lekoui

A mon Encadreur : KHELFAOUI.M

Si les jours nous séparent, les souvenirs nous rassemblent

Maïsa

Dédicace

A l'aide de dieu tout puissant, qui m'a tracé le chemin de ma vie, j'ai pu réaliser ce modeste travail, le fruit de mes efforts que je dédie :

A ceux que j'aime le plus au monde mes très chers parents, qui m'ont toujours encouragé, pour leurs sacrifices, leur soutiens et leurs précieux conseils durant toute ma vie, à mon mère ELOUAZNA, source de vie, d'amour et d'affection, et à mon père MOHAMED, l'épaule solide, Et L'œil attentif.

Que die vous procure bonne santé et longue vie.

A mes chers Sœurs, Zahia , Hanane , Manel , Source de joie et de bonheur.

A mes chers frères, Noureddine, Cherif, Abd el Karim, Abd el Malek, Salah.

A toute ma CHAABA, Ainsi qu'à ma grand-mère Elzohra.

A mon Encadreur : KHALFAOUI.M.

A mon binôme, Maisa et Rania avec qui j'ai vécu des beaux moments au cours

De cette année.



AHLEM

Dédicace

**Avant tout, je remercie « Dieu » le tout puissant pour m'avoir
donné la force,**

le courage et la chance d'étudier

**Je le dédie à toutes personnes qui ne sont chère ; Je le dédie à
toutes personnes qui ne sont chère**

**Au deux être les plus chers au monde qui ont donnés sens à mon
existence, et qui m'ont soutenu nuits et jours durant tout mon
parcours:**

**Mon très cher père qui m'a donné un magnifique modèle de
volonté, mercibaba DJEMEL, avec mes prières qu'ils soient
toujours en bonne santé.**

**Ma très chère mère qui a consacré sa vie pour bâtir la mienne, je
lui serai éternellement reconnaissante, merci maman
DAOUIA .**

A mes très chères sœurs Khouloud, Radwa, Soundes

A tous mes amis , Chacun en son nom et chacun à sa place .

A toute ma famille : Boufligha , Boudallioua .

A mon Encadreur : KHELFAOUI.M

A tous ceux qui m'ont soutenu avec le sourire

Ranya



Résumé

La corrosion est une dégradation automatique du métal en raison de son interaction avec le milieu environnant et, est un procédé continu ne peut pas être éliminé facilement, Dans ce travail, nous avons proposé un moyen naturel de réduire la corrosion d'acier C1020 dans un milieu acide de HCl à 1M par l'utilisation de deux inhibiteurs verts de deux plantes médicinales ; Cytisus villosus et Lavandula Stoechas. L'étude a été réalisée par des méthodes électrochimiques en particulier la spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS). Les résultats obtenus montrent une bonne efficacité inhibitrice pour les deux extraits.

Mots clés : corrosion, inhibiteur de corrosion, polarisation, plante

Abstract

Corrosion is an automatic degradation of metal due to its interaction with the surrounding environment and is a continuous process that cannot be easily eliminated. In this work, we have proposed a natural way to reduce corrosion of C1020 steel in a acid medium of HCl at 1M by the use of two green inhibitors of two medicinal plants; Cytisus villosus and Lavandula Stoechas. The study was carried out by electrochemical methods in particular electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The results obtained show good inhibitory efficacy for the two extracts.

Keywords: corrosion, corrosion inhibitor, polarization, plant

المخلص

لتآكل هو تدهور تلقائي للمعدن بسبب تفاعله مع البيئة المحيطة وهو عملية مستمرة لا يمكن القضاء عليها بسهولة. في هذا العمل، اقترحنا طريقة طبيعية لتقليل تآكل فولاذ س 0101.

في وسط حمضي من حمض الهيدروكلوريك عند 0 مولاري ، اقترحنا طريقة طبيعية لتقليل تآكل فولاذ باستخدام مثبطين أخضر من نباتين طبييين. اللزان الزغبي والخزامة المكورة أجريت الدراسة بالطرق الكهروكيميائية وخاصة التحليل الطيفي.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها فعالية مثبطة جيدة للمستخلصين

الكلمات المفتاحية: التآكل، مانع التآكل، الاستقطاب، النبات

Liste des figures

Figure I.1 : photos de matériaux soumis aux phénomènes de corrosion	3
Figure I.2 : Métal au contact d'un milieu agressif.....	7
Figure I.3 : classement des inhibiteurs de corrosion.....	9
Figure II.1 : Les feuilles de Lavandou Stoechas.....	14
Figure II.2 : Les feuilles Cytisus Villosus.....	14
Figure II.3 : Agitation de mélange et le séchage d'extrait.....	14
Figure II.4 : filtration du mélange et extrait obtenu.....	15
Figure II.5 : Extrait des feuilles Lavandula Stoechas et Cytisus villosus.....	15
Figure II.6 : Préparation de l'électrode de travail.....	16
Figure II.7 : Lavandula Stoechas.....	18
Figure II.8 : Les fruits de Lavandula Stoechas.....	20
Figure II.9 : Lavandula stoechas.....	21
Figure II.10 : Cytisus Villosus.....	22
Figure II.11 : La feuille de Cytisus Villosus.....	23
Figure II.12 : La fleur de Cytisus Villosus.....	23
Figure II.13 : La Cytisus Villosus.....	25
Figure II.14 : Potentiostat piloté par ordinateur.....	26
Figure II.15 :Détermination des paramètres électrochimique à partir des droites de Tafel.....	27
Figure II.16 : Diagramme d'impédance dans le plan de Nyquist.....	29
Figure III.1 : Courbes de polarisation de l'acier au carbone C-1020 dans HCl 1M sans et avec addition d'inhibiteur à différents concentrations de l'extrait (A et B).....	31

FigureIII.2 : Diagrammes d'impédance enregistrés sur l'électrode d'acier dans la solution HCl (1M) sans et avec addition de l'extrait (A et B)	35
Figure. III.9 : le circuit équivalent simule les données d'impédance pour l'acier C-1020 sans et avec les inhibiteurs.....	36
FigureIII.4 : Isotherme d'adsorption de Langmuir de l'acier C1020 dans HCl 1M en présence d'inhibiteur (plante A).....	39
FigureIII.5 : Isotherme d'adsorption de Langmuir de l'acier C-1020 dans HCl 1M en présence d'inhibiteur (plante B).....	39

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les principaux facteur de corrosion	5
Tableau I.2 : Extrait de plantes comme inhibiteur de corrosion sur les aciers dans différents milieux acides.....	11
Tableau II.1 : propriété mécanique d'acier C1020.....	16
Tableau II.2 : Composition chimique de l'acier C 1020.....	17
Tableau II.3 : Classification de la plante Lavandula Stoechas.....	21
Tableau II.4 : Classification de la plante CytisusVillosus.....	24
Tableau III.1 : Paramètres électrochimiques et l'efficacité d'inhibition de l'acier C1020 dans HCL à diverses concentrations des deux extraits Cytisus Villosus et Lavadula Stoechas.....	32
Tableau III.2 : Paramètres d'impédance et efficacité inhibitrice de la corrosion de l'acier C 1020 dans HCl (1M) sans et avec addition de l'inhibiteur (A) aux différentes concentrations.....	37
Tableau III.3 : Paramètres d'impédance et efficacités inhibitrices de la corrosion de l'acier dans HCL 1M sans et avec addition de l'inhibiteur(B) à différentes concentrations.....	37

Les abréviations

β_a : coefficients de Tafel anodique

β_c : coefficients de Tafel cathodique

C_{inh} : Concentration de l'inhibiteur

E : potentiel

$E\%$: Efficacité inhibitrice

E_{corr} : potentiel de corrosion

E_R : Electrode de référence

ET : Electrode de travail est la fréquence pour laquelle la partie imaginaire de l'impédance est maximale

I : courant global

I : Densité de courant de transfert de charge ($A.cm^{-2}$)

i_{corr} (inh) : valeurs de densité de courant de corrosion de l'acier avec inhibiteur I_{corr} : Courant de corrosion I i_{corr} : valeurs de densité de courant de corrosion de l'acier sans inhibiteur ;

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

R : constante de gaz parfait,

R^2 : Coefficient de corrélation

R_p : résistance de polarisation

R_t : Résistance de transfert de charge

R : Surface de l'électrode

T : Température, v : la vitesse de fluide

V_{des} : Vitesse de désorption

ΔG_{ads} : L'énergie libre d'adsorption standard (kJ/mol)

θ : Taux de recouvrement de surface

Table des Matières

Remerciement	-
Sommaire	-
Liste des figures	-
Liste des tableaux	-
Liste abréviations	-
Introduction générale	01
Chapitre I : Généralité sur la corrosion	
I. Généralité sur la corrosion	3
I.1.Introduction	3
I.2.Définition de la corrosion	3
I.3.Les types de la corrosion	4
I.3.1.Corrosion chimique (sèche)	4
I.3.2.Corrosion biochimique (bactérienne)	4
I.3.3.Corrosion électrochimique (humide)	4
I.4.Les facteurs de la corrosion	4
I.5.Les formes de la corrosion	5
I.5.1.La corrosion généralisée	5
I.5.2.Corrosion localisée	5
I.5.3.Corrosion liée à des effets mécaniques	5
I. 6 Méthodes de protection contre la corrosion	6
I. 6.1 Corrosion endogène	6
I. 6.2 Corrosion exogène	6
I. 7 Aperçu sur les inhibiteurs de corrosion	6
I. 7.1 Historique	6
I. 7.2 Définition	7
I. 7.3 Conditions d'utilisation	7
I. 7.4 Propriétés des inhibiteurs	8
I. 8 Les classement d'inhibiteurs	8
I. 9 L'inhibiteur de la corrosion par les substances naturelles (plantes)	9

I. 10 Aperçu bibliographique sur les inhibiteurs naturels de corrosion	10
I. 10.1 Extraits de plantes comme inhibiteur de corrosion sur les aciers dans différents milieux acides	11
I. 11 Conclusion	12
Chapitre II : Matériel et méthodes expérimental	
II.1.Introduction	13
II.2.Préparation des échantillons	13
II.2.1 Matériels et les produits utilisés	13
II.3 Mode opératoire	13
II. 3.1.Extraction des plantes	13
II. 3.2préparation le milieu corrosif	15
II. 3.3 Solutions inhibitrices	15
II. 4 Elaboration de l'électrode de travail	15
II.5. Les composition d'électrode	17
II. 6 Inhibiteur testé	17
II. 6.1 .1Historique de la lavandula stoechas	17
II. 6.1.2 Définition	18
II. 6.1.3. Propriétés médicinales de Lavandula stoechas	18
II. 6.1.3.1.Utilisation de Lavandula stoechas	18
II. 6.1.4.Composants de Lavandula stoechas	19
II. 6.1.4.1. La tige	19
II. 6.1.4.2.Les feuilles	19
II. 6.1.4.3. Les fleurs	19
II. 6.1.4.4Les fruits	20
II. 6.1.5 Classification de la plante Lavandula stoechas	21
II.6.1.6 Description de lavandula stoechas	21
II. 6.2 Inhibiteur cytisis villosus	22
II. 6.2.1 Historique de la cytisis villosus	22
II. 6.2.2 Définition de cytisis villosus	22
II. 6.2.3 Propriétés médicinales	22

II. 6.2.4 La composition de <i>Cytisus villosus</i>	23
II.6.2.4.1. Le cadre	23
II.6.2.4.2 Les feuilles	23
II.6.2.4.3 Les fleurs	23
II.6.2.4.4 Les fruits	24
II.6.2.5 Classification de la plante <i>Cytisus villosus</i>	24
II.6.2.6 Description de la <i>Cytisus villosus</i>	24
II.7 Méthode électrochimique	25
II.7.1 Dispositif	25
II.7.2 Protocole des mesures électrochimiques	26
II.7.2.1. Les courbes de polarisation	26
II.7.2. 2. Spectroscopie d'impédance électrochimique	27
II.7.2.2.1 Diagrammes de Nyquist	28
II.7. Conclusion	29

Chapitre III : Résultat et discision	
III.1. Introduction	30
III.2 les résultats de l'inhibition de la corrosion de l'acier (C1020)	30
III. 3. Etude électrochimiques	30
III. 3.1 Méthode de Courbes de polarisation	30
III. 3.2 La Spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE)	34
III. 3.3 Isotherme d'adsorption	38
III. 3.4 Conclusion	40
Conclusion générale	42
Références bibliographiques	-

Introduction générale

Introduction Générale

Les matériaux métalliques, et plus particulièrement les aciers, qui sont des alliages à base de fer, constituent les matériaux hautement recommandés pour plusieurs activités industriels, sont malheureusement le siège de la corrosion lorsqu'ils sont exposés aux milieux naturels agressifs. C'est en raison de leur faible coût, de leur force mécanique élevée et de leur disponibilité que les aciers sont privilégiés dans l'industrie. Toutefois, ils sont particulièrement vulnérables aux environnements variables (milieu aqueux, atmosphère, hautes températures, etc.), puisqu'ils offrent une faible résistance à la corrosion. La corrosion résulte d'une action chimique ou électrochimique d'un environnement sur les métaux et les alliages. Les conséquences sont importantes dans divers domaines et en particulier dans l'industrie : arrêt de production, remplacement des pièces corrodées, accidents et risques de pollutions sont des événements fréquents avec parfois de lourdes incidences économiques. En effet, on estime par exemple que chaque année le quart de la production d'acier est détruit par la corrosion, ce qui correspond environ à 150 millions de tonnes/an ou encore 5 tonnes/seconde. Le remplacement des équipements et matériel corrodés constitue pour l'industrie une charge financière très élevée à laquelle il faut ajouter le manque à gagner correspondant à l'arrêt des installations nécessaires pour effectuer les réparations [1]. De ce fait, la corrosion a donné et donne toujours lieu à de nombreuses études car les phénomènes de corrosion rencontrés quotidiennement sont complexes et souvent spécifiques [2].

Aujourd'hui, La prévention contre la corrosion est une problématique importante pour l'emploi à l'échelle industrielle des matériaux métalliques. Il existe de nombreuses mesures préventives parfois concurrentielles pour assurer leur protection telles que les

revêtements, la protection électrochimique (cathodique ou anodique) et/ou les inhibiteurs de corrosion

Les inhibiteurs de corrosion constituent un moyen à part entière de protection contre la corrosion métallique[3].

Un inhibiteur est un composé chimique que l'on ajoute, en faible quantité au milieu pour diminuer la vitesse de corrosion des matériaux. Il peut être destiné soit à une protection permanente de la pièce (l'installation requiert alors une attention scrupuleuse), soit à une protection provisoire (notamment lorsque la pièce est particulièrement sensible à la corrosion ou lorsqu'elle est exposée à un milieu très agressif). Les molécules inhibitrices peuvent agir

1

suivant différents mécanismes, leur conférant ainsi des performances d'inhibition fonction du milieu d'étude [4].

Au cours de ce travail, nous avons déterminé l'efficacité inhibitrice de deux plantes médicinales ; les feuilles de *Lavandula stoechas* et les feuilles de *Cytisus villosus* sur l'acier C1020 et dans un milieu corrosif de HCl à concentration 1M, utilisant les techniques électrochimiques.

Ce mémoire est organisé de la manière suivante :

- Le premier chapitre est consacré à une présentation générale de la corrosion et les inhibiteurs verts ;
- Le deuxième chapitre représente les différentes techniques et produits chimiques utilisés ainsi que les protocoles expérimentaux appliqués pour l'extraction des inhibiteurs ;
- Le troisième chapitre est réservé aux résultats des tests électrochimiques et leurs discussions ;

Ce travail se termine par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur la corrosion

I.1 Introduction

L'importance considérable de la corrosion dans la vie quotidienne (domestique ou Industrielle) n'est plus à démontrer [05]. En effet, ce phénomène touche pratiquement toutes les réalisations de l'ingénieur, des plus grandes au plus petites : production de l'énergie, construction, transport, secteur médical, l'électronique, etc. Dans les pays industrialisés les conséquences de la corrosion ne résident pas seulement dans le coût économique (gaspillage de matière première, énergie et temps) mais également dans les accidents que peut provoquer (sécurité public en jeu) ainsi que le mauvais impact sur l'environnement [06].

I.2 Définition de la corrosion

D'après la norme internationale **ISO 8044:1999**, la corrosion est définie comme l'interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et pouvant conduire à une dégradation significative de la fonction du métal, du milieu environnant ou du système technique dont ils font partie [7]. Ou encore comme une réaction interfaciale irréversible d'un matériau avec son environnement [8, 9]. L'importance de la corrosion n'est plus à démontrer ; elle peut affecter de nombreuses structures, particulièrement celles qui sont constituées de matériaux métalliques. En effet, les matériaux métalliques, et plus particulièrement les aciers qui constituent les matériaux de base dans la construction de nombreuses structures, sont fortement exposés à la corrosion lorsqu'ils sont au contact d'atmosphères humides, immergés en eau douce ou saline, implantés dans les sols ou en présence de solutions plus ou moins agressives (**Figure I.1**)

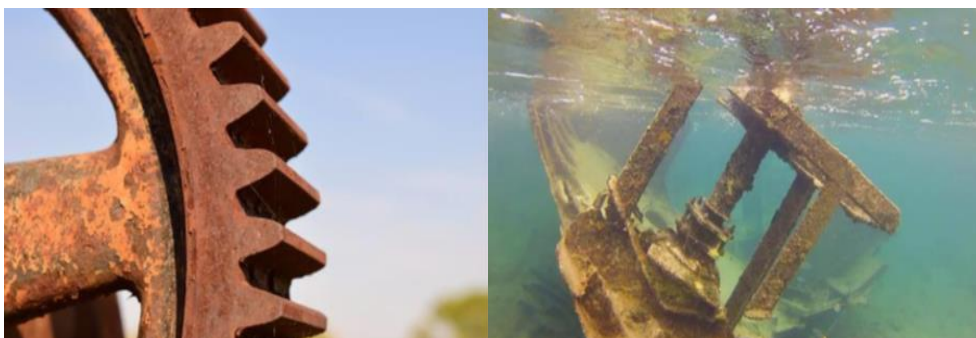


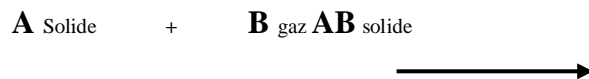
Figure I.1 : photos de matériaux soumis aux phénomènes de corrosion.

I.3 Types de la corrosion

Selon la nature de l'environnement et son comportement qui autour le métal, il existe trois grandes types de corrosion : chimique, biologique et électrochimique [10].

I.3.1 La corrosion chimique (sèche)

Il s'agit d'une réaction hétérogène entre une phase solide (le métal) et une phase gazeuse sans intervenir du passage d'un courant électrique, la réaction qui se produit est de la forme :



Il est très difficile à donner des exemples sur ce type de corrosion puisque elle est accompagnée de la corrosion électrochimique [11].

I.3.2 La corrosion biochimique (bactérienne)

Ce type de corrosion appelé aussi la bio-corrosion, c'est une attaque des métaux par les produits du métabolisme de certains micro-organismes [11].

Elle rassemble « tous les phénomènes de corrosion où les bactéries agissant directement ou par un intermédiaire des substances provenant de leur métabolisme, jouent un rôle primordial, soit en accélérant un processus déjà établi, soit en créant les conditions favorables à son établissement ». C'est un cas particulier de corrosion électrochimique qui concerne un métal en contact avec une phase aqueuse [12].

I.3.3 La corrosion électrochimique (humide)

Ce type de corrosion s'effectue dans un milieu liquide, il est en général accompagné d'une corrosion électrochimique, ceci est produit essentiellement par l'oxydation d'un métal sous forme d'ions ou d'oxydes et réduite l'agent corrosif existant dans la solution électrolytique par un transfert de charge en présence d'une circulation d'un courant électrique [13].

Pour une corrosion électrochimique on a :



I.4 facteurs de la corrosion

La corrosion dépend d'un très grand nombre de facteurs dont nous avons dressé une liste, d'après Portevin. La corrosion mettant en présence deux « partenaires », le réactif et le

métal ou l'alliage, il est logique de penser qu'elle dépendra à la fois des caractéristiques du réactif et de celles du métal. En ce qui concerne ces dernières, il convient de souligner que la connaissance de la composition chimique est nécessaire mais tout à fait insuffisante, de même que les traitements thermiques et mécaniques subis par le métal. (**Tableau I.1**) [14].

Tableau I.1 : Les principaux facteurs de corrosion.

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

I.5 formes de corrosion

Différentes formes de corrosion, dépendant de la nature du matériau et des caractéristiques de son environnement, ont pu être identifiées et répertoriées selon leurs principales manifestations visibles [15].

I.5.1 Corrosion généralisée

I.5.2 Corrosion localisée

On en distingue les différents types cités ci-dessous.

- Corrosion galvanique ou bimétallique ;
- Corrosion par piqûres ;
- Corrosion inter-granulaire ;
- Corrosion sélective ;
- Corrosion caverneuse ; ➤ Corrosion bactérienne.

I.5.3 Corrosion liée à des effets mécaniques

On en distingue les différents types cités ci-dessous.

- ❖ Fissuration par corrosion sous contrainte ;
- ❖ Effets de l'érosion, de l'abrasion, de la cavitation ; ❖ Fatigue due à la corrosion.

I.6 Méthodes de protection contre la corrosion

Les méthodes à utiliser pour protéger les matériaux contre la corrosion dépendent des types de corrosion, qui sont en général au nombre de deux grandes catégories, à savoir les corrosions endogène et exogène qui sont définies brièvement ci-dessous [16].

I.6.1 Corrosion endogène

Corrosion qui est propre au métal utilisé. Elle peut se manifester sous forme de corrosion uniforme dans le cas des métaux monophasés suffisamment homogènes ou dans le cas où les hétérogénéités sont réparties uniformément dans des matériaux polyphasés. Elle peut aussi se manifester sous forme de corrosion localisée lorsque les hétérogénéités (inclusions,..) sont suffisamment étendues pour fixer de manière permanente des aires anodiques en des points discrets de la surface du métal (par exemple: corrosion par piquuration).

I.6.2 Corrosion exogène

Pour ce type de corrosion, les causes ne sont pas à rechercher dans le métal lui-même mais dans des facteurs extérieurs. Cette corrosion se manifeste souvent par l'existence de zones anodiques et cathodiques localisées. Existence qui est causée par :

- _ Les imperfections lors de la mise en oeuvre du métal : défauts de surface (rayure,...), écrouissages locaux (cintrage des tubes,...) ;
- _ Les défauts de conception de la structure tels que par exemple le couplage galvanique entre deux parties de l'appareil en métaux différents.

I.7 Aperçu sur les inhibiteurs de corrosion

I.7.1 Historique

Comme dans plusieurs domaines différents, il est difficile de voir l'origine précise de l'inhibition considérée comme une technologie distincte. Pourtant, il y a plusieurs décennies, il

a été absolument découvert que le dépôt de chaux formé dans les tuyaux transportant les eaux naturelles liées protégeait ce tuyau ; au lieu d'augmenter perpétuellement la résistance à la corrosion des tuyaux en agissant directement sur eux, il est très judicieux de réguler les concentrations minérales des solutions transportées, cette mesure carrée à l'origine des dépôts calcaires « protecteurs ». En 1945, il n'y avait qu'une 30 d'articles traitant des inhibiteurs [17].

Divers articles sur l'inhibition ont été écrits tout au long de la période allant de 1945 à 1954 : ceux-ci proscrivaient, entre autres, l'inhibition dans les domaines de l'aviation, de chaudières, des systèmes de refroidissement, des moteurs diesel, du déneigement des sels, des raffineries de pétrole, des pétroliers ...

Les articles révélés tout au long de cette époque témoignent d'un bon développement technologique dans l'inhibition de la corrosion. Au cours des quarante dernières années, on identifie une gamme croissante de résumés, d'articles et de différents ouvrages sur ce sujet : en 1970, 647 articles traitant de l'inhibition ont été recensés [18].

I.7.2 Définition

Un inhibiteur de corrosion est un composé chimique qui, ajouté à faible concentration au milieu corrosif ralentit ou stoppe le processus de corrosion d'un métal placé au contact de ce milieu [19].



(a) sans inhibiteur de corrosion (b) avec inhibiteur de corrosion

Figure I. 2: Métal au contact d'un milieu agressif.

I.7.3 Conditions d'utilisation

Un inhibiteur (ou un mélange d'inhibiteurs) peut être utilisé comme unique moyen de protection :

-Soit comme protection **permanente** : l'inhibiteur permet alors l'utilisation de matériaux métalliques (ferreux non alliés, par exemple) dans des conditions satisfaisantes de résistance à la corrosion ; une surveillance de l'installation s'impose [20].

-Soit comme protection **temporaire** : pendant une période où la pièce ou l'installation est particulièrement sensible à la corrosion (stockage, décapage, nettoyage). Dans ce cas, le contrôle du système est à priori plus simple, la prévision du comportement de l'inhibiteur dans le temps étant plus facile à faire.

Un inhibiteur (ou un mélange d'inhibiteurs) peut être combiné à un autre moyen de protection : protection supplémentaire d'un alliage à haute résistance à la corrosion, addition à un revêtement de surface tel que peinture, graisse, huile [20].

I.7.4 Propriétés des inhibiteurs

Doit abaisser la vitesse de corrosion du métal tout en conservant les caractéristiques physicochimiques de ce dernier ;

- Être compatible avec les normes en vigueur de non-toxicité et de protection de L'environnement ;
- Être efficace à faible concentration ;
- Être stable en présence d'autres constituants ;
- Être stable dans le domaine de températures utilisé [21].

I.8 Les classement d'inhibiteurs

Il existe plusieurs manières pour classer les inhibiteurs de corrosion. Généralement, ils sont classés :

- ❖ Par réaction partielle ;
- ❖ Par mécanisme réactionnel ;
- ❖ Par domaine d'application (organique ou minérale) [22].

Néanmoins, cette classification n'est pas tout à fait adéquate car un même inhibiteur peut présenter à la fois des caractéristiques propres à chaque groupe de classement.

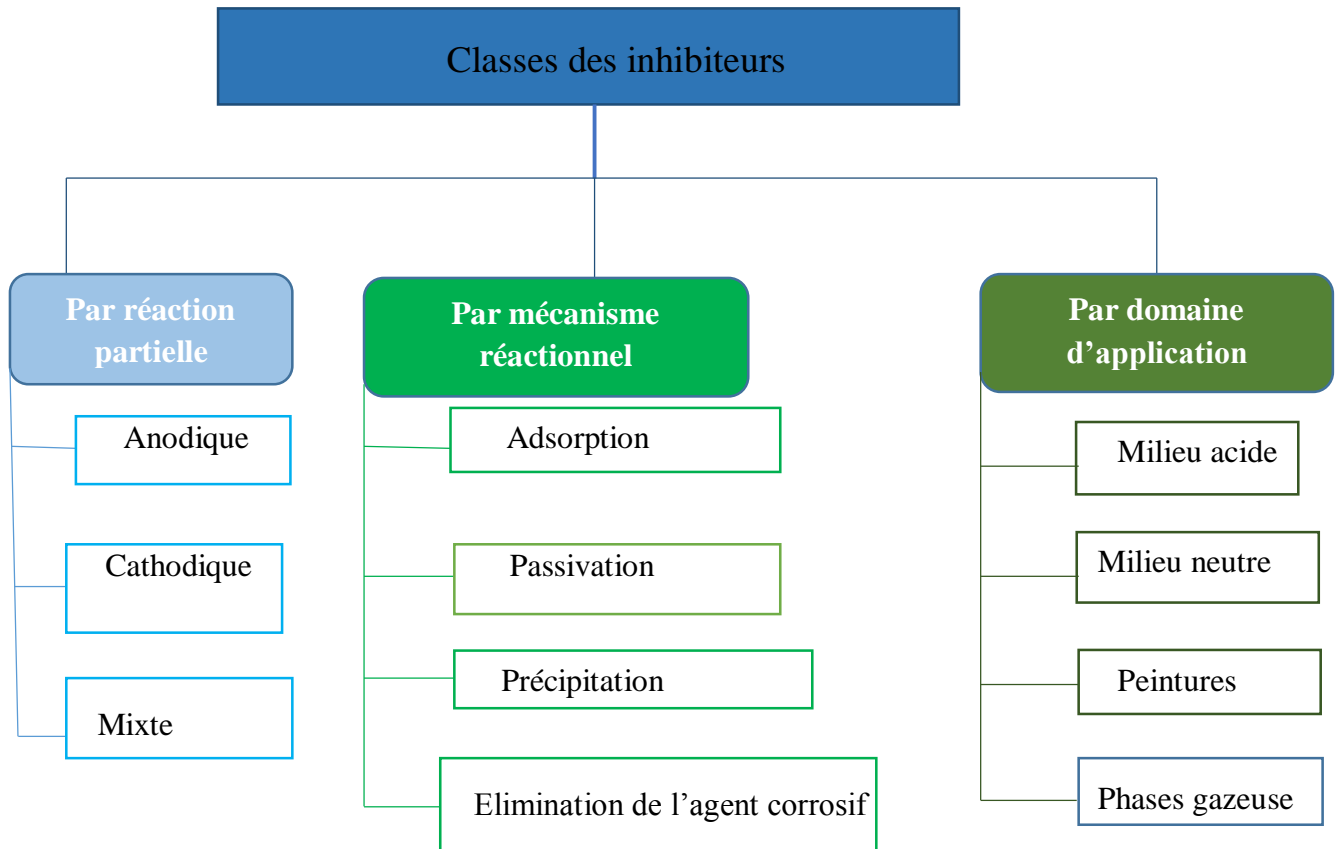


Figure I.3 : Classement des inhibiteurs de corrosion

I.9 L'inhibiteur de la corrosion par les substances naturelles (plantes)

De nombreux inhibiteurs utilisés aujourd'hui sont soit synthétisés à partir de matières premières peu coûteuses ou proviennent de composés organiques ayant des hétéroatomes tels que l'azote, le soufre, le phosphore ou l'oxygène dans leur système aromatique ou dans leur chaîne carbonée. Cependant, la plupart de ces substances anticorrosives sont toxiques vis-à-vis des êtres humains et de l'environnement [23]. Ces inhibiteurs peuvent notamment causer des dommages temporaires ou permanents du système nerveux, mais également des perturbations du processus biochimique et du système enzymatique de notre organisme [23]. La toxicité de ces composés se manifeste durant la synthèse ou durant leurs applications. Ces inhibiteurs n'étant pas biodégradables, ils causent également des problèmes de pollution. En conséquence, ces inconvénients ont orienté la recherche dans la direction des substances naturelles qui peuvent également offrir des propriétés inhibitrices vis-à-vis des métaux et des alliages [24].

Les plantes ont été reconnues comme sources de composés d'origine naturelle, avec pour certaines des structures moléculaires complexes et ayant des propriétés physiques, biologiques

et chimiques variables [25]. La plupart des composés extraits de plantes sont principalement utilisés dans les produits pharmaceutiques et les biocarburants et même les substances employés dans le domaine de cosmétique et de la gastronomie [26]. L'utilisation de substances naturelles est intéressante puisque celles-ci sont biodégradables, écologiques, peu onéreuses et présentent une disponibilité abondante. Ainsi, de nombreux groupes de recherche ont étudié des produits végétaux pour des applications en qualité d'inhibiteurs de corrosion pour métaux et autres alliages dans différents milieux corrosifs [27].

I.10 Aperçu bibliographique sur les inhibiteurs naturels de corrosion

L'utilisation de substances naturelles comme inhibiteurs de corrosion remonte à 1930 lorsque des extraits de plantes (tiges séchées, feuilles et graines) de *Chélidoine* (*Chelidonium majus*) et d'autres plantes ont été utilisées dans un bain de décapage H₂SO₄ [23]

Le taux d'inhibition de corrosion rencontré dans presque tous les extraits de plantes semble être lié à la présence de constituants actifs qui améliorent la formation d'un film sur la surface métallique, réduisant ainsi la corrosion. L'analyse de la structure chimique de certains des constituants extraits de plantes révèle que toutes les molécules sont des hydrocarbures à longue chaîne portant un groupe polaire à l'une ou l'autre extrémité. Les groupes polaires contiennent des atomes d'oxygène, d'azote ou de soufre. En effet, les extraits naturels de plante sont de riches sources de composés organiques. Il a été montré qu'ils contiennent des composés chimiques tels que des terpènes, des tanins, des alcools, des polyphénols, des acides carboxyliques, des composés contenant de l'azote tels que les alcaloïdes qui peuvent présenter une activité anticorrosive des métaux. Ce qui est tout à fait en accord avec les travaux de Riggs [28], qui a montré que les paramètres structuraux pouvant influencer significativement l'efficacité des inhibiteurs organiques sont :



- La structure géométrique ;
- La longueur de la chaîne carbonée ;
- Le type de liaison à travers la molécule ;
- Le type d'atomes et les caractéristiques des groupes moléculaires présents dans la molécule ;
- La capacité moléculaire à former une couche continue sur la surface métallique ou une liaison chimique ;

-La capacité de réagir et de former un complexe avec des atomes et des ions métalliques ou avec les produits de corrosion ;

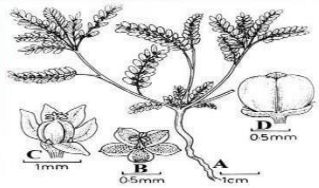



-La force de liaison formée avec la surface métallique.

I.10.1 : Extraits de plantes comme inhibiteur de corrosion sur les aciers dans différents milieux acides.



Tableaux I.2 : Extraits de plantes comme inhibiteur de corrosion sur les aciers dans différents milieux acides.

L'inhibiteur	Concentration	Milieu	Métal	L'efficacité	Ref
 <i>Acalypha indica alcoholic</i>	5 mg à 30°C	1N <i>H₃PO₄</i>	Acier doux	90.38 %	[22]
 <i>Rosemary</i>	10 g/l	2M <i>H₃PO₄</i>	Acier au carbone	73 %	[23]
		2M <i>H₂SO₄</i>		88.6 %	

CHAPITRE I : Généralité sur la corrosion

 <p><i>Phyllanthus amarus</i></p>	<p>4 g/l</p> <p>Extrait de feuilles</p>	<p>2M HCl</p>	<p>Acier doux</p>	<p>94.1 %</p>	<p>[24]</p>
 <p><i>Murraya koenigii</i></p>	<p>0.6 g/l</p>	<p>0.5M H_2SO_4</p> <hr/> <p>1M HCl</p>	<p>Acier doux</p>	<p>96.44 %</p> <hr/> <p>97.54 %</p>	<p>[25]</p>
 <p><i>Justicia gendarussa</i></p>	<p>0.15 g/l a</p> <p>25°C</p>	<p>1M HCl</p>	<p>Acier doux</p>	<p>93 %</p>	<p>[26]</p>
 <p><i>Cistus monspeliensis</i></p>	<p>0.25 g/l</p>	<p>1M HCl</p>	<p>Acier ordinaire</p>	<p>92 %</p>	<p>[27]</p>

CHAPITRE I : Généralité sur la corrosion

 <i>Tabernaemontana divaricata</i>	0.5 g/l a 25°C	1M HCl	Acier au carbone	95.24 %	[6]
 <i>Zingiber officinale</i>	1.5 g/l a 25°C	1M HCl	Acier au carbone	96 %	[28]

I.11. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre Généralités sur la corrosion ainsi que les facteurs influant sur la corrosion des métaux. Cette étude permet de choisir la méthode de protection la plus adéquate pour chaque Installation.

Chapitre II
Méthodes

Matériels et

III.1. Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter les méthodes expérimentales et électrochimiques, utilisées dans cette étude. Une description du matériau, de l'électrolyte et du montage, permet, dans un premier temps, de fixer une démarche expérimentale assurant une bonne reproductibilité des résultats. Les techniques électrochimiques sont à leur tour présentées de manière à souligner leur intérêt dans l'étude des phénomènes de corrosion.

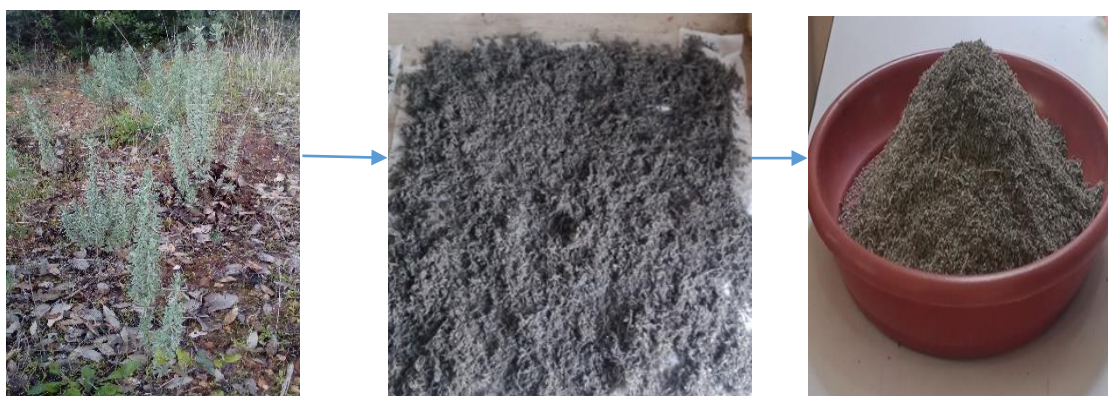
II. 2. Préparation des échantillons

II.2.1 Matériels et les produits utilisés

Matériels	Produite
Bécher (800ml) Erlenmeyer ; Entonnoir ; Balance ; Eprouvette graduée (25ml) ;papier filtre ; Papier aluminium ; Spatule ; étuve ; Cristalliseur ; Agitateur.	HCL Eau distillé.

II.3. Mode opératoire II.3.1.Extraction des plantes

Après avoir collecté les feuilles de Lavandula stoechas et Cytisus villosus elles ont été séchées pendant 30 jours dans une pièce sombre et réduites en poudre.



FigureII.1 : les feuilles de Lavandula Stoechas



Figure II.2 : les feuilles Cytisus Villosus

La quantité spécifique (30g) de poudre a été macérée avec l'eau distillée dans un bécher. Ensuite, la solution a été chauffée à 60 C° et mélangé pendant 2h.



Figure II.3 : Agitation de mélange et le séchage d'extrait

La solution résultante a été passée du filtre pour éliminer les feuilles de lavandula stoechas et cytisis villosus non dissoutes. Puis, la solution claire est évaporée dans l'étuve afin d'obtenir un solide de l'extrait de feuilles de lavandula stoechas et cytisis villosus .



Figure II.4 : filtration du mélange et extrait obtenu

II.3.2. préparation le milieu corrosif

La solution corrosive de cette étude est le HCl de concentration 1M

II.3.3. Solutions inhibitrices

L'inhibiteur utilisé dans ce travail est l'extrait des feuilles de lavandula stoechas et cytisus villosus



Figure II.5 : Extrait des feuilles lavandula stoechas et cytisus villosus

II.4 Elaboration de l'électrode de travail

Le subjectile est un carré de 1cm² de surface utile. Il est lié à un fil conducteur et enrobé dans une résine thermodurcissable et inerte chimiquement (**Figure II.6**).

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

Afin d'obtenir des résultats fiables et reproductibles, la surface aérée de l'électrode de travail subit, avant chaque essai, un polissage à différentes granulométries au papier abrasif (Grit 600, 800, 1000, 1200, 2400) sous un jet d'eau suivi d'un dégraissage à l'acétone, lavée à l'eau distillée et séchée sous air pulsé [37].

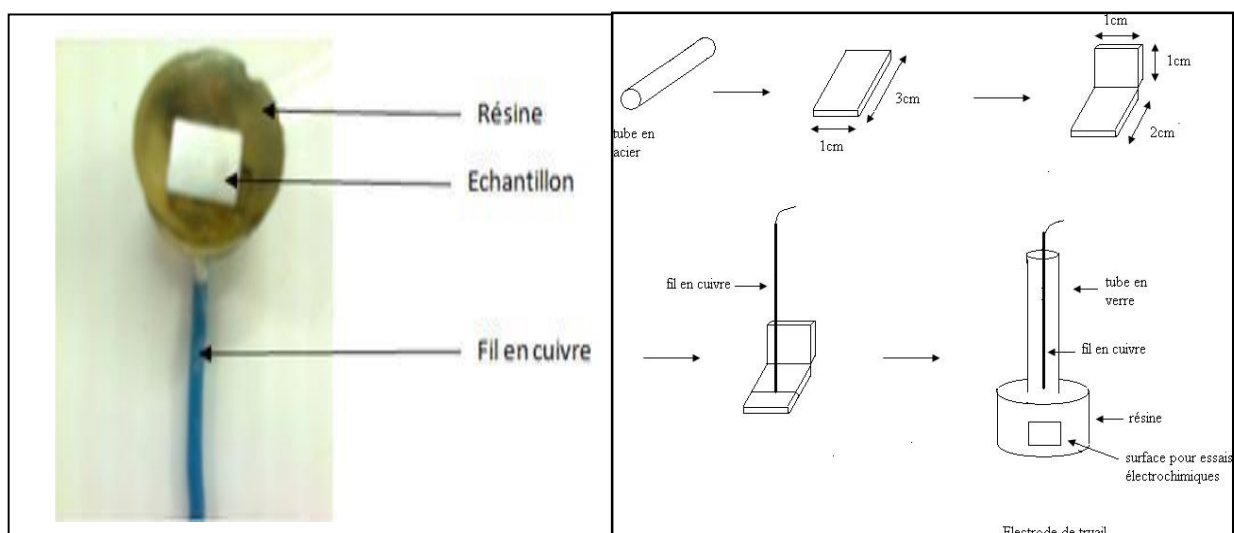


Figure.II.6: Préparation de l'électrode de travail [38]

Propriété mécanique d'acier C1020 :

Tableau. II.1 : propriété mécanique d'acier C-1020 [39].

Résistance à la traction	Force de rendement	Dureté brinell
420MPA	350MPA	121

II.5. Les composition d'électrode

La composition chimique de l'acier C1020 est représenté dans le tableau suivant :

Tableau II. 2 : Composition chimique de l'acier C1020 [39].

Elément	%	+/-	Limite
Ti	0.00	0.054	
V	0.03	0.024	
Cr	0.01	0.021	0.00-0.20
Mn	0.49	0.062	0.30-0.60
Fe	98.13	0.108	98.00-99.80
Ni	0.00	0.046	0.00-0.30

Cu	0.00	0.015	
Nb	0.00	0.006	
Mo	0.00	0.007	0.00-0.05
C			0.17-0.23
P	0.04		
S	0.05		

II.6 Inhibiteur testé

II.6.1 .1Historique de la lavandula stoechas

Le nom Lavandula Stoechas est composé de Lavandula, qui est un genre de la famille des lamiacées (parmi Lequel on trouve la lavande), et Stoechas, faisant référence à « Stoechades », seconde appellation donnée Aux îles d'Hyères situées dans le sud-est de la France, appelées ainsi car il y pousse la « Stoechas ,» Lavande en latin. On dit que les grecs l'auraient appelée ainsi car les îles d'Hyères en étaient tellement Recouvertes que les marins pouvaient s'orienter grâce à leur odeur.

Synonymes : Lavande Papillon, Lavande Stéchade, Lavande à toupet, Lavanda Maritime.

II.6.1.2 Définition

Lavandula Stoechas est une espèce de lavande très florifère (elle porte les plus grosses fleurs du genre) .C'est un arbuste vivace atteignant jusqu'à 1 mètre de hauteur et 60 cm d'étalement.



Figure II.7 : Lavandula stoechas

II.6.1.3. Propriétés médicinales de Lavandula stoechas II.6.1.3.1.Utilisation de Lavandula stoechas

La lavande est une plante polyvalente, et elle est utilisée de multiples façons pour améliorer la santé et la beauté et traiter certaines maladies. Ils comprennent :

Aromathérapie : les parfums dérivés des huiles de lavande aident à calmer, réduire le stress et l'anxiété, et aident à soulager les douleurs légères. Ils peuvent également être utilisés localement pour réduire les crampes menstruelles.

L'aromathérapie à la lavande aide à faire face aux effets secondaires du traitement du cancer, car les récepteurs olfactifs envoient des messages au cerveau qui peuvent influencer l'humeur.

Améliorez votre sommeil et votre repos, en particulier pour les personnes souffrant d'insomnie et de troubles du sommeil, en remplissant l'oreiller de fleurs de lavande.

Traitement de la pelade, qui provoque la perte de cheveux à certains endroits, où les huiles de lavande, de thym, de romarin et de cèdre ont été mélangées et placées dans les zones de perte de cheveux, ce qui entraîne une croissance des cheveux dans les sept mois, comme indiqué dans l'un des les études publiées dans les archives de la dermatologie, sachant qu'il n'y a pas de spécification laquelle des huiles était responsable du traitement de la condition.

Aide à traiter l'eczéma, l'acné, les coups de soleil et les éruptions cutanées.

Certaines études indiquent que la consommation de thé à la lavande peut aider à résoudre certains problèmes digestifs tels que : vomissements, nausées, gaz intestinaux et maux d'estomac.

Utilisez la lavande pour aider à soulager la douleur comme les maux de tête, les entorses et les maux de dents.

Utiliser la lavande pour prévenir la chute des cheveux et se débarrasser des pellicules.

Combattre les infections causées par les champignons, car des études indiquent que l'huile de lavande est efficace dans la lutte contre les champignons en détruisant les membranes cellulaires fongiques.

La cicatrisation des plaies, car l'huile de lavande stimule la croissance et le renouvellement de nouvelles cellules.

Contrôlez les troubles anxieux, car la lavande a un effet anxiolytique.

Réduire la quantité d'analgésiques utilisés après une amygdalectomie ; Il convient de noter que des recherches supplémentaires sont nécessaires pour confirmer l'efficacité de l'huile de lavande dans ce cas.

Soulager les symptômes émotionnels prémenstruels De nombreuses femmes en âge de procréer éprouve une gamme de symptômes prémenstruels, autrement connus sous le nom de syndrome prémenstruel. Des études ont conclu que les parfums de lavande peuvent soulager ces symptômes.

II.6.1.4. Composants de Lavandula stoechas

II.6.1.4.1. La tige

La tige est ramifiée et de couleur grise

II.6.1.4.2. Les feuilles

Ses feuilles sont étroites, lancéolées et aromatiques. Elles mesurent de 1 à 4 cm de longueur et sont de Couleur gris-vert

II.6.1.4.3. Les fleurs

Ses fleurs apparaissent de mai à juillet et se présentent sous forme d'épis mesurant de 2 à 3 cm surmontés De bractées violettes à pourpres de 4 à 8 mm. L'inflorescence est un épi compact et ovale. Les fleurs ,Petites, sont fixées par 2 à l'aisselle des bractées membraneuses, imbriquées comme des écailles sur 4 Rangs. Le calice est composé de 5 sépales verts et pourpres soudés à la base avec des lobes libres Légèrement inégaux. La corolle forme un tube violet clair, puis les lobes étalés des 5 pétales soudés en Tubes sont d'un pourpre très foncé. La floraison a lieu en avril/mai, puis en automne .

On dit que cette espèce a su développer de «fausses fleurs» en forme de papillon, afin d'attirer les insectes Pollinisateurs et assurer ainsi sa pérennité

II.6.1.4.4 Les fruits

Les fruits sont des akènes contenant chacun une graine. Les akènes sont groupés par 4 au fond du calice Séché



Figure II.8 : les fruits de lavandula stoechas

II.6.1.5 Classification de la plante Lavandula stoechas

Tableaux II.3 : Classification de la plante Lavandula stoechas

Classification	
Règne	Plantae
Division	Magnoliophyta
Classe	Magnoliopsida
Ordre	Lamiales
Famille	Lamiaceae
Sous-famille	Nepetoideae
Genre	Lavandula

Espèce	
Lavandula stoechas L ;1753	
Classification phylogénétique	
Ordre	Lamiales
Famille	Lamiaceae

II.6.1.6 Description de lavandula stoechas

Lavandula stoechas est un arbrisseau aromatique très ramifié au feuillage feutré blanc-gris dense, jusqu'à 1 m de haut. La floraison a lieu d'avril à juin. Ses fleurs sont en pseudo épis denses de coupe carrée.



Figure II. 9 : lavandula stoechas

II.6.2 Inhibiteur cytissus villosus

II.6.2.1 Historique de la cytissus villosus

L'espèce est décrite en 1788 par le botaniste français Pierre André Pourret, qui la classe dans le genre Cytissus sous le nom correct Cytissus Villosus. Le néotype de l'espèce n'est désigné qu'en 2020. Cytissus villosus a pour synonymes : Cytissus affinis C .

II.6.2.2 Définition de cytissus villosus

La cytissus villosus est un arbrisseau de 1 à 2 mètres de hauteur, dressé, velu, noircissant par la dessiccation . Ses rameaux sont étalés, allongés, les jeunes pentagonaux, munis de longs poils blancs, et les feuilles sont pétiolées, à folioles larges, obovales , velues , la médiane plus grande que les latérales.



Figure II.10 : *Cytisus villosus*

II.6.2.3 Propriétés médicinales

Il est utilisé en application cutanée sur les piqûres de serpents venimeux et de scorpions

- Utilisé dans le traitement des brûlures ;
- Utilisé pour le nettoyage.

II.6.2.4 La composition de *Cytisus villosus*

II.6.2.4.1. Le cadre

La partie aérienne de la tige est boisée ; la couleur de l'écorce est vert-olivace, tandis que les jeunes branches sont blanches soyeuses et ont une section pentagonale (ou sont plus ou moins cylindrique) avec des angles obtus. **II.6.2.4.2 Les feuilles**

Les feuilles, pétiolées, sont formées par trois segments, bords entiers strictement, elliptiques, aiguës et juste picciolati; le central est plus grand côté. La surface est couverte de cheveux clairsemés, la couleur est vert foncé dans la adaxiale et blanc soyeux dans cet abaxiale. Sur la surface des nerfs sont présents qui ne parviennent pas au bord de la feuille. Longueur du pétiole : 5-8 cm. La taille des segments latéraux : largeur 5-6 mm ; longueur de 10 - 13 mm. La taille du segment central : largeur 10 mm ; longueur 24 m.



Figure II.11 : la feuille de *Cytisus villosus*

II.6.2.4.3 Les fleurs

Les fleurs sont de couleur jaune et sont hermaphrodite, pentamères, zygomorphes, étéroclamidati (calice et corolle bien différencié) et diplostemoni (les étamines sont deux fois pétales). Taille d'une seule fleur : 15 mm.



Figure II.12 : la fleur de *Cytisus villosus*

II.6.2.4.4 Les fruits

Le fruit est une légumineuse poilue, aplati, blanc-Argentine, le type deiscente. Dimensions de la légumineuse : largeur 4-6 mm ; longueur de 20 - 40 mm.

II.6.2.5 Classification de la plante *Cytisus villosus*

Tableaux II .4: Classification de la plante *Cytisus villosus*

Classification	
Famille	Fabaceae
Sous-famille	Faboideae
Tribu	Genisteae
Genre	<i>Cytisus</i>

Section	Cytisus
Espèce	
Cytisus villosus	
Pourr,1788	

II.6.2.6 Description de la cytisis villosus

Ces plantes sont élevées de 5 à 20 dm dm. La forme biologique est du type fanerofita touffue (P caesp), À savoir qu'ils sont des plantes vivaces, ligneuse à la base avec touffue aussi robuste, avec des bourgeons d'hivernage placés à une hauteur au-dessus du sol entre 12 et 20 cm (50 cm au maximum) ; dans les parties de herbacés de la saison froide, ils ont été séchés et restent en vie que les parties boisées et souterraines. Cette plante noircit avec dessiccation.



Figure II .13: la cytisis villosus

II.7 Méthode électrochimique

II.7.1 Dispositif

La technique de perte de poids, ne permet pas l'approche des mécanismes mis en jeu lors de la corrosion. Cependant, les techniques électrochimiques constituent une méthode plus complète puisqu'elles étudient la base même du phénomène de corrosion. L'aspect quantitatif de ces techniques (courbes de polarisation à vitesse de balayage modérée, spectroscopie d'impédance électrochimique) permet d'accéder à des vitesses de réaction et des valeurs de

paramètres physiques décrivant l'état du système (capacité de double couche, résistance de transfert de charges, capacité du film,..) [44].

Ces méthodes ont certains avantages et inconvénients, on cite :

- *Permettent d'estimer assez rapidement les vitesses de corrosion ;
- *Elles sont suffisamment sensibles pour déterminer à la fois les fortes et faibles vitesses de corrosion ;
- *Sa mise en œuvre est relativement aisée dans le cadre d'un laboratoire.

L'étude électrochimique a été réalisée à l'aide d'une chaîne électrochimique qui comprend

- Un potentiostat/galvanostat PGZ301.
- Une unité de traitement informatique comprenant un micro-ordinateur PC doté d'un logiciel « Volta Master 4 » permettant de calculer les paramètres électrochimiques, et d'une imprimante.
- Une cellule d'électrolyse en verre pyrex à trois électrodes thermo statées et à double paroi, de contenance 200 ml de forme cylindrique.
- Une électrode de travail (ET) (acier), sous forme rectangulaire 1cm².
- Une contre électrode en Platine (CE), assure le passage du courant.
- Une électrode de référence au calomel saturée (ECS).

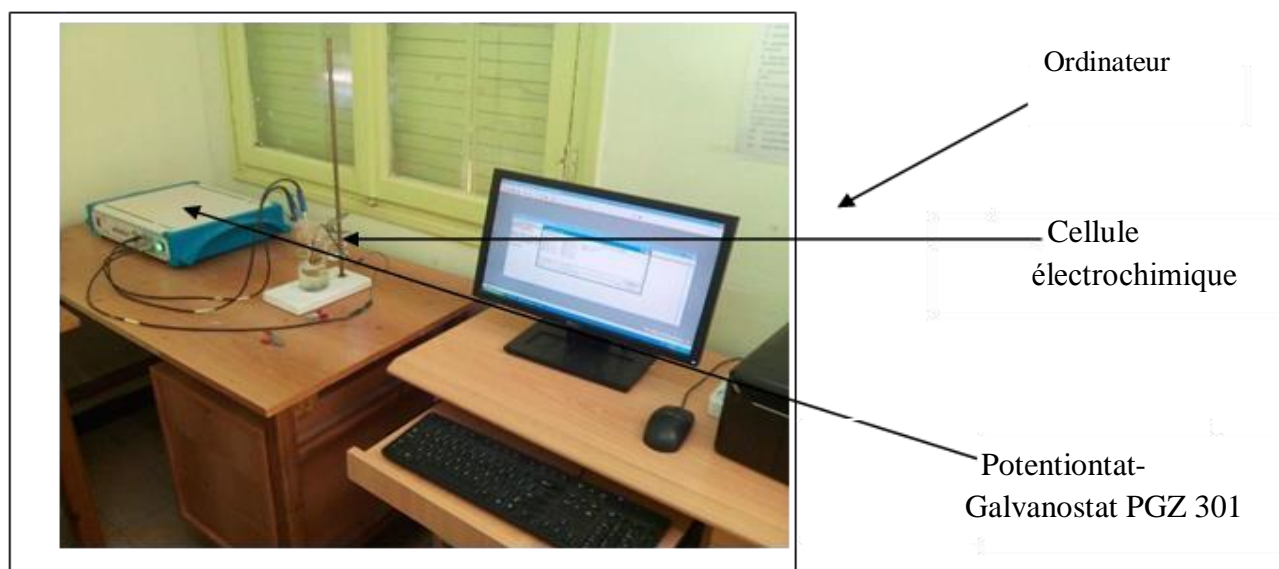


Figure II.14 : Potentiostat piloté par ordinateur

II.7.2 Protocole des mesures électrochimiques

II.7.2.1. Les courbes de polarisation

La courbe de polarisation de l'interface métal-solution est une caractéristique fondamentale de la cinétique électrochimique, mais ne rend compte que de l'étape la plus lente du processus global à l'interface électrochimique.

Pour déterminer une courbe de polarisation potentiostatique, on applique à l'aide d'un potentiostat, différents potentiels entre l'électrode de travail et une électrode de référence. On mesure le courant stationnaire qui s'établit après un certain temps dans le circuit électrique entre cette électrode de travail et une contre-électrode.

Cette méthode permet de déterminer d'une façon précise les paramètres électrochimiques d'un métal au contact de l'électrolyte à savoir : la vitesse instantanée de corrosion (I_{corr}), le potentiel de corrosion (E_{corr}), les pentes de Tafel, les résistances de polarisations (R_p), les courants limites de diffusion. Elle donne des mesures rapides et sa mise en oeuvre est relativement simple.

La détermination de la vitesse de corrosion à partir des courbes de polarisation est étroitement liée à la cinétique régissant le processus électrochimique.

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

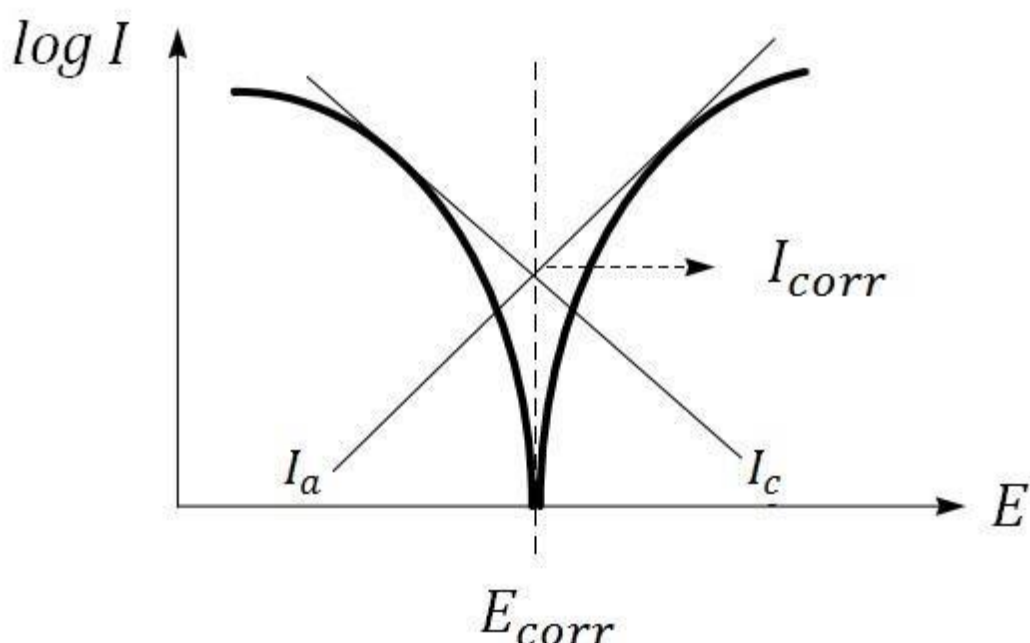


Figure II.15 : Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel .[45]

II.7.2. 2. Spectroscopie d'impédance électrochimique

Les mesures d'impédance électrochimique sont largement utilisées dans la recherche d'une meilleure connaissance des processus de corrosion et d'une évaluation plus sûre de la vitesse de corrosion. L'un des objectifs des courbes courant-potential qui consiste à recueillir des informations mécanistiques à des fins de modélisation du processus interracial n'est que très partiellement atteint quand il s'agit de mesurer dans l'état stationnaire. En effet, elle ne rend compte que de la vitesse globale du processus ou de l'étape la plus lente qui limite celle-ci. Parmi les techniques électrochimiques transitoires, l'impédance électrochimique qui permet d'avoir des informations sur les étapes élémentaires qui constituent le processus électrochimique global. Elle va pouvoir différencier les divers phénomènes élémentaires sur la base de leur constante du temps :

- Les phénomènes électrochimiques rapides sont sollicités dans le domaine des haute Fréquences (transfert de charges).

- Les phénomènes lents apparaissent dans le domaine des basses fréquences (transfert de masse, réaction de diffusion et d'adsorption). Son principe consiste à superposer au potentiel de l'électrode une modulation de potentiel sinusoïdale de faible amplitude et à suivre la réponse en courant pour différentes fréquences du signal perturbateur.

L'impédance d'interface métal-électrolyte a pour expression générale :

$$Z(\omega) = R_e + \frac{Z_f(\omega)}{1 + j\omega C_{dl} Z_f(\omega)} \quad (\text{II.1})$$

R_e : Résistance de l'électrolyte ;

Z_f : Impédance faradique provenant du processus électrochimique de transfert d'électrons à travers l'interface ;

C_{dl} : Capacité de double couche.

Les résultats des mesures d'impédance sont en général représentés sur un diagramme dit de Nyquist [46].

II.7.2.2.1 Diagrammes de Nyquist

Ce diagramme représente la partie imaginaire de l'impédance en fonction de la partie réelle. Il permet de déduire directement la résistance de la solution R_e (lecture de la partie réelle de Z : limite haute fréquence) d'une part et la résistance de transfert de charge R_t (limite basse fréquence de la partie réelle de l'impédance) d'autre part. La capacité C_{dl} est calculée en considérant la fréquence du sommet de la boucle [47].

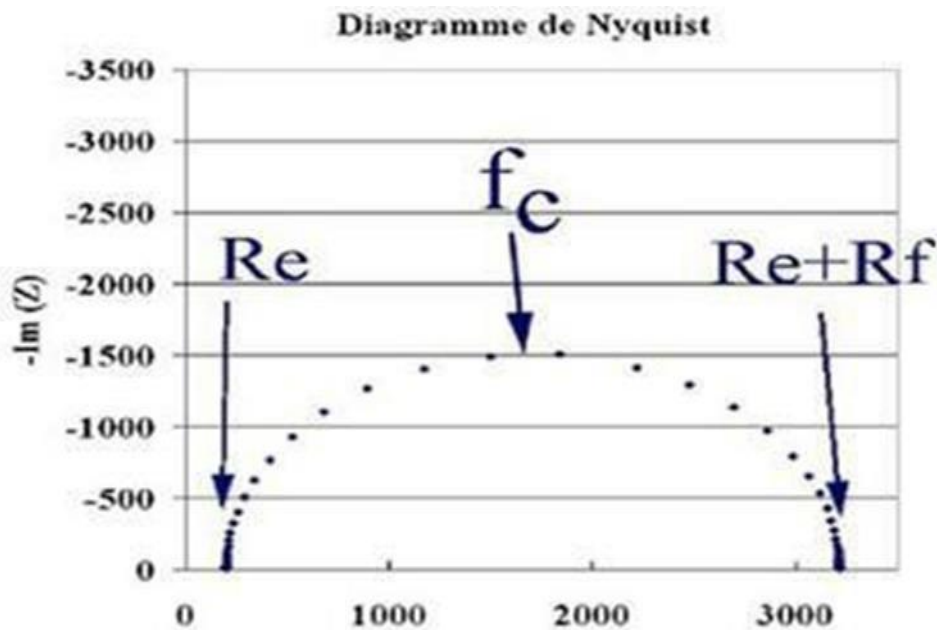


Figure II.16 : Diagramme d'impédance dans le plan de Nyquist

II.7.Conclusion

L'étude des inhibiteurs de corrosion peut s'effectuer par de nombreuses façons. Dans notre travail, on a utilisé les méthodes électrochimiques (courbes de polarisation et de spectroscopie d'impédance électrochimique).

Chapitre III
discussion

Résultats et

III.1 Introduction

Les inhibiteurs de corrosion sont des substances qui, lorsqu'elles sont ajoutées à de faibles concentrations dans des milieux corrosifs, diminuent ou empêchent la réaction du métal avec son environnement. La plupart des composés synthétiques présentent une bonne action anticorrosion, mais la plupart d'entre eux sont hautement toxiques pour les êtres humains et l'environnement. Ces inhibiteurs peuvent causer des dommages temporaires ou permanents au système d'organes tels que les reins ou le foie, ou de perturber le système enzymatique dans le corps. Par conséquent, en raison des préoccupations environnementales le développement de technologies vertes est durable et hautement souhaitable à cause de la prise de conscience écologique croissante et de réglementations environnementales strictes.

Nous sommes intéressés dans notre étude à l'inhibition de la corrosion de l'acier (C1020) par les inhibiteurs naturels de deux plantes médicinales *Cytisus Villosus* (A) et *Lavandula Stoechas* (B), qui présentent des propriétés intrinsèques très importantes.

III.2 les résultats de l'inhibition de la corrosion de l'acier (C1020)

Le pouvoir inhibiteur de la corrosion de l'acier au carbone (C1020) en milieu acide de 1M de HCl sans et avec addition de l'inhibiteur sera évalué en utilisant différentes techniques, l'extrapolation des droites de Tafel à partir du tracé des courbes intensités – potentiel et des diagrammes d'impédance de type Nyquist. Puis, nous avons calculé certaines valeurs thermodynamiques du processus d'adsorption (ΔG_{ads}) à partir des isothermes d'adsorption.

III.3. Etude électrochimiques

Les essais électrochimiques apportent d'intéressantes indications pour un mécanisme d'action de l'inhibiteur et, dans la mesure où elles sont correctement interprétées, sur la vitesse de 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 peuvent être classées en deux groupes : les méthodes stationnaires et les méthodes non stationnaires dites transitoires.

III.3.1 Méthode de Courbes de polarisation

Les courbes de polarisation potentiodynamique ont été tracées pour l'acier au carbone C1020 dans une solution de HCl à 1M en l'absence et en présence des différentes concentrations de l'extrait de *Cytisus Villosus* (A) et *Lavandula stoechas* (B). La figure. IV.2 présente les courbes

de polarisation de l'acier C1020 dans une solution de HCl de concentration 1 M en l'absence et en présence des différentes concentrations des deux extraits.

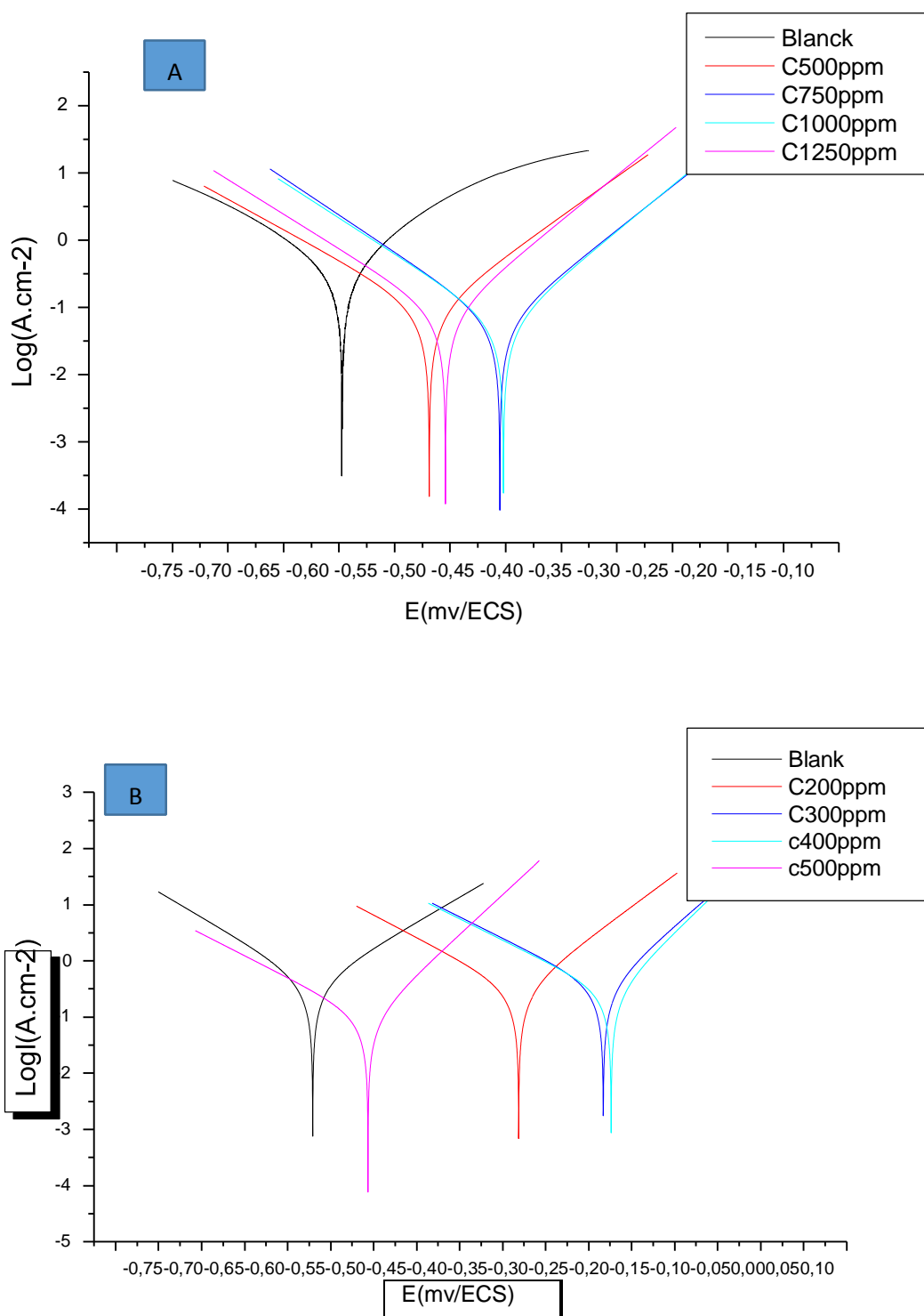


Figure III.1 : Courbes de polarisation de l'acier au carbone C1020 dans HCl (1M) sans et avec addition d'inhibiteur à différentes concentrations de l'extrait (A et B).

Afin d'obtenir des informations sur la cinétique de la corrosion, certains paramètres électrochimiques, potentiel de corrosion (E_{corr}), pentes cathodiques (B_c) et anodiques (B_a), densité de courant de corrosion (i_{corr}), efficacité d'inhibition ($E\%$) ont été obtenus à partir de l'extrapolation Tafel de la courbe de polarisation. Ces paramètres sont résumés dans le tableau.III.1.1

L'efficacité d'inhibition a été calculée à partir de i_{corr} en utilisant l'équation suivante : $E\% = ((I_0 - I_{inb}) / I_0) * 100$ **(III.1)**

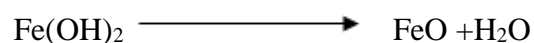
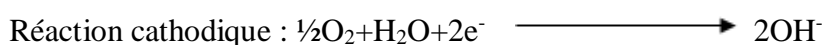
Où I_0 et I_{inb} représentent respectivement les courants de corrosion en présence d'inhibiteur.

Tableau III.1 Paramètres électrochimiques et l'efficacité d'inhibition de l'acier C1020 dans HCL à diverses concentrations des deux extraits Cytisus Villosus et Lavadula Stoechas.

Extraits	C (ppm)	E (i=0) mv	Icorr (mA/cm ²)	Ba	Bc	E%	Θ
HCl (1M)	Blanc	-547.403	501.054	110.8	126.8	/	/
Extrait A Cytisus Villosus	500	-468,785	90,038	85,1	109,5	82.03%	0.8203
	750	-405,221	59,973	76,7	90,6	88.14%	0.8814
	1000	-402,177	55,110	73,5	93,3	89%	0.8900
	1250	-454,472	77,216	74,5	97,3	84.89%	0.8458
Extrait B Lavandula Stoechas	200	-281.447	296.410	88.1	125.6	40.84%	0.408
	300	-281.447	267.405	68.2	133.8	46.63%	0.466
	400	-456.604	91.826	70.6	127.2	81.67%	0.816
	500	-183.259	330.622	75.9	132.2	34.01%	0.340

Discussion et interprétation

- D'après la figure III.1, nous remarquons que la nature des courbes de polarisation reste presque la même en l'absence et en présence des deux inhibiteurs. La densité de courant diminue en présence d'inhibiteurs lorsque la concentration d'inhibiteur augmente. Ce résultat est indicatif de l'adsorption des molécules d'inhibiteurs sur la surface de l'acier C1020. Le léger changement des pentes de Tafel cathodique et anodique indique que l'effet d'inhibition de ces composés s'est produit par simple blocage de leurs sites actifs sur la surface métallique.
- L'étude du produit testé par la méthode électrochimique montre que les densités de courant de corrosion i_{corr} diminuent au fur et à mesure que la concentration de l'extrait (A) de *Cytisus Villosus* et de l'extrait (B) de *Lavandula Stoechas* augmente. Par conséquent de cette diminution de (i_{corr}), l'efficacité inhibitrice $E(\%)$ augmente avec l'accroissement de la concentration en inhibiteur pour atteindre un maximum de 89 % pour la concentration 1000 ppm de l'extrait (A) et 81.67% pour la concentration 400 ppm de l'extrait (B). Cet accroissement suggère que les molécules inhibitrices forment une couche adsorbée sur la surface de l'acier, bloquant le processus de corrosion, son effet est progressivement élevé avec l'addition de l'inhibiteur.
- En absence d'inhibiteur, les réactions anodique et cathodique de l'acier C1020 dans la solution sont caractérisées par oxydation de l'acier C1020 et par réduction de l'oxygène dissous :



L'oxygène dissous diffuse vers la surface où il génère des ions hydroxyde qui sont utilisés pour former l'hydroxyde de fer, qui sous l'effet de l'oxydation se transforme en oxyde de fer.

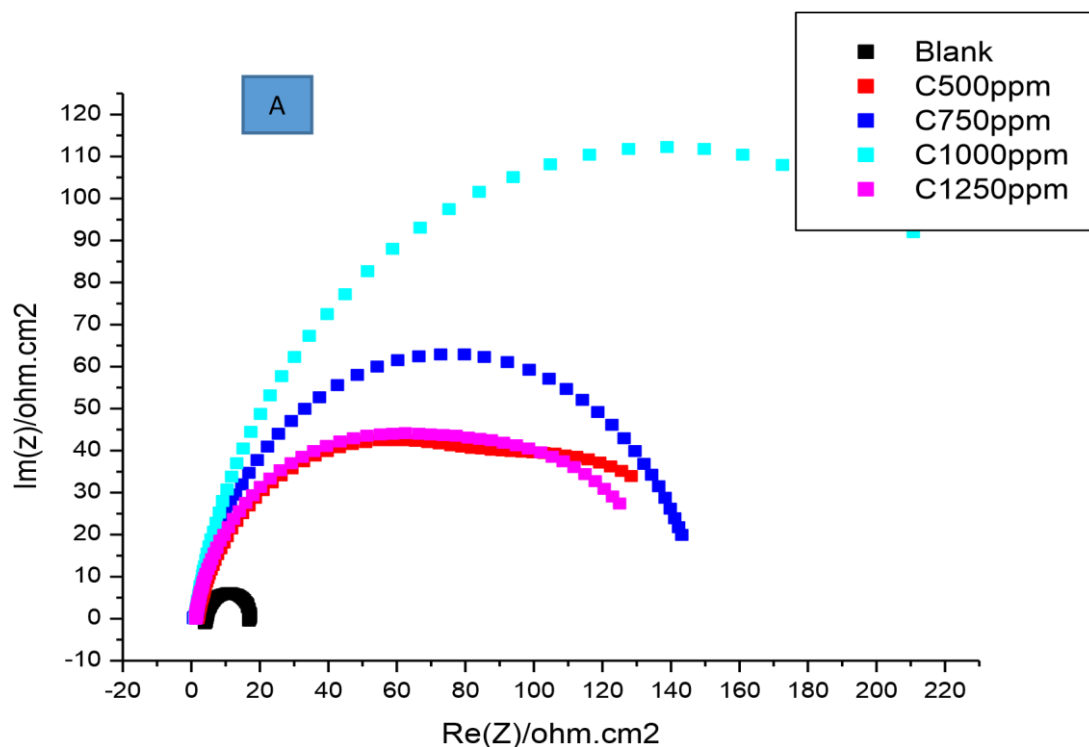
- L'ajout des extraits au milieu corrosif entraîne une modification des valeurs des pentes de Tafel, indiquant que les deux réactions anodique et cathodique sont affectées. En

présence de l'extrait, le potentiel de corrosion se déplace vers d'autres valeurs. D'après la littérature, si le potentiel de corrosion en présence de l'inhibiteur se déplace d'une valeur supérieure à 85 mV par rapport au blanc, l'inhibiteur peut être considéré comme inhibiteur anodique ou cathodique et si la variation du potentiel est inférieure à 85 mV, l'inhibiteur peut être considéré comme inhibiteur de type mixte (anodique et cathodique).

- . Dans notre cas, la variation du potentiel est supérieure à 85 mV. Ce résultat nous amène à dire que les deux extraits A et B sont des inhibiteurs anodique ou cathodique.

III.3.2 La Spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE)

Des mesures SIE ont été effectuées pour étudier l'effet inhibiteur de *Lavandula stoechas* et *Cytisus viollosus* ainsi que la cinétique du processus de réaction à la corrosion. La figure.III.2 représente les courbes d'impédance de l'acier C1020 dans un milieu de HCl de 1M en l'absence et en présence de différentes concentrations de l'extrait (A et B).



B

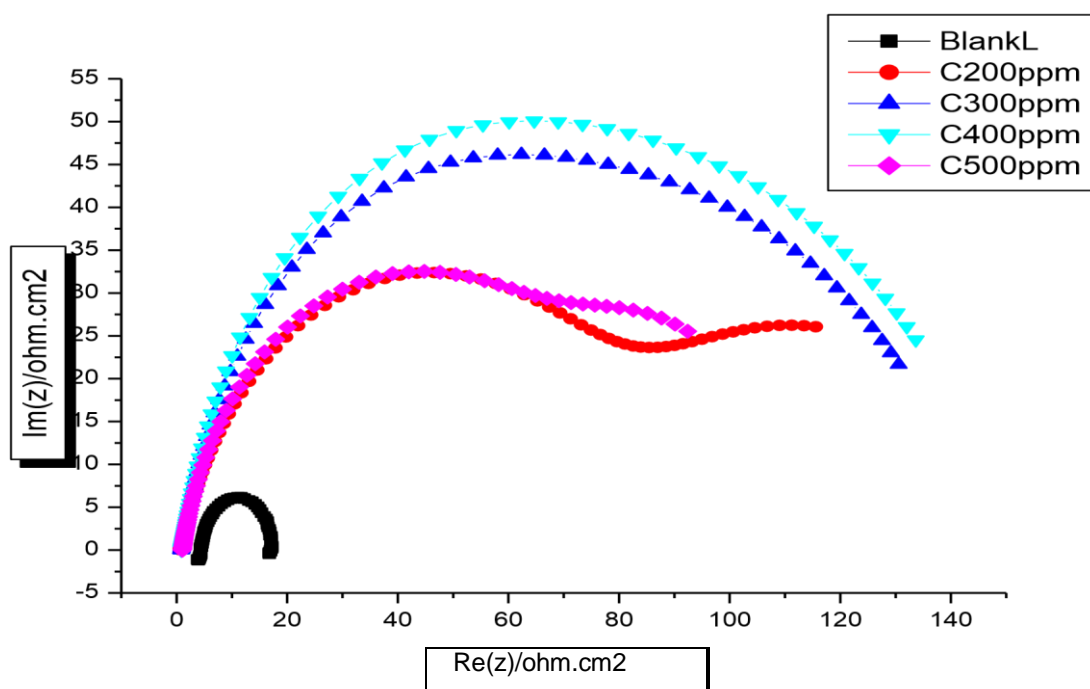


Figure III.2 : Diagrammes d'impédance enregistrés sur l'électrode d'acier dans la solution HCl (1M) sans et avec addition de l'extrait (A et B)

Discussion et interprétation

D'après la figure (III.2) on remarque clairement qu'avec ou sans inhibiteur, les diagrammes d'impédance montre la même tendance, une boucle capacitive, dont le diamètre augmente avec l'augmentation de la concentration. Alors que lorsqu'on a ajouté l'inhibiteur à la solution avec différentes concentrations et des proportions croissantes (500,750 ,1000 et 1250 ppm pour A) et (200, 300, 400, 500 pour B) nous avons remarqué que la résistance de l'inhibiteur croissante et atteint son maximum à des concentrations de 1000 ppm et 400 ppm respectivement. Afin de déterminer les paramètres d'impédance, tous les diagrammes d'impédance ont été ajustés par un modèle à deux constantes de temps : $R_1 + Q_2/R_2 + Q_3/R_3$

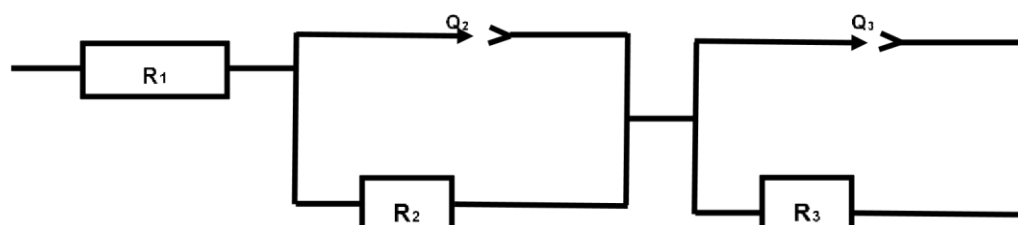


Figure. III.9 : le circuit équivalent simule les données d'impédance pour l'acier C-1020 sans et avec les inhibiteurs

R1 : Résistance d'électrolyte (élément à phase constante)

R2 : représente la résistance du film formé sur la surface de l'acier (double couche)

R3 : Résistance de transfert de charge

Q1 : la capacité de double couche

Q2 : la capacité de double couche(R_{CT})

L'impédance (Z) de CPE est donnée avec l'expression :

$$Z(f) = R1 + R2/R3Q3(j2\pi f)^{a_3} + 1 + R3/R3Q3(j2\pi f)^{a_3} + 1$$

L'efficacité inhibitrice obtenue par spectroscopie d'impédance électrochimique est regroupée dans le tableau III.2 et le tableau III.3

Tableau III.2 : Paramètres d'impédance et efficacité inhibitrice de la corrosion de l'acier

C 1020 dans HCl (1M) sans et avec addition de l'inhibiteur (A) aux différentes concentrations

C (ppm)	R1 (Ohm)	Q2 (F/cm2)	a 2	R2 (Ohm)	Q3 (F/cm2)	a 3	R3 (Ohm)	E%	θ
Blank	2,863	1,99e-6	6,691e-3	1,594	0,192 1e-3	0,955	12,79	/	/
500 ppm	1,838	8,173e-3	0,85	73,45	73,45	0,871 9	82,39	84,44%	0,8444
750ppm	0,771 4	44,27e-6	1	0,622	1,494e-3	0,897 7	148	91,35%	0,9135
1000ppm	1,19	0,010 13	0,945 9	100,5	3,399e-3	0,881 6	169,4	92,44%	0,9244
1250ppm	1,286	0,011 7	0,903 5	61,69	1,663e-3	0,889 5	76,99	83,38%	0,8338

Tableau III.3 : Paramètres d'impédance et efficacités inhibitrices de la corrosion de l'acier dans HCL 1M sans et avec addition de l'inhibiteur(B) à différentes concentrations

C (ppm)	R1 (Ohm)	Q2 (F/cm2)	a 2	R2 (Ohm)	Q3 (F/cm2)	a 3	R3 (Ohm)	E%	θ
------------	-------------	---------------	-----	-------------	---------------	-----	-------------	----	----------

Blank	2,863	1,99e-6	5,691e-3	1,594	0,192 1e-3	0,955	12,79	/	/
200ppm	0.6174	0.01913	0.7143	75.15	0.6115e-3	0.8082	79.05	83.82%	0.838
300ppm	0.8481	1.447e-3	0.966	47.4	4.188e-3	0.739	97.22	86.84%	0.868
400ppm	0.8724	1.788e-3		46.24	4.243e-3	0.7553	103	87.58%	0.875
500ppm	1.019	0.0384		36.18	2.286e-3	0.8497	73.59	82.61%	0.826

L'efficacité inhibitrice de la corrosion de C1020 est calculée à partir des valeurs de la résistance de transfert

$$E (\%) = \frac{R_{ct} - R_{ct}^0}{R_{ct}} * 100 \quad \text{Où}$$

:

R_{ct}^0 et R_{ct} sont la résistance au transfert de charge en l'absence et en présence de l'inhibiteur respectivement.

Discussion

Dans le tableau III.2 et le tableau III.3 nous avons observé une augmentation dans le R_{ct} et $E\%$ avec l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur, suggérant que le film d'inhibiteur forme une barrière à l'interface de l'acier au C1020. Le diamètre du demi-cercle aux hautes fréquences représente la résistance des réactions électrochimiques sur l'électrode. Il augmente de manière significative pour l'augmentation de concentrations des échantillons, ce qui fournit une plus grande résistance au transfert de charge en raison de la présence de film d'inhibiteur. Ces résultats indiquent que *Cytisus villosus* et *Lavandula Stoechas* recouvre la surface de l'acier C1020 pour une concentration de 1000 ppm pour l'extrait A et 400 ppm pour l'extrait pour B a fourni la meilleure résistance à la corrosion avec 169.4 Ohm et 103 Ohm.

L'efficacité inhibitrice augmente avec l'augmentation de la concentration en inhibiteur et atteint une valeur maximale de 92.44% dans le cas de (l'extrait A) et 87.58% pour (l'extrait B) cette évolution est due à l'effet de la nature des substituant dans chaque inhibiteur, donc l'efficacité de l'extrait (A) est meilleur par rapport à l'efficacité de l'extrait B.

III.3.3 Isotherme d'adsorption

L'inhibition de la corrosion des métaux par les composés organiques 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 composés sur la surface. Pour identifier le type d'adsorption correspondant à la présente d'étude, l'isotherme de Langmuir a été utilisée.

Isotherme de Langmuir

Le modèle de Langmuir suppose qu'il existe à la surface un nombre fixe de sites. Chacun de ces sites peut adsorber qu'une seule particule. De plus, comme on néglige les interactions entre particules adsorbées, l'énergie d'adsorption est constante, la vitesse d'adsorption proportionnelle à la concentration en inhibiteur C_{inh} et à la fraction de sites d'adsorption non occupée $(1-\theta)$ sachant que θ représente la fraction de sites occupés par l'inhibiteur $(0-\theta-1)$.

L'équation de Langmuir est donnée :

$$\frac{C_{inh}}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C_{inh}$$

Ou :

(θ) est le taux de recouvrement fractionnaire ; C_{inh} la concentration d'inhibiteur ; K est constante d'équilibre du processus d'adsorption-désorption.

Les figures III.4 et III.5 représentent l'isotherme d'adsorption tracée à 25°C à partir des valeurs de θ obtenues de la courbe de polarisation sur la surface de l'acier en milieu chlorhydrique HCl 1M.

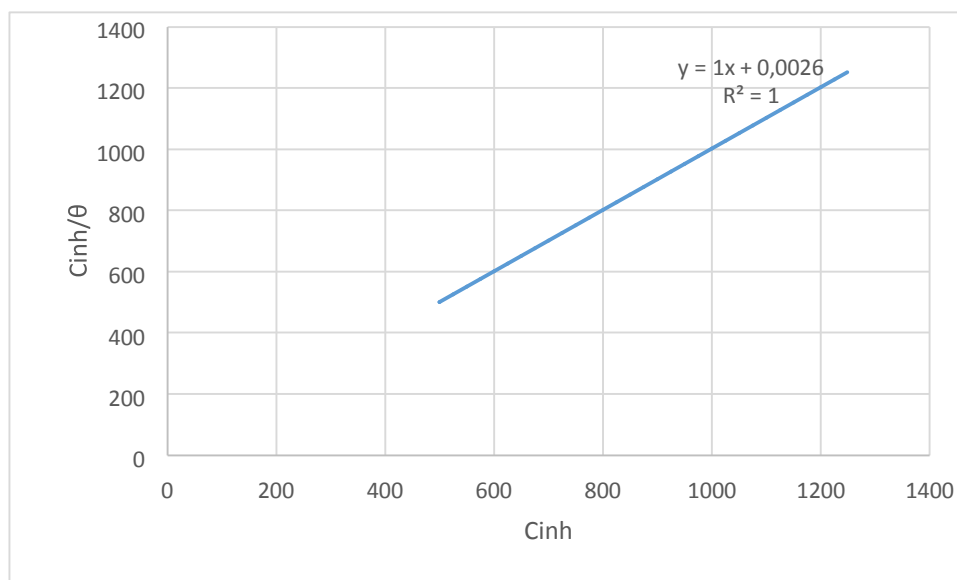


Figure III.4 : Isotherme d'adsorption de Langmuir de l'acier C1020 dans HCl 1M en présence d'inhibiteur (plante A).

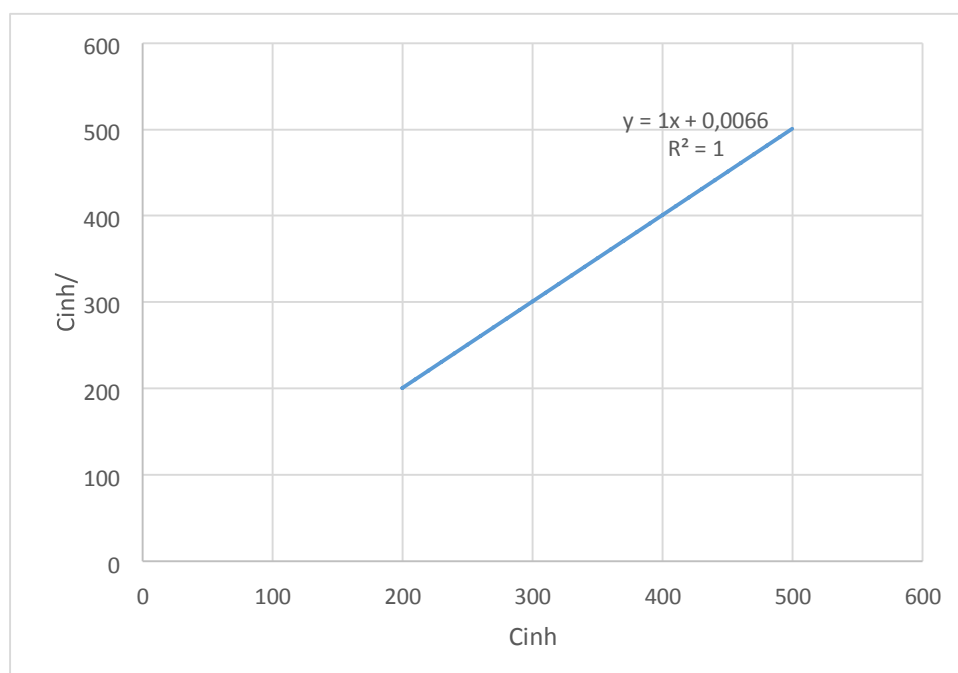


Figure III.5 : Isotherme d'adsorption de Langmuir de l'acier C-1020 dans HCl 1M en présence d'inhibiteur (plante B).

Discussion

La courbe C/θ en fonction de la concentration de des extraits A et B est linéaire avec un coefficient de corrélation (R^2) jusqu'à 1 pour la plante (A) et 1 pour la plante (B). La pente de la courbe est très proche dans l'unité. Ces résultats suggèrent que les données expérimentales sont bien décrites et meilleure par l'isotherme de Langmuir. Cet isotherme implique l'hypothèse, que tous les sites d'adsorption sont équivalent et que les liaisons des particules se produisent indépendamment des sites proches qu'ils sont occupés ou non. Par conséquent, les molécules inhibitrices sont adsorbées à la surface métallique pour former un film qui isole la surface de l'acier.

L'énergie libre d'adsorption standard ΔG_{ads} (**kJ / mol**) est évaluée à partir de l'équation suivante :

$$K_{ads} = \left(\frac{1}{55,55} \right) \exp \left(\frac{(-\Delta G_{ads})}{RT} \right)$$

Où : R est la constante de gaz parfait (8.314 J. mol⁻¹. K⁻¹), T est la température absolue (25°C) 298,15K et la valeur 55.5 est la concentration d'eau en solution exprimée en M.

- La valeur de ΔG_{ads} est égale à -24.697 (kJ / mol) pour Cytisus Villosus
- La valeur de ΔG_{ads} est égale à -22.389 (kJ / mol) pour Lavandula Stoechas

Les valeurs négatives de ΔG_{ads} pour les systèmes étudiés impliquent que l'adsorption des inhibiteurs sur la surface de l'acier au carbone était spontanée, et le film adsorbé sur la surface métallique est stable. Dans ce cas, nous avons remarqués que les valeurs de ΔG_{ads} d'adsorption sont autour de -20 kJ/ mol, ceci correspond aux interactions électrostatiques entre les molécules chargées ainsi les charges du métal (physisorption). L'ajustement de coefficient de corrélation par une droite nous donne une pente de 1 ce qui suggère que chaque molécule de l'extrait occupe environ 100% des sites d'adsorption sur la surface du métal.

III.3.4 Conclusion

L'étude de l'effet d'inhibition de Lavandula stoechas et Cytisus viollosus sur la corrosion de l'acier 1020 dans une solution de HCl montre que :

- L'inhibiteur de la plante Cytisus viollosus est un excellent inhibiteur de la corrosion de l'acier C1020 en milieu de HCl à 1M, même à des faibles concentrations.
- Les courbes de polarisation pour l'électrode de l'acier C1020 montrent la nature cathodique ou anodique pour les deux extraits.
- Les meilleures efficacités d'inhibition pour l'extraie de Cytisus viollosus est 92,44% pour la concentration 1000 ppm par contre l'efficacité d'inhibition pour l'extraie de Lavandula stoechas est 87,58% pour la concentration 400 ppm
- Le processus d'adsorption est spontané et suit l'isotherme Langmuir d'adsorption. Les valeurs de ΔG_{ads} ont indiqué que les inhiniteurs sont physisorbés sur la surface métallique.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La corrosion entraîne de problèmes fondamentaux pour les industries qui souffrent à ce phénomène qui génère chaque année des nombreux dégâts pour les installations, les travailleurs et l'environnement. L'objet de notre travail est porté sur l'utilisation de deux extraits naturels des plantes médicinales ; Cytisus Villosus et Lavandula Stoechas afin d'offrir des propriétés inhibitrices de corrosion vis-à-vis de l'acier au carbone C1020 en milieu acide HCl 1M.

L'étude de l'effet d'inhibition de deux plante sur la corrosion de l'acier au carbone C1020 dans une solution de HCl 1M montre que :

- L'inhibiteur de Cytisus Villosus et Lavandula Stoechas sont des meilleurs inhibiteurs de la corrosion de l'acier au carbone C-1020 en milieu de HCl 1M, même à faibles concentrations.
- Les courbes de polarisation pour l'électrode de l'acier au carbone montrent la nature cathodique ou anodique de deux inhibiteurs de l'extrait de plante ; Cytisus Villosus et Lavandula stoechas.
- La meilleure efficacité d'inhibition obtenue à partir de courbe de polarisation est obtenue pour de Cytisus Villosus est 89% dans 1000ppm et pour Lavandula Stoechas est 81.67% dans 400 ppm, ce qui est en bon accord avec les données obtenues d'EIS (92.44%) et (87.58%) est respectivement pour les deux plante.
- L'adsorption d'inhibiteur de Cytisus Villosus et Lavandula Stoechas sur la surface de l'acier au carbone C-1020 suit l'isotherme de Langmuir.
- Le processus d'adsorption est spontané. Les valeurs de ΔG_{ads} ont indiqué que Cytisus Villosus et Lavandula Stoechas est physisorbés sur la surface métallique.
- Donc, l'inhibition verte est une méthode très efficace, plus économiques et plus respectueuses de l'environnement ;
- Finalement, ce travail a permis de mettre en valeur les propriétés inhibitrices des extraits de plantes médicinales afin de protéger et empêcher la destruction ou la dégradation de la surface métallique des équipement industriels et limiter les risques et les accidents engendrée par ce phénomène dangereux.

Référence Bibliographiques

- [1] H. Faiz, « Etude du mécanisme de corrosion atmosphérique à long terme des aciers : nouvelles stratégies de protection des aciers du patrimoine culturel », Thèse de Doctorat, Université de Nancy 1, 2012.
- [2] M. Faustin, « Etude de l'effet des alcaloïdes sur la corrosion de l'acier C38 en milieu acide chlorhydrique 1M : Application à *Aspidosperma album* et *Geissospermum laeve* (Apocynacées) », Thèse de Doctorat, Université des Antilles et de la Guyane, 2013.
- [3] Marmi Hayat, Amélioration de la résistance à la corrosion électrochimique des aciers par utilisation des inhibiteurs, thèse de doctorat, Univ, Biskra, (2017).
- [4] Naili Douaouda Malha, Etude des performances de l'Extrait de la Sabline Rouge « *Spergularia Rubra* » comme inhibiteur vert de corrosion de l'acier ordinaire en environnements sévères, Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Génie chimique Université de Blida 1, 2020 P1
- [05] Dr. H. Bensabra. Cours de corrosion et protection des métaux. Université de Jijel 2016.
- [06] G.Daoufin, J.Talbot. HAL « Etude de quelques problèmes de corrosion dans l'industrie laitière. 1ère partie Généralités sur la corrosion des métaux et alliages. Le lait, INRA édition. 1971. pp 375-398
- [7] A. Maillet, « Interactions argilite de Tournemire / fer métal en contexte in situ : résultats à 10 ans de contact », Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2012.
- [8] D. Landolt, « Corrosion et chimie de surfaces des métaux, Traité des Matériaux 12 », Edition Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1993.
- [9] K. E. Heusler, D. Landolt, S. Trasatti, « Electrochemical corrosion nomenclature », *Pure and Applied Chemistry* 61 (1989) 19-22.
- [10] D.E. Talbot, J.D. Talbot, *Corrosion science and technology*, CRC press(2018).

- [11] G. Daufin, J. Talbot, Etude de quelques problèmes de corrosion dans l'industrie laitière. Première partie. Généralités sur la corrosion des métaux et alliages, *Le Lait* 51(507) (1971) 375-398.
- [12] R. Marchal, Rôle des bactéries sulfurogènes dans la corrosion du fer, *Oil & Gas Science and Technology* 54(5) (1999) 649-659.
- [13] S. Bensaada, M.T. Bouziane, F. Mohammedi, B. Zergui, A. Bouras, Effet des inhibiteurs de corrosion $ZnCl_2$, Na_2MoO_4 ET $ZnCl_2 + Na_2MoO_4$ sur le comportement de l'acier pour armature a beton en milieu oxydant NaCl, *LARHYSS Journal* (2013) 49-60.
- [14] G. Daufin, J. Talbotn , « Etude de quelques problèmes de corrosion dans l'industrie laitière». Première partie. Généralités sur la corrosion des métaux et alliages. INRA Editions, 1971 ,51 (507)..
- [15]. N. Le Bozec, Réaction de Réduction de l'Oxygène sur les Aciers Inoxydables en Eau de Mer Naturelle, Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale 2000
- [16]. B. Stanislas, Etude du Dimensionnement Optimal d'un Système de Protection Cathodique, Alimenté par Energie Solaire , Université de Boumerdès, 2010.
- [17]. H.E. Waldrip, Present Day Aspects of Condensate Well Corrosion. *Corr*, 1948.
- [18]. N.E. HAMNER, Scope and importance of inhibitor technology. In: Ed. By C.C. Nathan, Houston, NACE Corrosion Inhibitors. USA: National Association of Corrosion Engineers, 1973.
- [19]. M. FONTANA and N. GREEN, Corrosion engineering, Mc. Graw - hill (1978).
- [20]. E. Heitz, Proc. 4th European Symposium on Corrosion Inhibitors, Ann, Univ. Ferrara, Italy, N.S., Sez. V, Suppl. 6, 432 (1975).
- [21]. K. Rahmouni, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie CURIE. Paris VI. Déc 2005
- [22] G. Palanisamy, Corrosion Inhibitors, Intechope(2019).
- [23] P.B Raja, M.G. Sethuraman, "Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media—a review" *Mater. Lett. materials letters* . Volume 62 Issue 1, (15 January 2008) PP. 113 -116.
- [24] F.Milcard, "Etude de l'effet des alcaloïdes sur la corrosion de l'acier C38 en milieu acide chlorhydrique 1M":, Thèse doctorat , Université des Antilles et de la Guyane,(2013).

- [25] H.I. Farooqi, M.A. Quraishi, P.A. Saini, Natural compounds as corrosion inhibitors for mild steel in industrial cooling systems, Proceedings from European Federation of corrosion (EUROCORR. '97). I (1997) PP. 186
- [26] M.H.H. Nkunya, "Natural chemicals for disease and insect management. Professorial inaugural lecture series No. 44". University of Dar es salaam. Colour Print (T) Ltd, Dar es salaam; 2002, PP. 1-172.
- [27] A.M Abdel-Gaber, et al, "Inhibitive action of some plant extracts on the corrosion of steel in acidic media" Corrosion Science, Volume 48, Issue 9, (September 2006), PP. 2765-2779
- [23] P.B Raja, M.G. Sethuraman, "Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media—a review" Mater. Lett. materials letters . Volume 62 Issue 1, (15 January 2008) PP. 113 -116.
- [28] O. L.Riggs, Jr., in C.C. Nathan (Ed.), "Corrosion Inhibitors", NACE, Houston, TX, (1973) ,PP.11.
- [29]. Sivaraju, M. and K. Kannan, *Inhibitive properties of plant extract (Acalypha indica L.) on mild steel corrosion in 1N phosphoric acid*. International Journal of ChemTech Research, 2010. **2**(2): p. 1143-1153.
- [30]. Bendahou, M., M. Benabdellah, and B. Hammouti, *A study of rosemary oil as a green corrosion inhibitor for steel in 2 M H₃PO₄*. Pigment & resin technology, 2006.
- [31]. Satapathy, A., et al., *Corrosion inhibition by Justicia gendarussa plant extract in hydrochloric acid solution*. Corrosion science, 2009. **51**(12): p. 2848-2856.
- [32]. Quraishi, M., et al., *Green approach to corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid and sulphuric acid solutions by the extract of Murraya koenigii leaves*. Materials chemistry and Physics, 2010. **122**(1): p. 114-122.
- [33]. Okafor, P., et al., *Inhibitory action of Phyllanthus amarus extracts on the corrosion of mild steel in acidic media*. Corrosion Science, 2008. **50**(8): p. 2310-2317.
- [34]. Haida, S., et al., *Cistus monspeliensis extract as antioxidant and corrosion inhibitor of ordinary steel in 1 M hydrochloric acid medium*. Mediterranean Journal of Chemistry, 2020. **10**(2): p. 185-196.
- [35]. Rose, K., et al., *Surface protection of steel in acid medium by Tabernaemontana divaricata extract: physicochemical evidence for adsorption of inhibitor*. Journal of Molecular Liquids,

- [36]. Mouhsine, G., et al., *Valorization of the essential oil of Zingiber officinale by its Use as inhibitor against the corrosion of the carbon steel in acid medium hydrochloric acid 1M*. Mediterranean Journal of Chemistry, 2019. **8**(1): p. 17-24.2016. **214**: p. 111-116.
- [37] DOB Karima, Etude électrochimique de l'efficacité inhibitrice de substances vertes sur la corrosion de l'acier au carbone dans un milieu aqueux, Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Science en Génie Mécanique, Université 20 Août 1955 Skikda, 2018, p 36.
- [38] Sihem KHERRAF, COMPORTEMENT ELECTROCHIMIQUE DE L'ACIER A105 DANS DIFFERENTS MILIEUX AQUEUX. Influence de quelques inhibiteurs, Mémoire de magister en chimie appliquée, Université 20 Août 1955 Skikda, 2008, p 42,43.
- [39] Y.Boumeghiti, I.Bekkouche, « Elaboration d'un produit chimique pour le nettoyage en place d'une chaudière industrielle », mémoire de master en génie chimique Université 20 Aout Skikda(2021).
- [40] Document électronique : www.codif-recherche-et-nature.com
- [41] Document électronique : <https://altibbi.com>
- [42] Document électronique : <https://fr.m.wikipedia.org>
- [43] Document électronique : <https://boowiki.info>
- [44] M. Bilel, Synthèse des inhibiteurs contre la corrosion des aciers, Mémoire de magister, Université Mentouri, Constantine, 2011.
- [45] D.C.Zocher, Mater. Perform. , 15, 33(1976).
- [46] BOUBETTA Amina et BOULAHIA Romayssa, Utilisation d'une plante médicinale comme inhibiteur de corrosion des équipements industriels, Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de master professionnel en Génie chimique , Université de 20 Aout 1955-Skikda ,2022 ;p32.
- [47] E. K Boukas, Systèmes asservis. Editions de l'école polytechnique, Montréal, P251, (1995)