

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A. MIRA – Bejaia

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés

Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master

En Génie des Procédés

Option Génie Chimique

Présenté par

BOUFADENE Hayat & BOUCHKOUT Norhane

Thème

**Etude de l'effet inhibiteur de l'*Artemisia Herba Alba* sur la
corrosion de l'acier X42 dans le milieu HCl 0,5M**

Prévue le 03 /07/ 2023

Devant le jury composé de :

M ^r . BENCHIKH Abdelkader	MCB à l'Université de Bejaia	Président
M ^r . MAIZIA Radouane	MCB à l'Université de Bejaia	Examinateur
M ^{me} . AMOURA Damia	MCB à l'Université de Bejaia	Encadrant
M ^r . DJERMOUNE Atmane	Assistant de Recherche au Centre de Recherche CRAPC de Bejaia	Invité

Promotion 2022-2023

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Allah qui nous a donné le courage pour réaliser ce modeste travail et le mener jusqu'au bout. Ce travail a été réalisé au Laboratoire d'Électrochimie, Corrosion et de Valorisation Énergétique (LECVE) du département de Génie des Procédés, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa.

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre encadrant **Mme AMOURA Damia**, Maître de Conférences à l'Université de Bejaïa, pour le temps qu'elle nous a consacré pour la réalisation de ce mémoire, sa patience, sa disponibilité, ses conseils précieux et de nous avoir accompagné avec une grande attention tout au long de ce travail.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à **Mr MAIZIA Radouane** Maitres de Conférences Classe (B) à l'Université de Bejaia pour l'intérêt accordé à notre recherche pour tous les conseils et les orientations éclairées au cours du développement de ce travail, et d'avoir accepté d'être membre de jury de ce travail, qu'il trouve ici l'expression de notre respectueuse gratitude.*

*Nous tenons aussi à exprimer nos vifs remerciements à **Mr DJERMOUNE Atmane**, assistant de recherche au Centre de Recherche CRAPC de Bejaia pour son aide et tous ses conseils au long de ce travail.*

*Recevez, **Mr BENCHIKH Abdelkader**, nos plus sincères remerciements pour avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.*

Merci pour tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin et nous espérons que nous serons à la hauteur de leur attente.

Dédicaces

J'ai un grand plaisir et immense joie de dédier ce modeste travail :

*A mes très chers **parents**, qui ont beaucoup sacrifié pour mon bonheur, et à
mon égard.*

Que Dieu vous procure santé, prospérité et bonheur.

*A mes frères **Hani** et **Ahcene**,*

*A ma très chère sœur **Hinde**,*

*A mes **grands-parents**,*

*A mes très chères amies : **Lydia**, **Feriel**, **Tinhinane**, **Fouzia**, **Ghania**, **Mounia***

*Je tiens tout particulièrement à dédier ce travail à mon fiancé « **Amine** » de
m'avoir soutenu et encouragé tout le long de mon travail.*

*Sans oublier mon binôme « **Hayat** » pour son soutien moral, sa patience, sa
compréhension tout au long de ce projet.*

Norhane

Dédicaces

*J'ai un grand plaisir et immense joie de dédier ce modeste travail :
A mes très chers **parents**, qui ont beaucoup sacrifié pour mon bonheur, et à
mon égard.*

Que Dieu vous procure santé, prospérité et bonheur

*A ma petite sœur **Nadia**,*

*A toute ma famille, **BOUFADENE** et **AYACHE**.*

*A mes très chères amies : **Fouzia, Tinhinane, Nasma, Ghania, Mounia**.*

*A mon binôme **Norhane** pour son soutien moral, sa patience, sa
compréhension tout au long de ce projet.*

A tous ceux qui m'ont aidé et encouragé, même avec un mot.

Hayat

Liste des abréviations

ISO : International Organisation for Standardization.

E_{corr} : Potentiel de corrosion ou potentiel d'abandon (mV).

I_{corr} : Courant de corrosion (mA).

i_{corr} : Densité de courant de corrosion ($\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$).

SIE : Spectroscopie d'Impédance Electrochimique.

OPC : Open Circuit Potentiel.

f : Fréquence (Hz).

C_{dl} : Capacité de double couche ($\text{mF}\cdot\text{cm}^{-2}$).

AHA: Extrait de *L'artemisia herba alba* par la méthode à reflux dans l'eau.

w : Perte de poids ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$).

v_{corr} : Vitesse de corrosion ($\text{cm}\cdot\text{an}^{-1}$).

b_a et b_c : Les coefficients de Tafel ($\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1}$).

R_p : Résistance de polarisation ($\Omega\cdot\text{cm}^2$).

θ : Taux de recouvrement.

EI : Efficacité inhibitrice (%).

R_e : Résistance de l'électrolyte ($\Omega\cdot\text{cm}^2$).

R_t : Résistance de transfert de charge ($\Omega\cdot\text{cm}^2$).

v_b : Vitesse de balayage ($\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$).

k : Constante de vitesse (s^{-1}).

CEE : Circuit Electrique Equivalent.

C : Concentration de l'inhibiteur ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$).

C_{HCl} : Concentration de la solution acide (HCl) ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$).

Liste des abréviations

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: Photos de matériaux soumis aux phénomènes de corrosion	6
Figure I.2: Corrosion chimique: cuivre et acier noir dans une installation	7
Figure I.3: Corrosion électrochimique	7
Figure I.4: Exemple de bactéries responsable de la corrosion bactérienne	8
Figure I.5: Corrosion générale (rouille) d'une pièce en acier	8
Figure I.6: Corrosion par piqures	9
Figure I.7: Corrosion inter granulaire	10
Figure I.8: Exemple de la corrosion sélective	10
Figure I.9: Corrosion galvanique du cuivre par couplage avec l'acier	11
Figure I.10: Corrosion caverneuse d'un acier allié sous un joint	11
Figure I.11: Étapes de développement du phénomène de corrosion-érosion	12
Figure I.12: Corrosion sous contrainte	12
Figure I.13: Corrosion filiforme sur un échantillon d'aluminium peint et scarifié	13
Figure I.14: Types des revêtements protecteurs	17
Figure I.15: Formation des couches barrières anodiques interférant avec les réactions électrochimiques, dans le cas d'une étude en milieu acide	21
Figure I.16: Formation des couches barrières cathodiques interférant avec les réactions électrochimiques, dans le cas d'une étude en milieu acide.....	22
Figure I.17: Diagrammes d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur de corrosion	22
Figure I.18: <i>Artemisia herba alba</i> : (A) la plante au début de la saison de floraison, (B) la plante à la fin de la saison de floraison	24
Figure I.19: La plante <i>Artemisia Herba Alba</i>	25
Figure I.20: Morphologie générale d' <i>Artemisia</i>	26
Figure I.21: Structures chimiques de quelques composés rencontrés dans les huiles essentielles.....	28

Liste des figures

Figure I.22: Structure chimique extraite	28
---	-----------

Chapitre II

Figure II.1: Détermination des paramètres électrochimique à partir des droites de Tafel	38
--	-----------

Figure II.2: Schéma d'une fonction de transfert	39
--	-----------

Figure II.3: Diagramme d'impédance électrochimique en représentation de(a): Nyquist et (b): Bode	41
---	-----------

Figure II.4: La cellule électrochimique à trois électrodes	42
---	-----------

Figure II.5 : Schéma du montage du chauffage à reflux.....	43
---	-----------

Figure II.6: Electrode au calomel saturé	44
---	-----------

Figure II.7: Les étapes suivis pour obtenir l'extrait de la plante <i>AHA</i>	45
--	-----------

Figure II.8: Dispositif expérimental de mesure potentiostatique et galvanostatique	46
---	-----------

Figure II.9: Dispositif expérimental de mesures de l'impédance électrochimique	46
---	-----------

Figure II.10: Echantillons d'acier dans des solutions corrosives avec et sans inhibiteur	47
---	-----------

Figure II.11: Photographie du goniomètre Krüss et schéma de principe de la mesure de l'angle de contact	49
--	-----------

Figure II.12: Illustration schématique de la diffraction des rayons X	49
--	-----------

Figure II.13: Diffractomètre R X (PANalytical Empyrean)	50
--	-----------

Figure II.14: Spectroscopie infrarouge a transformé du Fourier	51
---	-----------

Chapitre III

Figure III.1: (a) Variation de la perte en poids(<i>w</i>) et (b) de l'efficacité inhibitrice, déduite après 17jours d'immersion, de la corrosion de l'acier dans HCl 0,5M en fonction de la concentration en inhibiteur vert <i>AHA</i>	55
---	-----------

Figure III.2: Evolution du potentiel d'abandon de l'électrode de l'acier en fonction du temps dans HCl 0,5M à différentes concentrations en inhibiteur <i>AHA</i>	57
--	-----------

Figure III.3: Courbes de Tafel relatives à l'acier dans HCl 0,5M à différentes concentrations en inhibiteur <i>AHA</i> , $V_b = 1 \text{ mV.s}^{-1}$ et $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	58
--	-----------

Figure III.4: Diagrammes d'impédance de Nyquist de l'acier dans HCl 0,5M en absence et en présence de différentes concentrations de l'extrait <i>AHA</i>	62
---	-----------

Liste des figures

Figure III.5: Spectre d'impédance de Nyquist de l'acier X42 dans HCl 0,5M en absence de l'inhibiteur <i>AHA</i> à E_{corr} et $T = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$	62
Figure III.6: Circuit électrique équivalent proposé pour modéliser les diagrammes d'impédance de Nyquist précédemment présentés	63
Figure III.7: Isothermes d'adsorption selon le modèle : (a) de Langmuir, (b) de Temkin et (c) de Frumkin de l'acier X42 dans HCl 0,5M	67
Figure III.8: Effet de la température sur les courbes de Tafel dans HCl 0,5M (a) absence de l'extrait <i>AHA</i> et (b) contenant $0,80\text{g.L}^{-1}$ de l'extrait <i>AHA</i> $\eta_b=1 \text{ mV.s}^{-1}$	69
Figure III.9: Variation de $\text{Ln}(i_{\text{corr}})$ en fonction de $(1/T)$ dans HCl 0,5M en absence et en présence de $0,80 \text{ g.L}^{-1}$ de l'extrait <i>AHA</i>	71
Figure III.10: Spectres DRX de la surface d'acier X42, (a) après 2h d'immersion en milieu HCl 0,5 M seul et (b) 2h d'immersion en milieu HCl 0,5 M et $0,80 \text{ g.L}^{-1}$ d'inhibiteur vert <i>AHA</i>	72
Figure III.11: Mesures de l'angle de contact dans 0,5M HCl, après 2h du temps d'immersion en absence et en présence de différentes concentrations.....	74
Figure III.12: Spectre infrarouge de l' <i>AHA</i>	75

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1: Les principaux facteurs de la corrosion.....	13
--	-----------

Chapitre II

Tableau II.1: Composition chimique de l'acier API 5L-X42 en % massique	42
---	-----------

Chapitre III

Tableau III.1: Paramètres de la corrosion de l'acier X42 dans le milieu HCl 0,5M contenant les différentes concentrations de l'inhibiteur <i>AHA</i> , calculés par la méthode d'extrapolation de Tafel	60
--	-----------

Tableau III.2: Efficacité inhibitrice et paramètres électrochimiques de la corrosion de l'acier X42 déduits des mesures d'impédances dans le milieu agressif HCl 0,5M contenant les différentes concentrations de l'inhibiteur <i>AHA</i>	64
--	-----------

Tableau III.3: Paramètres électrochimiques de la corrosion de l'acier dans le milieu agressif HCl 0,5M sans et avec $0,80\text{g.L}^{-1}$ de l'inhibiteur à différentes températures, déterminés par la méthode d'extrapolation de Tafel	70
---	-----------

Table des matières

Introduction générale	1
Références bibliographiques	4
Chapitre I : Synthèse bibliographique	
I.1. Généralité sur la corrosion	5
I.1.1. Définition de la corrosion	5
I.1.1.1. Selon la norme internationale ISO 8044	5
I.1.1.2. Selon « National Association of Corrosion en Corrosion Engineers » NACE (la norme ISO 15156)	5
I.1.2. Les types de corrosion	6
I.1.2.1. Corrosion chimique (sèche)	6
I.1.2.2. Corrosion électrochimique	7
I.1.2.3. Corrosion biochimique (corrosion bactérienne)	8
I.1.3. Les formes de corrosion.....	8
I.1.3.1. Corrosion uniforme (généralisée)	8
I.1.3.2. Corrosion localisée.....	9
I.1.4. Les facteurs de la corrosion	13
I.1.4.1. Effet de la température	14
I.1.4.2. Effet de l'acidité.....	14
I.1.4.3. Salinité.....	14
I.1.4.4. Régime hydrodynamique	14
I.1.4.5. Ions chlorures	14
I.2. Méthodes d'étude de la corrosion	14
I.2.1. Méthodes classiques	15
I.2.2. Méthodes électrochimiques	16
I.3. Moyen de lutte contre la corrosion	16
I.3.1. La protection électrochimique	16
I.3.1.1. La protection cathodique.....	16
I.3.1.2. La protection anodique.....	17
I.3.2. Protection par revêtements.....	17
I.3.3. Protection par les inhibiteurs de corrosion	17

Table des matières

I.3.3.1. Définition	17
I.3.3.2. Propriétés d'un inhibiteur.....	18
I.3.3.3. Conditions d'utilisation des inhibiteurs	18
I.3.3.4. Domaines d'application	18
I.3.3.5. Classification des inhibiteurs de corrosion	19
I.4. Inhibiteurs verts.....	22
I.5. L'armoise blanche (<i>Artemisia Herba Alba</i>)	23
I.5.1. Origine	23
I.5.2. Répartition géographique.....	23
I.5.3. Description botanique	24
I.5.3.1. Partie aérienne.....	25
I.5.3.2. Partie souterraine ou racine	25
I.5.4. Classification scientifique	26
I.5.5. Composition chimique	26
I.5.5.1. Composés polyphénoliques.....	27
I.5.5.2. Les sesquiterpènes lactones.....	27
I.5.5.3. Les huiles essentielles	27
I.5.6. Usage de la plante	28
I.5.7. Toxicité de la plante.....	29
I.6 Conclusion.....	29
Références bibliographiques	31
Chapitre II : Conditions et méthodes expérimentales	
II.1. Techniques d'étude	36
II.1.1. La gravimétrie.....	36
II.1.2 .Techniques électrochimiques.....	37
II.1.2.1. Méthodes stationnaires	37
II.1.2.1.1. Suivi du potentiel en circuit ouvert.....	37
II.1.2.1.2. Courbes de polarisation	38
II.1.2.2. Méthode transitoire	39
II.1.2.2.1. La Spectroscopie d'Impédance Electrochimique (SIE).....	39
II.2. Conditions expérimentales.....	41
II.2.1. L'acier API 5L-X42	41
II.2.2. Cellule électrochimique	42

Table des matières

II.2.2.1. Electrode de travail (ET).....	42
II.2.2.2. Électrode de référence (ER)	43
II.2.2.3. Electrode auxiliaire (Contre électrode (CE))	43
II.2.3. Préparation du matériau (électrode de travail)	44
II.2.4. Milieu corrosif	44
II.2.5. Méthode d'extraction utilisée: Extraction à reflux	44
II.2.6. Préparation de l'extrait d' <i>Artemisia Herba Alba (AHA)</i>	45
II.3. Dispositifs expérimentaux.....	46
II.4. Protocoles expérimentaux.....	47
II.4.1. Protocoles de la méthode gravimétrique.....	47
II.4.2. Protocole des mesures électrochimiques	47
II.4.2.1. Courbes de polarisation intensité-potentiel.....	47
II.4.2.2. Suivi de potentiel de corrosion	48
II.4.2.3. Diagrammes d'impédance électrochimique.....	48
II.4.3. Protocoles d'analyse de surface	48
II.4.3.1. L'angle de contact.....	48
II.4.3.2. Diffraction des Rayons X	49
II.4.3.3. Spectroscopie d'absorption infrarouge	50
II.5. Système d'acquisition et de traitement de données électrochimiques	51
II.6. Conclusion.....	52
Références bibliographiques	53

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1. Etude gravimétrique	54
III.2. Étude électrochimique	56
III.2.1. Suivi du potentiel de corrosion en fonction du temps	56
III.2.2. Courbes de polarisation	58
III.2.3. Spectroscopie d'impédance électrochimique	61
III.3. Isotherme d'absorption	65
III.4. Effet de température.....	68

Table des matières

III.5. Analyse de surface	72
III.5.1. Analyse par diffraction des rayons X (DRX)	72
III.5.2. Angle de contact	73
III.5.3. Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier	75
III.6. Conclusion	75
Références bibliographiques	77
Conclusion générale	81

Introduction générale

Introduction générale

Dans notre vie quotidienne, nous rencontrons des nombreux phénomènes indésirables, parmi eux la corrosion. Le terme corrosion provient du latin corroder, qui signifie ronger, attaquer. La corrosion, au sens large, peut s'exprimer comme la détérioration d'un matériau par le milieu dans lequel il se trouve. Elle résulte d'interactions physico-chimiques entre le matériau métallique et son environnement, entraînant des modifications des propriétés du métal souvent accompagnées d'une dégradation fonctionnelle de ce dernier (altération de ses propriétés mécaniques, électriques, optiques, esthétiques, etc.). Observé depuis toujours, ce phénomène n'est étudié scientifiquement que depuis 1830 [1]. Les conséquences sont importantes dans divers domaines et en particulier dans l'industrie : arrêt de production, remplacement des pièces corrodées, accidents graves et risques de pollutions ; sont des événements fréquents avec parfois de lourdes incidences économique.

Les phénomènes de corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs qui interviennent non pas individuellement, mais en relation plus ou moins complexes les uns avec les autres : la nature et la structure du matériau, les traitements de surface (mécaniques, chimiques, électrochimiques...), l'environnement et ses caractéristiques chimiques, la température, le régime hydrodynamique auquel est soumis le matériau, les contraintes qui lui sont imposées...etc. Le milieu agressif constitue un environnement particulièrement favorable à la détérioration des matériaux métalliques [2].

L'acier est un alliage métallique ferreux, qui est d'ailleurs principalement composé de fer, l'élément additionnel étant le carbone, qui n'est présent qu'à l'état de traces infimes. Ils sont largement employés dans l'industrie vue leurs bonnes propriétés mécaniques et physico-chimiques ainsi leur faible coût, les raisons pour lequel il étés employée dans tous les domaines : le bâtiment et construction, les boites de conserves alimentaires, les composés électroniques, industrie pétrolière...etc. [3].

Diverses méthodes, largement utilisées pour prévenir et contrôler la corrosion, dépendent du matériau spécifique à protéger et l'environnement. Les méthodes les plus utilisées comprennent les revêtements organiques et métalliques, la protection cathodique et les inhibiteurs de corrosion. Ces derniers peuvent être utilisé dans des systèmes fermés, le décapage acide des métaux et même comme additif aux peintures anticorrosion [4].

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 pour diminuer la vitesse de corrosion des matériaux. Les inhibiteurs peuvent interférer avec la réaction anodique ou cathodique et forment une barrière protectrice sur la surface du

Introduction générale

métal contre les agents corrosifs [5]. Les inhibiteurs présentent l'originalité d'être le seul moyen d'intervention à partir du milieu corrosif, ce qui en fait une méthode de contrôle de la corrosion facile à mettre en œuvre et peu onéreuse, pour peu que le ou les produits utilisés soient d'un coût modéré.

Au cours des dernières années, de nombreux articles, livres, et conférences ont porté sur le thème de réduire les impacts négatifs des activités humaines sur la planète et sur sa capacité à soutenir la vie, d'où l'intérêt croissant pour la chimie verte. Dans ce contexte, la tendance à la mise au point et à l'utilisation d'inhibiteurs "verts", acceptables pour l'environnement et biodégradables ou d'inhibiteurs à très faible concentration utilisés en mélange, avec effets de synergie, inspire beaucoup de chercheurs scientifiques.

Dans cette optique, les extraits de plantes sont devenus importants source facilement accessible et renouvelable pour une vaste gamme d'inhibiteurs. À partir de ces inhibiteurs, la performance d'inhibition est généralement attribuée à la présence de groupes organiques complexes tels que des tanins, des alcaloïdes, des bases azotées, des glucides, des acides aminés et des flavonoïdes. Ils contiennent des groupes fonctionnels électro-négatifs (C = O, N-H, O-H et C = S) et des liaisons multiples carbone-carbone (C = C et CC) qui favorisent le processus d'inhibition par adsorption ou par formation de liaisons avec les ions métalliques.

L'objectif de ce travail est de tester une nouvelle formulation inhibitrice qui soit à la fois efficace, économiquement rentable et en accord avec les réglementations concernant l'environnement. L'inhibiteur étudié est un extrait de la plante *Artemisia Herab Alba* « *Armoise Blanche* ». *L'Artemisia Herba Alba* est une plante herbacée, vivace, de couleur verdâtre-argenté, de 30 - 60 cm de long, aromatique [6]. L'extrait de cette plante est obtenu par la méthode d'extraction à la vapeur d'eau.

Ce manuscrit est structuré de la manière suivante :

- **Le premier chapitre** : consiste en une étude bibliographique dans laquelle nous avons présenté des généralités sur la corrosion et sa protection et sur l'utilisation d'inhibiteurs en général et l'application des inhibiteurs verts en particulier.
- **Le deuxième chapitre** : présente la mise en place du montage d'extraction et la description des méthodes et conditions expérimentales mises en œuvre au cours de l'étude des tests d'inhibition (gravimétrie, voltampérométrie, impédance électrochimique), ainsi que les méthodes de caractérisation de surface

Introduction générale

- **Le troisième chapitre** : expose les résultats des tests d'inhibition de la corrosion de l'acier API 5L X42 par l'extrait de l'*AHA* dans un milieu agressif HCl à 0,5 M. L'efficacité inhibitrice a été déterminée en faisant varier les différents paramètres à savoir : la concentration en inhibiteur, la température.

Enfin nous finirons par une conclusion générale dont laquelle nous rapporterons l'ensemble des résultats et perspectives concernant l'application de l'extrait de l'*AHA* en tant qu'inhibiteurs de corrosion de l'acier en milieu acide pour approfondir cette étude.

Références bibliographiques

- [1] J.J. Lamoureux, Précis de Corrosion, Ed. Masson, (1994).
- [2] Z. Khiati, « Inhibition de la corrosion du cuivre en milieux chlorure et sulfate neutres par une nouvelle molécule dérivée de 1, 2,4-triazole », Thèse de Doctorat, Université de Pierre et Marie Curie, (2013).
- [3] R. Winston Revie, Herbert H. Uhlig, « Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering », (2008).
- [4] F. Bentiss, « Synthèses et études physicochimiques des inhibiteurs organiques de corrosion en milieu acide ». Thèse de Doctorat. Université de Lille, (1990).
- [5] F. Khoukhi, « Etude de l'efficacité de deux inhibiteurs de corrosion dans les milieux multiphasique (eau, huile et gaz) », Mémoire de Magister, Université de Boumerdes, (2008).
- [6] N. Chaabna, « Activité anticoccidienne des extraits d'*Artemisia herba alba* », Mémoire de Magister, Université de Sétif, (2014).

CHAPITRE I

Synthèse Bibliographique

Chapitre I

Synthèse Bibliographique

La corrosion est une dégradation spontanée d'un métal dans un milieu corrosif. Les métaux existent souvent sous forme de minerais (oxydes), pour former un métal il faut faire la transformation oxyde → métal (réduction). Donc les métaux ont tendance à retourner à leur état naturel (oxyde), cette transformation du métal en oxyde (oxydation) s'appelle la corrosion.

Il existe plusieurs méthodes de protection pour protéger les métaux contre la corrosion comme : les revêtements, la protection anodique, la protection cathodique et les inhibiteurs de corrosion [1].

Ce chapitre a pour but de présenter une brève synthèse sur les généralités de la corrosion et son inhibition, suivie de la description des méthodes de protection usuelles.

I.1. Généralité sur la corrosion

I.1.1. Définition de la corrosion

La corrosion est une dégradation du matériau ou de ses propriétés par des réactions chimiques ou électrochimiques avec l'environnement. Cette définition admet que la corrosion est un phénomène nuisible: elle détruit le matériau et/ou réduit ses propriétés, ce qui rend inutilisable pour une application prévue [2].

I.1.1.1. Selon la norme internationale ISO 8044

La définition officielle de la corrosion, est la suivante : « interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs » [3].

I.1.1.2. Selon « National Association of Corrosion Engineers » NACE (la norme ISO 15156)

La référence mondiale en matière de corrosion, NACE, 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].



Figure I.1: Photos de matériaux soumis aux phénomènes de corrosion [1].

I.1.2. Les types de corrosion

Il existe trois types de corrosion : la corrosion chimique, la corrosion électrochimique et la corrosion bactérienne [5].

I.1.2.1. Corrosion chimique (sèche)

Il s'agit d'une réaction hétérogène entre une phase solide (le métal) et une phase gazeuse. Elle ne fait pas intervenir le passage d'un courant électrique [6].

Aux températures élevées, les anions et les cations se diffusent plus rapidement à travers un film compact, ce film croît rapidement avec une vitesse égale à la vitesse de la corrosion. La surface inférieure est considérée comme anode, alors que la surface extérieure du film est considérée comme cathode. L'oxyde dans ce cas est un électrolyte et un conducteur électronique en même temps, contrairement aux piles électrochimiques classiques [7].

Il est très difficile de donner des exemples de corrosion chimique, puisque le plus souvent elle est accompagnée de la corrosion électrochimique. On peut considérer comme corrosion chimique l'attaque d'un métal par un autre métal liquide (Hg), par un seul fondu ou par une solution aqueuse (Al dans CCl_4) l'exemple de la corrosion sèche en atmosphère oxydante à haute température [6].



Figure I.2 : Corrosion chimique: cuivre et acier noir dans une installation [8].

I.1.2.2. Corrosion électrochimique

C'est le phénomène de corrosion le plus important et le plus rencontré. Elle se manifeste lorsque le réactif est un liquide ou lorsqu'il existe une hétérogénéité soit dans le métal ou dans le réactif, présentant dissymétrie de composition. L'existence de ces hétérogénéités détermine la formation d'une pile, alors un courant électrique circule entre anodes et cathodes dans le réactif et par conséquent les zones qui constituent les anodes sont attaquées (corrodées) [9].

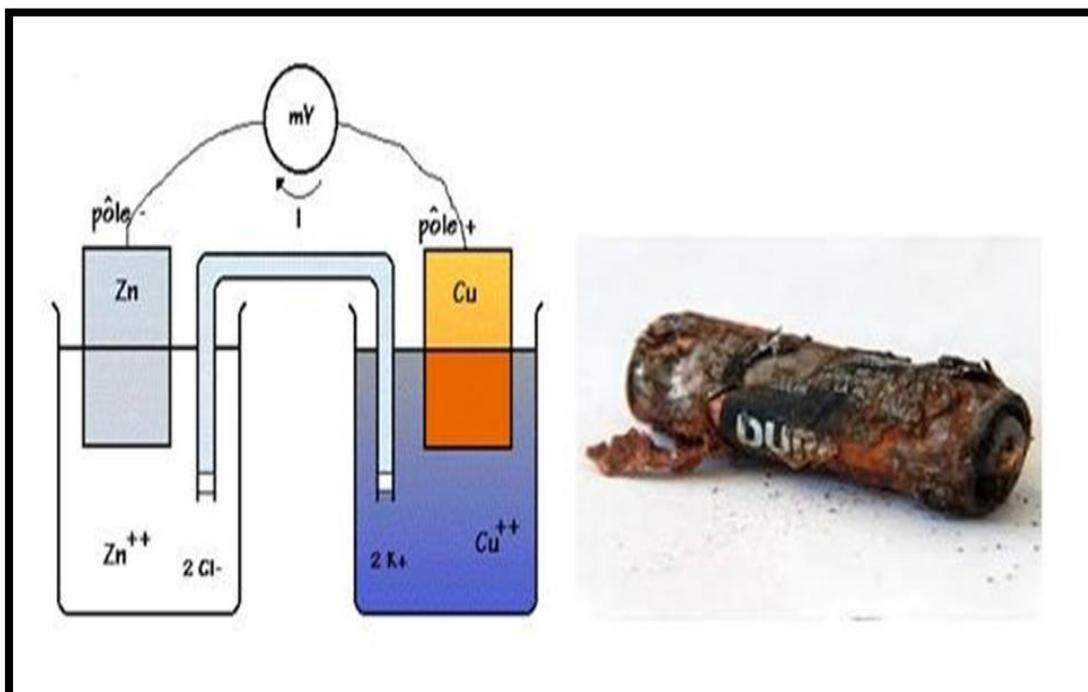


Figure I.3: Corrosion électrochimique [8].

I.1.2.3. Corrosion biochimique (corrosion bactérienne)

Elle résulte de l'action de bactéries ou de produits provenant de l'activité bactérienne tels que des acides organiques ou des gaz comme CO_2 et SO_2 , sur le matériau métallique. Les canalisations enterrées sont sujettes à ce type de corrosion [10].

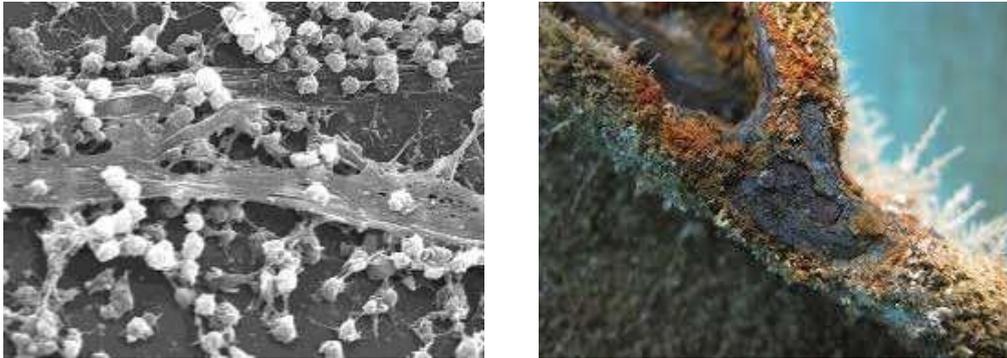


Figure I.4: Exemple de bactéries responsable de la corrosion bactérienne [11].

I.1.3. Les formes de corrosion

Les principales formes de corrosion sont regroupées en deux grandes familles :

I.1.3.1. Corrosion uniforme (généralisée)

Corrosion généralisée ou corrosion uniforme, elle est due à une réaction chimique ou électrochimique qui se produit d'une manière uniforme sur toute la surface du métal [7]. On trouve cette attaque notamment sur les métaux exposés aux milieux acides [12]. Exemple la corrosion d'acier ou du zinc dans une solution d'acide sulfurique aérée [13].



Figure I.5 : Corrosion générale (rouille) d'une pièce en acier [14].

I.1.3.2. 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 [15].

Il existe différents types de corrosion localisée tels que :

- **Corrosion par piqures**

La corrosion par piqures se caractérise par la formation de petites cavités (piques) dans le métal, ces dernières peuvent varier considérablement en fonction de la profondeur et de la forme et être dispersées à la surface avec des fréquences différentes [16].

La principale cause des phénomènes de piqures est la formation d'une cellule de corrosion stable, généralement à la surface d'un métal passif, dans cette cellule, la zone passive joue le rôle d'une cathode et le fond métallique de la piqure se dissout sous forme d'anode [17].



Figure I.6 : *Corrosion par piqures* [18].

- **Corrosion inter granulaire**

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 [19].

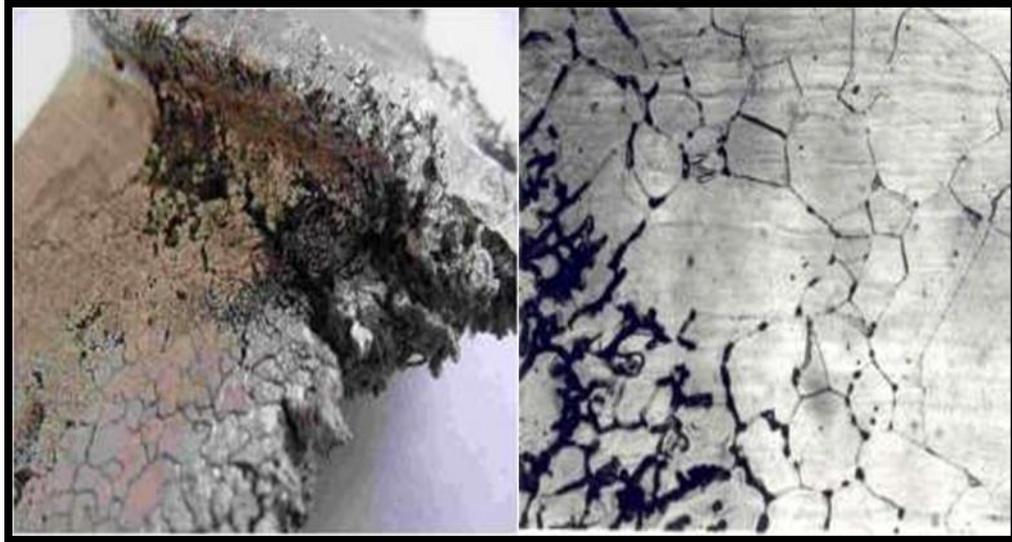


Figure I.7 : *Corrosion inter granulaire* [20].

- **Corrosion sélective**

Cette forme de corrosion est due à l'oxydation d'un composant de l'alliage par rapport à l'autre, ce qui conduit à la formation d'une structure métallique poreuse [21].



Figure I.8: *Exemple de la corrosion sélective* [22].

- **Corrosion galvanique**

C'est l'une des formes les plus courantes de corrosion en milieu aqueux. Elle est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux matériaux dans laquelle une des électrodes (l'anode) se consomme au bénéfice de l'autre (la cathode) qui reste intacte.

Cette sélectivité des réactions est due à une hétérogénéité provenant soit du matériau, soit du milieu ou des conditions physicochimiques et thermodynamiques à l'interface [23-24].

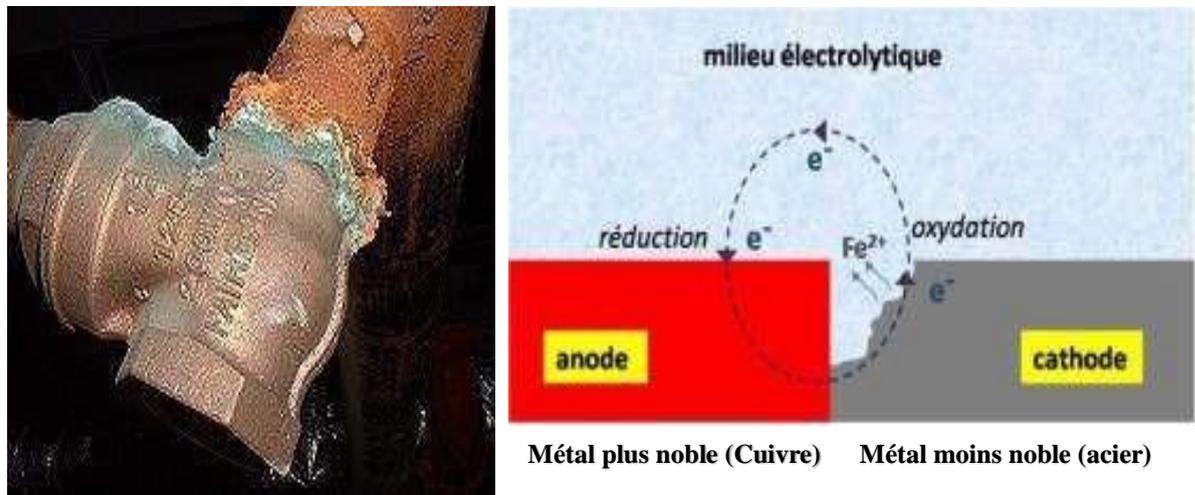


Figure I.9 : corrosion galvanique de cuivre par couplage avec l'acier [25].

- **Corrosion caverneuse**

La 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 [26].

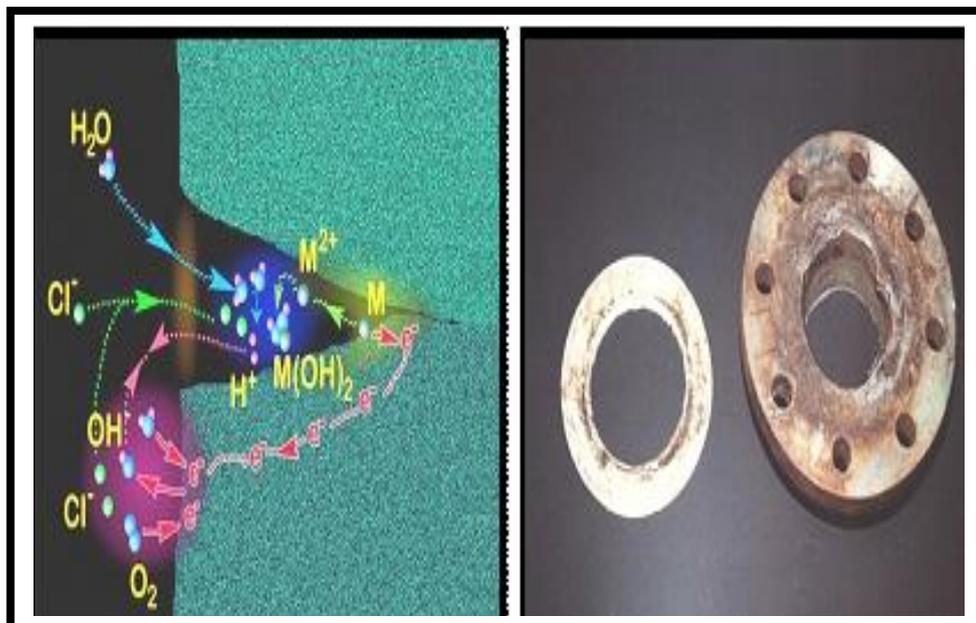


Figure I.10 : Corrosion caverneuse d'un acier allié sous un joint [8].

- **Corrosion par érosion**

La corrosion par érosion affecte de nombreux matériaux, elle est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de la matière. Elle est souvent favorisée par l'écoulement rapide d'un fluide [20].



Figure I.11 : *corrosion par érosion* [27].

- **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 [28].



Figure I.12 : *Corrosion sous contrainte* [29].

- **Corrosion filiforme**

C'est la forme de la corrosion qui se produit dans certains revêtements sous forme de filaments filiformes distribués aléatoirement comme la peinture par exemple [30].

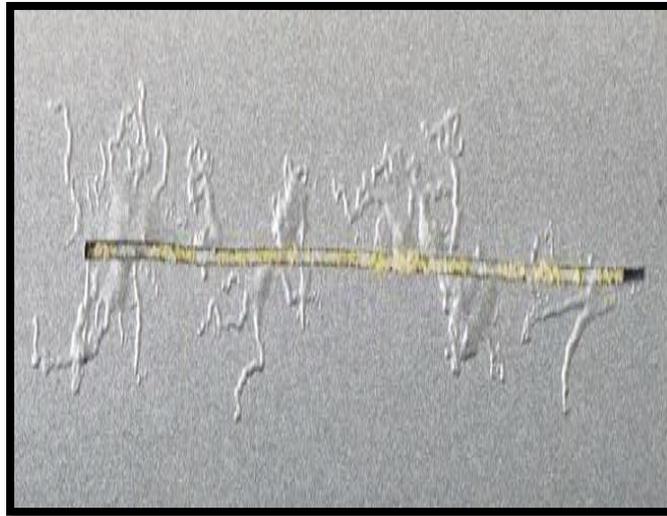


Figure I.13 : *Corrosion filiforme sur un échantillon d'aluminium peint et scarifié [31].*

I.1.4. Les facteurs de la corrosion

Les phénomènes de la corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs et ils peuvent être classés en quatre groupes principaux comme le montre le tableau I.1

Tableau I.1 : Les principaux facteurs de la corrosion [32].

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

La vitesse de corrosion d'un métal dans un milieu corrosif dépend à la fois des caractéristiques de ces deux paramètres :

La température et le pH ont une influence directe sur la vitesse de corrosion, et une influence indirecte à travers la phase aqueuse (eau de condensation, eau de production). Les conditions de flux, le film formé à la surface du métal et la pression ont une influence directe à travers la pression partielle du CO₂ [33,34].

I.1.4.1. Effet de la température

Généralement l'augmentation de la température accélère les phénomènes de corrosion car elle diminue les domaines de stabilité des métaux et accélère les cinétiques de réaction et de transport des molécules [35].

I.1.4.2. Effet de l'acidité

L'agressivité d'un électrolyte est en fonction de son pH, une forte concentration en protons dans la solution augmente l'agressivité du milieu. Donc la vitesse de corrosion augmente avec la diminution du pH du milieu [36].

I.1.4.3. Salinité

La salinité augmente la conductivité du milieu et accélère donc la corrosion [37].

I.1.4.4. Régime hydrodynamique

La vitesse de la réaction est fixée par les conditions hydrodynamiques en contrôlant le transport de matière dans la couche de diffusion (couche de Nernst), ce qui explique l'importance de l'agitation de l'électrolyte lors des essais de corrosion aux laboratoires [38].

I.1.4.5. Ions chlorures

La présence des ions dans l'eau conduit à une acidification du milieu et donc accélère sa corrosivité en réduisant le pouvoir protecteur des couches de surface du métal [7].

I.2. Méthodes d'étude de la corrosion

L'interface métal-solution est un système complexe, chaque méthode de la détermination de la vitesse de corrosion conduira donc à une approche différente de cette grandeur, suivant la nature des hypothèses sur lesquelles est fondée la technique utilisée. Les méthodes les plus courantes sont : la gravimétrie qui est une méthode très ancienne de mesure directe, les méthodes électrochimiques stationnaires (courbes de polarisation) et les méthodes transitoires (spectroscopie d'impédances électrochimiques) [39].

I.2.1. Méthodes classiques

La vitesse de corrosion peut être exprimée en termes de perte de masse, de réduction d'épaisseur ou de densité de courant ou de densité de courant. Elle peut être simplement définie à partir des analyses suivantes :

a. Mesures de pertes de masse

Dans le cas d'une perte de masse Δm au cours d'une durée Δt , on exprime la vitesse de corrosion v_{corr} par la relation :

$$v_{corr} = \frac{\Delta m}{\rho \cdot S \cdot \Delta t} \quad (\text{I.1})$$

v_{corr} : Vitesse de corrosion ($\text{cm} \cdot \text{an}^{-1}$).

$\frac{\Delta m}{\Delta t}$: Perte de masse par unité de temps ($\text{g} \cdot \text{an}^{-1}$).

ρ : Masse volumique du métal ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$).

S : Surface de l'échantillon en contact avec le liquide (cm^2).

b. Dosage de la concentration de cations M^{n+} en solution

$$v_{corr} = \frac{\Delta C}{\rho \cdot S \cdot \Delta t} V \quad (\text{I.2})$$

Avec :

$\frac{\Delta C}{\Delta t}$: Variation de concentration en ions métalliques dans la solution par unité de temps

($\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$).

V : Volume de solution (L).

c. Exploitation de la réaction de réduction

A condition qu'il n'y ait qu'un seul moteur de corrosion. La mesure du dégagement d'hydrogène permet de quantifier l'endommagement.

$$v = \frac{\Delta V_{H_2} \cdot M}{V \cdot \rho \cdot S \cdot \Delta t} \quad (\text{I.3})$$

Avec :

$\frac{\Delta V_{H_2}}{\Delta t}$: Volume d'hydrogène dégagé par unité de temps ($\text{L} \cdot \text{an}^{-1}$).

V_{mol} : Volume molaire ($22,4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$), dans les conditions normales de température et de pressions).

M : Masse molaire du métal ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$).

Remarque : dans le cas où le cation M^{n+} n'est pas divalent, il convient de tenir compte de l'équilibre des charges entre les réactions anodiques et cathodiques.

d. Mesure de perte d'épaisseur

Effectuer par mesure directe, elle nécessite d'avoir accès à la surface se corrodant. Des mesures ultrasonores facilitent l'obtention de l'information, qui reste cependant ponctuelle, tant du point de vue géométrique que temporel [40].

I.2.2. Méthodes électrochimiques

Les méthodes électrochimiques utilisées permettant l'étude du phénomène de corrosion peuvent être divisée en deux catégories : méthodes stationnaire (courbes de polarisation) et méthodes transitoire (Spectroscopie d'Impédances Electrochimique (SIE)). Ces méthodes seront détaillées dans le chapitre II.

I.3. Moyen de lutte contre la corrosion

La lutte contre la corrosion représente toutes les mesures qu'on peut utiliser pour protéger les matériaux métalliques contre l'action destructive du milieu.

Les différents moyens de lutte contre la corrosion sont [41] :

- Protection électrochimique.
- Protection par revêtement.
- Protection par inhibiteur.

I.3.1. La protection électrochimique

La protection électrochimique est le résultat du passage d'un courant entre une anode et une cathode. Ainsi, pour stopper la corrosion, il faut agir sur la pile formée. On parle alors de protection cathodique ou protection anodique [41].

I.3.1.1. La protection cathodique

La protection cathodique est la technique qui permet de conserver dans son intégrité la surface extérieure des structures en acier enterrées ou immergées, en supposant au processus électrochimique d'attaque du métal par le milieu ambiant. Les canalisations en acier, même anciens et dégradés, peuvent bénéficier de cette technique dans des conditions économiques admissibles [42].

I.3.1.2. La protection anodique

Le principe de la protection anodique diffère de celui de la protection cathodique en ce sens qu'on fait augmenter le potentiel de corrosion de façon qu'il se situe dans la zone passive. Cette méthode est donc uniquement applicable aux métaux qui peuvent être passifs [43].

I.3.2. Protection par revêtements

Les revêtements constituent une barrière physique entre le milieu agressif et le métal à protéger. Leur efficacité dépend de leur propre comportement vis-à-vis du milieu agressif ainsi que l'intégrité du revêtement [44]. Ils peuvent être métalliques et non métalliques [45].

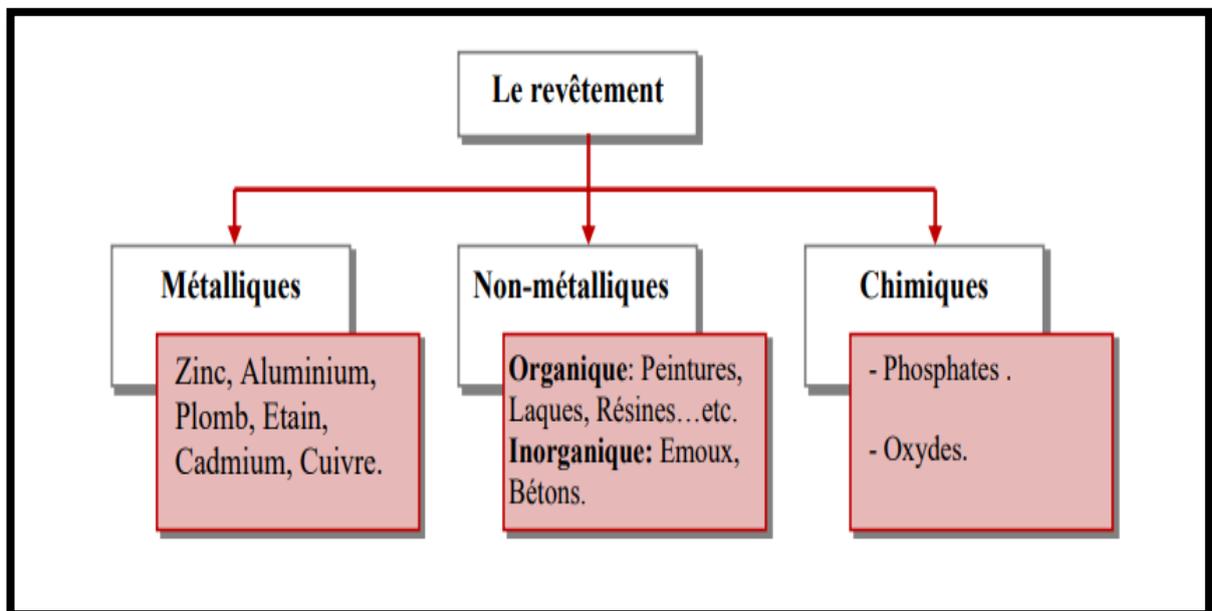


Figure I.14 : Types des revêtements protecteurs [46].

I.3.3. Protection par les inhibiteurs de corrosion

I.3.3.1. Définition

Les inhibiteurs de corrosion constituent un moyen de lutte original contre la corrosion des métaux.

Selon la norme ISO 8044, un inhibiteur est une « substance chimique ajoutée au système de corrosion à une concentration choisie pour son efficacité ; celle-ci entraîne une diminution de la vitesse de corrosion du métal sans modifier de manière significative la concentration d'aucun agent corrosif contenu dans le milieu agressif » [47].

La définition d'un inhibiteur de corrosion n'est pas unique. Celle retenue par l'association américaine "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 » [47,48].

I.3.3.2. Propriétés d'un inhibiteur

Un inhibiteur de corrosion doit vérifier un certain nombre de propriétés fondamentales :

- Abaisser la vitesse de corrosion du métal tout en conservant les caractéristiques physico-chimiques de ce dernier.
- Être stable en présence des autres constituants.
- Être stable dans le domaine de températures utilisé.
- Être efficace dans les conditions d'utilisation.
- Être efficace à faible concentration.
- Être peu onéreux par rapport aux économies qu'il permet de réaliser.
- Être compatible avec les normes en vigueur de non-toxicité et de protection de l'environnement.

Il faut noter que la non-toxicité est le point faible des molécules inhibitrices actuellement utilisées [49].

I.3.3.3. Conditions d'utilisation des inhibiteurs

Un inhibiteur peut être utilisé comme unique moyen de protection :

- Soit comme protection permanente ; l'inhibiteur permet alors l'utilisation de matériaux métalliques dans des conditions satisfaisantes de résistance à la corrosion.
- Soit comme protection temporaire pendant une période où la pièce ou l'installation est particulièrement sensible à la corrosion (stockage, décapage, nettoyage), ou encore lorsque la pièce est soumise à des usinages très sévères comme le perçage, taraudage, forage, filetage, ... [50].

I.3.3.4. Domaines d'application

Les inhibiteurs ont plusieurs domaines traditionnels d'application :

- Le traitement des eaux (eaux sanitaires, eaux de procédés industriels, eaux de chaudières, etc.);

- L'industrie du pétrole : forage, extraction, raffinage, stockage et transport ; à tous les stades de cette industrie, l'utilisation d'inhibiteur de corrosion est primordiale pour la sauvegarde des installations.
- Les peintures ou les inhibiteurs de corrosion sont des additifs assurant la protection anticorrosion des métaux [51].

I.3.3.5. Classification des inhibiteurs de corrosion

Les inhibiteurs de corrosion sont classés habituellement en fonction de leurs domaines d'application, de leur composition chimique, de leur mode d'action, ou de la nature électrochimique du processus [52].

I.3.3.5.1. Classification selon le domaine d'application

Dans la classification relative au domaine d'application, nous pouvons distinguer les inhibiteurs de corrosion utilisés en milieu aqueux, organiques ou gazeux. Ceux utilisés en milieux aqueux sont choisis en fonction du pH du milieu ; en milieu acide, ils sont utilisés afin d'éviter l'attaque chimique de l'acier lors d'une opération de décapage ou de détartrage et en milieu neutre/alcalin, ils sont souvent utilisés pour protéger les conduites des circuits de refroidissement.

Les inhibiteurs utilisés en milieu organique sont incorporés dans les lubrifiants pour moteurs, dans l'essence ou dans les peintures. Les inhibiteurs en phase gazeuse sont employés pour les objets métalliques pendant leur transport et stockage. Pour cela, des composés organiques ayant une pression de vapeur élevée sont souvent utilisés [53].

I.3.3.5.2. Classification selon la composition chimique

➤ Les inhibiteurs organiques :

Les molécules organiques utilisées comme inhibiteurs contiennent une partie non polaire, hydrophobe et relativement volumineuse, constituée principalement d'atomes de carbone et d'hydrogène, et une partie polaire, hydrophile, constituée d'un ou plusieurs groupes fonctionnels, tels -NH₂ (amine), -SH (mercapto), -OH (hydroxyle), -COOH (carboxyle), -PO₄ (phosphate) et leurs dérivés. La molécule se lie à la surface par son groupe fonctionnel, alors que sa partie non polaire, plus volumineuse, bloque partiellement la surface active. Ce phénomène ne se limite d'ailleurs pas aux solutions acides, il s'applique à tous les inhibiteurs organiques [54].

➤ **Les inhibiteurs inorganiques (minéraux)**

Sont largement utilisés dans les milieux neutres ou alcalins et rarement dans les milieux acides, leur utilisation est souvent limitée à cause de leur toxicité. Ils se divisent en deux types :

- **Anioniques** : les oxo-anions de type (MO_4X^-) tels que les chromates, molybdates, tungstates, vanadates.
- **Cationiques** : les cations sont essentiellement Ca^{2+} et Zn^{2+} et ceux qui forment des sels insolubles avec certains anions tels que l'hydroxyle OH^- [55].

I.3.3.5.3. Classification selon leur mode d'action

Dans la classification liée au mécanisme réactionnel mis en jeu en fonction de leur mode d'action, on peut distinguer différents types d'inhibiteurs [56] :

- Par passivation
- Par adsorption
- Par précipitation

➤ **Inhibiteurs d'adsorption**

L'adsorption est un phénomène de surface universel, car toute surface est constituée d'atomes n'ayant pas toutes leurs liaisons chimiques satisfaites. Cette surface a donc tendance à combler ce manque en captant les atomes et molécules se trouvant à proximité [57]. On peut distinguer deux types d'adsorption :

- Adsorption physique (Physisorption)
- Adsorption chimique (Chimisorption)

➤ **Inhibiteurs passivant**

La passivation est le fait de rendre un métal non-réactif suite à l'application d'un revêtement au moyen d'une modification plus spécialisée de sa surface. Certains inhibiteurs oxydants agissent en provoquant une passivation spontanée du métal, ce qui diminue la vitesse de corrosion. La passivation peut être favorisée également par des agents tampons qui augmentent le pH près de la surface métallique [58].

➤ **Inhibiteurs par précipitation**

Certains inhibiteurs de corrosion réagissent avec les ions ou les composés organiques, contenus dans le milieu corrosif, pour former respectivement des sels ou des complexes organiques. Ces composés se précipitent sur la surface de métal formant un film protecteur

superficiel. Ce film réduit l'accessibilité de la surface de métal vis-à-vis l'agent corrosif, en plus il bloque la dissolution anodique [59].

I.3.3.5.4. Classification selon la nature électrochimique du processus

Dans la classification relative au mécanisme d'action électrochimique, on peut distinguer les inhibiteurs anodiques, cathodiques ou mixtes.

➤ Inhibiteurs anodiques

Sont les inhibiteurs qui forment une couche mince sur la surface du métal, Ils comportent les agents oxydants tels que les chromates et les nitrites, ou d'autres sels comme les hydroxydes, les silicates, les borates, les phosphates, les carbonates, les benzoates. Ces inhibiteurs diminuent la densité de courant de dissolution du métal et déplacent le potentiel de corrosion dans le sens positif [46].

L'inhibiteur anodique s'adsorbe préférentiellement sur les sites anodiques de dissolution du métal (figure (I.15)).

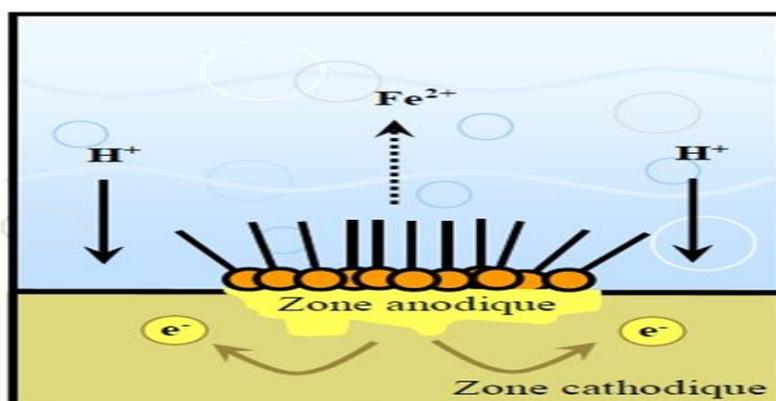


Figure I.15: Formation des couches barrières anodiques interférant avec les réactions électrochimiques, dans le cas d'une étude en milieu acide [60].

➤ Inhibiteurs cathodiques

Les inhibiteurs cathodiques, diminuent la densité de courant de réduction du solvant et déplacent le potentiel de corrosion dans le sens négatif.

Les inhibiteurs cathodiques sont considérés comme plus sûrs que les inhibiteurs anodiques car ils ne risquent pas de favoriser la corrosion localisée [20].

L'inhibiteur cathodique s'adsorbe préférentiellement sur les sites cathodiques de réduction d'un oxydant contenu dans la solution (figure (I.16.)).

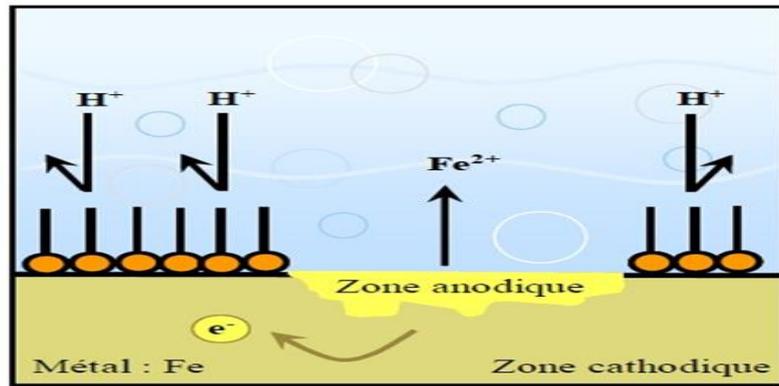


Figure I.16: Formation des couches barrières cathodiques interférant avec les réactions électrochimiques, dans le cas d'une étude en milieu acide [60].

➤ Inhibiteurs mixtes

Les inhibiteurs mixtes agissent à la fois sur les processus anodiques et cathodiques. Ces inhibiteurs diminuent la vitesse des deux réactions partielles, mais modifient peu le potentiel de corrosion [61].

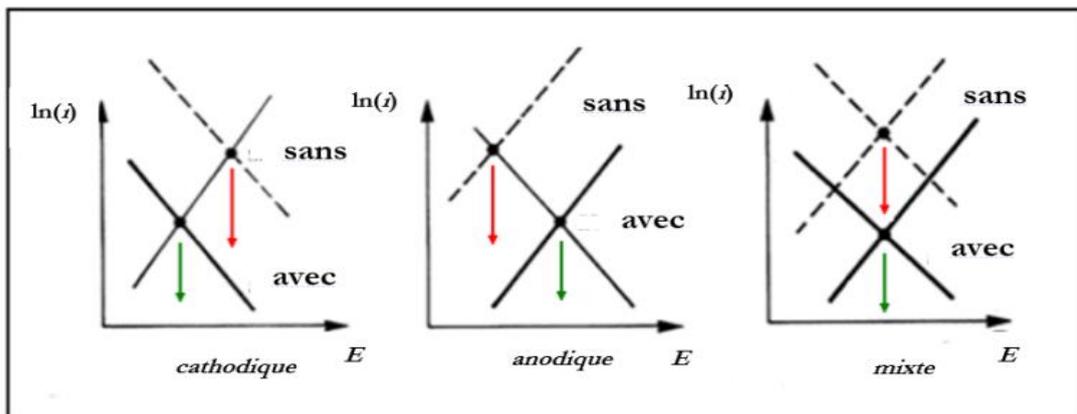


Figure I.17: Diagrammes d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur de corrosion [61].

I.4. Inhibiteurs verts

En générales, les inhibiteurs utilisés pour protéger les métaux contre la corrosion, où la plupart des inhibiteurs sont toxique ou cancérrogène, 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'autre structures spéciales [62].

Les produits naturels sont une bonne source d'inhibiteurs de corrosion écologiques, la plupart de leurs extraits contenant les éléments nécessaires tels que O, C, N et S, qui sont actifs dans les composés organiques, facilitant l'adsorption de ces composés sur des métaux ou des alliages pour former un film qui protège la surface et empêche la corrosion.

Les inhibiteurs verts agissent lorsqu'ils sont ajoutés à de très faibles concentrations pour traiter la surface de métaux ou d'alliages dans un environnement corrosif. Les extraits de plantes sont réputés être des composés chimiques de synthèse naturelle riches qui affectent le taux de corrosion par adsorption d'espèces efficaces sur des surfaces métalliques lorsqu'ils sont ajoutés à de nombreux systèmes industriels [63].

I.5. *Artemisia Herba Alba (AHA)*

L'*Artemisia Herba Alba* « Armoise blanche », connue sous le nom de 'Chih', est une plante médicinale aromatique utilisée depuis longtemps dans la médecine traditionnelle algérienne.

Le genre *AHA* appartient à la famille des Astéracées : c'est l'un des genres le plus répandu et le plus étudié de cette famille ; il contient un nombre variable d'espèces allant jusqu'à 400 espèces.

Il a été rapporté que le genre *AHA* est riche en métabolites secondaires tels que les flavonoïdes, les acides cafféoylquinic, les coumarines, les huiles essentielles, les stérols et les acétylènes.

Les espèces qui appartiennent au genre *AHA* possèdent des propriétés thérapeutiques, elles sont non seulement utilisées dans la médecine traditionnelle, mais aussi dans l'industrie alimentaire et pharmaceutique [64].

I.5.1. Origine

Artemisia est le nom de guerre des armoises. Il provient de celui de la déesse grecque de la chasse Artémis, la diane des romains, patronne des vierges à cause des bienfaits de cette herbe. *Herba Alba* signifie herbe blanche.

I.5.2. Répartition géographique

- **Local** : Les Hauts Plateaux et le Sahara Septentrional
- **Régional** : Afrique du Nord
- **Mondial** : Espagne, Afrique du Nord et Asie Occidentale

AHA est une plante spontanée très répandue en Afrique du nord et au moyen orient, elle affectionne les climats secs et chauds, et existe sous forme de peuplements importants dans les zones désertiques [65].

En Algérie, *AHA* couvre près de six millions d'hectares dans les steppes, elle se présente sous forme de buissons blancs, laineux et espacés [66].

Le genre *AHA* (les armoises) regroupe des herbacées, des arbrisseaux et des arbustes, généralement aromatiques, densément tomenteux, pubescents ou glabres, de la famille des Astéracées.



(A)

(B)

Figure I.18 : *Artemisia Herba Alba* : (A) la plante au début de la saison de floraison, (B) la plante à la fin de la saison de floraison [67].

I.5.3. Description botanique

L'espèce *AHA* est une plante herbacée, vivace, de couleur verdâtre-argenté, de 30 - 60 cm de long.

Elle présente une odeur caractéristique d'huile de thymol et un goût amer d'où son caractère astringent [68].

I.5.3.1. Partie aérienne

- **Les tiges** : rigides et dressées, très feuillées avec une couche épaisse, la touffe des tiges est plus importante selon la pluviométrie ;
- **Les feuilles** : sont petites, sessiles, pubescentes et à aspect argenté, divisées en languettes fines, blanches et laineuses.
- **Les fleurs** : sont groupées en grappes, à capitules très petites et ovoïdes de 1,5 à 3 mm de diamètre, de couleur jaune à rougeâtre [68].

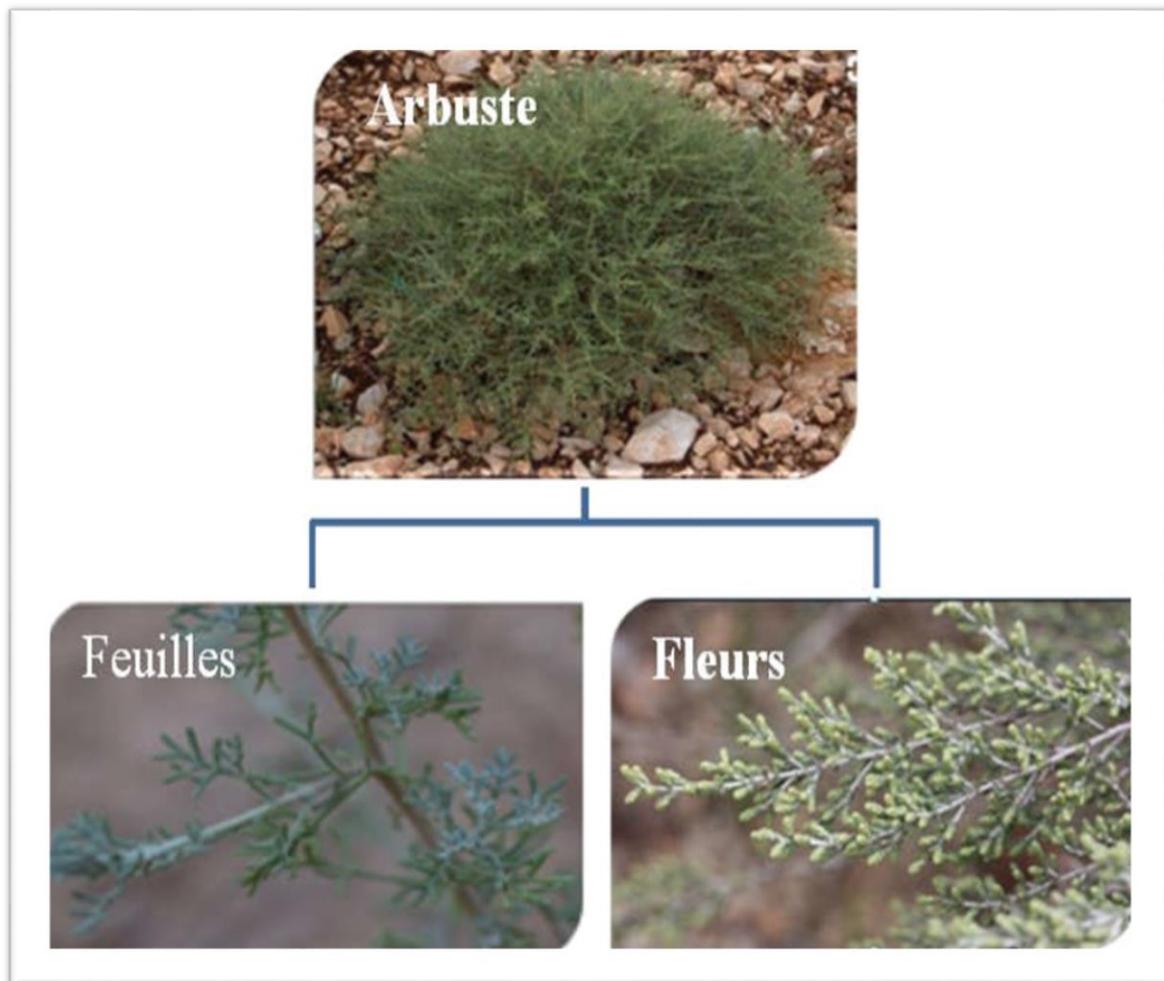


Figure I.19 : La plante *Artemisia Herba Alba*

I.5.3.2. Partie souterraine ou racine

Elle se présente sous forme d'une racine principale, ligneuse et épaisse, bien distincte des racines secondaires et qui s'enfonce dans le sol tel un pivot. La racine pénètre profondément jusqu'à 40 à 50 centimètres et ne se ramifie qu'à cette profondeur [68].

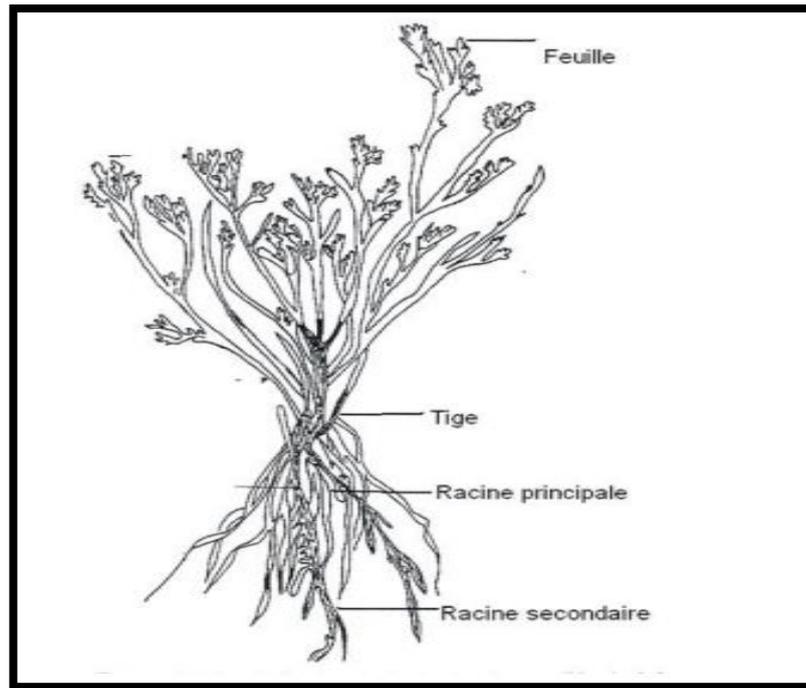


Figure I.20: Morphologie générale d'*Artemisia* [66].

I.5.4. Classification scientifique

Règne	Plante
Embranchement	Spermaphytes
Sous Embranchement	Angiospermes
Classe	Magnoliopsida
Ordre	Asterales
Famille	Asteraceae
Genre	Artémisia
Espèce	Artemisia Herba Alba
Nom vernaculaire	Chih

I.5.5. Composition chimique

L'armoise blanche est la principale espèce végétale pâturée surtout au printemps et en été. Elle constitue une source très importante pour le cheptel. La biomasse de cette plante constitue un aliment de substitution pour l'élevage du bétail en période de disette.

La matière sèche apporte entre 6 et 11 % de matière protéique brute dont 72% est constitué d'acides aminés. En effet la valeur énergétique de l'armoise herbe blanche, très faible en hiver (0,2 à 0,4 UF/kg MS), augmente rapidement au printemps (0,92 UF/kg MS) pour diminuer de nouveau en été (0,6 UF/kg MS). En automne, les pluies de septembre provoquent une nouvelle période de croissance et la valeur énergétique augmente de nouveau (0,8 UF/kg MS) [66].

Cette plante présente un équilibre harmonieux entre le calcium (0.5%) et le phosphore (0.07%). Elle est assez riche en cellulose (26,73%) [68].

D'après KHAFAGY et al en 1971, plusieurs métabolites secondaires ont été isolés de l'*Artemisia Herba Alba*, peut être les plus importants sont les sesquiterpènes lactones. D'autres études ont été portées sur les flavonoïdes et les huiles essentielles.

I.5.5.1. Composés polyphénoliques

La plante est riche en composés polyphénoliques, qui sont les meilleurs antioxydants, flavonoïdes et tanins. Le terme flavonoïde désigne une très large gamme des composés naturels appartenant à la famille des polyphénols, ils sont considérés comme des pigments quasiment universels des végétaux, souvent responsables de la coloration des fleurs, des fruits et parfois des feuilles. Les principaux flavonoïdes isolés à partir de l'Armoise herbe blanche sont : la hispiduline, la cirsimaritrine. Des flavones glycosidiques comme la 3- rutinoside, quercétine et isovitexine sont aussi mis en évidence [68].

I.5.5.2. Les sesquiterpènes lactones

Les sesquiterpènes lactones sont parmi les produits naturels trouvés dans les espèces d'*Artemisia* et sont en grande partie responsable de l'importance de ces plantes en médecine et en pharmacie. Plusieurs types de sesquiterpènes lactones ont été trouvés dans les parties aériennes de *AHA*: des eudesmanolides, germacranolides, guainalides, et xanthonolides [68].

I.5.5.3. Les huiles essentielles

Les plantes de la famille des Astéracées, auquel appartient l'*AHA*, ont fait l'objet de plusieurs études phytochimiques par intérêt économique surtout pour leurs huiles essentielles. Généralement, l'huile a été largement rapporté à contenir des composés de monoterpénoïdes, principalement oxygéné, telle que le 1,8-cinéole, chrysanthenone, chrysanthenol, $\alpha\beta$ -thujones, et le camphre comme principales composantes [68].

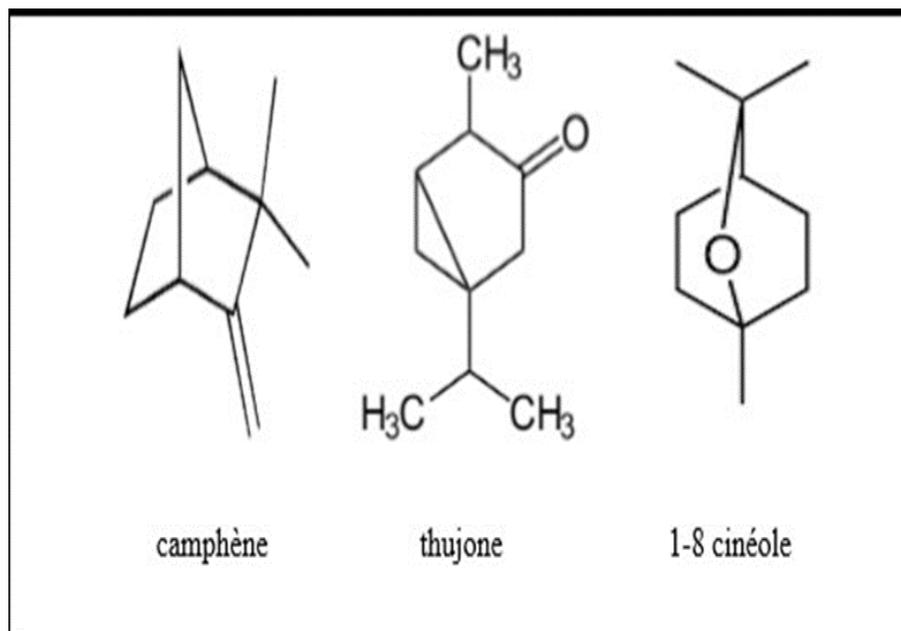


Figure I.21 : Structures chimiques de quelques composés rencontrés dans les huiles essentielles [66].

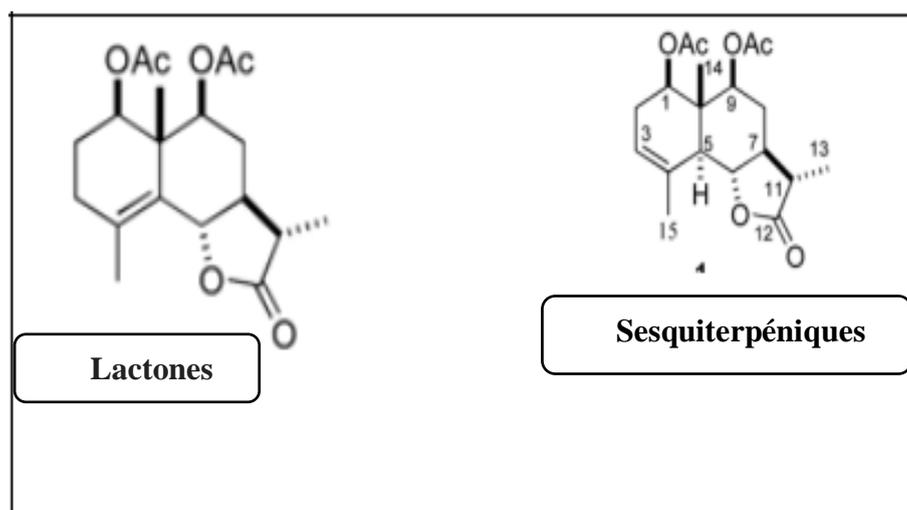


Figure I.22 : Exemples de composés isolés à partir de l' AHA [69].

I.5.6. Usage de la plante

Les applications biologiques et pharmacologiques des espèces de la famille des Asteraceae sont le résultat de leur importance dans la médecine traditionnelle et le fruit de plusieurs études chimiques et pharmacologiques.

La majorité des applications biologiques et thérapeutiques des espèces de la famille des Asteraceae concernent des effets antimicrobiens, antifongique, etc.

➤ Usage phyto-thérapeutique

L'armoise blanche est une véritable panacée. Recommandé dans les troubles gastriques, le décocté des parties aériennes sont efficaces dans les cas de ballonnement intestinaux, de pyrosis, d'aérophagie et de constipation, soit essentiellement en cas des maladies du tractus digestif.

Depuis longtemps, l'*AHA* a été reconnue par les populations pastorales et nomades pour ses vertus purgatives. On l'utilise notamment comme vermifuge chez les ovins. En Irak également, l'armoise préparée avec le thé constitue l'une des formes d'automédication contre le diabète.

Les tunisiens l'utilise aussi comme un traitement antidiabétique. Elle est conseillée pour les affections du foie; le décocté de feuilles est bu à jeun suivi d'un verre de l'huile.

AHA est utilisée comme anti diarrhée, contre les crampes abdominales, et pour curatif des blessures externes. Elle est utilisée contre le diabète et l'ictère. Elle est recommandée pour des désordres neurologiques.

➤ Usage alimentaire

En alimentation, l'*AHA* est considéré comme l'arôme de certaines boissons comme le thé ou le café. Néanmoins, son usage dans l'industrie alimentaire reste très limité à cause de la toxicité de la bêta thujone dont le taux ne doit pas dépasser 5mg/kg [69].

I.5.7. Toxicité de la plante

L'armoise blanche est peu broutée au printemps, elle est comme légèrement toxique à cette époque.

L'armoise à forte dose est abortive, neurotoxique et hémorragique la tuyone constitue la substance toxique et bioactive dans l'armoise et sa forme la plus toxique est l'alpha-tuyone. Elle a des effets convulsivants.

Elle est interdite aux femmes enceintes car elle est toxique à dose élevée on doit respecter les doses. Son pollen provoque des diarrhées [64].

I.6. Conclusion

La protection contre la corrosion doit être considérée pour éviter de nombreux problèmes et garantir une certaine durée de vie. La solution adoptée doit être compatible avec les prescriptions concernant la protection de l'environnement et permettre le recyclage ou l'élimination des différents composants à la fin de leur utilisation. Plusieurs méthodes

sont disponibles pour la protection contre la corrosion. L'utilisation des inhibiteurs est l'une des méthodes utilisées pour la protection des métaux contre la corrosion.

En particulier, pour la protection des métaux et alliages ferreux, les inhibiteurs à base d'extraits de plantes présentent des pouvoirs protecteurs intéressants et sont actuellement utilisés dans le domaine de recherche, notamment en raison de leur non-toxicité vis-à-vis de l'environnement.

C'est pourquoi les travaux rapportés dans ce mémoire portent sur l'utilisation de l'extrait brut de la plante de l'*AHA*.

Références bibliographiques

- [1] H. Bakouri « Etude d'inhibition de la corrosion de l'acier doux au carbone au milieu acide orthophosphorique par un antibiotique organique », Mémoire de Master, Université de Oujda, (2000).
- [2] D.Daoud, «Etude du pouvoir complexant et inhibiteur de nouveaux ligands bases de schiff », Thèse de Doctorat, Université de Sétif, (2016).
- [3] 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).
- [4] C. A. Vanscoy, « The Use of Volatile Corrosion Inhibitors for the Protection of Steel in Storage or Transit », Porcelain Enamel Institute Technical Forum, 3 (2009) 268.
- [5] C.Chausin et G. Hally, « Métallurgie alliage métallique tome 1 », Ed. Dunod, (1976).
- [6] S. Bensaada, « Cours de Corrosion », Université de Biskra, (2016).
- [7] M. Allali, N. Hadj Abderrahmane, « Synthèse bibliographique sur les inhibiteurs pour lutter contre la corrosion électrochimique », Mémoire de Master, Université d'Ouargla, (2020).
- [8] M. Bouteldja, « Contribution à l'étude de l'utilisation des inhibiteurs dans la lutte contre la corrosion », Mémoire de Master, Université d'Ouargla, (2016).
- [9] S. Bensaada, T.M. Bouziane, F. Mohammedi, B. Zergui, A. Bouras, J.14 (2013) 49.
- [10] R. Habchi, «La synthèse d'un dérivé d'aniline et l'étude de son efficacité inhibitrice sur corrosion d'X42 dans l'eau d'albien», Mémoire de Master, Université de Biskra, (2010).
- [11] A. Benali, « Synthèse et caractérisation Electrochimique du polypyrrole : application comme primaire », Mémoire de Magister, Université de Boumerdes, (2009).
- [12] S. Marouf, F. Lakehal, and A. Tabchouche, « Etude de l'inhibition de la corrosion d'un acier au carbone par 1.2 diaminophenyl et 1.2 diaminopropane », Mémoire de Master, Université d'Ouargla (2018).
- [13] T. Lanez, « cours de corrosion », Université d'Ouargla, (2010).
- [14] A. Nadia, B. Aicha, « Corrosion dans les installations pétrolières de surface causes, effets et remèdes », Mémoire de Master, Université d'Adrar, (2019).
- [15] F. Dabosi, G.Béranger, B.Baroux, « Corrosion localisée » Ed. Physique, (1994).
- [16] J. Riskin, A. Khentov, « Electrocorrosion and Protection of Metals », Ed.2nd, (2019).
- [17] A. Nadji, «Synthèse et étude de l'effet inhibiteur contre la corrosion d'un acier au carbone A283 Gr-C par une molécule organique », Mémoire de Master, Université de Tébessa, (2020).

- [18] A.Oulabbas, «Effet des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers dans deux milieux acides », Thèse de Doctorat, Université de Badji Mokhtar, (2019).
- [19] O.Vololonirina, « Contribution à l'évaluation des capacités des glycérophosphates pour la maintenance dans le béton armé », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, (2011).
- [20] T. Hanene, k. Boutheyna, « Etude l'efficacité inhibitrice de substances vertes sur la corrosion de l'acier au carbone dans un milieu acide », Mémoire de Master, Université de Tébessa, (2022).
- [21] B.Djeghoubbi, Y.Harbouche, «Technique d'évaluation des inhibiteurs de corrosion par CO₂ dans le champ Hamra », Mémoire de Master, Université d'Ouargla, (2019).
- [22] O. Amar, M. Mohamed Smail, « Effet inhibiteur de l'extrait de feuilles d'oliviers sauvages sur la corrosion de l'acier doux : modélisation par les plans d'expériences», Mémoire de Master, École Nationale Polytechnique, El-Harache, (2021).
- [23] A. Habchi, « Etude de l'effet de la température sur la corrosion de l'acier xc52 en présence du sulfarlem et leur sel correspondent dans un milieu H₂SO₄ 20% », Mémoire Master, Université d'Ouargla, (2013).
- [24] C. Defontaine, « Mécanismes de corrosion, systèmes de protection et vieillissement accéléré », Journée thématique, (2011).
- [25] 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 de Skikda, (2018).
- [26] C.Abdelmalek, «Etude de l'inhibiteur contre la corrosion par un extrait de la plante pituranthos scoparius », Mémoire de Master, Université de Tébessa, (2019).
- [27] A. Col, M. Colombié, « Phénomènes de Corrosion, les différentes formes de corrosion aqueuse », Ed. Dunod, (2010).
- [28] 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», J. of materials processing technology,53 (1995) 491.
- [29] J. Leconte, « Protection contre la corrosion », Techniques de l'Ingénieur, (1981).
- [30] R. Baboian, « NACE Corrosion Engineer's Reference Book », NACE International the corrosion society, Book, Houston, (2002).
- [31] A. Bautista, « Filiform corrosion in polymer-coated metals », 28 (1996) 49.
- [32] G.Béranger et H.Mazille, « Corrosion des métaux et alliages – mécanismes et phénomènes », Ed. Hermès science publications, (2002).

- [33] L. N. Putilova, S. A. Balezin, V. P. Barranki « Metallic corrosion inhibitors », Pergamon Press, New-York, Book, (1960) 196.
- [34] I. A. Ammar, F. M. El Khorafi, *Werkst Corrosion*, 24 (1973) 702.
- [35] 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, (2005).
- [36] D.D. Kane, S. Srinivasan, « Experience survey on corrosion monitoring on oil and gas pipelines », *corr. ocean USA*, Houston, (1998) 83.
- [37] N. Boudieb, « Evaluation des performances des peintures par des techniques Electrochimique », Mémoire de Magister, Université de Boumerdes, (2008).
- [38] P. Olav Gartland, « Choosing the right positions for corrosion monitoring on oil and gas pipelines », *Corr ocean USA*, Houston, (1998) 83.
- [39] R. Baboian, « NACE Corrosion Engineer's Reference Book », Ed. NACE International the corrosion society, Houston, (2002) 969.
- [40] L. Jaubert, « Etude de la corrosion uniforme d'aciers non alliés et inoxydables : utilisation conjointe de l'émission acoustique et des techniques électrochimiques » Thèse de Doctorat, Université de Lyon, (2004).
- [41] S. Ammar, Ghedier Brahim Noureddine, « Effets de la corrosion sur les installations gaziers et leurs méthodes de protections ». Mémoire de Master, Université d'Ouargla, (2017).
- [42] Natacha, P. Malou, « Etude de la corrosion et maintenance des installations pétrolières de Shell », Mémoire de Master, Sénégal (2003).
- [43] H. Essom, « Corrosion et Protection », Publication de l'université de Annaba, (2010).
- [44] Corrosion des métaux, ENSPM formation industrie, France (2005).
- [45] L. Ghilani, « Tenue à la corrosion d'un dépôt de chrome électrolytique sur un substrat en acier XC45 », Thèse de Magister, Université de Batna, (2008).
- [46] S. Haimer, « La synthèse d'un inhibiteur de corrosion et l'étude de son effet sur l'acier X42 dans un milieu aqueux », Mémoire de master, Université de Biskra, (2019).
- [47] S. Chakri, « Compréhension des mécanismes d'inhibition de la corrosion des armatures métalliques des bétons par des molécules d'origine biologique », Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, (2015).
- [48] P. Bommersbach, « Evolution des propriétés d'un film inhibiteur de corrosion sous l'influence de la température et des conditions hydrodynamiques », Thèse de Doctorat. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (2005).
- [49] 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 M et NaCl 3% ». Mémoire de Magister, Université de Bejaia, (2010).

[50] E. Luminita Din-stirbu, « Thèse Comportement à la corrosion des alliages d'aluminium Utilises dans l'industrie automobile pour la fabrication de radiateur de chauffage », Thèse de Doctorat, Université de Lyon, (2005).

[51] A. Aliouali, « Etude du comportement à la corrosion de l'aluminium dans différents milieux »Thèse de doctorat, Université de Batna 2, (2017).

[52] C. Lila, « Etude de la corrosion d'un acier au carbone et de son inhibition par un compose réducteur de frottement hydrodynamique. D'un milieuna Cla3. », Thèse de Doctorat, Université de Béjaia, (2001).

[53] D. Landolt, « corrosion et chimie de la surface des métaux », Presse polytechniques et Universitaires Romandes, première édition, (1993).

[54] D. Landolt., « Corrosion et chimie de surfaces des métaux ». Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 12 (1997).

[55] C. Fiaud, C. Lemaitre et N.Pébère, « Corrosion et anticorrosion », Ed. Lavoisier, (2002).

[56] H.Yousfi,S.Bourahla, «Etude des inhibiteurs de corrosion pour protéger l'acier ordinaire en milieu agressif »,Mémoire de Master ,Université de Bordj Bou Arreridj, (2020).

[57] F. Mansfeld, et all, «Inhibition in Neutral, Aerated Media », J. of Electrochemical Society, 32 (1985)142.

[58] A.R. Mendoza, « Corrosion of Reinforcing Steel in Loaded Cracked Concrete exposed to deicing Salts», These de Doctorat, Université de Waterloo, (2000).

[59] N. Branko. Corrosion Engineering: Principles and Solved Problems. Elsevier. (2015).

[60] K. Zahi et N. Zahouani, « Etude de l'effet de l'inhibition de l'hydrolat de la plante « Pituranthos Chloranthus » sur la corrosion de l'acier X70 en milieu acide chlorhydrique (HCl) 1M », Thèse de Doctorat, université de Ghardaia, (2019).

[61] J. Benrd, A. Michel, J. Philibert, J. Talbort, Métallurgie générale, Ed. Masson (1969).

[62] D.Benmessaoud Left, M.Zertoubi, A.Irhzo, M.Azzi, J. Mater Environ Science, (2013).

[63] L. Hamadi « Application des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers en milieux agressifs », Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, (2020).

[64] K.Naima, «Etude du pouvoir antibactérien d'Atemisia Herba Alba », Mémoire de Master Université de Mostaganem, (2018).

[65] M. Hurabielle, and J. Eberle, « Flavonoids of Artemisia campestris ssp. glutinosa. Planta Med », (1982).

[66] M. Eloukili, « Valeur nutritive de l'Armoise Blanche (Artemisia Herba Alba) comparée à

l'unité fourragère de l'orge », Mémoire de Master, Université de Tlemcen, (2013).

[67] L. Messai, « Etude phytochimique d'une plante medicinale de l'Est algérien (Artemisia Herba Alba) », Thèse de Doctorat, Université de Constantine, (2011).

[68] T. Salah Eddine, « Etude de certaines activités des huiles essentielles de Artemisia Herba Alba Asso et son effet sur les performances chez le poulet de chair », Mémoire de Master, Université de Biskra, (2019).

[69] D. Houaria, «Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier au carbone (XC38) par l'extrait aqueux de plantes sahariennes dans le milieu acide chlorhydrique 1M »,Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen,(2019).

Chapitre II
Techniques d'étude et conditions
expérimentales

Chapitre II

Techniques d'étude et conditions expérimentales

La complexité des phénomènes de corrosion nécessite l'utilisation d'un très grand nombre de méthodes expérimentales pour estimer le taux de corrosion et la nature des mécanismes qui interviennent au cours de la destruction d'un métal. En plus des méthodes gravimétriques qui reposent sur la détermination de la perte de masse au cours du temps, et qui reflètent mieux le phénomène de corrosion tel qu'il est dans l'état réel, les méthodes électrochimiques présentant une sensibilité et une précision remarquables, sont aussi d'une utilisation courante voir indispensable pour l'étude des phénomènes liés à la corrosion.

Ce deuxième chapitre a pour but d'introduire les méthodes expérimentales utilisées dans le cadre de cette étude. Elles sont présentées de manière à souligner leur intérêt et leur pertinence dans l'étude des inhibiteurs.

II.1. Technique d'étude

Il existe plusieurs méthodes d'analyse et d'évaluation de la corrosion, parmi ces méthodes il y'a qui sont électrochimiques et d'autres qui sont non électrochimiques, parmi ces méthodes nous avons utilisé:

II.1.1. La gravimétrie

C'est une méthode d'analyse chimique quantitative effectuée en déterminant par pesée, la masse du métal après et avant la corrosion [1], cette méthode présente l'avantage d'être simple, non coûteuse et ne nécessite pas d'un instrument important, elle nécessite seulement une balance analytique, bien qu'elle représente une méthode directe pour la détermination de la vitesse de corrosion et en conséquence l'efficacité inhibitrice dans le cas de l'utilisation des inhibiteurs.

Son principe repose sur la mesure de la perte de poids (Δm) subie par un échantillon de surface(S), pendant le temps (t) d'immersion dans une solution corrosive maintenue à température constante. La vitesse de corrosion est donnée par la relation suivante :

$$V = \frac{\Delta m}{ts} \quad (\text{mg.h}^{-1}.\text{cm}^{-2}) \quad (\text{II.1})$$

$$\Delta m = m_2 - m_1 \quad (\text{II.2})$$

V : La vitesse de corrosion exprimé en $(\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2})$.

Δm : La perte en masse (exprimée en mg).

t : Le temps d'immersion (exprimé en heure).

S : La surface (exprimée en cm^2).

m_1 et m_2 masses de l'échantillon avant et après l'essai en mg.

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

$$EI (\%) = \left(\frac{V - V_{inh}}{V} \right) \times 100 \quad (\text{II.3})$$

Où V et V_{inh} sont respectivement les valeurs de la vitesse de corrosion en absence et en présence de l'inhibiteur.

II.1.2. Techniques électrochimiques

Les techniques électrochimiques sont des méthodes d'étude essentielles de la corrosion, elles sont utilisées pour prévoir la durée de vie des composants métalliques utilisés dans les industries chimiques et de la construction. Elles mesurent les taux de corrosion, le pouvoir oxydant de l'environnement et évaluent l'efficacité des stratégies de protection contre la corrosion [2].

L'étude électrochimique du comportement des aciers dans un milieu corrosif en absence ou en présence d'inhibiteur, est basée essentiellement sur les tracés des courbes de polarisation $i = f(E)$ et les droites de Tafel.

Les méthodes électrochimiques peuvent être classées selon deux groupes distincts : les méthodes stationnaires et les méthodes non-stationnaires dites transitoires.

II.1.2.1. Méthodes stationnaires

II.1.2.1.1. Suivi du potentiel en circuit ouvert

Le potentiel à courant nul également désigné par le potentiel spontané, potentiel d'abandon, de repos ou encore libre, le potentiel en circuit ouvert (OCP : Open Circuit Potential) est la grandeur électrochimique mesurable la plus immédiate. Cette technique simple, qui consiste à suivre le potentiel en fonction du temps d'immersion dans le milieu.

C'est la seule mesure qui n'entraîne absolument aucune perturbation de l'état du système étudié. Ce potentiel est mesuré par rapport à un potentiel de référence, dans ce cas celui de l'électrode au calomel saturée (2 électrodes sont nécessaires seulement). Le suivi de

cette grandeur apporte des informations préliminaires sur la nature des processus se produisant à l'interface métal/électrolyte (corrosion, passivation...) [3].

II.1.2.1.2. Courbes de polarisation

Les courbes de polarisation de l'interface métal-solution sont une caractéristique fondamentale de la cinétique électrochimique, mais ne rendent compte que de l'étape la plus lente du processus global (transport de matière, adsorption des espèces sur l'électrode, ...) à l'interface électrochimique.

Cette méthode permet de déterminer d'une façon précise les paramètres électrochimiques d'un métal au contact d'un électrolyte à savoir : la densité de courant (I_{corr}), le potentiel de corrosion (E_{corr}), les pentes de Tafel (b_a et b_c) ainsi que la résistance de polarisation (R_p). Pour déterminer expérimentalement ces paramètres, 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.1) [4].

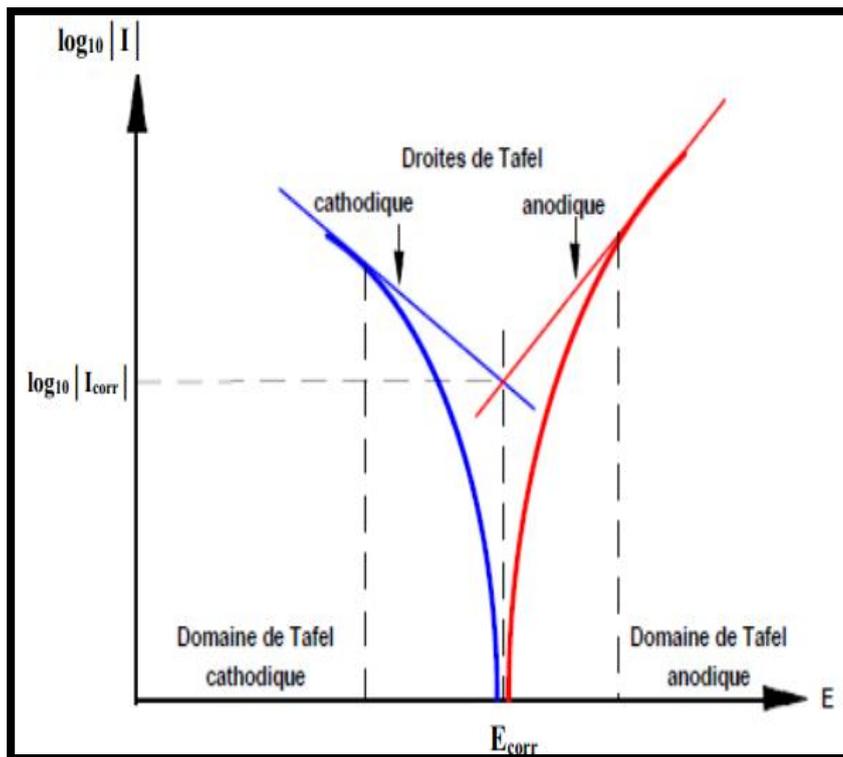


Figure II.1 : Détermination des paramètres électrochimique à partir des droites de Tafel.

II.1.2.2. Méthode transitoire

La réaction électrochimique est un processus hétérogène, constitué par une séquence de processus physico-chimiques, adsorption, réactions à la surface de l'électrode (transfert de charge) avec éventuellement des réactions chimiques et des étapes physiques comme phénomènes de transport et de transfert. Plusieurs méthodes sont disponibles, elles se différencient les unes des autres par la forme du signal appliqué : une impulsion ou une modulation [5].

II.1.2.2.1. La Spectroscopie d'Impédance Electrochimique (SIE)

La spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) est une technique transitoire, qui permet d'avoir des informations sur les étapes élémentaires du processus électrochimique global, se déroulant à l'interface électrode/électrolyte.

La méthode de spectroscopie d'impédance électrochimique fait appel aux analogies qui existent, entre une réaction électrochimique et un circuit électrique équivalent comportant des résistances et des capacités associées, suivant un schéma électrique qui décrit le comportement de la chaîne électrochimique lorsqu'elle est soumise à une perturbation temporelle de l'intensité ou du potentiel [6].

La méthode d'impédance consiste à mesurer la réponse de l'électrode face à une modulation sinusoïdale de faible amplitude du potentiel en fonction de la fréquence. On peut superposer une telle modulation à un potentiel anodique ou cathodique imposé au potentiel de corrosion. Une alternative consiste à moduler le courant et mesurer le potentiel. On appelle parfois spectroscopie d'impédance. L'analyse de la réponse du système conduit à disséquer les étapes élémentaires intervenant dans le processus électrochimique global [7].

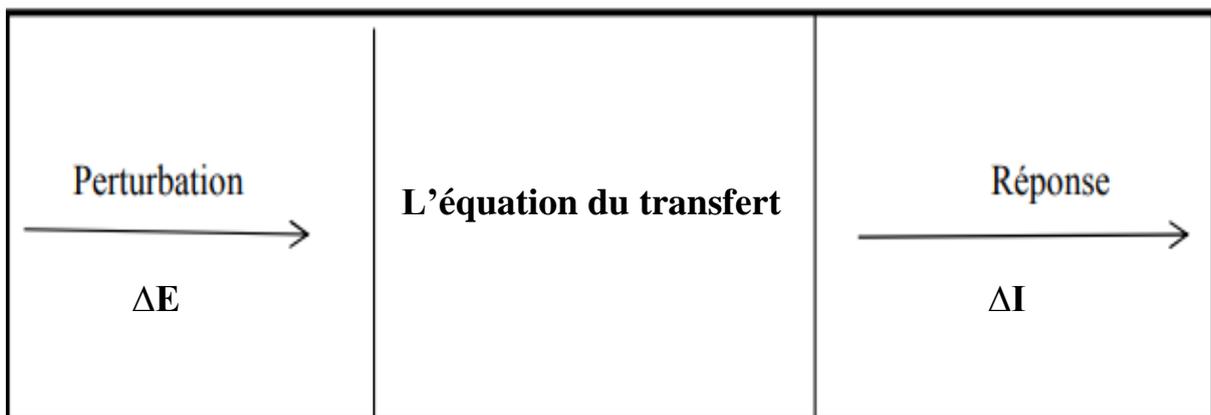


Figure II.2 : Schéma d'une fonction de transfert [7].

- **Principe**

L'objectif de l'analyse d'un spectre d'impédance est d'associer à chacune des étapes observables sur les diagrammes de Nyquist et/ou de Bode des grandeurs physiques représentatives. Ceci peut être abordé par la modélisation du spectre en proposant un circuit électrique équivalent (CEE), composé d'un certain nombre d'éléments simples : les éléments les plus couramment utilisés sont :

- La résistance d'impédance R , uniquement modélisée par sa partie réelle (indépendante de la pulsation).
- La capacité d'impédance.
- L'inductance d'impédance.

L'interprétation des diagrammes par l'intermédiaire de CEE doit respecter deux conditions primordiales :

- Tous les éléments du circuit doivent avoir une signification physique précise, associée aux propriétés physiques du système.
- Le spectre simulé à partir du (CEE) doit être le plus fidèle possible au spectre expérimental et l'erreur ne doit pas présenter de caractère systématique en fonction de la fréquence.

Deux représentations permettent de décrire les variations de cette fonction de transfert en fonction de la fréquence imposée.

- **Représentation dans le plan de Nyquist**

Cette représentation tracée selon le formalisme de Nyquist dans le plan complexe avec la partie imaginaire négative portée au-dessus de l'axe réel comme il est habituel de le faire en électrochimie. Chaque point du diagramme correspond à une fréquence donnée du signal d'entrée (figure II.3 (a)).

- **Représentation dans le plan de Bode**

Dans le plan de Bode, on peut observer les variations du logarithme décimal du module de Zen fonction du logarithme de la fréquence d'une part, le déphasage en fonction du logarithme de la fréquence d'autre part. Il conduit notamment à distinguer les différentes constantes de temps du système électrochimique par la présence de rupture de pente (figure II.5 (b)).

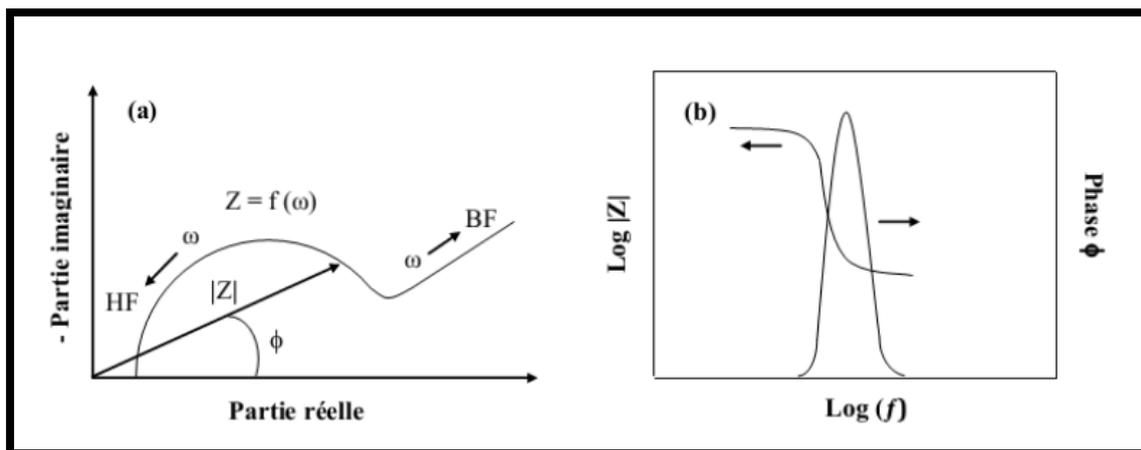


Figure II.3 : Diagramme d'impédance électrochimique en représentation de(a): Nyquist et (b) : Bode [3].

Lors de notre étude, les mesures d'impédances électrochimiques (EIS) ont été effectuées autour du potentiel à circuit ouvert dans la gamme de fréquence allant de 100 kHz à 10 mHz, avec un signal de 10 mV d'amplitude sinusoïdale. L'efficacité de l'inhibition obtenue à partir de la spectroscopie d'impédance électrochimique (EI (%)) est calculée en utilisant la relation suivante [4].

$$EI (\%) = \frac{R_t^{inh} - R_t^0}{R_t^{inh}} \times 10 \quad (II.4)$$

Où :

R_t^{inh} et R_t^0 sont les valeurs de la résistance de transfert de charge en absence et en présence de l'inhibiteur étudié respectivement.

II.2. Conditions expérimentales

II.2.1. L'acier API 5L-X42

L'acier API 5L X42 est un acier au carbone sont utilisés dans la construction des pipelines désigné par sa limite élastique et résistance mécanique. La composition chimique est donnée dans le tableau II.1.

Pipelines API 5L-X42 est utilisé pour le transport du pétrole et du gaz naturel dans l'industrie pétrolière. Ce type de pipelines fabriqué à partir de tube sans soudure laminé à chaud. Les significations de ces dernières désignations sont comme suit :

- API 5L signifie : pipeline.
- X42 signifie : le grade de l'acier. Les autres grades sont, par exemple, A, B, X60, X70.
- Le chiffre 42 signifie : 42000 psi, c'est la limite élastique de l'acier en psi « pound per square inch » (livre par pouce carré).

Tableau II.1 : Composition chimique de l'acier API 5L-X42 en % massique [8].

Eléments	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Nb	Ti	Fe
Teneur	0,23	1,18	0,1	0,01	0,01	0,4	0,4	0,035	0,020	97,59

II.2.2. Cellule électrochimique

Les tests électrochimiques ont été réalisés dans une cellule en verre, à double parois entre lesquelles est maintenue une circulation d'eau thermostatée, qui contient l'électrolyte où sont introduites les trois électrodes : l'électrode de travail (ET), l'électrode de référence (ER) et la contre électrode (CE) appelée aussi l'électrode auxiliaire (Figure II.4). Avant chaque expérience, la cellule est rincée à l'eau distillée et séchée avec du papier absorbant.



Figure II.4 : La cellule électrochimique à trois électrodes.

Nous avons utilisé un système électrochimique à trois électrodes dont les caractéristiques sont les suivantes :

II.2.2.1. Electrode de travail (ET)

Est une plaque rectangulaire en acier API 5L6 - X42. Elle est souvent appelée électrode redox. Ce type d'électrode est le lieu d'une réaction chimique, il constitue le site d'échange entre l'électrode et la substance électro-active. L'électrode utilisée dans la cellule est enrobée dans la résine à l'exception de la surface exposée à tester, égale à 1cm^2 . Le contacte électrique est assuré par une pince métallique.

Avant chaque manipulation, l'électrode de travail est polie à l'aide d'une polisseuse avec du papier abrasif de grade croissant : 120 à 2400. En fin elle est rincée abondamment à l'eau distillée et essuyée avec de papier absorbant.

II.2.2.2. Électrode de référence (ER)

C'est une électrode au calomel saturée en chlorure de potassium, constituée par le système $\text{Hg}_2/\text{HgCl}_2/\text{KCl}$. Cette électrode de référence notée ECS, son potentiel rigoureusement constant, est situé à 0.241 V par rapport à l'électrode normale d'hydrogène dont le potentiel est pris égal à 0. L'électrode de référence est placée très près de l'électrode de travail afin de diminuer les erreurs de mesure, surtout dues aux chutes ohmiques.

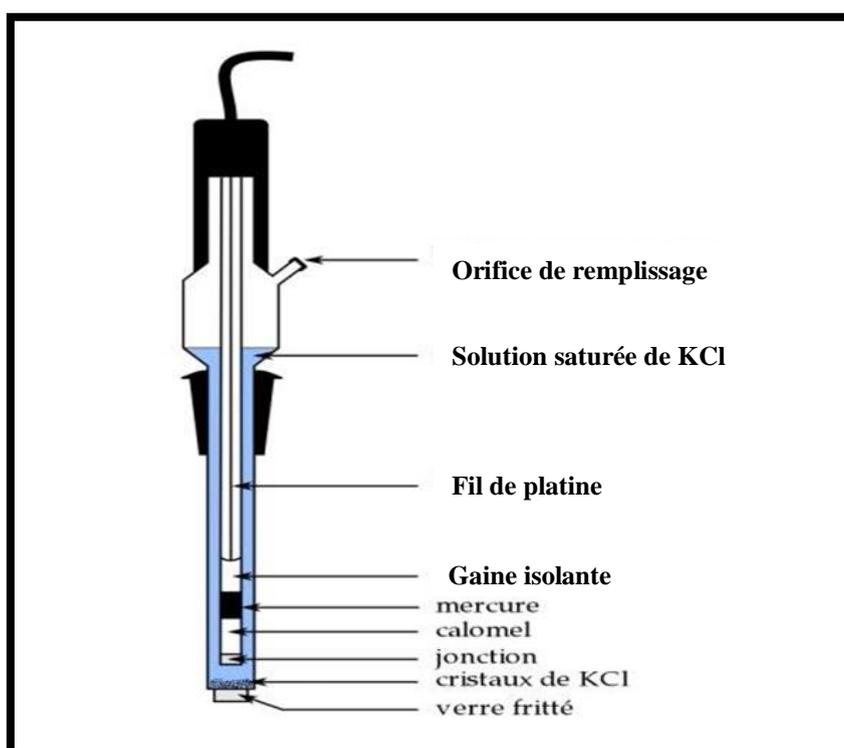


Figure II.5 : *Electrode au calomel saturé.*

II.2.2.3. L'électrode auxiliaire (Contre électrode (CE))

L'électrode auxiliaire est utilisée d'une part pour permettre à un courant de circuler dans la cellule électrochimique sans endommager l'électrode de référence et d'autre part de minimiser les effets de la chute ohmique. On introduit cette troisième électrode, généralement en platine, elle est disposée parallèlement à l'électrode de travail afin d'assurer une bonne répartition des lignes de champ dans la cellule électrochimique.

II.2.3. Préparation du matériau (électrode de travail)

Les échantillons d'acier X42 ont subi, avant chaque expérience, un polissage avec du papier abrasif de carbure de silicium (SiC), de granulométries décroissantes (de 120 jusqu'à 2000 μm) pour obtenir un état de surface suffisant, ensuite, la surface des échantillons a été rincée avec de l'eau distillée puis séchée afin d'éliminer les grains de suspensions qui pourrait éventuellement rester à la surface. Ce protocole est suivi avant chaque essai.

II.2.4. Milieu corrosif

Afin d'étudier et de caractériser l'extrait de la plante *Artemisia Herba Alba* (AHA) sur la protection de l'acier X42 contre la corrosion, une solution contenant de l'acide chlorhydrique (HCl 0.5M) est préparée à partir d'une solution commerciale d'acide chlorhydrique (37%) en utilisant de l'eau distillée et testée comme milieu corrosif. Le volume de la solution considérée est égal à 50 mL.

II.2.5. Méthode d'extraction utilisée: Extraction à reflux

Cette méthode consiste à mettre la poudre de la plante dans de l'eau et chauffer jusqu'à l'ébullition. Ce dernier empêche la perte de réactif ou de produit par évaporation. Dans le vase à réaction (souvent un ballon), du fait de l'augmentation de la température, certaines espèces chimiques s'évaporent. Ces espèces chimiques montent alors dans le réfrigérant. De l'eau froide s'écoule en permanence dans ce réfrigérant, au contact des parois, les gaz refroidissent et se condensent sous formes de gouttelettes sur les parois du réfrigérant et finissent par retomber dans le vase à réaction [9].

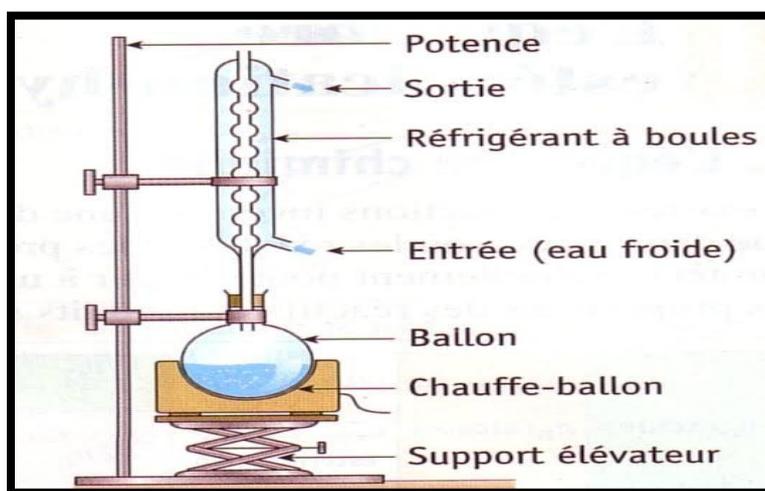


Figure II.6 : Schéma du montage du chauffage à reflux.

II.2.6. Préparation de l'extrait d'*Artemisia Herba Alba* (AHA)

La plante récoltée est aussitôt mise à sécher dans une étuve à température 45°C durant plusieurs jours afin d'éliminer toutes les traces d'eau. Après séchage, celle-ci est broyée à l'aide d'un moulin afin d'obtenir une poudre. La poudre obtenue est conservée dans des flacons en verre.

L'inhibiteur vert est extrait dans l'eau par la méthode à reflux, en mélangeant 5g de la poudre sèche avec 50 ml d'eau distillée puis chauffé pendant une heure. Par la suite, le reflux est filtré pour éliminer tous les résidus.

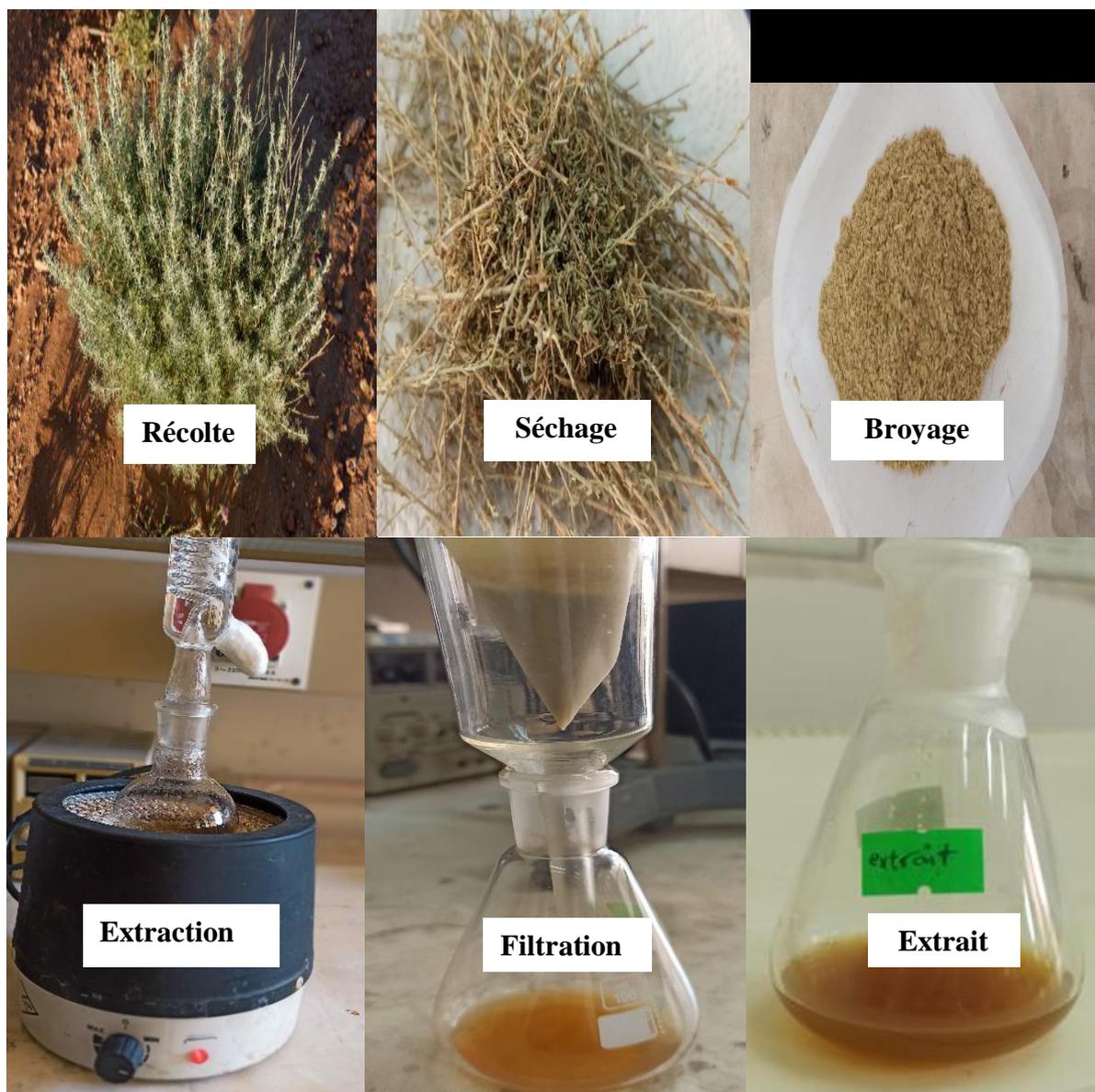


Figure II.7: Les étapes suivies pour obtenir l'extrait de la plante AHA.

II.3. Dispositifs expérimentaux

Les essais ont été réalisés à l'aide de différents appareils. Le premier est constitué d'un système d'asservissement Potentiostat/Galvanostat de type PGP 201. Cet appareil est relié à un micro-ordinateur avec le logiciel Voltmaster (4). Les mesures des tests de corrosion, ont été réalisées sur un système qui permet d'effectuer les différentes expériences en maintien galvanostatique, potentiostatique ou en recyclage du potentiel (Figure II.8).

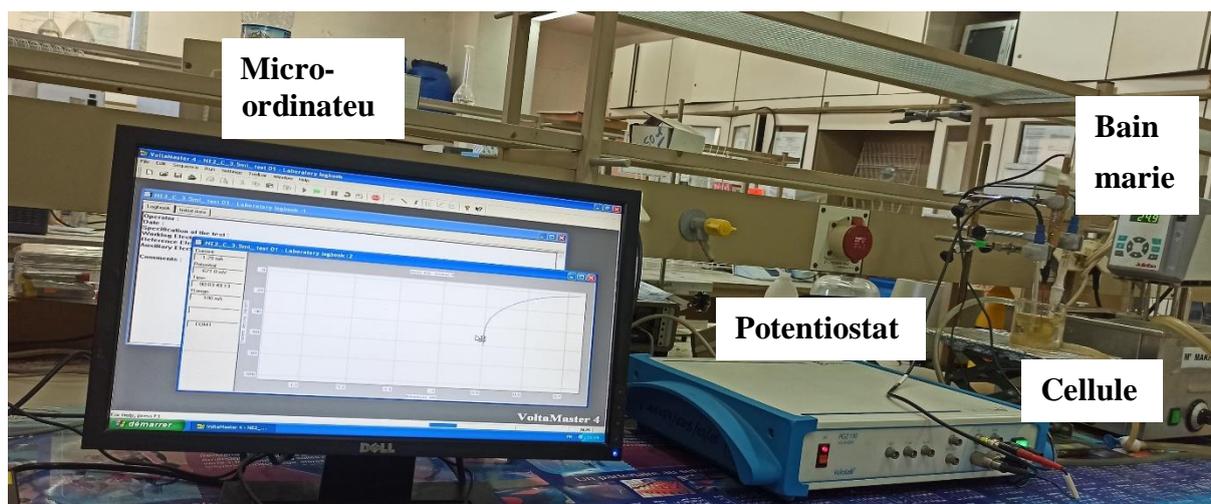


Figure II.8 : Dispositif expérimental de mesure potentiostatique et galvanostatique.

Le seconde constitué d'un appareil de mesure de marque Autolab intégrant à la fois un Potentiostat/Galvanostat, commandé par le logiciel GPES et un analyseur de fonction de transfert commandé par le logiciel NOVA pour les mesures d'impédance électrochimique (Figure II.9).

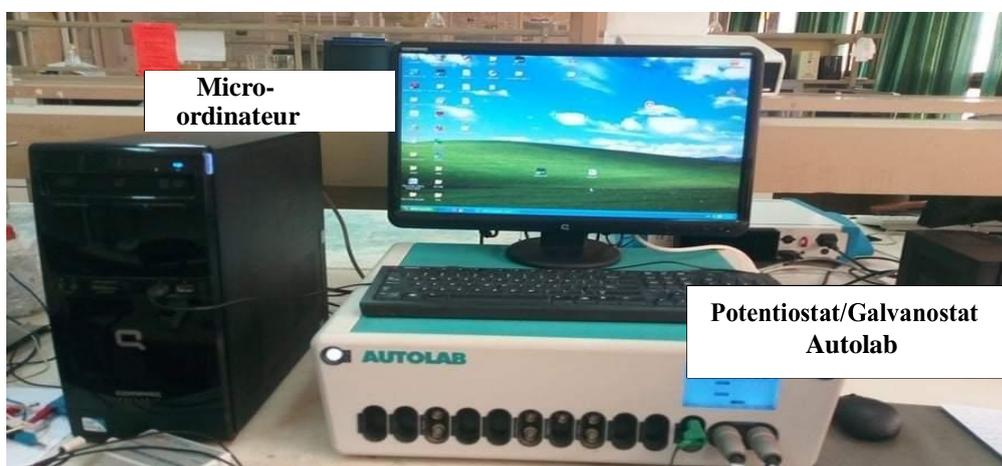


Figure II.9 : Dispositif expérimental de mesure de l'impédance électrochimique.

II.4. Protocoles expérimentaux

II.4.1. Protocole de la méthode gravimétrique

Les échantillons d'acier ont été pesés en premier temps à l'aide d'une balance analytique de haute précision. Puis, elles sont immergées pendant 17 jours dans des béchers contenant les solutions électrolytiques de 50 ml en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur étudié à température constante. Après chaque 24 heures d'immersion, les pièces sont retirées de la solution électrolytique et lavées à l'eau distillée, puis séchées à l'air libre. Enfin les pièces récupérées ont été pesées une deuxième fois. Ce protocole est appliqué pour chaque test effectué.

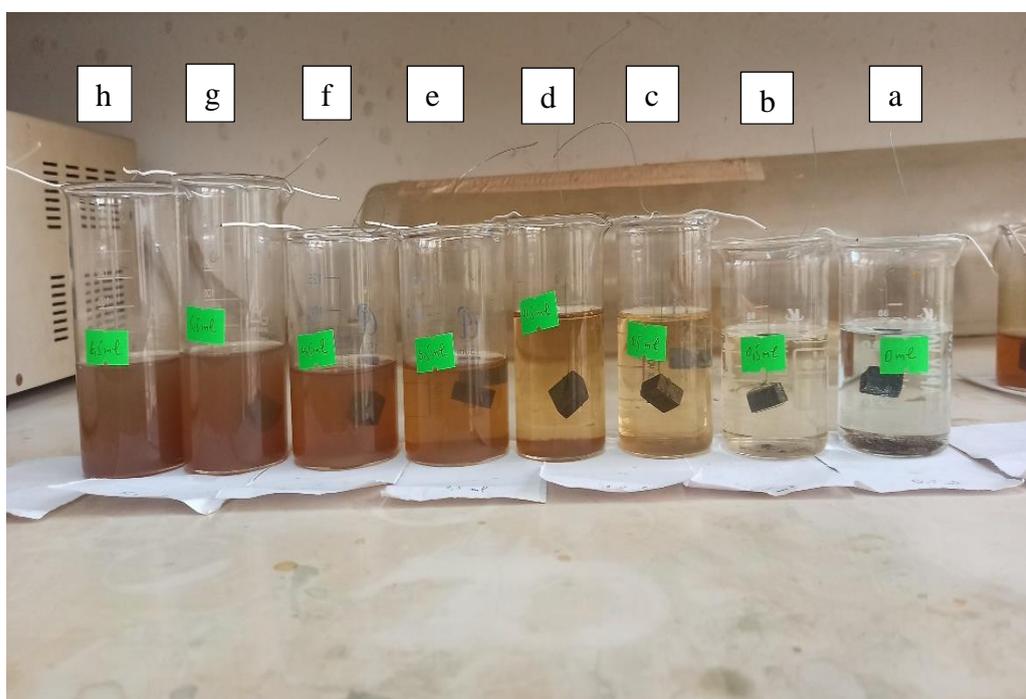


Figure II.10 : Echantillons d'acier dans des solutions corrosives avec et sans inhibiteur : (a) : 0g.L^{-1} ; (b) : $0,26\text{g.L}^{-1}$; (c) : $0,80\text{g.L}^{-1}$; (d) : $1,34\text{g.L}^{-1}$; (e) : $1,87\text{g.L}^{-1}$; (f) : $2,4\text{g.L}^{-1}$; (g) : $2,94\text{g.L}^{-1}$; (h) : $3,48\text{g.L}^{-1}$.

II.4.2. Protocole des mesures électrochimiques

II.4.2.1. Courbes de polarisation

Dans notre étude, les courbes de polarisation potentiodynamique ont été obtenues par la variation automatique du potentiel de -900 à -200 (mV/ECS) à une vitesse de balayage de 1mV.s^{-1} . Pour différentes concentrations de l'extrait de AHA (0 ; $0,26$; $0,80$; $1,34$; $1,87$; $2,41$; $2,94$; $3,48\text{g.L}^{-1}$) et pour différentes températures (25 , 30 , 35 , 45 , 50 °C).

II.4.2.2. Suivi du potentiel de corrosion

Le potentiel de corrosion a été suivi en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur *AHA* pendant deux heures à la température ambiante ($T = 25$ °C).

II.4.2.3. Diagrammes d'impédance électrochimique

Les spectres d'impédances électrochimiques ont été enregistrés au potentiel d'abandon, après différents temps d'immersion, pour différentes concentrations d'inhibiteur *AHA*. Les mesures ont été effectuées dans la gamme de fréquence 100 KHz à 0.01Hz et avec une amplitude de 10 mV.

II.4.3. Protocole d'analyse de surface

L'interaction des matériaux avec l'environnement, susceptible de provoquer la corrosion, se produit à la surface de ces matériaux. Une bonne connaissance de la composition et de la structure de cette surface est donc indispensable à la compréhension des réactions chimiques ou électrochimiques responsables de la corrosion.

Il est très important que l'appareil le plus approprié pour la proposition d'analyses soit choisi parmi différentes techniques analytiques.

II.4.3.1. L'angle de contact

Les échantillons sont constitués des plaques rectangulaires en acier X42. Les échantillons polis, rincés et séchés ont été immergés pendant 2h dans HCl 0,5M, en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur *AHA* à une température de 25°C à l'air atmosphérique. Ils ont ensuite été retirés de la solution et séchés avant d'être placés sur la platine du goniomètre G10 de KRÜSS ® (Figure II.11), les essais ont été réalisés par la méthode de la goutte posée. Cette méthode consiste à déposer une goutte du solvant (eau) 5 μ l sur l'échantillon à l'aide d'une micro seringue. Le profil de cette goutte déposée sur la surface à étudier, est alors observé juste après le dépôt de la goutte. L'image de la goutte est prise par une caméra vidéo et l'angle de contact est mesuré automatiquement par le logiciel de l'appareil ADVANCE®. Une moyenne des mesures de l'angle de contact est effectuée sur trois gouttes d'acide déposées à des endroits différents de la surface.

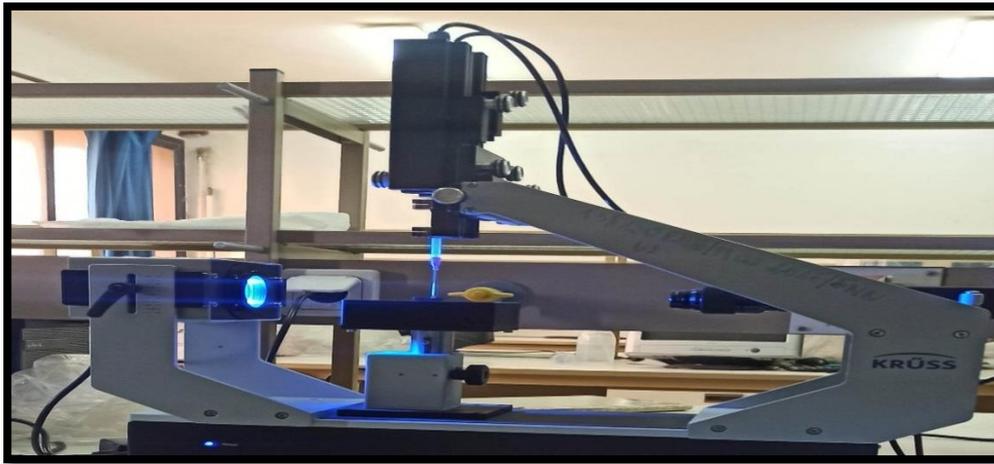


Figure II.11 : Photographie du goniomètre Krüss de l'angle de contact.

II.4.3.2. Diffraction des Rayons X

La diffractométrie de rayons X est une méthode d'analyse physico-chimique basée sur la diffraction des rayons X sur la matière. Les directions dans lesquelles les interférences sont constructives, appelées « pics de diffraction ».

La diffraction de rayon X permet la caractérisation structurale des matériaux cristallisés massifs ou sous forme de poudre : métaux, minéraux. Dans le cas de corrosion cette technique permet de mettre en évidence la formation ou non d'oxydes de fer à la surface du métal avant et après inhibition [10].

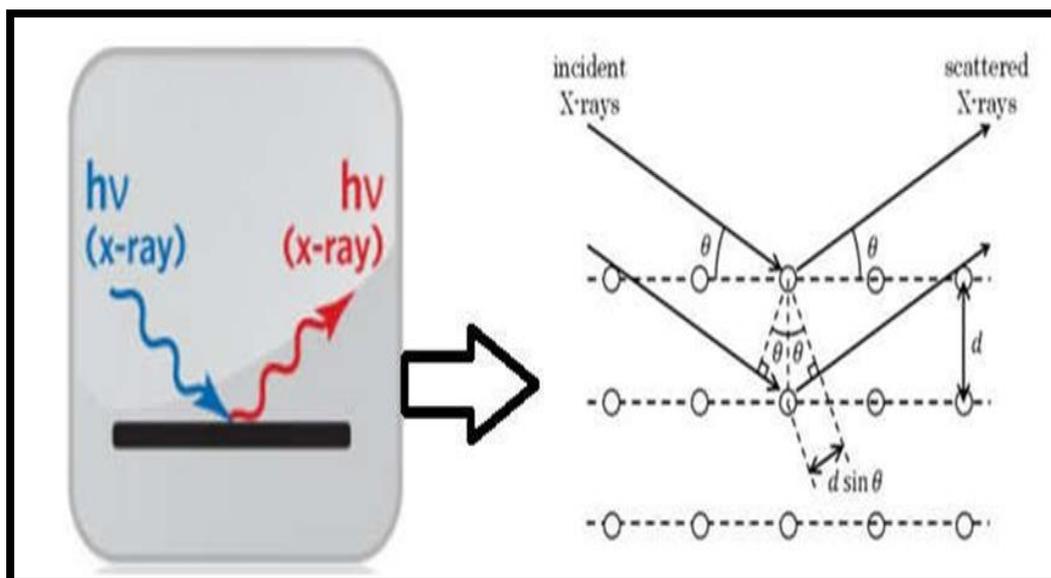


Figure II.12 : Illustration schématique de la diffraction des rayons X.

Les mesures sont effectuées avec un appareil, constitué par un tube à rayons X qui irradie l'échantillon, lequel diffracte une partie d'un rayonnement émis vers un système de détection. Cette technique permet principalement aux géologues d'identifier les minéraux. Les spectres de diffraction peuvent être obtenus directement à partir d'un fragment solide, ou de petites quantités de poudre (spectre de poudre) [7].

Les mesures de DRX ont été effectuées via le dataconnecteur (Figure II.13). L'appareil est mis en mode Gonio avec un angle d'incidence égal à 1 degré, une tension de 45 kV et une intensité de 40 mA avec une anode en cuivre. Le pas angulaire d'enregistrement est égal à 0,0260 degré (2θ) et un temps de 20 secondes ; l'échantillon est posé sur un goniomètre de rayon de 240 mm.

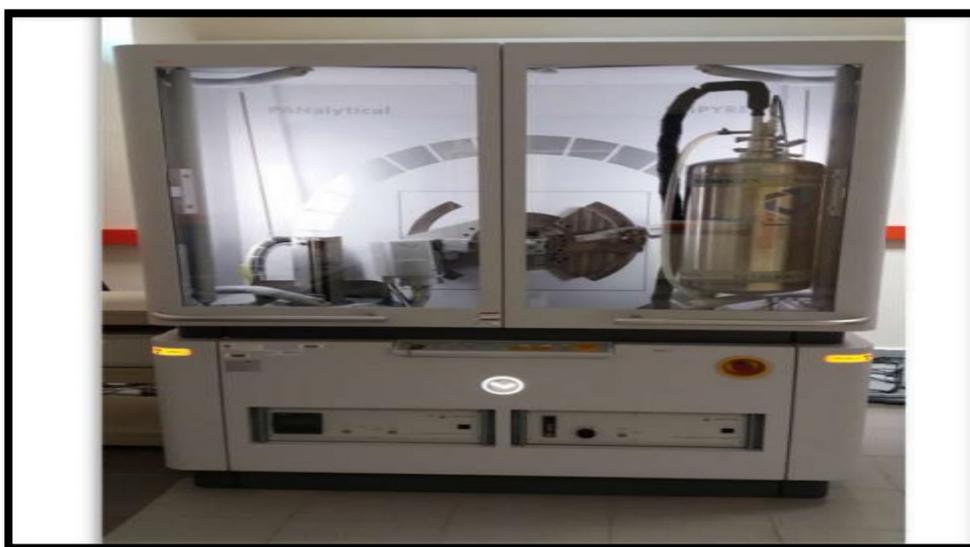


Figure II.13: *Diffraction X-ray (PANalytical Empyrean).*

II.4.3.3. Spectroscopie d'absorption infrarouge

La spectroscopie IR est une méthode utilisée pour la détermination de la structure des composés organiques. En effet, les vibrations moléculaires dépendent des distances interatomiques, des angles de liaison et des forces de liaison. Ainsi, la spectroscopie infrarouge est utilisée en chimie organique pour la détection des groupes fonctionnels, la confirmation de l'identité des composés et le suivi des réactions [11].

Nous avons utilisé un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier de marque Shimadzu (Kyoto, Japon).

Le protocole utilisé est basé sur celui décrit par Pitt, JI. (1988). Pour commencer, une quantité de 2 mg de l'échantillon est pesée avec précision. Ensuite, 80 mg de bromure de

potassium (KBr) sont ajoutés pour compléter la masse. Le mélange obtenu est soigneusement mélangé afin d'assurer une répartition homogène des composants.

Pour obtenir une fine poudre, le mélange est broyé manuellement jusqu'à ce que la consistance souhaitée soit atteinte. Ensuite, une presse manuelle est utilisée pour comprimer la poudre à une pression de 70 bars pendant une durée de 2 minutes. Cette compression permet d'obtenir une pastille solide à partir de la poudre.

Une fois la pastille est obtenue, elle est ensuite insérée dans la chambre optique du spectromètre pour l'analyse. Cette chambre permet d'interagir avec la lumière et d'obtenir des informations sur la composition de l'échantillon.

Pour calibrer l'appareil, une pastille de référence contenant uniquement du KBr est utilisée.

Cette pastille de référence permet d'établir une référence de mesure et d'assurer la précision des résultats obtenus lors de l'analyse de l'échantillon.

En suivant ce protocole, il est possible d'effectuer une analyse spectroscopique de l'échantillon en utilisant le spectromètre, en fournissant des informations sur sa composition et ses propriétés.

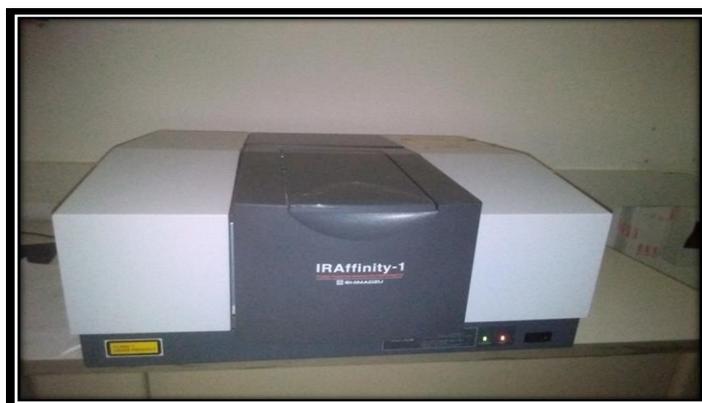


Figure II.14 : *Spectroscopie infrarouge a transformé du Fourier.*

II.5. Système d'acquisition et de traitement de données électrochimiques

Pour les mesures intensité-potentiel (courbes de polarisation) et chronopotentiométrie (E_{corr} en fonction de temps), notre chaîne d'acquisition repose essentiellement sur le logiciel voltmaster qui permet l'acquisition et le stockage des signaux électriques des différentes expérimentations dans des fichiers ayant une extension CRV. Ces signaux sont ensuite transférés et traités sous le logiciel ORIGINE®. Pour les mesures d'impédance électrochimique, l'analyseur de fréquence est contrôlé par une carte graphique FRA qui

permet de visualiser et d'enregistrer les mesures d'impédance sous différentes formes à savoir les plans de Nyquist et de Bode. Une fois les signaux enregistrés dans des fichiers ayant une extension pfr; ce logiciel permet leur conversion en format txt pour être traités ensuite sous le logiciel ORIGIN® et ZsimpWin®.

II.6. Conclusion

Les méthodes électrochimiques présentent une sensibilité et une précision remarquables, pour l'étude des phénomènes liés à la corrosion. Tandis que, les méthodes gravimétriques reposent sur la détermination de la perte de masse au cours du temps, et reflètent mieux le phénomène de corrosion tel qu'il se présente à l'état réel. Comparer aux méthodes stationnaires, les mesures d'impédances apportent une analyse plus complète du mécanisme d'action de l'inhibiteur. L'analyse de surface a été analysée par diverses techniques analytiques telles que l'angle de contact, la diffraction des rayons X (DRX).

Les techniques ainsi que les conditions opératoires ont été explicité d'une façon détaillée afin de permettre une bonne interprétation des résultats obtenus.

Références bibliographiques

- [1] A.Nadji, «Synthèse et étude de l'effet inhibiteur contre la corrosion d'un acier au carbone A283 Gr-C par une molécule organique », Mémoire de Master, Université de Tébessa, (2020).
- [2] N. Branko, «*Corrosion engineering principles and solved problems* ». Elsevier, (2015).
- [3] 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).
- [4] D.Amoura, « utilisation de couches de polymères, de copolymères et de terpolymères conducteurs (poly (3,4-éthylènedioxythiophene, poly (N-méthylpyrrole) et polyaciline) pour les supercondensateurs et la protection contre la corrosion de l'acier ». Thèse de Doctorat, Université de Bejaia, (2017).
- [5] J. Muller, « Etude électrochimique et caractérisation des produits de corrosion formés à la surface des bronzes Cu-Sn en milieu sulfate », Thèse de Doctorat, Université Paris-Est, (2010).
- [6] M. Bouaoud, « Tenue à la corrosion en milieu acide d'un dépôt de Zn Sn sur acier inoxydable ». Thèse de Doctorat, Université de Sétif, (2014).
- [7] H. Derfouf-talbi, « étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier au carbone (XC38) par l'extrait aqueux de plantes sahariennes dans le milieu acide chlorhydrique 1M », Thèse de Doctorat, Université Tlemcen, (2019).
- [8] W.Yahiaoui, D.Salhi, «Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier au carbone (X42) par l'extraction de l'inule visqueuse dans le milieu acide sulfurique 0,5m », Mémoire de Master, Université de Bejaia, (2022).
- [9] A. Zaabar, « Utilisation de l'extrait de la plante d'ortie (*Urticadioica L.*) Comme inhibiteur de corrosion de l'acier dans les milieux HCl 0,5 M et NaCl 3% », Mémoire de Magister, Université de Bejaia, (2010).
- [10] S. Ramesh, and S. Rajeswari, « Corrosion inhibition of mild steel in neutral aqueous solution by new triazole derivatives », *Electrochimica Acta*, 49 (2004) 811.
- [11] J. Pitt, « An appraisal of identification methods for penicillium species novel taxonomic criteria based on temperature and water relations », *Mycology*, (1988).

CHAPITRE III

***Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier X42 en
milieu HCl 0,5M par l'extrait de la plante Artemisia
Herba Alba***

Chapitre III

Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier X42 en milieu HCl 0,5M par l'extrait de la plante Artemisia Herba Alba

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). En plus de la méthode gravimétrique basée sur la détermination de la perte de masse au cours du temps.

Dans ce chapitre nous avons présente ci-dessous les résultats expérimentaux de l'activité inhibitrice par la caractérisation électrochimique et physico-chimique de l'efficacité de l'extrait du Artemisia Herba Alba, noté AHA, obtenu par la méthode à reflux dans l'eau en vue de l'inhibition de la corrosion de l'acier X42 en milieu acide chlorhydrique (0,5M HCl). Nous avons choisi l'eau comme solvant d'extraction pour son impact vis-à-vis de l'environnement.

III.1. Etude gravimétrique

La mesure de perte en masse représente une première alternative dans l'étude de l'inhibition de la corrosion d'un métal. Cette méthode est caractérisée par sa mise en œuvre simple, ne nécessitant pas un appareillage important et donne des informations très utiles. Son principe repose sur l'immersion de l'échantillon à étudier dans le milieu corrosif considéré (après sa pesé) pendant une durée de temps bien définie. Après un lavage, l'échantillon est de nouveau repesé pour déterminer la masse perdue.

Les différents échantillons d'acier sont immergés dans des solutions de HCl 0.5M sans et avec addition de différentes concentrations en inhibiteur AHA (0,26 ; 0,80 ; 1,34 ; 1,87 ; 2,41 ; 2,94 et 3,48 g.L⁻¹). La masse des échantillons et l'efficacité inhibitrice sont relevés est déterminée après chaque 24 heures d'immersion pendant 17 jours à la température ambiante (25 ± 1 °C).

La valeur de l'efficacité inhibitrice donnée par la relation III.1 ci-dessous :

$$EI (\%) = \frac{W - W_{inh}}{W} \times 100 \quad (III.1)$$

Où W et W_{inh} sont les valeurs de la perte en poids de l'acier après immersion sans et avec inhibiteur respectivement.

Les résultats obtenus de la perte en masse et du rendement (pourcentage de l'efficacité inhibitrice) en absence et en présence de différentes concentrations de l'extrait *AHA* dans la solution 0.5M en HCl sont présentés sur la figure III.1.

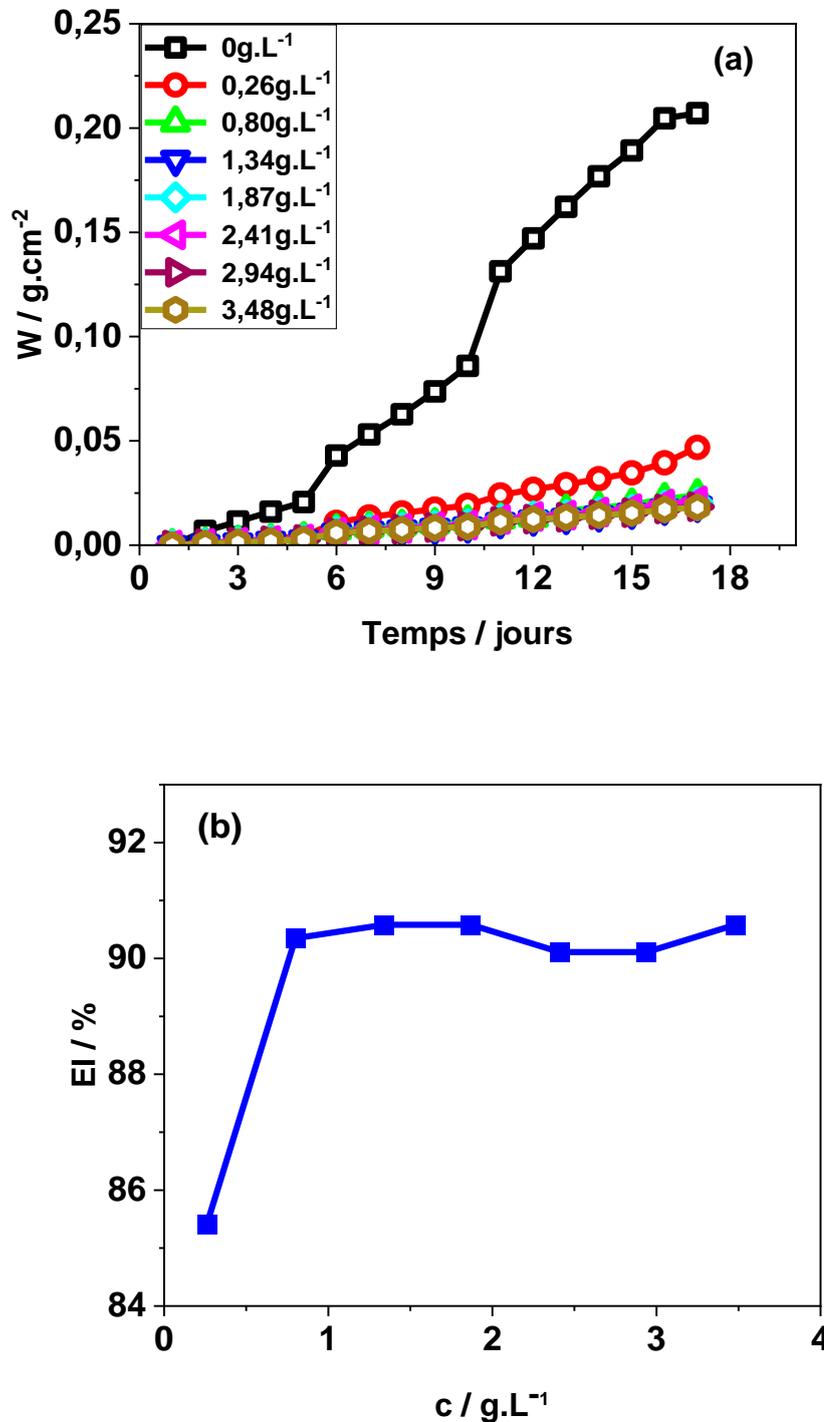


Figure III.1 : (a) Variation de la perte en poids (w) et (b) de l'efficacité inhibitrice, déduite après 1 jour d'immersion, de la corrosion de l'acier dans HCl 0,5M en fonction de la concentration en inhibiteur vert AHA.

L'analyse des résultats présentés sur la figure III.1 (a) montre clairement que *AHA* possède d'excellentes propriétés inhibitrices de la corrosion de l'acier en milieu HCl 0,5 M. On remarque que l'efficacité de la protection est déjà observée pour la concentration la plus faible (figure III.1 (b)) et elle croît avec la concentration en inhibiteur pour atteindre une valeur maximale de 90% en présence d'une concentration variant de 0,8 g.L⁻¹ de l'extrait *AHA*. Au-delà de cette dernière l'efficacité inhibitrice varie légèrement et reste pratiquement stable. Ainsi, une concentration optimale de l'inhibition est dégagée et est égale à 0,80 g.L⁻¹ (au-delà de cette concentration l'efficacité varie légèrement).

III.2. Étude électrochimique

L'évaluation de l'efficacité inhibitrice, déterminée par la méthode gravimétrique, ne permet pas d'accéder aux mécanismes mis en jeu lors de la corrosion. Cependant, les techniques électrochimiques (courbes de polarisation, spectroscopie d'impédance électrochimique...etc.) constituent une méthode plus complète puisqu'elles étudient la base même du phénomène de corrosion. L'aspect quantitatif de ces techniques permet d'accéder à des vitesses de réaction et à des valeurs de paramètres physiques décrivant l'état du système (capacité de double couche, résistance de transfert de charge...etc.).

III.2.1. Suivi du potentiel de corrosion en fonction du temps

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 dans des solutions de HCl contenant diverses quantités en inhibiteur. En effet, les valeurs mesurées de ce potentiel résultent des réactions qui se déroulent à l'interface métal/solution.

Cette mesure permet également de connaître la durée d'immersion nécessaire à l'établissement d'un régime stationnaire indispensable aux mesures potentiodynamiques ou d'impédances électrochimiques. La valeur du potentiel libre qui est le potentiel de corrosion ne nous renseigne pas sur les cinétiques électrochimiques et ne permet pas d'accéder à la vitesse de corrosion [1].

Les courbes obtenues pour une durée d'immersion de 2 heures et pour les différentes concentrations en inhibiteur (*AHA*) sont reportées sur la figure III.2. A titre de comparaison, la courbe obtenue dans le milieu d'étude sans inhibiteur est également présentée. D'après les résultats obtenus, globalement, toutes les courbes chronopotentiométriques enregistrées évoluent vers des valeurs positives en potentiel, pour venir ensuite se stabiliser sur un palier.

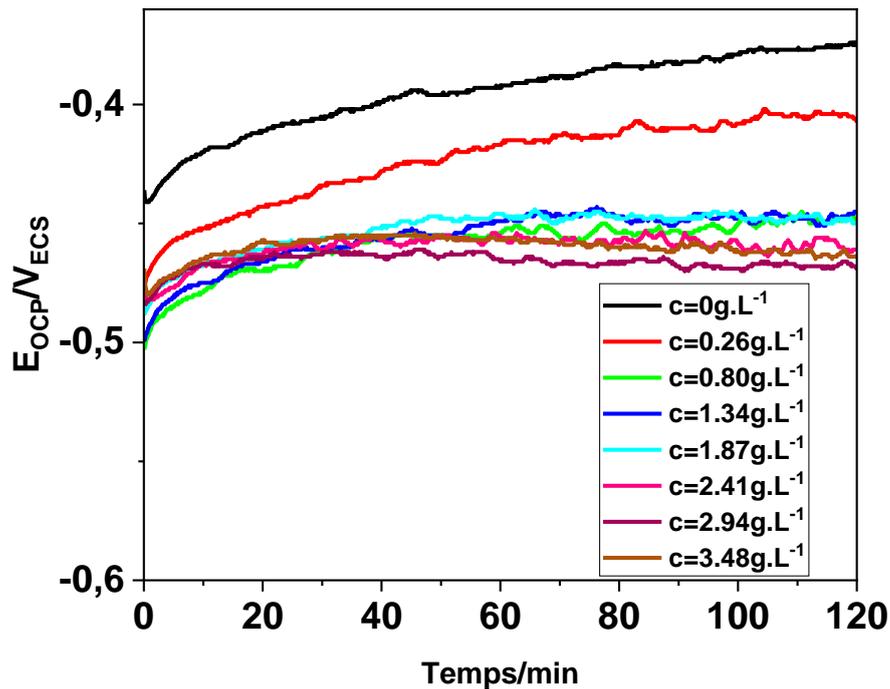


Figure III.2 : Evolution du potentiel de corrosion de l'électrode de l'acier en fonction du temps dans HCl 0,5M à différentes concentrations en inhibiteur AHA.

Le potentiel de l'essai réalisé sans inhibiteur, qui caractérise la formation de produits de corrosion sur la surface de l'électrode de travail se stabilise à une valeur proche de - 475 mV/ECS après un temps d'immersion de 2 heures.

Lorsque les essais sont conduits en présence d'inhibiteur vert, nous observons un anoblissement du potentiel d'autant plus marqué que la concentration en inhibiteur est importante, ceci peut être expliqué par le fait que l'inhibiteur s'adsorbe de plus en plus efficacement pour rendre le dégagement d'hydrogène de plus en plus difficile [2,3] et dénote selon la littérature d'une protection de la corrosion de l'acier par cet inhibiteur [4, 5].

D'après l'évolution anodique du potentiel avec l'augmentation de la concentration en inhibiteur, se traduisant par une augmentation de la surtension anodique, nous pouvons conclure que notre inhibiteur est plutôt d'une action à tendance anodique. Nous enregistrons le palier de potentiel le plus noble pour des concentrations en inhibiteur au-delà de la concentration $C=0,80 \text{ g.L}^{-1}$. Les mesures de potentiel de corrosion semblent indiquer que l'effet inhibiteur s'accroît avec la concentration de l'extrait AHA. Nous notons néanmoins,

que pour les concentrations les plus élevées de $0,80 \text{ g.L}^{-1}$ en inhibiteur est la concentration seuil de protection, le potentiel du palier diminue légèrement. Nous pensons que la concentration de $0,80 \text{ g.L}^{-1}$ en inhibiteur est la concentration seuil de protection. Ces résultats seront vérifiés par les mesures voltampérométriques et par la spectroscopie d'impédance électrochimique (III.3 et III.4).

III.2.2. Courbes de polarisation

Le comportement électrochimique de notre électrode dans le milieu d'étude est traduit par les courbes de polarisation i en fonction de E ($i = f(E)$). Les courbes de polarisation sont obtenues avec une vitesse de balayage de 1 mV.s^{-1} en faisant un balayage de potentiel de -900 à -200 mV/ECS ($\pm 300 \text{ mV}$ environ par rapport au potentiel d'abondant). Ces tests ont été effectués sur une électrode d'acier X42 dans le milieu agressif aéré de HCl $0,5 \text{ M}$, en absence et en présence de l'inhibiteur vert l'extrait de *AHA*. Afin d'accéder aux différents paramètres électrochimiques de la corrosion de l'acier dans ce milieu, en absence et en présence de l'inhibiteur *AHA*, nous présentons par les courbes de Tafel les résultats cinétiques, enregistrés après 20 min d'immersion (figure III.3, tableau III.1 respectivement).

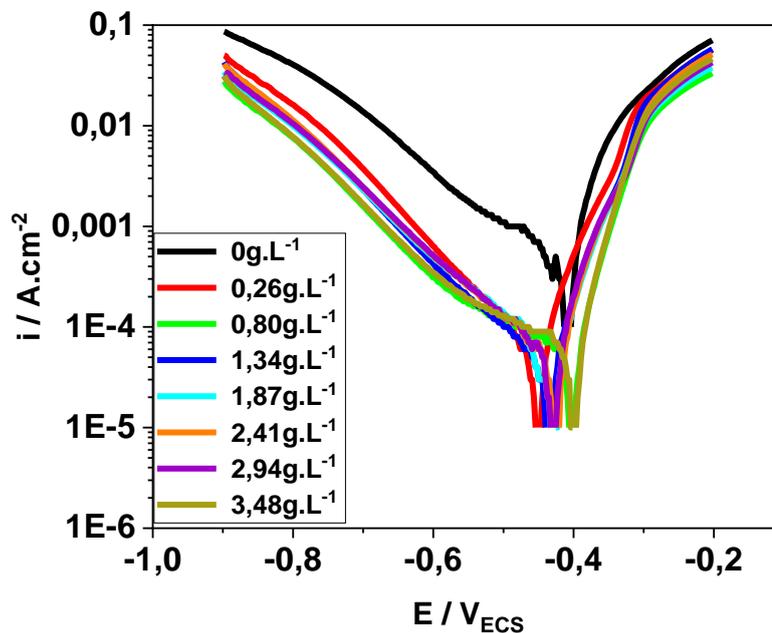


Figure III.3 : Courbes de Tafel relatives à l'acier dans HCl $0,5\text{M}$ à différentes concentrations en inhibiteur *AHA*, $V_b = 1 \text{ mV.s}^{-1}$ et $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

L'examen de ces courbes montre que les diagrammes de polarisation à différentes concentration L'extrait *AHA* sont constitués de deux branches :

➤ La branche anodique : qui correspond à la cinétique de dissolution de l'acier selon la réaction suivante: ($\text{Fe} \longrightarrow \text{Fe}^{+n} + n\text{e}^-$).

➤ La branche cathodique : qui correspond à la réduction du cation hydrogène selon la réaction suivante: ($2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2$).

Ces courbes ayant presque la même allure avec un décalage qui est provoqué par l'ajout des différentes concentrations de L'extrait *AHA*. L'action de notre extrait 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^+ [6].

La diminution de la densité du courant de corrosion avec l'augmentation de la concentration jusqu'à atteindre un minimum de $0,0438 \text{ mA/cm}^2$ à la concentration $0,80 \text{ g.L}^{-1}$ de l'extrait *AHA* est due à l'effet de blocage des sites actifs sur la surface métallique par les molécules adsorbées de l'extrait [7]. Pour les différentes concentrations en inhibiteur utilisées. Au de la concentration de $0,80 \text{ g.L}^{-1}$ l'inhibiteur semble agir de manière efficace avec des valeurs de l'efficacité inhibitrice qui varient légèrement.

Afin de certifier les constatations précédentes, les valeurs des densités de courant de corrosion (i_{corr}), du potentiel de corrosion (E_{corr}), des pentes de Tafel cathodique et anodique (b_c et b_a), du taux de recouvrement (θ) ainsi que de l'efficacité d'inhibition (EI) sont reportées dans le tableau III.1.

La valeur du taux de recouvrement de la surface du métal par l'inhibiteur adsorbé (θ), est définie par la relation suivante [8]:

$$\theta = \left[1 - \frac{i_{\text{corr}}^{\text{inh}}}{i_{\text{corr}}} \right] \quad (\text{III.2})$$

Où i_{corr} et $i_{\text{corr}}^{\text{inh}}$ sont les densités de courant sans et avec inhibiteur respectivement, déterminés par extrapolation des droites de Tafel.

L'efficacité inhibitrice (EI) est déterminée par la relation suivante[9, 10]:

$$EI(\%) = \theta \times 100 \quad (\text{III.3})$$

Les valeurs de la résistance de polarisation (R_p) sont calculées par la relation de Stern-Geary [11]:

$$R_p = \frac{b_a b_c}{2,3(b_a + b_c)i_{\text{corr}}} \quad (\text{III.4})$$

L'analyse des résultats du tableau III.1 montrent clairement que les courants cathodiques et anodiques sont affectés par l'ajout de l'inhibiteur.

D'après la littérature [7, 12], 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 la valeur 85 mV l'inhibiteur est de type mixte. L'action de notre inhibiteur est de type mixte car ($\Delta E < 85$ mV).

Tableau III.1. Paramètres de la corrosion de l'acier X42 dans le milieu HCl 0,5M contenant les différentes concentrations de l'inhibiteur (AHA), calculés par la méthode d'extrapolation de Tafel.

Concentration (g.L ⁻¹)	i_{corr} (mA.cm ²)	b_a (mV.dec ⁻¹)	$-b_c$ (mV.dec ⁻¹)	E_{corr} (mV _{ECS})	R_p (Ω .cm ⁻²)	θ	EI (%)
0	0,2880	38,0	109,3	-419,5	44,38	–	–
0,26	0,0559	35,1	137,3	-459,9	286,11	0,80	80,59
0,80	0,0438	44,6	280,2	-419,9	494,73	0,84	84,79
1,34	0,0450	51,4	172,8	-444,0	397,75	0,84	84,37
1,87	0,0457	50,1	132,8	-438,9	379,55	0,84	84,13
2,41	0,0440	44,0	142,0	-435,4	339,49	0,84	84,72
2,94	0,0458	45,3	137,8	-438,6	306,65	0,84	84,09
3,48	0,0568	41,0	268,8	-409,8	298,85	0,80	80,27

Ainsi, les résultats obtenus montrent que :

- La résistance de polarisation (R_p) augmente avec l'augmentation de la concentration en inhibiteur (AHA) jusqu'à la concentration seuil de 0,80 g.L⁻¹ puis elle diminue pour les concentrations les plus élevées.
- L'efficacité inhibitrice (η) augmente avec l'augmentation de la concentration en inhibiteur et atteint la valeur maximale de 84,79 % pour 0,80 g.L⁻¹ en inhibiteur AHA. Cette dernière se stabilise autour de l'efficacité maximale pour la quasi majorité des concentrations

- Les valeurs de (b_c) ont changé avec l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur, ce qui indique l'influence de l'inhibiteur (*AHA*) sur la cinétique de réduction de l'hydrogène.
- L'ajout de l'inhibiteur (*AHA*) provoque la modification des pentes des droites de Tafel (b_c), ce qui indique l'influence de l'inhibiteur (*AHA*) sur la cinétique de réduction de l'hydrogène [13].

En termes d'efficacité inhibitrice (EI), Les résultats de polarisation viennent confirmer les résultats obtenus précédemment à l'aide des mesures de la perte en masse, la valeur maximale de cette dernière est de 84,79% pour la concentration optimale de 0,80 g.L⁻¹.

III.2.3. Spectroscopie d'impédance électrochimique

Les techniques stationnaires restent toutefois insuffisantes pour caractériser des mécanismes complexes, mettant en jeu plusieurs étapes réactionnelles et ayant des cinétiques caractéristiques différentes. L'utilisation de la spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) devient alors indispensable.

Afin de caractériser le mécanisme de corrosion de l'acier X42 dans le milieu corrosif en absence et en présence de l'inhibiteur (*AHA*), les 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 allant de 100 kHz à 10 mHz. Les résultats de cette méthode sont obtenus sous forme des diagrammes de Nyquist.

Les spectres d'impédance obtenus au potentiel de corrosion enregistrés, après 20 min d'immersion dans le milieu HCl en absence et en présence de différentes concentrations en inhibiteur (*AHA*) sont représentés dans la figure III.4. Pour plus de clarté, le diagramme de Nyquist pour la solution témoin (sans inhibiteur) a été présenté sur la figure III.5.

Les spectres d'impédance, en représentation de Nyquist, obtenus au potentiel de corrosion pour différentes concentrations en inhibiteur (figure III.4) montrent la présence d'une boucle capacitive à hautes fréquences, caractéristique de la relaxation de la double couche en parallèle avec le transfert de charge. Ce type de diagramme indique généralement que le processus de dissolution de l'acier X42 est contrôlé par un processus de transfert de charge [14, 15, 16,17]. Il est bien clair, d'après la figure III.4, que l'ajout de l'inhibiteur (*AHA*) provoque une augmentation de la taille des boucles capacitives (diamètre des boucles), donc une résistance croissante à la corrosivité du milieu. Ce comportement peut être dû à la formation d'une couche protectrice suite à l'adsorption de l'inhibiteur sur la surface de l'acier [18, 19].

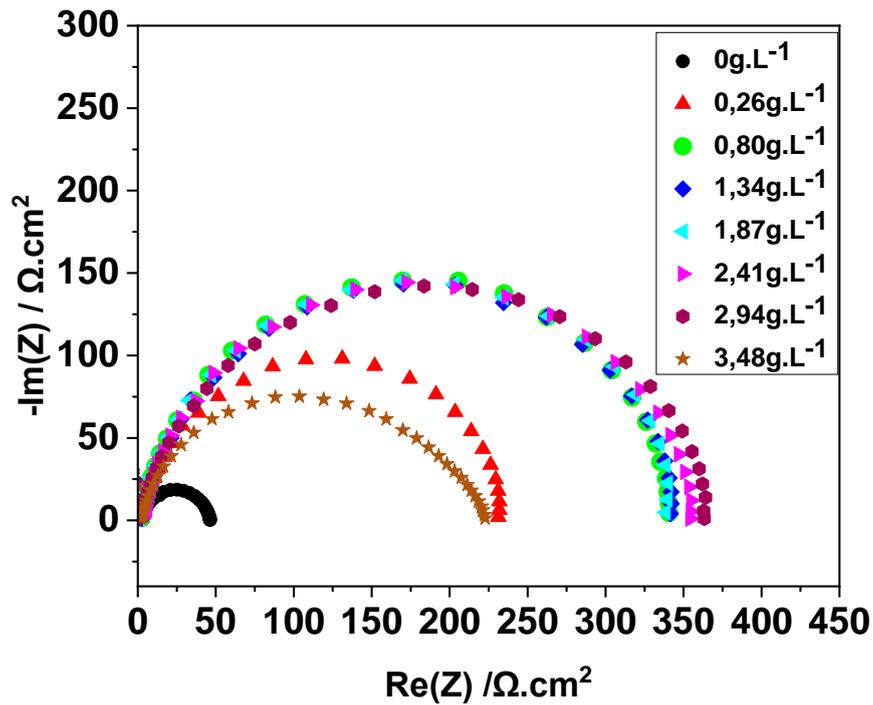


Figure III.4 : Diagrammes d'impédance de Nyquist de l'acier dans HCl 0,5M en absence et en présence de différentes concentrations de l'extrait AHA.

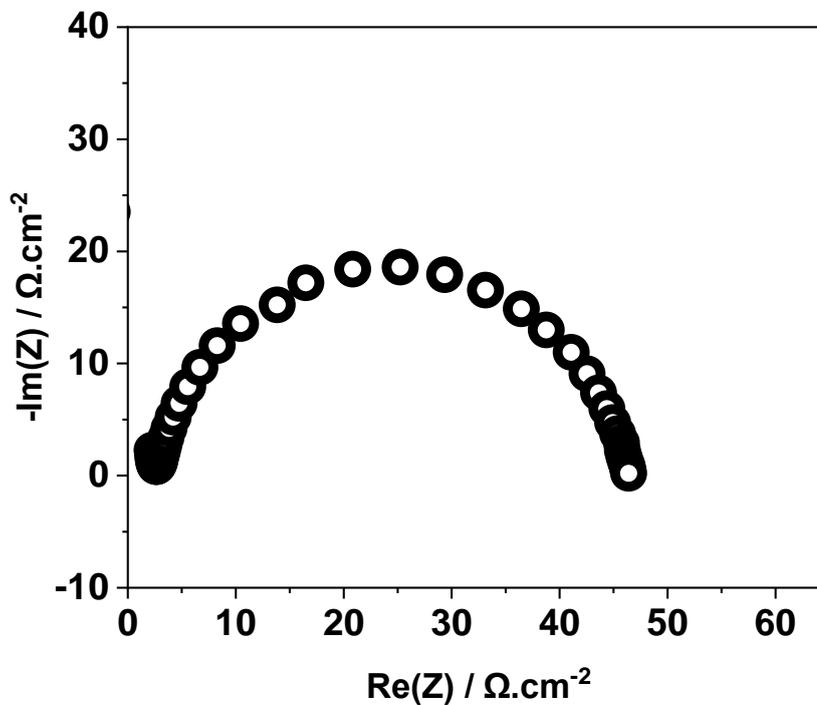


Figure III.5 : Spectre d'impédance de Nyquist de l'acier X42 dans HCl 0,5M en absence de l'inhibiteur AHA à E_{corr} et $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La forme de ces diagrammes n'est pas des demi-cercles parfaits, cela est probablement dû à l'hétérogénéité de la surface de l'électrode (acier). Cette inhomogénéité peut résulter de la rugosité de la surface de l'électrode, de la formation de produits de corrosion, de l'oxydation du métal ou encore de l'adsorption de l'inhibiteur [20, 21].

En utilisant le logiciel de simulation électrique ZSimpWin®, une modélisation de l'interface métal / électrolyte a été réalisée par l'intermédiaire d'un circuit électrique équivalent (figure III.6), composé d'une résistance de transfert de charge (R_{tc}) en parallèle avec un élément à phase constante (CPE), l'ensemble est en série avec la résistance de la solution (R_s). Un excellent ajustement paramétrique des spectres d'impédance a été obtenu en utilisant ce modèle.

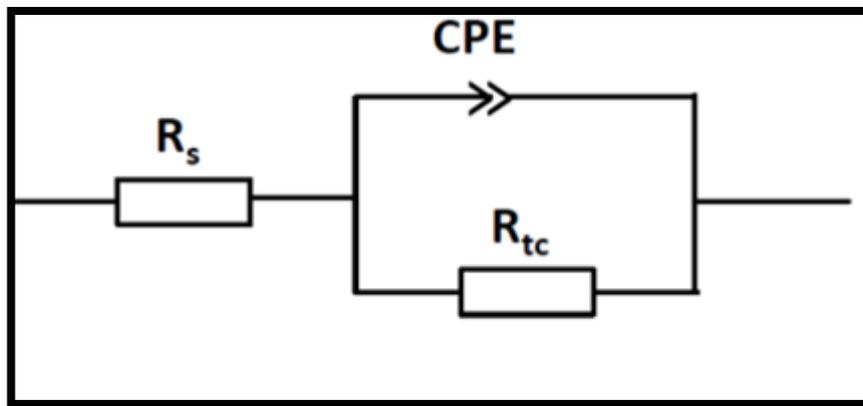


Figure III.6 : Circuit électrique équivalent proposé pour modéliser les diagrammes d'impédance de Nyquist précédemment présentés.

Les valeurs de la capacité de la double couche (C_{dl}) sont calculées par la relation de Brug [8,22, 23]:

$$C_{dl} = [Q \cdot R_{tc}^{n-1}]^{\frac{1}{n}} \quad (\text{III.5})$$

L'efficacité inhibitrice de corrosion de l'acier est calculée à partir de la résistance de transfert de charges selon la relation suivante :

$$EI (\%) = \frac{(R_{tc}^{inh} - R_{tc}^o)}{R_{tc}^{inh}} \times 100 \quad (\text{III.6})$$

Où R_{tc}^{inh} et R_{tc}^o représentent, respectivement les valeurs de la résistance de transfert de charge en présence et en absence de l'inhibiteur AHA.

Les valeurs des paramètres électrochimiques pour différentes concentrations en inhibiteur obtenues par la spectroscopie d'impédance électrochimique et en utilisant le circuit électrique équivalent sont rassemblées dans le tableau III.2

Tableau III.2 : Efficacité inhibitrice et paramètres électrochimiques de la corrosion de l'acier X42 déduits des mesures d'impédances dans le milieu agressif HCl 0,5M contenant les différentes concentrations de l'inhibiteur *AHA*.

Concentration (g.l ⁻¹)	R _s (Ω.cm ²)	Q (s ⁿ Ω ⁻¹ cm ⁻²)	n	R _{tc} (Ω.cm ²)	C _{dl} (F.cm ⁻²)	R _p (Ω.cm ²)	EI (%)
0	2,631	31,2E-5	0,8730	46,407	55,1E-6	44,29	-
0,26	2,122	11,12E-5	0,8586	231,238	10,1E-6	240,50	79,93
0,80	2,003	7,919E-5	0,8781	340,691	9,50E-6	349,10	86,37
1,34	2,851	8,962E-5	0,8530	341,518	6,58E-6	354,70	86,41
1,87	1,542	8,169E-5	0,8703	338,554	8,43E-6	353,50	86,29
2,41	2,488	7,994E-5	0,8723	354,324	8,50E-6	357,20	86,90
2,94	1,287	10,44E-5	0,8404	363,337	5,97E-6	369,70	87,22
3,48	2,120	12,15E-5	0,8028	222,738	3,51E-6	215,70	79,16

D'après ce tableau, nous constatons que l'ajout de l'extrait *AHA* fait diminuer la valeur de la capacité de la double couche (C_{dl}) et augmente celle de la résistance de transfert de charge (R_{tc}).

La diminution de la valeur de C_{dl} peut être attribuée à l'adsorption des molécules de l'inhibiteur à l'interface acier / électrolyte conduisant à la formation d'une couche protectrice.

Le tableau III.2 montre aussi que l'efficacité d'inhibition de l'extrait *AHA* est proportionnelle avec la concentration de l'inhibiteur *AHA* et atteint une valeur de 86,37 % pour 0,80 g.L⁻¹. L'efficacité inhibitrice varie légèrement au-delà de 0,80 g.L⁻¹. A titre indicatif, l'efficacité d'inhibition calculée à partir des résultats de l'impédance électrochimique montre la même tendance que celles obtenues par des courbes de polarisation et de la perte en masse.

III.3. Isotherme d'adsorption

Afin de trouver l'isotherme d'adsorption convenable à notre cas d'étude, différents types d'isothermes ont été testés à savoir : Langmuir, Temkin et Frumkin (Figure III.7).

Les valeurs de taux de recouvrement (θ) pour différentes concentrations d'inhibiteur AHA, obtenues à partir des mesures d'impédance électrochimique (équation III.6), ont été utilisées pour déterminer l'isotherme correspondante au processus d'adsorption de cet inhibiteur selon la valeur des coefficients de corrélation R^2 (figure III.7).

$$\theta = \frac{(R_{tc}^{inh} - R_{tc}^0)}{R_{tc}^{inh}} \quad (\text{III.7})$$

Le modèle d'isotherme d'adsorption de Langmuir suppose qu'il existe à la surface un nombre fixe de sites énergétiquement identiques. Chacun des sites ne peut adsorber qu'une seule particule. De plus, le modèle suppose que les interactions entre particules adsorbées sont négligeables et, par conséquent, l'énergie d'adsorption est considérée comme constante. Avec ces hypothèses, et pour une température donnée, la relation entre la quantité adsorbée d'une espèce et sa concentration dans la phase liquide en contact avec la surface est donnée par l'équation III.8 :

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K} + C \quad (\text{III.8})$$

Les systèmes n'obéissent pas toujours à l'isotherme de Langmuir. Car certaines hypothèses de base de ce modèle ne sont parfois pas vérifiées. Nous constatons notamment que l'enthalpie d'adsorption varie souvent avec θ . Afin d'en tenir compte, l'isotherme de Temkin suppose que l'enthalpie d'adsorption (ΔH_{ads}) décroît linéairement en fonction du θ . Cela donne une relation de type III.9 :

$$\exp(-2a\theta) = KC \quad (\text{III.9})$$

Frumkin suppose que la chaleur d'adsorption Q diminue linéairement quand le taux de recouvrement augmente. Son isotherme est donnée par la relation III.10 :

$$\frac{\theta}{1-\theta} \exp(-2a\theta) = KC \quad (\text{III.10})$$

Où (a) est une constante d'interaction entre particules adsorbées. (K) est la constante d'équilibre du processus d'adsorption et (C) la concentration de l'inhibiteur dans la solution.

La forme linéaire des isothermes d'adsorption est par les équations suivantes [8, 24, 25]:

$$\text{Langmuir : } \frac{C}{\theta} = \frac{1}{K} + C \quad (\text{III.11})$$

$$\text{Temkin : } \theta = \frac{\ln(K)}{a} + \frac{\ln(C)}{a} \quad (\text{III.12})$$

$$\text{Frumkin : } \theta = \frac{\ln(K)}{a} + \frac{1}{a} \ln \left[\frac{\theta}{C(1-\theta)} \right] \quad (\text{III.13})$$

Les figures (III.7a, III.7b et III.7c). Représentent les différents modèles d'isotherme d'adsorption de l'extrait *AHA* sur la surface de l'acier à $T = 25^\circ\text{C}$. Le choix d'un modèle adéquat dépend de la valeur du coefficient de corrélation R^2 .

La courbe $\frac{C}{\theta}$ en fonction de la concentration C de l'extrait *AHA* est linéaire avec un meilleur coefficient de corrélation égale à $R^2 = 0,999$ (figure III.7a), ce qui montre que l'adsorption de l'inhibiteur à la surface de l'acier en milieu chlorhydrique obéit à l'isotherme d'adsorption de Langmuir. Cette isotherme implique l'hypothèse. Que tous les sites d'adsorption sont équivalents et que les liaisons des particules se produisent indépendamment des sites proches qu'ils soient occupés ou non [26], par conséquent, cela suppose que les molécules inhibitrices sont adsorbées à la surface métallique pour former un film qui isole la surface de l'acier.

La constante d'adsorption (constante d'équilibre) peut être calculée à partir de l'ordonnée à l'origine de la courbe linéaire $\frac{C}{\theta}$, K est liée à l'énergie libre standard d'adsorption (ΔG°_{ads}) par l'équation III.14 [27]:

$$K = \frac{1}{55,5} \exp \left(\frac{-\Delta G^\circ_{ads}}{R.T} \right) \quad (\text{III.14})$$

Où R est la constante des gaz parfait ($8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), T est la température en $^\circ\text{K}$, la valeur 55,5 est la concentration de l'eau en solution exprimée en mole. l^{-1} . L'énergie libre standard d'adsorption (ΔG°_{ads}) peut donc être calculée.

Pour voir le type d'adsorption (physique, chimique et mixte), il faut d'abord calculer la valeur de ΔG°_{ads} . La valeur négative de ΔG°_{ads} indique la spontanéité du processus d'adsorption et la stabilité de la couche adsorbée sur la surface métallique.

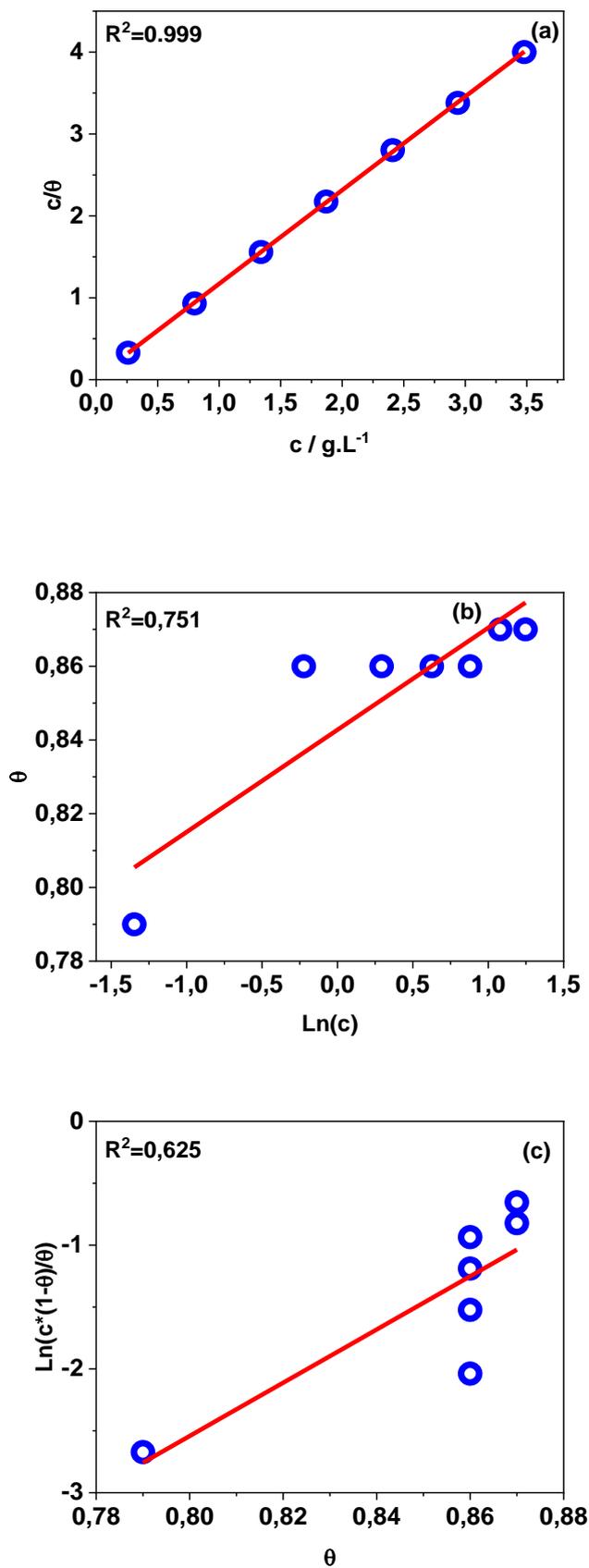


Figure III.7 : Isothermes d'adsorption selon le modèle : (a) de Langmuir, (b) de Temkin et (c) de Frumkin de l'acier X42 dans HCl 0,5M.

Adsorption physique : les valeurs de ΔG°_{ads} voisines de -20 KJ.mol^{-1} ou inférieures sont liées à des interactions électrostatiques entre les molécules chargées et le métal chargé

Adsorption chimique : les valeurs de ΔG°_{ads} proche ou supérieures de -40 KJ.mol^{-1} impliquent un transfert de charges entre les molécules organiques et la surface métallique.

Adsorption mixte : les valeurs de ΔG°_{ads} sont comprises entre -20 et -40 KJ.mol^{-1} [28, 29, 30].

Dans notre étude, la valeur de ΔG°_{ads} est égale à $-18,74 \text{ KJ.mol}^{-1}$. Cette valeur est négative et inférieure à -20 KJ.mol^{-1} , ce qui indique que les molécules de notre inhibiteur *AHA* s'adsorbent spontanément à la surface métallique par des interactions électrostatiques entre les molécules chargées et le métal chargé, ce qui donne d'une adsorption physique [31].

III.4. Effet de température

La plupart des réactions chimiques et électrochimiques deviennent plus rapides lorsque la température augmente.

En général, la température a un effet important sur les phénomènes de corrosion : la vitesse de corrosion augmente lorsque la température augmente, et cette augmentation de température induit, de fait, des changements sur l'action des inhibiteurs. Le mécanisme d'inhibition est amélioré partiellement aux températures élevées.

ZAABAR et al ont étudié l'effet de la température sur l'efficacité de plusieurs extraits de plantes utilisés pour la protection de l'acier (dans l'intervalle $20-80 \text{ }^{\circ}\text{C}$) dans le milieu HCl

$0,5\text{M}$. Cette étude a révélé une diminution du pouvoir protecteur de l'inhibiteur avec l'augmentation de la température et que l'adsorption est de type physique [32, 33].

Compte tenu de l'importance de ce facteur, nous avons effectué une étude dans l'intervalle de température $25-50^{\circ}\text{C}$, à l'aide des mesures électrochimiques en traçant les courbes de polarisation. Ces dernières sont présentées en figure III.8(a) et (b) respectivement, en absence et en présence de $0,80 \text{ g.L}^{-1}$ de *AHA* dans le milieu HCl $0,5\text{M}$.

D'après la Figure III.8 (a) et (b). La variation de la température ne change pas la forme globale des courbes de polarisation en absence et en présence de l'inhibiteur, cela montre, selon la littérature que l'augmentation de la température n'affecte pas le mécanisme de corrosion de l'acier [34].

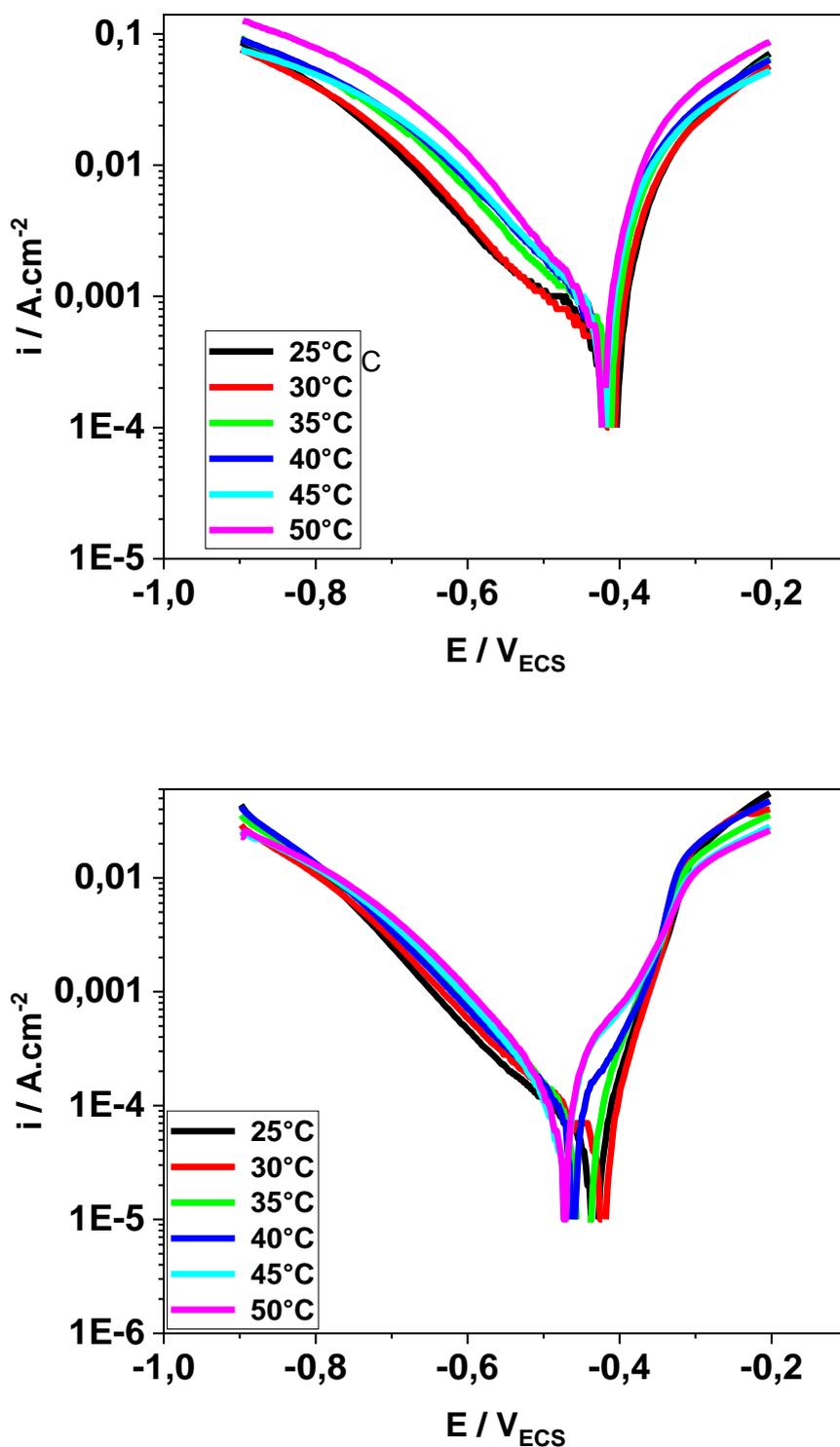


Figure.III.8 : *Effet de la température sur les courbes de Tafel dans HCl 0,5M (a) absence de l'extrait AHA et (b) contenant 0,80 gL⁻¹ de l'extrait AHA .vb=1 mV.s⁻¹.*

Les valeurs des densités de courant de corrosion (i_{corr}), du potentiel de corrosion de l'acier (E_{corr}) et de l'efficacité inhibitrice (EI) en fonction de la température sont données dans le tableau III.3.

Tableau III.3 : Paramètres électrochimiques de la corrosion de l'acier dans le milieu agressif HCl 0,5M sans et avec 0,80 g.L⁻¹ de l'inhibiteur à différentes températures, déterminés par la méthode d'extrapolation de Tafel.

Températures (°C)	Concentrations (g.L ⁻¹)	E_{corr} (mV ECS)	i_{corr} (mA.cm ⁻²)	EI (%)
25	Blanc	-419,5	0,2880	-
	0,80	-441,4	0,0402	86,04
30	Blanc	-420,3	0,3690	-
	0,80	-430,5	0,0437	88,15
35	Blanc	-423,6	0,6439	-
	0,80	-454,8	0,0648	90,00
40	Blanc	-431,0	0,6896	-
	0,80	-469,0	0,0762	88,95
45	Blanc	-430,9	0,7225	-
	0,80	-482,6	0,1691	76,59
50	Blanc	-432,4	0,7768	-
	0,80	-482,2	0,1789	76,96

D'après le tableau III.3 on observe que la densité du courant de corrosion de l'acier augmente avec l'augmentation de la température que ce soit pour la solution témoin (sans inhibiteur) ou celle avec inhibiteur AHA, ceci est en accord avec la loi d'Arrhenius (équation III.15), mais cette variation est peu marquée quand l'inhibiteur est présent dans la solution. Ainsi l'efficacité inhibitrice (EI) augmente avec l'augmentation de la température pour atteindre une valeur de 90 % à la température 35°C. Au-delà de cette dernière, l'efficacité

inhibitrice diminue légèrement et reste pratiquement constante, et par conséquent, on peut conclure que cet inhibiteur peut être jugé efficace même à haute température.

Dans cette étude, la dépendance, de type Arrhenius, observée entre la vitesse instantanée de corrosion et la température, a été utilisée pour calculer l'énergie d'activation (équation III.15)

$$i_{corr} = K \cdot \exp\left(\frac{E_a}{R.T}\right) \quad (\text{III.15})$$

Où E_a est l'énergie d'activation, R est la constante des gaz parfaits, K est la constante d'Arrhenius et T est la température absolue.

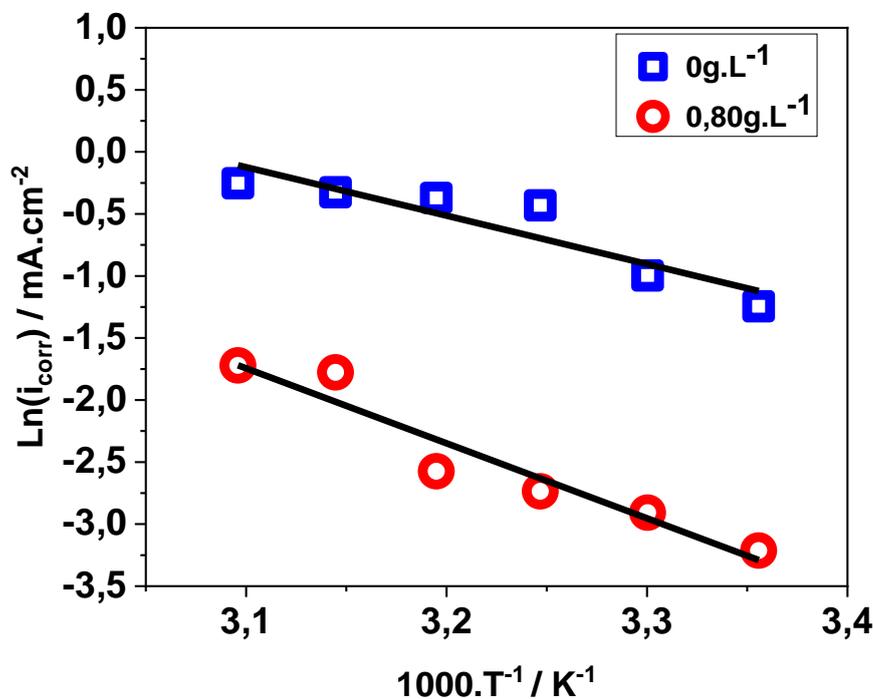


Figure III.9 : Variation de $\ln i_{corr}$ en fonction de $1/T$ dans HCl 0,5M en absence et en présence de 0,80 g.L⁻¹ de l'extrait AHA.

A partir des droites obtenues, nous pouvons calculer les énergies d'activation. La valeur de l'énergie d'activation E_a est estimée à 32,42 kJ.mol⁻¹ pour la solution exempte d'inhibiteur et à 49,88 kJ.mol⁻¹ pour celle contenant 0,80 g.L⁻¹ en inhibiteur AHA. L'augmentation de la valeur de E_a en présence de l'inhibiteur vert est typique à la physisorption de cet inhibiteur sur la surface de l'acier X42 [35]. Nous constatons que l'adsorption du produit vert sur la surface de l'acier se fait par des liaisons de natures électrostatiques. Malgré la sensibilité de ce type de liaisons avec l'augmentation de la température, mais d'après les résultats obtenus, l'inhibiteur vert étudié garde un pouvoir protecteur satisfaisant même aux hautes températures [36, 37].

III.5. Analyse de surface

III.5.1. Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

La méthode DRX a été utilisée à titre qualitatif pour confirmer les résultats obtenus précédemment (elle permet de déterminer la nature du film formé à la surface de l'électrode). En effet, la caractérisation DRX a été réalisée sur les électrodes d'acier X42 ayant immergé pendant 24h dans HCl 0,5 M en absence et en présence de 0,80 g.L⁻¹ de l'inhibiteur AHA et à la température ambiante (25 ± 1 °C) (figure III.10).

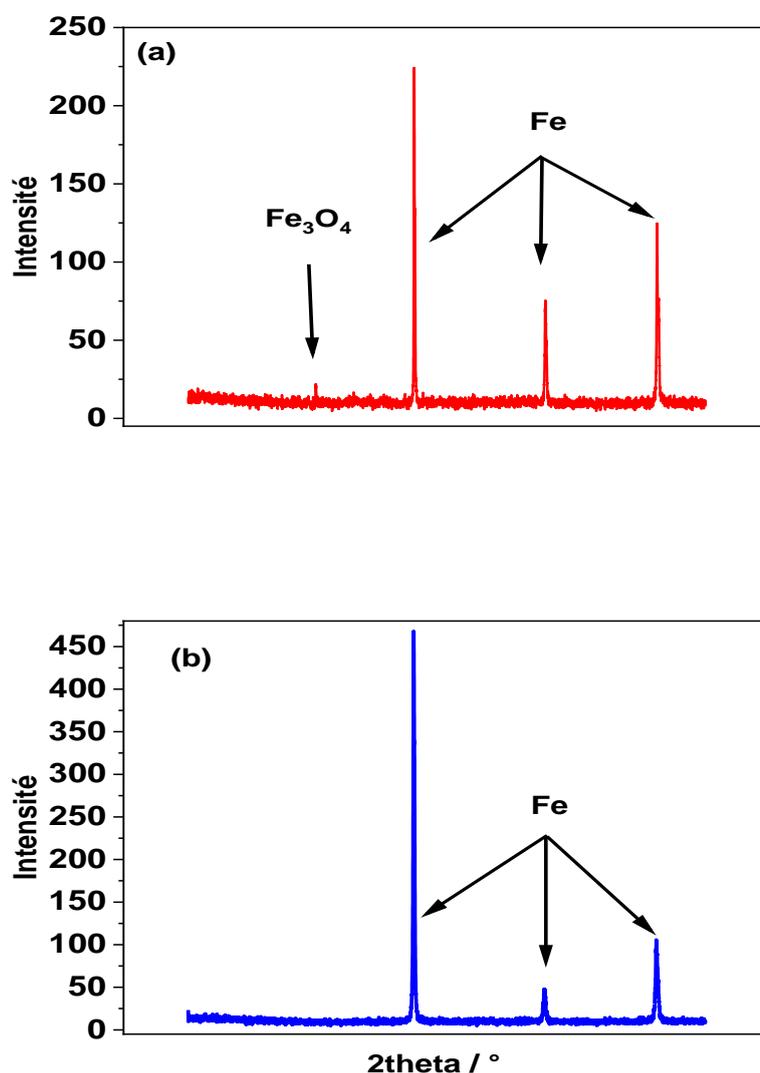


Figure III.10: Spectres DRX de la surface d'acier X42, (a) après 24h d'immersion en milieu HCl 0,5 M seul et (b) 24h d'immersion en milieu HCl 0,5 M 0,80 g.L⁻¹ d'inhibiteur vert AHA

Le spectre de l'échantillon immergé dans la solution corrosive en absence de l'inhibiteur (figure III.10 (a)) présente trois pics caractéristiques du fer distingués à $2\theta = 44,90^\circ$, $65,39^\circ$ et à $82,82^\circ$, ainsi qu'un quatrième pic qui apparaît à $2\theta = 29,70^\circ$ attribué à l'oxyde de fer (produit de corrosion), ce qui confirme que l'échantillon est attaqué par la solution HCl. Par contre, dans le cas où la solution d'attaque contient l'inhibiteur *AHA* (figure III.10 (b)), nous remarquons la disparition du pic attribué à l'oxyde de fer, ce spectre présente uniquement les pics caractéristiques du fer ($2\theta = 44,90^\circ$, $65,39^\circ$ et à $82,82^\circ$). Ceci confirme la formation d'un film assurant la protection de la surface de l'acier X42 dans le milieu corrosif.

III.5.2. Angle de contact

D'après la littérature, le caractère hydrophobe de la couche formée par l'inhibiteur sur la surface de l'électrode est à la cause de la protection de l'acier contre la corrosion. La formation spontanée et rapide du film inhibiteur repousse l'électrolyte aqueux contenant les espèces agressives, l'empêchant ainsi de mouiller correctement la surface de l'acier [4, 5, 36].

Les mesures de l'angle de contact ont été réalisées sur les électrodes de l'acier X42 ayant immergé pendant 2h dans HCl 0,5 M en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur *AHA* et à la température ambiante (25 ± 1 °C). Les valeurs moyennes de l'angle de contact sont calculées directement avec le logiciel ADVANCE® (figure III.11).

On remarque, d'après les résultats obtenus que l'addition de l'inhibiteur *AHA* dans la solution corrosive d'acide chlorhydrique HCl 0,5 M a fait augmenter l'angle de contact (la valeur de l'angle de contact passe de $27,4^\circ$ à $59,35^\circ$ en absence et en présence de $0,80 \text{ g.L}^{-1}$ de l'inhibiteur respectivement). Ce résultat indique que l'ajout de l'inhibiteur vert modifie la surface de l'acier et rend la surface de l'électrode hydrophobe. On peut supposer que le caractère hydrophobe du film organique formé, sur la surface de l'électrode, est à l'origine de la protection de l'acier contre la corrosion. La formation spontanée et rapide du film inhibiteur dès l'immersion de l'acier dans HCl repousse l'électrolyte aqueux contenant les espèces agressives, l'empêchant ainsi de mouiller correctement la surface de l'acier [37, 38].

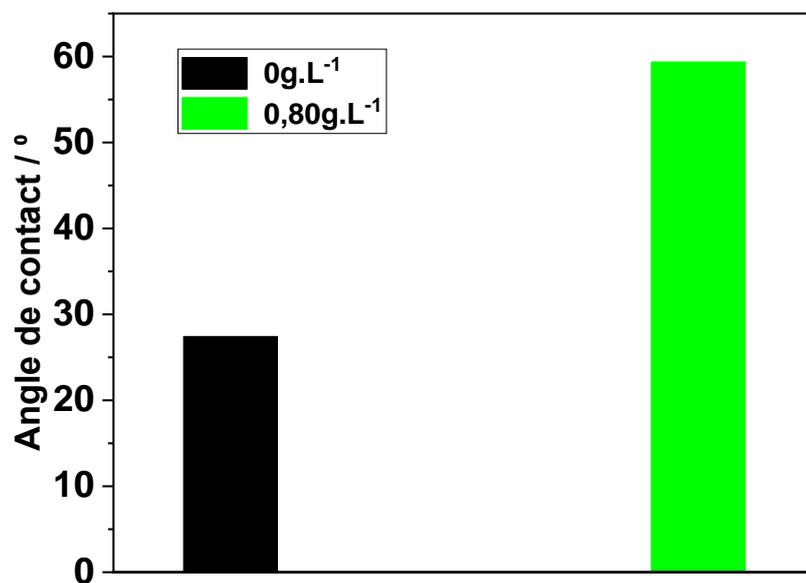
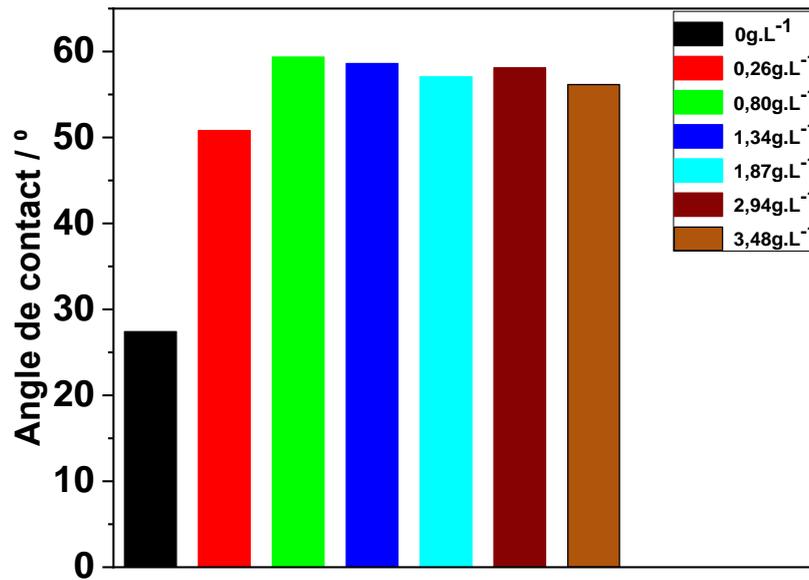


Figure III.11 : mesures de l'angle de contact dans 0,5M HCl, après 2h du temps d'immersion en absence et en présence de différente concentration.

III.5.3. Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier

La Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (ou FTIR: Fourier Transformed Infra Red spectroscopy) permet via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques.

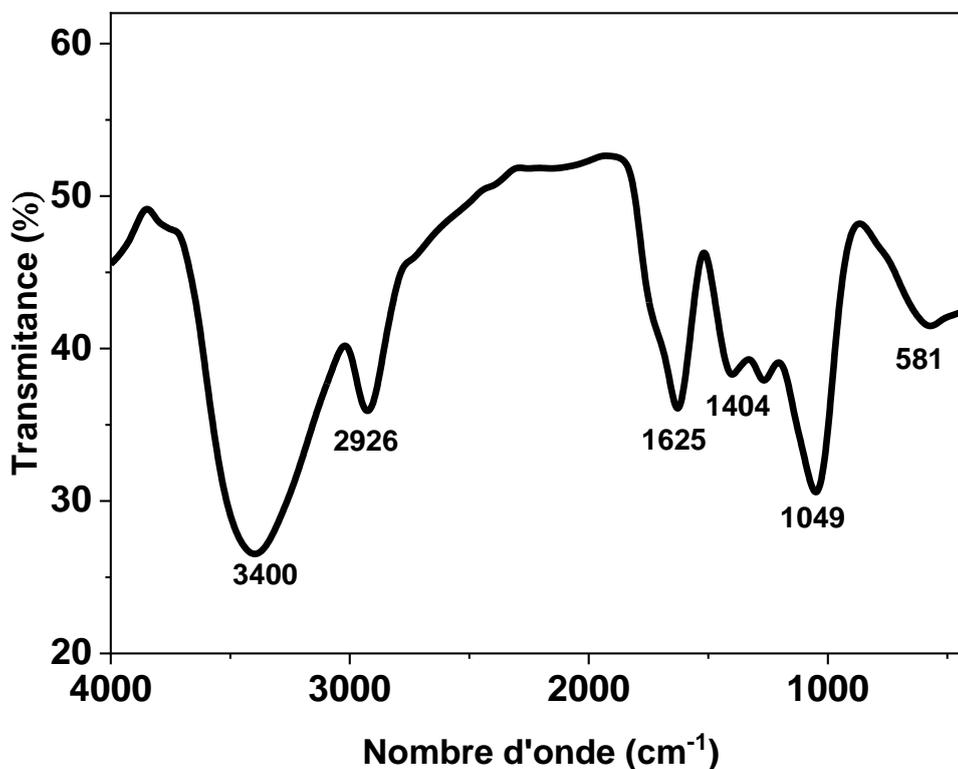


Figure III.12 : Spectre infrarouge de l'AHA.

Le spectre FTIR de l'AHA de la figure III.12 indique la présence d'une bande à 3400 cm^{-1} correspondante à la vibration du groupement OH/N-H, la bande attribuée aux C=O apparaît vers 1625 cm^{-1} . La bande attribuée aux C=C apparaît vers 2926 cm^{-1} . Un pic observé à 581 cm^{-1} et dû à la vibration aromatique C-H. Les résultats obtenus sont en accord avec la littérature [39].

III.6. Conclusion

L'ensemble des résultats obtenus lors de l'étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier X42 dans l'acide chlorhydrique à 0,5M par l'extrait de *L'Artemisia Herba Alba (AHA)* biodégradable et respectueux de l'environnement a permis de donner naissance aux conclusions qui peuvent être résumé comme suite :

- Les résultats de la gravimétrie ont montré que l'ajout de l'extrait *AHA* dans HCl diminue la vitesse de corrosion. L'efficacité inhibitrice augmente avec l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur et atteint une valeur maximale de 90% en présence d'une concentration variant de $0,8 \text{ g.L}^{-1}$ à $3,48 \text{ g.L}^{-1}$.
- Les courbes chronopotentiométriques enregistrées ont mis en évidence l'évolution du potentiel vers des valeurs positives, pour venir ensuite se stabiliser sur un palier.
- Les courbes de polarisation ont dévoilé une diminution de la densité des courants anodique et cathodique en fonction de la concentration. Par conséquent, l'action de cet inhibiteur est de type mixte.
- Les mesures par impédance électrochimique ont exhibé que l'addition de l'inhibiteur *AHA* diminue la valeur de la capacité de double couche (C_{dl}) et augmente celle de la résistance de transfert de charge (R_{tc}). La diminution de la valeur de (C_{dl}) peut être attribuée à l'adsorption des molécules de l'inhibiteur à l'interface acier / électrolyte conduisant à la formation d'une couche protectrice.
- Le tracé des différentes isothermes (Langmuir, Temkin et Frumkin) a suggéré que l'adsorption de l'extrait *AHA* obéit à l'isotherme de Langmuir. Ce modèle suppose que l'adsorption est monomoléculaire et que les interactions entre particules adsorbées sont négligeables. Cette étude a également permis de mettre en évidence la physisorption de cet extrait sur la surface métallique.
- Les essais concernant l'effet de la température ont été menés dans l'intervalle 25-50°C. L'augmentation de la température a conduit à une légère variation de l'efficacité tout en gardant de bonnes propriétés inhibitrices. Par conséquent, l'extrait *AHA* peut être jugé efficace même à haute température.
- L'effet bénéfique de l'inhibiteurs *AHA* a été mis en évidence par la technique de diffraction des rayons X (DRX) et cela par la formation d'un film assurant la protection de la surface de l'acier X42 dans le milieu corrosif conduisant la disparition du pic attribué à l'oxyde de fer.
- Le caractère hydrophobe de la couche inhibitrice a été mis en avant par l'étude de l'angle de contact, en effet, la formation spontanée et rapide du film inhibiteur dès l'immersion de l'acier dans HCl repousse l'électrolyte aqueux contenant les espèces agressives, l'empêchant ainsi de mouiller correctement la surface de l'acier.
- L'analyse du spectre FTIR de l'*AHA* a révélé des résultats en accord avec la littérature.

Références bibliographiques

- [1] A. Zaabar, R. Aitout, L. Makhloufi, K. Belhamel, et B. Saidani, « Inhibition of acid corrosion of mild steel by aqueous nettle extracts », *Pigment Resin Technol*, 1080 (2014) 145
- [2] A. Zaabar et al. « oat extract as a natural corrosion inhibitor for mild steel in 3% NaCl solution », *Surf. Rev. Lett*, 2150084 (2021) 458.
- [3] F. Constantin, « Etude de l'efficacité d'inhibiteurs de corrosion utilisés dans les liquides de refroidissement », INSA de Lyon, (2011).
- [4] X. Wang, H. Yang, F. Wang, « An investigation of benzimidazole derivative as corrosion inhibitor for mild steel in different concentration HCl solutions », *J. Corr SC*, 53 (2011) 113.
- [5] H.N. Shubha, T.V. Venkatesha, K.V. Athsala, M.K. Pavitra, M.K. Punith Kumar, «Preparation of Self Assembled Sodium Oleate Monolayer on Mild Steel and Its Corrosion Inhibition Behavior in Saline water », *J.AMI*, 5 (2013) 10738.
- [6] 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.
- [7] Li. Xianghong, « Inhibition effect of 6-benzylaminopurine on the corrosion of cold rolled steel in H₂SO₄ solution », *Corros. Sci.*, 51 (2009) 620.
- [8] Z. Mohammadi., M. Rahsepar., «The use of green *Bistorta Officinalis* extract for effective inhibition of corrosion and scale formation problems in cooling water system », *J. of All and Comp*, 770 (2019) 696.
- [9] H. Marmi, « Amélioration de la résistance à la corrosion électrochimique des aciers par utilisation des inhibiteurs », Thèse de Doctorat, Université de Biskra, (2017).
- [10] N.K. Othman, S. Yahya, M.C. Ismail, J. « corrosion inhibition of steel in 3.5% NaCl by rice straw extract », *J. Ind. En. Chemi*, 70(2019) 299.
- [11] M. Mehdipour, B. Ramezanzadeh, S.Y. Arman, « Electrochemical noise investigation of Aloe plant extract as green inhibitor on the corrosion of stainless steel in 1 M H₂SO₄ », *J. of Ind and Eng Chem*, (2015).

- [12] A. Zarrouk, B.Hammouti, T.Lakhlifi, M. Traisnel, H.Vezin, F.Bentiss, « New 1H-pyrrole2, 5-dione derivatives as efficient organic inhibitors of carbon steel corrosion in hydrochloric acid medium: electrochemical, XPS and DFT studies », *Corrosion Science*, 90 (2015) 572584.
- [13] W. Li, Q. He, C. Pei, et B. Hou, « Experimental and theoretical investigation of the adsorption behaviour of new triazole derivatives as inhibitors for mild steel corrosion in acid media », *Electrochimica Acta*, 52(2007) 6386.
- [14] A. Dehghani, G. Bahlakeh, B. Ramezanzadeh, et M. Ramezanzadeh, « Potential role of a novel green eco-friendly inhibitor in corrosion inhibition of mild steel in HCl solution: Detailed macro/micro-scale experimental and computational explorations », *Constr. Build. Mater*, 245 (2020) 118464.
- [15] M. Mehdipour, B. Ramezanzadeh, et S. Y. Arman, « Electrochemical noise investigation of Aloe plant extract as green inhibitor on the corrosion of stainless steel in 1 M H₂SO₄ », *J. Ind. Eng. Chem*, 21 (2015) 318.
- [16] A. Ostovari, S. M. Hoseinieh, M. Peikari, S. R. Shadizadeh, et S. J. Hashemi, «Corrosion inhibition of mild steel in 1 M HCl solution by henna extract: A comparative study of the inhibition by henna and its constituents (Lawsonie, Gallic acid, α -d-Glucose and Tannic acid) », *Corros. Sci*, 51 (2009) 1935.
- [17] B. Ramezanzadeh, S. Y. Arman, M. Mehdipour, et B. P. Markhali, « Analysis of electrochemical noise (ECN) data in time and frequency domain for comparison corrosion inhibition of some azole compounds on Cu in 1.0 M H₂SO₄ solution », *Appl. Surf. Sci*, 289 (2014) 129.
- [18] E. de Britto Policarpi et A. Spinelli, « Application of *Hymenaea stigonocarpa* fruit shell extract as eco-friendly corrosion inhibitor for steel in sulfuric acid », *J. Taiwan Inst. Chem. Eng*, 75 (2020) 269.
- [19] H. Ashassi-Sorkhabi et E. Asghari, « Effect of hydrodynamic conditions on the inhibition performance of l-methionine as a “green” inhibitor », *Electrochimica Acta*, (2008).
- [20] A. Fawzy, M. Abdallah, I. A. Zaafarany, S. A. Ahmed, et I. I. Althagafi, « Thermodynamic, kinetic and mechanistic approach to the corrosion inhibition of carbon steel by new synthesized amino acids-based surfactants as green inhibitors in neutral and alkaline aqueous media », *J. Mol. Liq*, 265 (2018) 276.

- [21] V. K. Thomas, J. K. Thomas, V. P. Raphael, K. Ragi, R. Johnson, et R. Babu, « Green corrosion inhibition properties of croton persimilis extract on mild steel in acid media », *J. Bio-Tribo-Corros*, 7 (2021) 1.
- [22] M. Shabani-Nooshabadi, M.S. Ghandchi, « Santolinachamaecyparissus extract as a natural source inhibitor for 304 stainless steel corrosion in 3.5% NaCl », *J.I and Eng Chem*,31 (2015) 231.
- [23] F.N. Grosser, R.S. J.Goncalves « Electrochemical evidence of caffeine adsorption on zinc surface in ethanol », *J.Corr Sc*, 50 (2008) 2934.
- [24] G.Salinas-Solano, J. Porcayo-Calderon, L.M. Martinez de la Escalera, J. Canto, M. Casales- Diaz, O. Sotelo-Mazon, J. Henao L. Martinez- Gomez, « Development and evaluation of a green corrosion inhibitor based on rice bran oil obtained from agro-industrial waste», *IndustCrps & Prodcts*, 119 (2018) 111.
- [25] A.S. Fouda, G.Y. Elewady, K. Shalabi, S. Habbouba, « Chalcone Derivatives as Corrosion Inhibitors for Carbon Steel in 1 M HCl Solutions » *J. of Materials and Environmental Scie*, 5(2014) 767.
- [26] K. Dob, « Étude de la résistance à la corrosion d'un acier au carbone en milieu Aqueux, Influencé des traitements thermiques », *Mémoire de Magister, Université de Skikda*, (2012).
- [27] S. Hu , Z. Chen ,X. Guo , « Plasmonic Interface Modified with Graphene Oxide Sheets Overlayer for Sensitivity Enhancement Materials », *J. Basel*, 11(2018) 1225.
- [28] E.M.Sherif, « A comparative study on the electrochemical corrosion behavior of iron and X-65 steel in 4.0 wt. % sodium chloride solution after different exposure intervals, *Molecules* », *J. Eng.Chem*,19 (2014) 9962.
- [29] A. Ehsani, M.G. Mahjani, M. Hosseini, R. Safari, R. Moshrefi, H. Mohammad Shiri, « Evaluation of Thymus vulgaris plant extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for stainless steel 304 in acidic solution by means of electrochemical impedance spectroscopy, electrochemical noise analysis and density functional theory », *J. Coll Inter Sc*, 490 (2017) 137.
- [30] Y. Feng, K.S Siow ,W.K Teo , K.L Tan, A.K Hsieh, « Corrosion Mechanisms and Products of Copper in Aqueous Solutions at Various pH Values », *J. Corr*, 53 (1997) 389.
- [31] T. Gancarz , K. Mech, J. Gu , K. Berent, « Corrosion studies of Li, Na and Si doped Zn-Al alloy immersed in NaCl solutions », *J. Alloys and Compounds* ,767 (2018) 1225.

-
- [32] A. Zaabar, R. Aitout, L. Makhloufi, K. Belhamel, et B. Saidani, « Inhibition of acid corrosion of mild steel by aqueous nettle extracts », *Pigment Resin Technol*, (2014).
- [33] A. Zaabar et al, « Oat extract as a natural corrosion inhibitor for mild steel in 3% NaCl solution », *Surf. Rev. Lett*, (2021).
- [34] K. Dob, « Étude de la résistance à la corrosion d'un acier au carbone en milieu Aqueux, Influencé des traitements thermiques », *Mémoire de Magister, Université de Skikda, Algérie*, (2012).
- [35] H. Hammache, L. Makhloufi, B. Saidani, « Corrosion protection of iron by polypyrrole modified by copper using the cementation process, *Corr. Sc*, 45 (2003) 2031.
- [36] A. Bonnel, F. Dabosi, C. Deslouis, M. Duprot, M. Keddami, B. Tribollet, « Corrosion Study of a Carbon Steel in Neutral Chloride Solutions by Impedance Techniques », *J. Electrochemical Society*, 130 (1983) 75.
- [37] R.M. Cornell, U. Schwertmann, « The Iron-Oxides: structure, properties, reactions, occurrences and uses », *Ed Weinheim*, (1996).
- [38] M.A. Migahed, « Effectiveness of some non-ionic surfactants as corrosion inhibitors for carbon steel pipelines in oil fields ». *J. Org Coat*, 549 (2005) 98.
- [39] D. Houaria, « Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier au carbone (XC38) par l'extrait aqueux de plantes sahariennes dans le milieu acide chlorhydrique 1M », *Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen*, (2019).

Conclusion générale

Conclusion générale

La corrosion des métaux et alliages est un phénomène universellement connu qui entraîne chaque année des pertes matérielles considérables, directes et indirectes, pour l'industrie et la collectivité. Plus grave encore, la corrosion peut causer des dommages irréversibles à l'environnement et même des pertes en vie humaine puisqu'elle est susceptible d'entraîner des problèmes de santé (pollution, contamination, ...) mais également d'affecter les appareils et structures en service (matériels de transport par exemple).

Aujourd'hui très au point, la protection contre la corrosion comprend une panoplie de traitements tels que la protection cathodique, les traitements de surface ou encore la modification du milieu corrosif par l'ajout des inhibiteurs de corrosion. Ces dernières constituent au moyen original pour lutter contre la corrosion.

L'objectif principal de ce travail est de proposer de nouvelles voies d'inhibition de la corrosion des aciers ordinaires, en vue de remplacer l'utilisation des composés cancérigènes pour l'Homme et toxiques pour l'environnement. Le but de l'étude est de pouvoir remplacer ces composés dangereux par des inhibiteurs verts.

Dans ce présent travail, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier X42 dans l'acide chlorhydrique à 0,5 M par l'extrait d'*Artemisia Herba Alba* biodégradable et respectueuse de l'environnement.

La démarche est basée sur l'utilisation de plusieurs méthodes telles que : l'étude gravimétrique, les techniques électrochimiques stationnaires et transitoires (spectroscopie d'impédance électrochimique). Cette étude a été complétée par l'analyse de surface par angle de contact et diffraction des rayons X (DRX) et cela en faisant varier plusieurs paramètres à savoir la concentration en inhibiteur, la température du milieu.

L'analyse de l'ensemble des résultats obtenus par les différentes méthodes, ont permis la mise en évidence de conclusions semblables à savoir une concentration optimale de 0,80 g.L⁻¹ ainsi qu'une stabilité de l'inhibiteur avec la température avec une efficacité élevée qui atteint 86,37 %.

L'ensemble des résultats obtenus au cours de ce travail permet enfin d'avancer quelques suggestions pour le poursuivre en améliorant leur qualité et leur précision ; à cet effet, plusieurs perspectives globales sont envisageables :

Conclusion générale

- Il serait plus judicieux d'étudier l'influence des conditions hydrodynamiques, dans les mêmes conditions opératoires, sur l'efficacité de l'inhibiteur *AHA*.
- Il serait très utile d'étudier la synergie entre les molécules de la *AHA* et les halogènes.
- Il serait également souhaitable que cette étude fasse appel à des techniques de caractérisation de surface telles que :
 - La spectroscopie des photoélectrons XPS (X-Ray Photoelectron Spectroscopy).
 - La Microscopie Electronique à Balayage (MEB) couplée à l'EDX.
 - La Microscopie à Force Atomique (AFM).
 - La spectroscopie de masse.
- Il serait donc intéressant de compléter cette étude par d'autres méthodes électrochimiques non-invasives telles que le bruit électrochimique.

Résumé

La préservation de l'environnement est un défi auquel sont confrontés les scientifiques. C'est dans cette optique que s'inscrit notre travail qui consiste en la valorisation de l'extrait de la plante *Artemisia Herba Alba* (AHA), non toxique, biodégradable, en tant qu'inhibiteur de corrosion de l'acier X42 en milieu acide HCl 0,5M. L'influence de la concentration, et de la température sur les processus de corrosion de l'acier en présence d'inhibiteur a été étudiée par la méthode gravimétrique, le suivi du phénomène d'inhibition est assuré par les méthodes électrochimiques stationnaires (la polarisation potentiodynamique et la chronopotentiométrie), transitoires (spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE)). Cette investigation est complétée par une analyse de surface telle que la diffraction des rayons X (DRX), l'angle de contact, la spectroscopie à Infra Rouge.

Les résultats obtenus indiquent que l'extrait AHA présente une efficacité inhibitrice très satisfaisante, cette efficacité augmente avec l'augmentation de la concentration en inhibiteur pour atteindre 86 % à 0,80 g.l⁻¹. Les interactions à l'interface acier/extrait AHA est typique à la physisorption, par conséquent, l'*Artemisia Herba Alba* présente un caractère d'inhibition physique et suit l'isotherme d'adsorption de Langmuir. Ces résultats confirment la formation d'un film protecteur sur la surface de l'acier X42.

Mots-clés : Corrosion, inhibiteur, biodégradable, extrait AHA, efficacité inhibitrice, milieu acide, acier X42.

Abstract :

Environmental preservation is a challenge faced by scientists. In this regard, our objective is the valorization of the extract from the plant *Artemisia Herba Alba* (AHA) as a non-toxic and biodegradable corrosion inhibitor for X42 steel in a 0.5M HCl acid medium. The influence of concentration, immersion time, and temperature on the corrosion processes of the steel in the presence of the inhibitor was studied using the gravimetric method. The inhibition mechanism was monitored using stationary electrochemical methods such as potentiodynamic polarization and chronopotentiometry, as well as transient methods such as electrochemical impedance spectroscopy (EIS). This investigation was complemented by a surface analysis including X-ray diffraction (XRD), contact angle measurement, and infrared spectroscopy.

The results obtained indicate that the AHA extract exhibits a highly satisfactory inhibition efficiency, which increases with increasing inhibitor concentration, reaching 86% at 0.80 g.l⁻¹. The interactions at the steel/AHA extract interface are typical of physisorption, indicating that *Artemisia Herba Alba* exhibits a physical inhibition character and follows the Langmuir adsorption isotherm. These results confirm the formation of a protective film on the surface of the X42 steel.

Keywords: Corrosion, Inhibitor, biodegradable, AHA extract, inhibitory efficiency, acid medium, X42 steel.

المخلص:

يمثل الحفاظ على البيئة تحدياً يواجهه العلماء، في هذا الصدد، هدفنا هو تمييز مستخلص من نبات *Artemisia Herba Alba* الغير سام والقابل للتحلل البيولوجي كمثبط لتآكل الفولاذ X42 في وسط حمضي HCl 0.5M. تمت دراسة تأثير التركيز ودرجة الحرارة على عمليات تآكل الصلب في وجود المثبط باستخدام الطريقة الوزنية، مراقبة آلية التثبيط باستخدام الطرق الكهروكيميائية الثابتة (الاستقطاب الديناميكي، قياس الجهد الزمني) بالإضافة الى الطرق الانتقالية (التحليل الطيفي للامتصاص الكهروكيميائي (SIE)). تم تكملة هذا البحث بتحليل السطح بما في ذلك حيود الأشعة السينية (DRX) وقياس زاوية التلامس والتحليل الطيفي للأشعة تحت الحمراء. تشير النتائج التي تم الحصول عليها إلى أن مستخلص AHA له فعالية تثبيطية مرضية للغاية وتزداد هذه الفعالية مع زيادة تركيز المثبط لتصل إلى 86 % عند 0.80g.l⁻¹. تعتبر التفاعلات على سطح الفولاذ/المستخلص نموذجية للامتصاص الفيزيائي، مما يشير إلى أن *Artemisia Herba Alba* ذات طابع تثبيط فيزيائي ويتبعه درجة حرارة الامتزاز (isotherme d'adsorption de Langmuir). هذه النتائج المتحصلة عليها تؤكد تكوين طبقة واقية على سطح الفولاذ X42.

الكلمات المفتاحية: التآكل، المثبط، القابل للتحلل البيولوجي، مستخلص AHA، الفعالية المثبطة، الوسط الحمضي، الفولاذ X42.

