

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université A. Mira de Bejaia



Faculté de Technologie
Département de Génie des Procédés
Laboratoire d'Electrochimie Corrosion et Valorisation Energétique (LECVE)

Mémoire

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE Master

Domaine : Science et Technologie Filière : Génie des Procédés
Spécialité : Génie Chimique

Présenté par

KERTOUS Sarah et IKHLEF Meriem

Thème

Etude de l'efficacité inhibitrice de l'extrait de la *Canne de Provence* (*Arundo Donax*) comme inhibiteur écologique de corrosion de l'acier X42 en milieu acide sulfurique 0,5 M.

Prévue le 30/06/2024

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
M ^{me} . ZAABAR Aida	MCA	Université de Bouira	Présidente
M ^{me} . AMOURA Damia	MCB	Université de Bejaia	Examinateur
M. MAIZIA Radouane	MCA	Université de Bejaia	Encadrant
M. DJERMOUNE Atmane	Assistant de recherche au centre de recherche CRAPC	Université de Bejaia	Co- Encadrant

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciements

Ce travail a été réalisé au Laboratoire d'Electrochimie Corrosion et Valorisation Energétique (LECVE) de l'Université Abderrahmane Mira – Béjaia.

La réalisation de ce mémoire a été une formidable aventure au cours de laquelle plusieurs personnes nous ont apporté leur soutien. Sans leur aide la tâche aurait été bien plus pénible. C'est alors tout naturellement que nous souhaitons les remercier.

Nos remerciements les plus sincères sont adressées à notre encadrant Mr. MAIZIA Radouane Maître de conférences classe (A) à l'université de Bejaia et le Co-cadrant Mr. DJARMOUNE Atmane assistant de recherche au centre de recherche CRAPC de Béjaia pour votre disponibilité incontestable, vos efforts et vos conseils avisés tout au long de cette période. Merci surtout pour votre soutien moral et votre sympathie. Vous avez été pour nous un exemple par votre qualité intellectuelle, votre persévérance et votre détermination au bon déroulement de notre travail.

Nous souhaitons exprimer toute notre gratitude envers les membres du jury qui ont bien voulu consacrer leur temps et prendre part à l'évaluation de notre travail. Veuillez trouver ici le témoignage de notre profond respect.

Nous tenons à dévoiler notre profonde reconnaissance à tout le personnel pédagogique et administratif de l'université de Bejaia pour la qualité des enseignements dispensés et l'encadrement bienveillant dont nous avons bénéficié.

Nous remercions également tous les ingénieurs/techniciens de département de Génie des Procédés ainsi que Mme HIBER ingénieur du laboratoire de recherche d'électrochimie, corrosion et de valorisation énergétique et tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Merci Allah de m'avoir donné la force et la patience d'aller jusqu'au bout et réaliser mon rêve.

Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude à :

Mon père : merci pour tous ce que tu as fait pour moi afin de pouvoir arriver à ce jour dont j'ai toujours rêvé. Tes conseils, tes encouragements et surtout ta confiance en moi m'ont aidé à aller vers l'avant.

Ma mère : merci d'être toujours à mes côtés dans les moments les plus durs. Ton soutien et tes précieux conseils ont été pour moi la clé avec laquelle j'ai pu ouvrir les portes vers un avenir plein de réussite.

Mon frère Youbacine et son épouse Meriem : je vous remercie du fond de mon cœur de m'avoir toujours soutenue.

*Ma sœur Katia : mon meilleur exemple dans la vie, ma fierté
Quoi que je dise, je ne pourrais jamais décrire à quel point tu m'as aidé, à chaque fois que je tombe, tu me relèves. Tu as toujours su me diriger vers la bonne voie.*

Mon cher grand père, qui me n'a jamais oublié dans ses prières.

Tous les membres de ma famille : oncles, tantes, cousins et cousines.

Ma chère amie Meriem qui a partagé avec moi ces cinq longues années et avec qui j'ai eu l'immense plaisir de travailler.

A toute personne qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie.

Sarah Kertous

Avec l'aide de Dieu le tout puissant.

J'ai le grand plaisir de dédier ce mémoire :

*Aux épaules sur lesquelles je repose et je peux me reposer à tout moment,
ma mère et mon père, je prie que dieu vous donne une longue vie.
Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération,
et mes profonds sentiments envers eux pour tous leurs sacrifices, leurs
soutiens, leurs amours, leur patience illimitée et leur encouragement
continu.*

*Une immense dédicace aux personnes les plus chères À mes yeux, ma
sœur : Assia et mon frère Mohammed Aymen qui m'ont toujours
soutenu.*

A toute ma famille et surtout à mes très chers grands parents.

A ma très chère amie Ahlem.

*A Ma chère amie Sarah qui a partagé avec moi ces cinq longues
années et avec qui j'ai eu l'immense plaisir de travailler.*

*A Toutes les personnes qui me reconnaissent et qui m'ont aidé et
contribué à la réalisation de ce travail.*

Meriem Ikhlaf

Table des matières

Liste des figures	iv
Liste des tableaux	vi
Liste des abréviations	vii
Introduction générale	1

Chapitre I: Recherche bibliographique

I.1 Généralités sur la corrosion	5
I.1.1 Définition de la corrosion	5
I.1.2 Les types de corrosion	6
I.1.2.1 La corrosion chimique	6
I.1.2.2 La corrosion électrochimique	6
I.1.2.3 La corrosion biochimique.....	6
I.1.3 Les formes de la corrosion	6
I.1.3.1 La corrosion généralisée (uniforme)	6
I.1.3.2 La corrosion localisée	7
I.1.4 Les facteurs de corrosion	11
I.1.4.1 Les paramètres influençant sur la vitesse de la corrosion	13
I.1.4.2 Mécanisme de la corrosion.....	13
I.1.5 Importance de l'étude de la corrosion	14
I.2 Méthodes d'études de la corrosion	14
I.2.1. Méthodes classiques	15
I.2.1.1 Mesure de perte de masse.....	15
I.2.1.2 Dosage de la concentration de cations M^{n+} en solution	15
I.2.1.3 Exploitation de la réaction de réduction.....	15
I.2.1.4. Mesure de perte d'épaisseur.....	16
I.2.2. Méthodes électrochimiques.....	16
I.3 Moyens de lutte contre la corrosion.....	16
I.3.1 Prévention par un choix judicieux des matériaux	16
I.3.2 Prévention par une forme adaptée des pièces	17
I.3.3 Protection électrochimique	17
I.3.3.1 Protection cathodique.....	17
I.3.3.2 Protection anodique	17
I.3.4 Protection par revêtement	18

I.3.5 Protection par les inhibiteurs de corrosion.....	18
I.3.5.1 Définition de l'inhibiteur.....	18
I.3.5.2 Propriétés.....	18
I.3.5.3 Utilisation industriels	19
I.3.5.4 Les classes d'inhibiteurs	19
I.4 Les inhibiteurs verts de corrosion	23
I.5 Arundo Donax	24
I.5.1 Description botanique d'Arundo Donax (La Canne de Provence).....	24
I.5.2 Classification	25
I.5.3 Composants chimiques d'Arundo Donax	25
Références bibliographiques	30

Chapitre II: Techniques d'étude et conditions expérimentales

II.1 Techniques d'étude.....	35
II.1.1 La gravimétrie (Perte de masse).....	35
II.1.2 Méthodes électrochimiques	36
II.1.2.1 Méthodes stationnaires	36
II.1.2.2 Méthodes transitoires.....	38
II.1.3 Les techniques d'analyse de surface	43
II.1.3.1 Angle de contact.....	43
II.1.3.2 Diffraction des rayons X (DRX)	44
II.2 Conditions expérimentales	45
II.2.1 Préparation des électrodes	45
II.2.1.1 Matériau utilisé.....	45
II.2.1.2 Préparation des surfaces.....	46
II.2.2 Milieu électrolytique	46
II.2.3 Préparation de l'extrait (AD)	46
II.2.4 Cellule électrochimique	47
II.3 Dispositifs expérimentaux	48
II.3.1 Dispositif expérimental de mesure potentiodynamique, potentiostatique et galvanostatique.....	48
II.3.2 Dispositif expérimental de mesure de l'impédance électrochimique.....	49
II.4 Protocoles expérimentaux	50
II.4.1 Protocole de mesure de la perte de masse	50
II.4.2 Protocole des mesures électrochimiques	51

II.4.2.1 Courbes de polarisation intensité-potentiel.....	51
II.4.2.2 Suivi de potentiel de corrosion.....	51
II.4.2.3 Diagrammes d'impédance électrochimique.....	51
II.4.2 Protocole de mesures d'analyse de surface	51
II.4.2.1 L'angle de contact	51
II.4.2.2. Diffraction des rayons X.....	52
II.5 Système d'acquisition et de traitement de données électrochimiques	53
Références bibliographiques	54

Chapitre III: Résultats et discussion

III.1 Etude gravimétrique	56
III.2 Etude électrochimique	58
III.2.1 Suivi du potentiel de corrosion en fonction du temps.....	58
III.2.2 Courbes de polarisation.....	59
III.2.3 Spectroscopie d'impédance électrochimique	62
III.3 Isotherme d'absorption.....	67
III.4 Effet de température	71
III.5 Analyse de surface.....	74
III.5.1 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)	74
III.5.2 Angle de contact	76
Références bibliographiques	77
Conclusion générale.....	80

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : photos de matériaux soumis aux phénomènes de la corrosion.	5
Figure I.2 : a) La distribution homogène des demi-réactions anodiques et cathodiques génère une corrosion uniforme [13], b) Corrosion générale (rouille) d'une pièce en acier.....	7
Figure I.3 : Corrosion localisée.....	7
Figure I.4 : Corrosion galvanique.....	8
Figure I.5 : Joint de grain d'un acier inoxydable sensibilisé	8
Figure I.6 : Dézincification d'un boulon en laiton	9
Figure I.7 : étapes de corrosion par érosion.	9
Figure I.8 : Corrosion par piqûres.	10
Figure I.9 : Corrosion sous contrainte.	10
Figure I.10 : Corrosion caverneuse	11
Figure I.11 : Les différents types de la corrosion localisée.	11
Figure I.12 : Représentation schématique des modes d'adsorption de molécules organiques inhibitrices sur une surface métallique	20
Figure I.13 : Diagramme d'Evans du déplacement du potentiel de corrosion en présence de l'inhibiteur de corrosion.....	22
Figure I.14 Les différentes classes des inhibiteurs verts de corrosion.	24
Figure I.15 Photographie d' <i>Arundo Donax</i>	25

Chapitre II

Figure II. 1 : Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel	38
Figure II.2: Schéma d'un système électrochimique non linéaire soumis à une perturbation de potentiel sinusoïdale.	40
Figure II.3 : Représentation de l'impédance $Z\omega$: (a) diagramme de Nyquist et (b) diagramme de Bode.	42
Figure II.4 : Représentation, dans le plan de Nyquist, de l'impédance électrochimique, dans cas d'un processus de transfert de charge et circuit électrique équivalent	43
Figure II.5 : Schéma de l'angle de contact	44
Figure II.6 : Loi de Bragg donnant les directions où les interférences sont constructives	45
Figure II.7 : Schéma du montage d'extraction à reflux.	47
Figure II.8 : photo de la cellule électrochimique à trois électrodes.	48

Figure II.9 : Dispositif expérimental de mesure potentiodynamique, potentiostatique et galvanostatique.....	49
Figure II.10 : Dispositif expérimental de mesure de l'impédance électrochimique.	50
Figure II.11: Echantillon d'acier dans une solution corrosive avec et sans inhibiteur.	50
Figure II.12: Photographie du goniomètre Krüss et schéma de principe de la mesure d'angle de contact.....	52
Figure II.13 : Photographie d'un diffractomètre de type Panalytical Empyrean®.	53

Chapitre III

Figure III.1 : (a) Variation de la perte en poids en fonction de temps (b) l'efficacité inhibitrice, déduite après 1 jours d'immersion, en fonction de la concentration en inhibiteur vert (AD) dans H ₂ SO ₄ 0.5M.....	57
Figure III.2 : Evolution du potentiel de corrosion de l'électrode de l'acier X42 en fonction du temps dans H ₂ SO ₄ 0,5M à différentes concentrations en inhibiteur (AD).....	59
Figure III.3 : Courbes de Tafel de l'acier X42 dans H ₂ SO ₄ 0,5 M à différentes concentrations en inhibiteur (AD), $V_b = 1 \text{ mV.s}^{-1}$ et $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	60
Figure III.4 : Diagrammes d'impédance de l'acier X42 dans H ₂ SO ₄ 0,5 M en absence et présence de différentes concentrations de l'extrait (AD) à E_{corr} et $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	64
Figure III.5 : Circuit électrique équivalent proposé pour modéliser les diagrammes d'impédance de Nyquist précédemment présentés.	65
Figure III.6: Isothermes d'adsorption selon le modèle : (a) de Langmuir, (b) de Temkin et (c) de Frumkin de l'acier X42 dans H ₂ SO ₄ 0,5M en présence de l'extrait (AD).	70
Figure.III.7 : Effet de la température sur les courbes de Tafel dans H ₂ SO ₄ 0,5 M (a) absence de l'extrait AD et (b) contenant 0,84 g.L ⁻¹ de l'extrait (AD), $v_b=1 \text{ mV.s}^{-1}$	71
Figure III.8: Variation de $\ln i_{\text{corr}}$ en fonction de $1/T$ dans H ₂ SO ₄ 0,5 M en absence et en présence de 0,84 g.L ⁻¹ de l'extrait (AD).....	73
Figure III.9: Spectres DRX de l'acier X42 après 24h d'immersion (a) en absence de L'extrait (RD) (b) en présence de L'extrait (AD).	75
Figure III.10: Mesures de l'angle de contact dans H ₂ SO ₄ 0.5 M, après 1h du temps d'immersion en absence et en présence de différentes concentrations de l'extrait (AD).....	76

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Influence de différents facteurs sur la corrosion des métaux	12
Tableau I.2 : Types de revêtements.....	18
Tableau I.3 : Classement des inhibiteurs	19
Tableau I.4 : Les différents composants chimiques <i>d'Arundo Donax</i>	26

Chapitre II

Tableau II.1 : Composition chimique d'acier X42 API 5L-X42 en % massique.	45
--	----

Chapitre III

Tableau III.1. Paramètres de la corrosion de l'acier X42 dans le milieu H_2SO_4 0,5M contenant les différentes concentrations de l'inhibiteur (AD), calculés par la méthode d'extrapolation de Tafel.....	61
Tableau III.2 : Efficacité inhibitrice et paramètres électrochimiques de la corrosion de l'acier X42, déduits des mesures d'impédances, dans le milieu H_2SO_4 0,5M contenant les différentes concentrations de l'inhibiteur (AD).....	66
Tableau III.3 : Paramètres électrochimiques de la corrosion de l'acier X42 dans le milieu agressif H_2SO_4 0,5M sans et avec 0.84 g.L^{-1} de l'inhibiteur à différentes températures, déterminés par la méthode d'extrapolation de Tafel.	72

Liste des abréviations

AD: *Arundo donax*.

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

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

i_{corr} : Densité de courant de corrosion (mA).

η : L'efficacité d'inhibition (%).

ω : Pulsation ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$).

W : Perte de masse.

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

θ : Taux de recouvrement.

SIE: Spectroscopie d'Impédance Electrochimique.

R_d : La résistance de polarisation ($\Omega\cdot\text{cm}^2$).

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

R_{tc} : la résistance de transfert de charge ($\text{ohm}\cdot\text{cm}^2$).

R_s : la résistance de solution ($\text{ohm}\cdot\text{cm}^2$).

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

f : Fréquence (Hz).

DRX: Diffraction des Rayons X.

ΔG_{ads}° : L'énergie libre standard d'adsorption ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$).

Introduction générale

La corrosion, au sens large, peut s'exprimer comme la détérioration d'un matériau par le milieu dans lequel il se trouve. C'est un domaine de recherche indispensable dans la science et l'ingénierie des matériaux, car la résistance à la corrosion caractérise la stabilité ou la durabilité d'un matériau, qui est l'une des performances les plus importantes dans les applications industrielles. La corrosion résulte d'interactions physico-chimique 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.) [1, 2].

Les processus de corrosion dans les milieux dépendent d'un grand nombre de facteurs (la nature et la composition du matériau, l'environnement et ses caractéristiques chimiques, sa température, etc...) qui interviennent non pas individuellement, mais en relation plus ou moins complexe les uns avec les autres. De ce fait, la corrosion a donné et donne toujours lieu à de nombreuses études car les phénomènes de corrosion rencontrés quotidiennement sont complexes et souvent spécifiques [3].

La corrosion affecte la plupart des secteurs industriels et peut coûter des milliards de dollars chaque année. On estime qu'elle détruit un quart de la production annuelle mondiale d'acier, ce qui représente environ 150 millions de tonnes par an ou encore 5 tonnes par seconde [4].

L'acier API 5L X42, constitue le type d'acier de notre étude. Le choix et l'importance de ce type acier, tient compte de sa large exploitation dans notre pays, comme étant un Oléoduc ou pipe pour le transport de produits pétroliers depuis des gisements de Hassi Messaoud au sud de l'Algérie, vers les ports pétroliers et zones industrielles au nord.

Les solutions acides sont largement utilisées dans l'industrie, les principaux domaines d'application étant le décapage ou le nettoyage à l'acide, la stimulation des puits de pétrole, et l'élimination de dépôts localisés (tartre non uniformément reparti, rouille, dépôts bactériens...etc.). L'agressivité de ces solutions acides conduit à l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion pour empêcher le processus de dissolution des métaux reste une application inévitable et très répondeue.

En matière de protection, les inhibiteurs de corrosion sont des substances qui, lorsqu'elles sont ajoutées à de faibles concentrations dans des milieux corrosifs, diminuent ou empêchent la réaction du métal avec son environnement. Des efforts considérables sont employés pour trouver les composés appropriés à employer comme inhibiteurs de corrosion dans divers

milieux corrosifs afin d'arrêter ou de retarder au maximum la corrosion des structures métalliques. Plusieurs travaux ont été réalisés sur les composés organiques et/ou inorganiques et ont démontré que ces inhibiteurs ont une bonne efficacité inhibitrice sur les différents matériaux et dans différents milieux corrosifs [5]. Cependant, ces composés présentent des effets toxiques sur l'organisme et empoisonnent l'environnement [6].

En raison des préoccupations environnementales, les huiles et les extraits de plantes sont considérés de plus en plus comme une source d'inhibiteurs verts de corrosion [7] qui font l'objet d'une grande attention dans le monde de l'industrie et vue leurs non toxicité et efficacité dans le domaine de la corrosion.

C'est dans cette optique que s'inscrit notre travail de recherche. Dans ce travail nous nous sommes intéressées à tester l'efficacité inhibitrice de l'extrait de plante de la Canne de Provence connu sous le nom scientifique *Arundo Donax* de l'acier X42 dans le milieu acide sulfurique (H_2SO_4 0.5M).

La Canne de Provence connu sous le nom scientifique *Arundo Donax*, qui est très répandu en Algérie. Elle pousse souvent dans les zones humides, au bord des cours d'eau, des rivières...etc, elle peut atteindre jusqu'à 6m de hauteur et des tiges épaisses sur lesquelles évoluent des feuilles rubanées. Le choix porté sur cette plante tient compte de son abondance, sa non toxicité et sa solubilité dans les milieux acides.

L'efficacité inhibitrice d'*Arundo Donax* a été étudiée par plusieurs méthodes à savoir : la perte de masse, la spectroscopie d'impédance électrochimique, les courbes de polarisation et le potentiel de corrosion. Afin de voir le caractère hydrophile ou hydrophobe de la surface de l'acier après inhibition, nous avons eu recours à la mesure de l'angle de contact. La DRX est utilisée pour révéler la nature des oxydes formés ainsi que le degré de corrosion de la surface.

L'étude que nous présentons dans ce mémoire est subdivisée en trois chapitres et se termine par une conclusion générale et quelques perspectives.

Le premier chapitre constitue une synthèse bibliographique relative à la corrosion, les méthodes de protection usuelles, l'utilisation d'inhibiteurs en général et l'application des inhibiteurs verts en particulier.

Le second 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 et impédance électrochimique) ainsi que les méthodes d'analyse de surface (Angle de contact et DRX).

Le troisième chapitre est dédié à la présentation des résultats des tests d'inhibition de la corrosion de l'acier API 5L X42 par l'extrait d'*Arundo Donax* dans le milieu agressif acide sulfurique 0,5M. L'efficacité inhibitrice a été testée en fonction de différents paramètres (la concentration en inhibiteur, le temps d'immersion et la température).

En fin une conclusion générale résumant l'essentiel des résultats obtenus et les perspectives à entreprendre pour approfondir cette étude.

Références bibliographiques

- [1] G. L. Song, « The grand challenges in electrochemical corrosion research », *Frontiers in materials*, Frontiers Media SA, vol. 1, p. 2, 2014.
- [2] J. J. Lamoureux, « Précis de corrosion », Masson, 1994.
- [3] J. Bénard, A. Michel, J. Philibert, et J. Talbot, « Métallurgie Générale, Masson et Cie », Edition, Paris VI, p. 49, 1969.
- [4] R. M. Latanision, « Current and projected impact of corrosion science and engineering », *Materials performance*, vol. 26, n° 10, p. 9, 1987.
- [5] K. Tourabi, K. Nohair, N. Nyassi, B. Hammouti, F. Bentiss, et A. Chetouani, « Enhancement of corrosion protection efficiency of mild steel by 3, 5-di (4-tolyl)-4-amino-1, 2, 4-triazole in hydrochloric acid medium », *Moroccan Journal of Chemistry*, vol. 1, n° 2, p. 1, 2013.
- [6] N. O. Eddy et E. E. Ebenso, « Inhibitive and adsorption properties of *Musa sapientum* for the corrosion of mild steel in acid medium », *Pure and Applied Chemistry*, vol. 2, p. 46, 2008.
- [7] N. Lotfi et al., « Effect of anise oil as a green inhibitor on steel corrosion behaviour », *Arab J Chem Environ Res*, vol. 1, p. 13, 2014.

Chapitre I

Ce chapitre est consacré à une étude bibliographique sur le phénomène de corrosion et les méthodes nécessaire pour lutter contre ce problème. Une revue bibliographique est aussi présentée sur l'utilisation des inhibiteurs verts dans la protection contre la corrosion.

I.1 Généralités sur la corrosion

I.1.1 Définition de la corrosion

Le terme « corrosion » a son origine en latin « corrodere » qui signifie ronger ou attaquer. En effet, la corrosion est une interaction chimique entre le métal et son milieu environnant agressif qui conduit à une dégradation du métal et notamment ces propriétés (physiques, chimiques, mécaniques...etc) [1].

La corrosion est aussi définie comme étant une réaction interfacial irréversible entre le métal et son environnement ce qui en résulte la consommation du matériau ou bien la dissolution d'une composante du milieu environnant dans le matériau [2]. L'environnement corrosif peut être l'eau, l'air, le carbone dioxyde, liquides organiques, sels fondus ou soufre gazeux [3].

La plupart des métaux se trouvent dans la nature sous forme de composés, tels que les oxydes, les sulfures, les silicates ou carbonates. Très peu de métaux se présentent sous forme native. La raison la plus évidente est la stabilité thermodynamique des composés par opposition aux métaux [3].



Figure I.1 : photos de matériaux soumis aux phénomènes de la corrosion [3].

I.1.2 Les types de corrosion

On distingue trois types de corrosion d'un métal : la corrosion chimique, la corrosion électrochimique et la corrosion biochimique (bactérienne).

I.1.2.1 La corrosion chimique

La corrosion chimique est la conséquence d'une réaction hétérogène d'une phase liquide ou gazeuse avec un solide sans la présence d'un catalyseur et qui ne fait pas intervenir le passage d'un courant électrique. Elle est souvent suivie d'une corrosion électrochimique et généralement elle est rencontrée dans les industries produisant ou utilisant les acides [4, 5].

I.1.2.2 La corrosion électrochimique

La corrosion électrochimique est une réaction d'oxydation du métal. Lors de la circulation du courant électrique entre les électrodes, la corrosion se forme par des transferts électroniques entre le métal et la solution corrosive. La corrosion qui se passe au niveau du métal représente une réaction anodique, cette zone est attaquée par la présence d'une zone cathodique où se déroule plusieurs réactions de réductions [6].

I.1.2.3 La corrosion biochimique

La corrosion biochimique est l'action des bactéries ou de produits provenant de l'activité bactérienne tels que les acides organiques, le dioxyde de carbone et l'anhydride sulfureux sur les matériaux métalliques [7]. On l'observe souvent sur les canalisations enterrées et sur les ouvrages immergés en eau de mer [8]. La lutte contre cette forme de corrosion est à l'heure actuelle essentiellement d'ordre biologique, elle est réalisée par injection de produits bactéricides dans les milieux corrosifs [9].

I.1.3 Les formes de la corrosion**I.1.3.1 La corrosion généralisée (uniforme)**

La corrosion généralisée est caractérisée par une dissolution uniforme due à une réaction chimique ou électrochimique sur toute la surface exposée du métal en contact avec l'agent agressif, la surface cathodique et anodique se déplace avec ce dernier, l'épaisseur se diminue par l'unité de temps ou par la perte de masse par unité de surface et de temps [1]. Généralement cette corrosion se trouve dans les milieux acides ou alcalins [10]. La corrosion généralisée peut être évitée par certaines méthodes comme le choix approprié des matériaux, la protection cathodique ou par l'utilisation des inhibiteurs de corrosion [11].

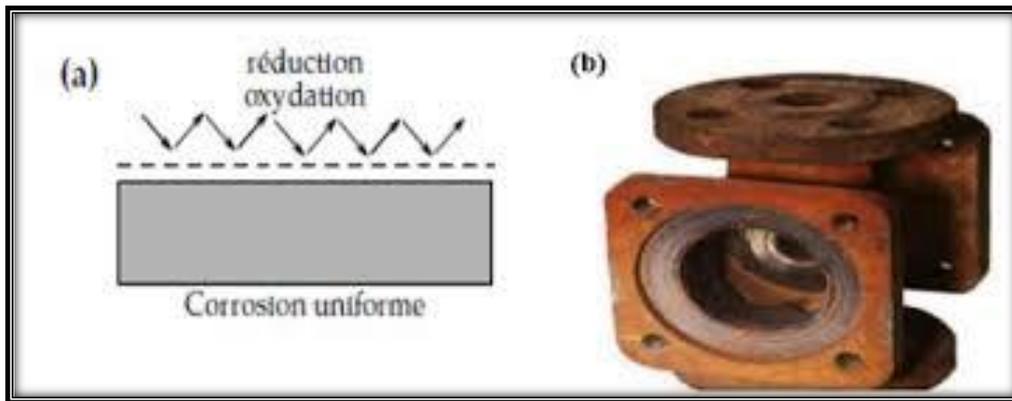


Figure I.2 : (a) La distribution homogène des demi-réactions anodiques et cathodiques génère une corrosion uniforme [12], (b) Corrosion générale (rouille) d'une pièce en acier [13].

I.1.3.2 La corrosion localisée

La corrosion localisée se découle de la corrosion uniforme, elle intervient sur des sites de façon localisée lorsqu'il existe une hétérogénéité du matériau, du milieu corrosif ou des conditions physico-chimiques à l'interface, cette partie représente un lieu anodique dont la surface est très petite dans toute la structure du métal qui représente la zone anodique. Cette forme de corrosion est mesurée par la perte de masse et l'épaisseur réduite [6, 14]. Elle représente particulièrement un phénomène dangereux puisque les produits de corrosion ne sont pas visible et la perte de poids n'est pas toujours appréciable [15].

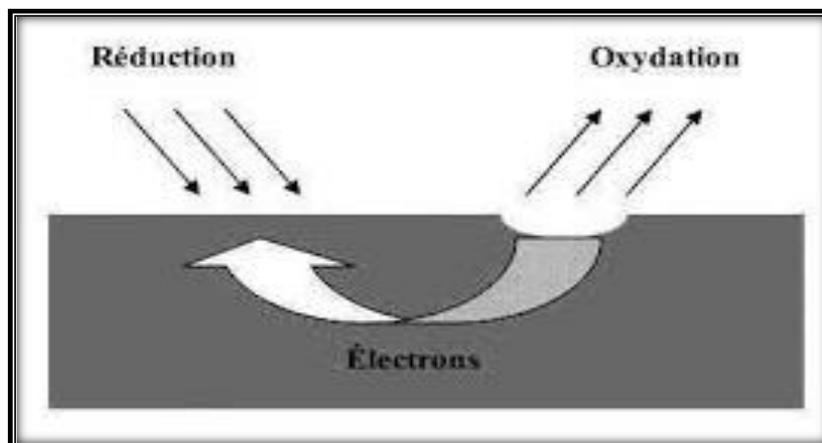


Figure I.3 : Corrosion localisée [4].

On distingue plusieurs types de la corrosion localisée macroscopique et microscopique :

I.1.3.2.1 Corrosion galvanique

La corrosion galvanique se produit entre deux métaux dissemblables immergés dans une solution corrosive, lors d'un couplage entre eux ou alliages différents, un courant électronique va s'établir entre ces deux métaux résultant du court-circuit formé. La dégradation du métal le

moins résistant à la corrosion devient l'anode et le métal le plus résistant à la corrosion c'est la cathode [11].

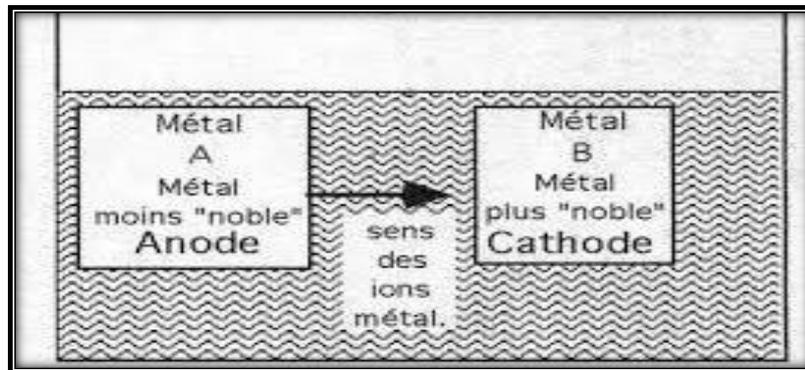


Figure I.4 : Corrosion galvanique [11].

I.1.3.2.2 Corrosion intergranulaire

La corrosion intergranulaire est une forme de corrosion qui se propage dans le métal et qui se manifeste dans les zones associées aux joints de grains. Ce phénomène peut être dû à la présence des impuretés dans le joint de grain, la structure atomique ou l'enrichissement (ou l'appauvrissement) local en l'un des constituants. Elle réduit et affaiblit la résistance mécanique pour certains aciers inoxydables et alliages (fer, chrome, nickel) qui sont très affectés[16].

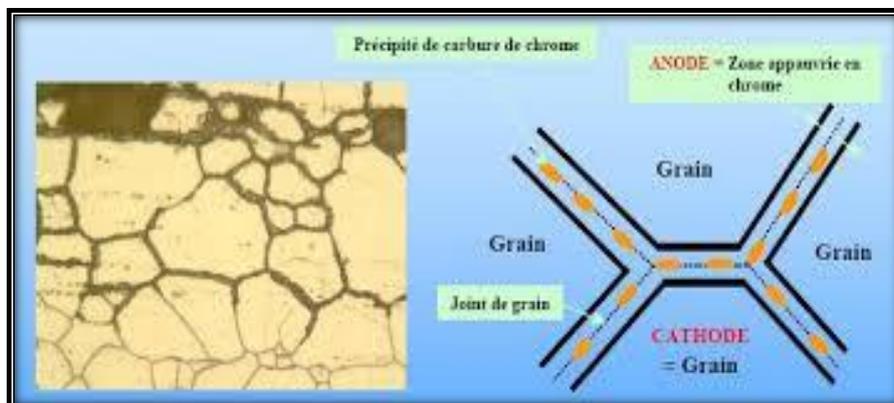


Figure I.5 : Joint de grain d'un acier inoxydable sensibilisé [11].

I.1.3.2.3 Corrosion sélective

La corrosion sélective est l'attaque de l'un des éléments constitutifs de l'alliage. Cette attaque peut être très localisée, elle se propage alors dans l'épaisseur de l'alliage en conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse qui modifie profondément les caractéristiques mécaniques du matériau. Les exemples les plus connus sont l'attaque des laitons par la dézincification (attaque sélective du zinc) qui se traduit par l'existence des zones poreuses de cuivre [17].

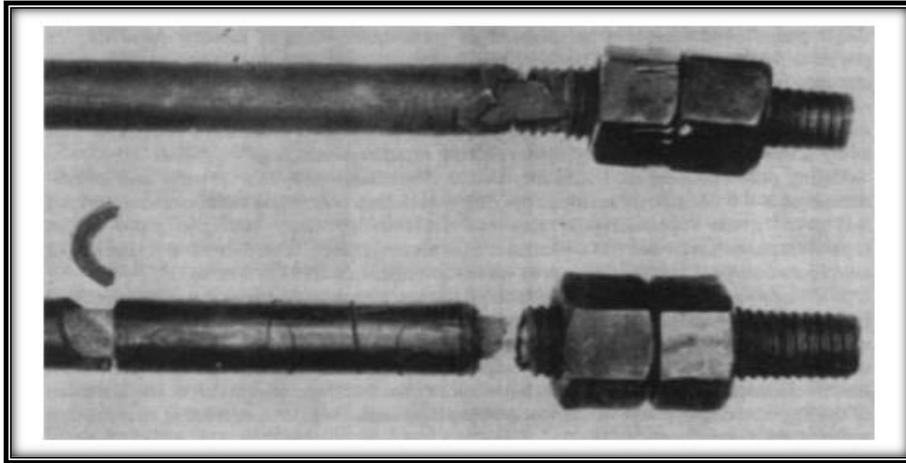


Figure I.6 : Dezincification d'un boulon en laiton [17].

I.1.3.2.4 Corrosion-érosion

La corrosion-érosion est due à une action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de matière, elle est généralement trouvée dans les métaux exposés à un écoulement rapide d'un fluide [18].

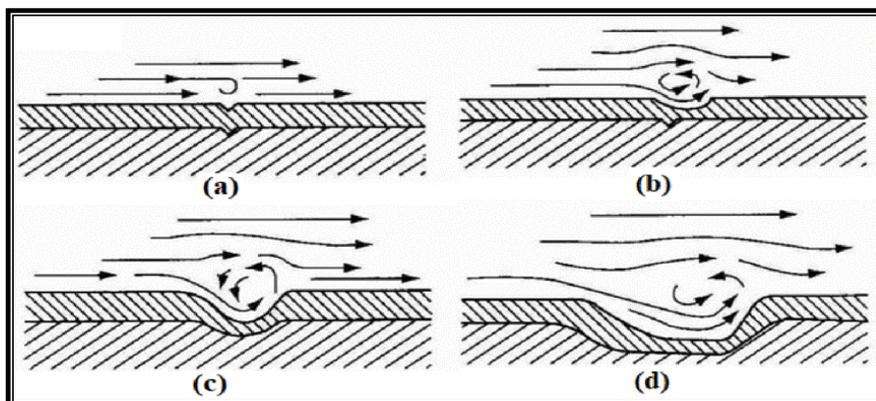


Figure I.7 : étapes de corrosion-érosion [18].

I.1.3.2.5 Corrosion par piqûres

La corrosion par piqûres est une forme de corrosion caractérisée par une attaque très localisée sur la surface du métal et provoque des piqûres. Elle est produite par certains anions agressifs généralement les halogénures et particulièrement les chlorures sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince [19]. Elle manifeste à la formation des petites cavités (piqûres) d'une forme irrégulière dont le diamètre et la profondeur varient par rapport aux caractéristiques du métal et le milieu agressif.

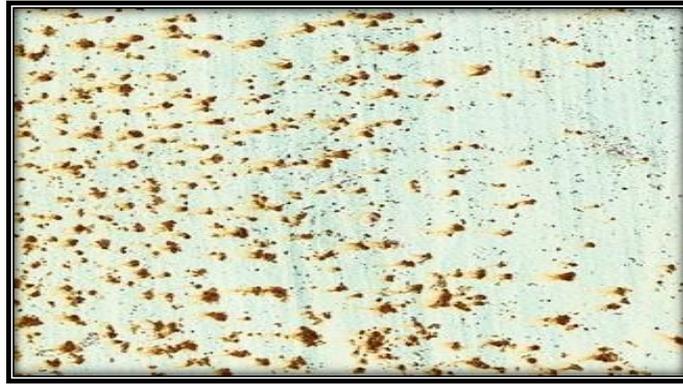


Figure I.8 : Corrosion par piqûres [19].

I.1.3.2.6 Corrosion sous contrainte

La corrosion sous contrainte représente une fissuration du métal qui résulte de l'action commune d'un milieu corrosif et d'une contrainte mécanique [20]. Les fissures qui se forme peuvent arriver jusqu'à la rupture complète de la pièce sous l'effet de la tension mécanique avec le milieu corrosif. Les pertes en poids sont généralement très faibles et sans commune mesure avec l'ampleur des dégâts [9].



Figure I.9 : Corrosion sous contrainte [20].

I.1.3.2.7 Corrosion caverneuse

La corrosion par crevasse est une corrosion qui se forme par la différence d'accessibilité de l'oxygène entre une surface de métal et une autre surface quelconque. Une pile d'aération différentielle se crée entre la surface aérée du métal et l'intérieur désaéré de la crevasse [21].

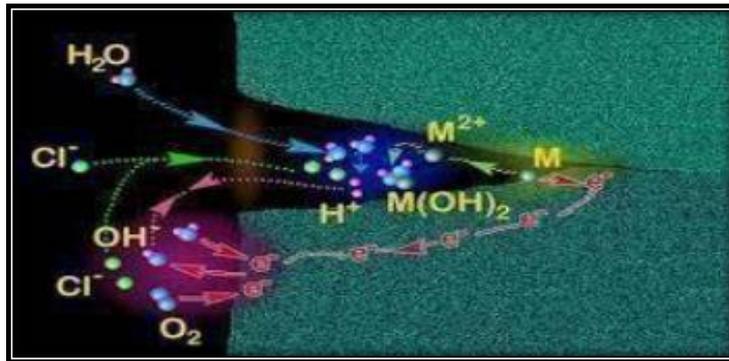


Figure I.10 : Corrosion caverneuse [22].

Il existe d'autres types de la corrosion localisée que nous pouvons schématiser comme suit :

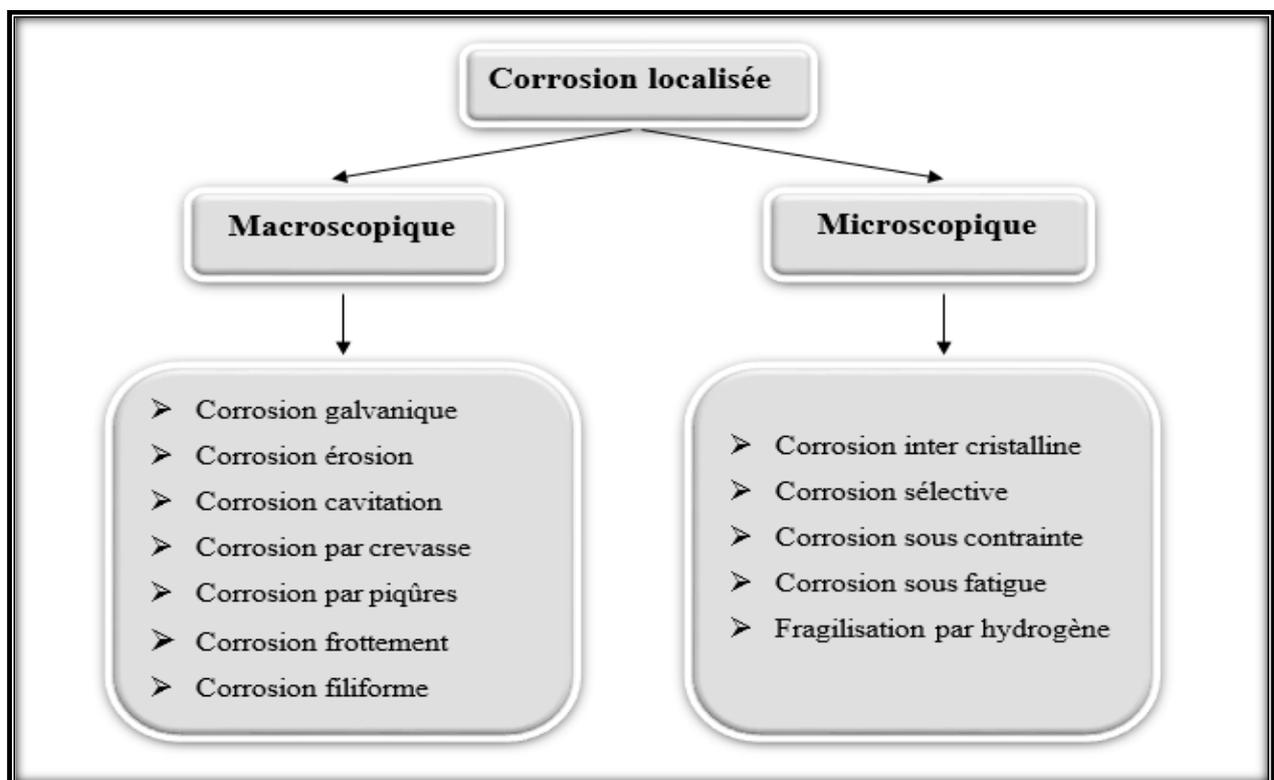


Figure I.11 : Les différents types de la corrosion localisée.

I.1.4 Les facteurs de corrosion

La plupart des métaux purs ne sont pas stable d'un point de vue thermodynamique. Au contact de l'atmosphère, ils forment une couche superficielle d'oxyde plus ou moins protectrice. Ainsi, la fragilisation de cette couche superficielle conduit à la corrosion sans frein du métal selon plusieurs critères comme la nature et les constitutions du milieu agressif, la température, le pH, les inhomogénéités de la structure réticulaire du métal, entre autres paramètres [23]. Les phénomènes de corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs, généralement en relation les uns avec les autres de manière complexe pouvant réagir avec un

effet de synergie [24]. Ces facteurs peuvent être de type interne ou externe et ils sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau I.1 : Influence de différents facteurs sur la corrosion des métaux [2].

Critère de classement	Facteurs
Facteurs relatifs au milieu et définissant le mode d'attaque	<ul style="list-style-type: none"> - Concentration du réactif. - Teneur en oxygène, en impuretés, en gaz. - Dissous (CO₂, NH₃H₂ ...). - Acidité du milieu, salinité, résistivité. - Température, pression. - Présence de bactéries
Facteurs métallurgiques	<ul style="list-style-type: none"> - Composition d'alliage, hétérogénéité cristalline. - Procédés d'élaboration. - Impuretés dans l'alliage, inclusions. - Traitement thermique, mécaniques. - Additions protectrices.
Facteurs définissant les conditions d'emploi	<ul style="list-style-type: none"> - Etat de surface, défauts de fabrications. - Formes de pièces. - Sollicitations mécaniques. - Emplois d'inhibiteurs. - Procédés d'assemblage. - Croûte d'oxydes superficiels.
Facteurs dépendants du temps	<ul style="list-style-type: none"> - Vieillessement. - Tension mécaniques internes ou externes. - Modification des revêtements protecteurs. - Apparition d'un dépôt (calcaire ou autre).

I.1.4.1 Les paramètres influençant sur la vitesse de la corrosion

➤ **Effet de la température**

L'augmentation de la température accélère le phénomène de la corrosion, en diminuant le domaine de stabilité des métaux et en accélérant la cinétique des réactions [25].

➤ **Effet de l'acidité**

La susceptibilité du matériau à la corrosion est en fonction du PH de l'électrolyte. Une forte concentration en protons dans la solution augmente l'agressivité du milieu, ce qui modifie les équilibres des réactions chimiques et électrochimiques. La corrosion augmente avec la diminution du PH du milieu. Pour étudier la corrosion il est particulièrement important de connaître l'évaluation des potentiels d'électrode quand un courant circule entre l'anode et la cathode, c'est-à-dire de pouvoir mesurer la variation des potentiels de l'anode et de la cathode en fonction du courant (ou densité de courant) [26].

➤ **Régime hydrodynamique**

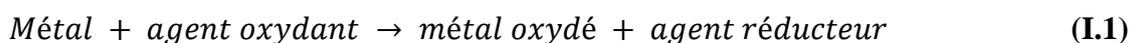
Le déplacement des réactifs vers l'interface et des produits de réaction vers l'électrolyte modifie la cinétique des réactions électrochimiques et change la concentration des espèces et donc le potentiel d'équilibre. Les conditions hydrodynamiques fixent les vitesses des réactions en contrôlant le transport de matière par l'établissement d'une couche limite de diffusion des espèces, appelée couche de Nernst, ce qui explique l'importance de l'agitation de l'électrolyte lors des essais de corrosion en laboratoire [27].

➤ **La salinité**

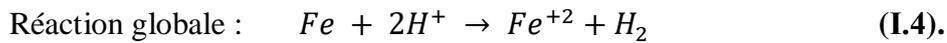
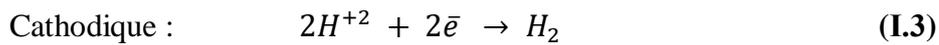
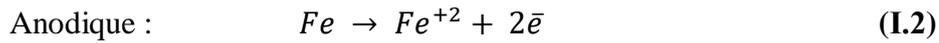
Les chlorures sont des ions agressifs, souvent à l'origine de corrosions localisées, leur présence en solution s'accompagne d'effets complémentaires, d'une part, leur concentration rend le milieu acide et d'autre part, la salinité influence sur la conductivité du milieu aqueux [28].

I.1.4.2 Mécanisme de la corrosion

La corrosion des métaux est due à une réaction d'oxydoréduction irréversible entre le métal et un agent oxydant contenu dans l'environnement. L'oxydation du métal implique la réduction de l'agent oxydant selon la réaction :



Toute réaction d'oxydo-réduction se compose de deux réactions partielles : la réaction partielle d'oxydation ou réaction partielle anodique, et la réaction partielle de réduction ou réaction partielle cathodique [29] :



I.1.5 Importance de l'étude de la corrosion

Tous les milieux sont corrosifs, on parle de la corrosion par l'air, l'eau, l'oxygène, l'atmosphère, les acides, les bases, les bactéries ou les moisissures. Les dégâts causés par la corrosion sont tellement importants et ne peuvent jamais être négligés.

L'importance de l'étude de la corrosion est double :

- La première se représente à l'échelle économique qui concerne de nombreuses installations : Tubes, bacs de stockage, échangeurs de chaleur. Dans l'impact de la corrosion on distingue les pertes directes et indirectes que nous allons examiner.
- La seconde est la conservation appliquée premièrement aux ressources de métal dont les réserves mondiales sont limitées et dont la destruction implique des pertes correspondantes d'énergie, et de réserves d'eau accompagnant la production et la fabrication des structures métalliques.
 - **Pertes directes** : Les pertes directes prennent en compte le prix des pièces à changer, la main d'œuvre, le coût de l'entretien et du contrôle, le prix des revêtements, inhibiteurs, etc.
 - **Pertes de produits** : À la suite de perforation des installations, on peut assister à des pertes d'eau, d'huile, de gaz et d'autres produits.
 - **Pertes de production** : Diminution d'un transfert de masse ou de chaleur, par suite de l'accumulation de produits de corrosion à l'intérieur des canalisations.
 - **Pertes par contamination des produits** : Dans une unité de production de détergents le passage d'une petite quantité de Cu provenant d'une faible corrosion de tubes en cuivre peut endommager un bain entier de savon.
 - **Pertes indirectes** : Elles sont très délicates à évaluer ; elles sont relatives au manque à gagner, aux pertes de production et de productivité [30].

I.2 Méthodes d'études de la corrosion

Les méthodes d'études nous permettent d'évaluer la vitesse de la corrosion et cela nous conduira à une approche différente de cette grandeur, suivant la nature des hypothèses sur lesquelles est fondée la technique utilisée. Il existe des méthodes d'étude les plus courantes : la

gravimétrie qui est une méthode très ancienne de mesure directe, les méthodes électrochimiques stationnaires et transitoires ainsi les techniques physico-chimiques d'analyse des surfaces [31].

I.2.1. Méthodes classiques

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

I.2.1.1 Mesure de perte de masse

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

$$v_{corr} = \frac{\Delta m}{\rho \cdot S \cdot \Delta t} \quad (\text{I.5})$$

Avec :

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

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

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

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

I.2.1.2 Dosage de la concentration de cations M^{n+} en solution

$$v_{corr} = \frac{\Delta c}{\rho \cdot S \cdot \Delta t \cdot V} \quad (\text{I.6})$$

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 la solution (L).

I.2.1.3 Exploitation de la réaction de réduction

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

$$v_{corr} = \frac{\Delta V_{H_2} \cdot M}{V_{mol} \cdot \rho \cdot S \cdot \Delta t} \quad (\text{pour un cation divalent}) \quad (\text{I.7})$$

$\frac{\Delta V_{H_2}}{\Delta t}$: 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 zinc ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$).

I.2.1.4. Mesure de perte d'épaisseur

La mesure de perte d'épaisseur est effectuée par une mesure directe, elle nécessite d'avoir accès à la surface corrodée. Des mesures ultrasonores facilitent l'obtention de l'information, qui reste cependant ponctuelle, tant du point de vue géométrique que temporel [32].

I.2.2. Méthodes électrochimiques

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

- Méthode stationnaire.
- Méthode transitoire.

I.3 Moyens de lutte contre la corrosion

La corrosion étant le résultat de l'action entre le métal ou l'alliage d'une part, et la solution (réactif), d'autre part. Il sera impossible de lutter contre ce phénomène, en agissant sur l'un ou l'autre. En ce qui concerne la solution, il est, la plus parts du temps, impossible de modifier sa nature. Seule l'addition de faibles quantités d'un corps appelé inhibiteur de corrosion pourra être faite. Généralement, il est plus facile d'agir sur la nature du métal, par exemple, en utilisant un métal noble ou un alliage inerte chimiquement ou passif dans le milieu considéré.

La lutte contre la corrosion doit être une préoccupation constante en d'autres termes on doit prendre en considération la corrosion depuis le début du projet jusqu'à sa réalisation. Il s'agit d'augmenter et garantir la durée de vie des équipements pour un coût minimal, en empêchant la production des réactions électrochimiques qui entraînent une dissolution et une attaque du métal [33, 34]. La lutte contre la corrosion englobe les méthodes suivantes :

I.3.1 Prévention par un choix judicieux des matériaux

Le choix du matériau doit tenir en compte de l'influence négative et les conditions de fonctionnement. Il n'existe pas des métaux résistant à la corrosion mais il y a certains qui résistent dans les milieux agressifs. Le comportement à la corrosion n'est qu'un critère pour la détermination des matériaux [35].

Le choix des matériaux prend en compte les facteurs suivants :

- Domaine d'utilisation ;
- Nature et niveau des sollicitations mécaniques et thermiques ;
- Traitements sélectionnés ;
- Prix et disponibilité des matériaux [36].

I.3.2 Prévention par une forme adaptée des pièces

Les risques de corrosion peuvent être diminués en donnant aux objets une forme adaptée aux conditions d'utilisation et en influençant leur durée de vie. Il existe des solutions couramment employées pour limiter les risques en fonction du type de corrosion [35]:

- Les zones humides.
- Un contact entre matériaux différents.
- Sous contrainte.
- Écoulement des fluides.

I.3.3 Protection électrochimique

Cette méthode consiste à protéger le métal en imposant un potentiel pour laquelle la vitesse d'attaque devient très faible, on distingue alors deux types de protection électrochimique :

I.3.3.1 Protection cathodique

La protection cathodique consiste à envoyer un courant électrique continu dans l'ouvrage susceptible de se corroder, qu'il soit enterré ou immergé. L'entrée du courant dans l'ouvrage à protéger permet d'abaisser son potentiel électrochimique en dessous du potentiel libre de corrosion et il a pour effet de réduire, voire d'annuler, la vitesse de la réaction anodique d'oxydation, donc la corrosion [2].

I.3.3.2 Protection anodique

Le principe de la protection anodique diffère de celui de la protection cathodique, elle est obtenue par l'augmentation du potentiel de corrosion jusqu'à la valeur qui correspond à l'état passif. Elle s'applique aux métaux passivables, dont le potentiel de corrosion se situe dans le domaine actif ($E_{\text{corr}} < E_{\text{passiv}}$). Une polarisation anodique permet dans ce cas de déplacer le potentiel dans le domaine passif où la densité du courant passif est très faible. En revanche pour atteindre l'état passif, il faut appliquer une densité de courant nettement plus élevée, car elle doit être supérieure à la densité de courant de passivation. La protection anodique peut être envisagée dans des milieux tels que les acides oxygénés (nitriques ou phosphoriques), les

nitrate alcalins, pour des métaux tels que l'acier ordinaire ou inoxydable, le titane et le zirconium. Les alliages à base de cuivre ne sont pas passivés [37].

I.3.4 Protection par revêtement

La protection par revêtement est une technique qui sert à protéger les métaux de toutes sortes d'attaque du milieu corrosif. Ce type de protection anticipe la formation des cellules de corrosion sur la surface du métal. On distingue deux types de revêtements, revêtements métalliques et revêtements non métalliques, ce dernier type peut être d'une nature organique et non organique.

Tableau I.2: Types de revêtements [34].

Revêtements métalliques	Revêtements non métalliques	
<ul style="list-style-type: none"> - Chrome - Aluminium - Plomb - Etain - Cadmium - Cuivre - Nickel - Argent 	Organiques	Inorganiques
	<ul style="list-style-type: none"> - Peintures - Vernis - Laques - Résine - Graisses - Cires 	<ul style="list-style-type: none"> - Couches de conversion - Couches étrangères au substrat

I.3.5 Protection par les inhibiteurs de corrosion

I.3.5.1 Définition de l'inhibiteur

Le mot « inhiber » est dérivé du latin inhibere qui signifie arrêter, retenir. Le mot «inhibition» est employé en chimie et en corrosion depuis 1907 [38].

Selon la norme ISO 8044, l'inhibiteur est une substance chimique (molécule organique ou inorganique) qui est ajoutée en faible quantité à une concentration choisie au milieu corrosif (en général milieu liquide et rarement milieu gazeux) pour son efficacité, elle entraîne une diminution de la vitesse de corrosion et la ralentit afin de protéger le métal sans modifier la concentration d'aucun agent corrosif contenu dans un milieu agressif [39].

I.3.5.2 Propriétés

L'action particulière d'un inhibiteur de corrosion peut s'avérer complexe car elle dépend du couple milieu corrosif-métal et est fonction de la température et des concentrations utilisées. Un inhibiteur est efficace s'il satisfait un certain nombre de critères. Pour cela, il doit :

- Réduire la vitesse de corrosion du métal, sans en affecter les caractéristiques physico-chimique en particulier la résistance mécanique (par exemple, risque de fragilisation par l’hydrogène en milieu acide).
- Être stable en présence d’autres constituants du milieu, en particulier vis-à-vis des Oxydants.
- Être stable aux températures d’utilisation.
- Être efficace à faible concentration.
- Être compatible avec les normes de non-toxicité.
- Être peu onéreux [40].

I.3.5.3 Utilisation industriels

Les inhibiteurs peuvent être appliqués dans plusieurs domaines :

- Le traitement des eaux (eaux sanitaires, eaux de procédés industriels, etc).
- L’industrie du pétrole : forage, extraction, raffinage, stockage et transport.
- L’industrie des peintures sur métaux où les inhibiteurs sont des additifs assurant la protection anticorrosion des métaux [26].

I.3.5.4 Les classes d’inhibiteurs

Les inhibiteurs peuvent être classés par rapport au domaine d’application, le mécanisme réactionnel, la composition chimique ou la réaction partielle :

Tableau I.3 : Classement des inhibiteurs [41].

Classement des inhibiteurs			
Domaine d’application	Mécanisme réactionnel	Composition chimique	Réaction partielle
- Milieu acide. - Milieu neutre. - Peinture. - Phase gazeuse. etc.	- Adsorption. - Passivation. - Précipitation. - Elimination de l’agent corrosif.	- Organiques. - Minéraux.	- Anodique. - Cathodique. - Mixte.

I.3.5.4.1 Classement selon la composition chimique

➤ Les inhibiteurs organiques

Il est préférable d'utiliser des inhibiteurs organiques que d'utiliser des inhibiteurs inorganiques pour des raisons d'écotoxicité, L'action inhibitrice de ces composés organiques est liée à la formation (par adsorption) d'une barrière plus ou moins continue, mais d'épaisseur finie, qui empêche l'accès de la solution au métal.

Les composés organiques utilisés comme inhibiteurs doivent posséder au moins un hétéroatome servant de centre actif pour leur fixation sur le métal tel que l'azote (amines, amides, imidazoles, triazoles...), l'oxygène (alcools acétyléniques, carboxylates, oxadiazoles...), le soufre (dérivé de la thiourée, mercaptans, sulfoxydes, thiazoles...) ou le phosphore (phosphonates).

L'une des limitations dans l'utilisation de ces produits peut être l'élévation de la température, les molécules organiques étant souvent instables à haute température [42].

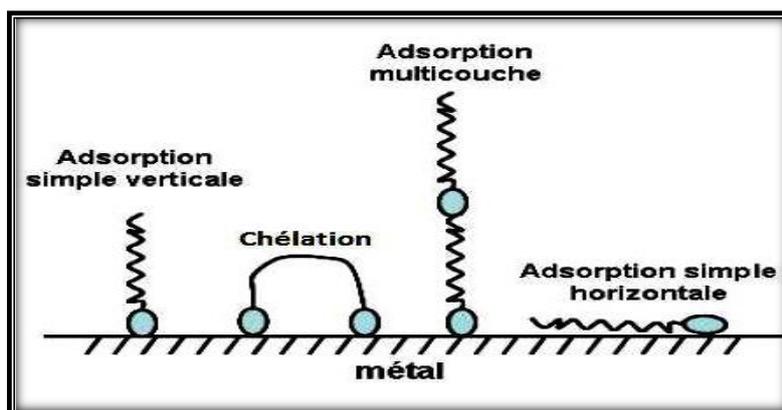


Figure I.12 : Représentation schématique des modes d'adsorption de molécules organiques inhibitrices sur une surface métallique [39].

➤ Les inhibiteurs minéraux

L'utilisation des inhibiteurs des molécules minérales apparaît dans les milieux plutôt neutre (en milieu alcalin et rarement en milieu acide). La dissociation des produits en solution assure les phénomènes d'inhibition (anions et cations). Les inhibiteurs cations sont Ca^{2+} et Zn^{2+} et ceux qui forment des sels insolubles avec certains anions tels que l'hydroxyle (OH^-). Les principaux anions inhibiteurs sont les oxo-anions de type XO_4^{n-} tels que les chromates, les molybdates, les phosphates, les silicates, ...etc [43].

Le nombre de molécules en usage à l'heure actuelle va en se restreignant, car la plupart des produits efficaces présentent un côté néfaste pour l'environnement. Cependant, de nouveaux complexes organiques de chrome III et d'autres cations (Zn^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Sr^{2+} , Al^{2+} , Zr^{2+} , Fe^{2+} , ...) efficaces contre la corrosion et non toxiques ont été développés [44].

I.3.5.4.2 Classement selon le mécanisme d'action électrochimique

Les inhibiteurs de corrosion réagissent de différentes manières, ils sont différents par rapport à leur influence sur la vitesse des réactions électrochimiques partielles. Un même composé aura un mécanisme d'action dépendant du système (métal-solution) au contact duquel il se trouve. On peut distinguer les inhibiteurs anodiques, cathodiques et mixtes. Ils forment une couche barrière sur la surface métallique, qui modifie les réactions électrochimiques en bloquant soit les sites anodiques (siège de l'oxydation du métal) soit les sites cathodique (siège de la réduction de l'oxygène en milieu neutre aéré ou siège de la réduction du proton H^+ en milieu acide). En effet, dans la pratique, la réduction du dioxygène dissous existe en milieu aéré quel que soit le pH. Mais, en milieu acide, la réduction du proton est prépondérante et on néglige souvent la réaction du dioxygène dissous. Les inhibiteurs mixtes agissent à la fois pour diminuer la vitesse de la réaction anodique et celle de la réaction cathodique [45, 43].

➤ Les inhibiteurs anodiques

Les inhibiteurs anodiques (également appelés les inhibiteurs de passivation) sont des substances oxydantes, ils ralentissent la réaction anodique d'où la densité de courant partiel anodique diminue et le potentiel de corrosion se déplace dans le sens positif. L'inhibiteur anodique s'adsorbe sur les sites anodiques où les atomes métalliques passent en solution. Son intérêt est de recouvrir l'ensemble de l'anode avec une concentration suffisante sinon le reste de la surface subira une corrosion par piqûre.

Les inhibiteurs anodiques fournissent une protection par l'un (ou plusieurs) des mécanismes :

- La capacité de déplacer le potentiel de corrosion du matériau vers des valeurs plus nobles (formation d'un film passif protecteur sur l'anode).
- La stabilisation des couches d'oxyde passives.
- La réparation de couches protectrices endommagées.
- L'amélioration de la capacité passive par incorporation d'espèces dans la couche passive.
- La diminution de la probabilité d'absorption d'ions agressifs, tels que les ions chlorure. Ces inhibiteurs réduisent la vitesse des réactions anodiques sans affecter les réactions cathodiques [46, 47].

➤ Les inhibiteurs cathodiques

Les inhibiteurs cathodiques diminuant la densité de courant partiel cathodique et déplaçant le potentiel de corrosion dans le sens négatif. Ils ralentissent la vitesse de la réaction cathodique, ou ils précipitent dans les zones cathodiques où le PH augmente en raison de la libération d'ions hydroxyle, augmentant l'impédance locale et empêchant la diffusion d'espèces réductibles dans ces zones. Ces inhibiteurs fonctionnent par différents mécanismes qui comprennent :

- La diminution de la vitesse de la réaction de réduction qui conduit au déplacement du potentiel de corrosion vers des valeurs plus électro-négatives.
- La précipitation sélective sur les zones cathodiques. Ces inhibiteurs affectent les réactions cathodiques [47].

➤ Les inhibiteurs mixtes

Les inhibiteurs de corrosion mixtes sont des composés organiques qui affectent sur les processus anodiques et cathodiques. Leur efficacité se présente dans le contrôle de la capacité à s'adsorber sur la surface du métal. Ils diminuent la vitesse des deux réactions partielles mais modifient peu le potentiel de corrosion [47].

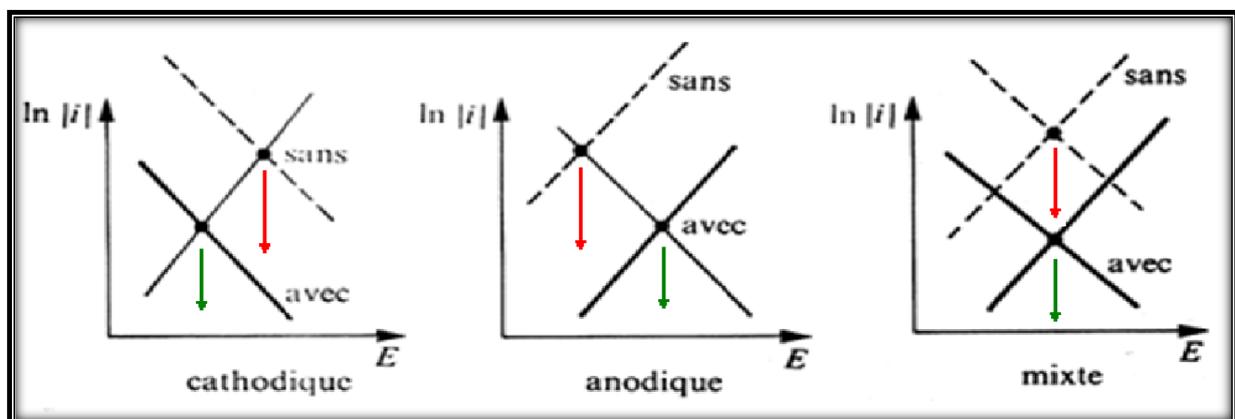


Figure I.13 : Diagramme d'Evans du déplacement du potentiel de corrosion en présence de l'inhibiteur de corrosion [47].

I.3.5.4.3 Classement selon le domaine d'application

L'utilisation des inhibiteurs de corrosion diffère selon le domaine d'application, ils sont classés comme suit :

- **En milieu aqueux** : l'emploi des inhibiteurs de corrosion en milieu acide a pour but de protéger l'acier d'une attaque électrochimique lors du décapage et du détartrage. Dans les milieux neutres ou alcalins ils servent à protéger les conduites des circuits de refroidissement.
- **En milieu organique** : certains liquides comme les lubrifiants pour moteurs, les essences et les peintures contiennent des traces d'eau et des espèces ioniques qui provoquent une corrosion extrême, pour cela il est nécessaire d'utiliser de grandes quantités d'inhibiteurs afin d'éviter la corrosion du milieu agressif.
- **Les phases gazeuses** : l'emploi des inhibiteurs de corrosion pour les phases gazeuses est une protection temporaire de différents objets emballés il s'agit le plus souvent des composés organiques ayant une pression élevée pendant le transport et le stockage [48].

I.4 Les inhibiteurs verts de corrosion

Les inhibiteurs verts de corrosion font l'objet d'une grande attention dans le monde de l'industrie et présentent un intérêt car la prise de conscience environnementale a augmenté et l'utilisation des inhibiteurs de corrosion habituels est limitée en raison de leur toxicité.

De nombreuses études ont été faites sur plusieurs composés organiques afin d'examiner leur potentiel d'inhibition de la corrosion. Toutes ces recherches ont montré que les composés organiques, en particulier celles qui contiennent les atomes N, C, S et O, ont une efficacité d'inhibition significative, la plupart de ces composés sont non seulement coûteux mais aussi toxiques pour les êtres vivants. Tous ces effets toxiques conduisent à l'utilisation des produits naturels écologiques et inoffensifs, le développement de la chimie verte et ses technologies offre de nouvelles méthodes de synthèse différentes substances (polymère, extrait de plante, acide aminé, liquide ionique...), considérées comme de nouveaux inhibiteurs de corrosion.

La surface des métaux ou d'alliages dans un milieu corrosif peut être traité par de très faibles concentrations des inhibiteurs verts. Les extraits des plantes sont considérés comme des composés chimiques de synthèse naturelle qui affectent le taux de corrosion par adsorption d'espèces efficaces sur des surfaces métalliques lorsqu'ils sont ajoutés à de nombreux systèmes industriels [49, 50].

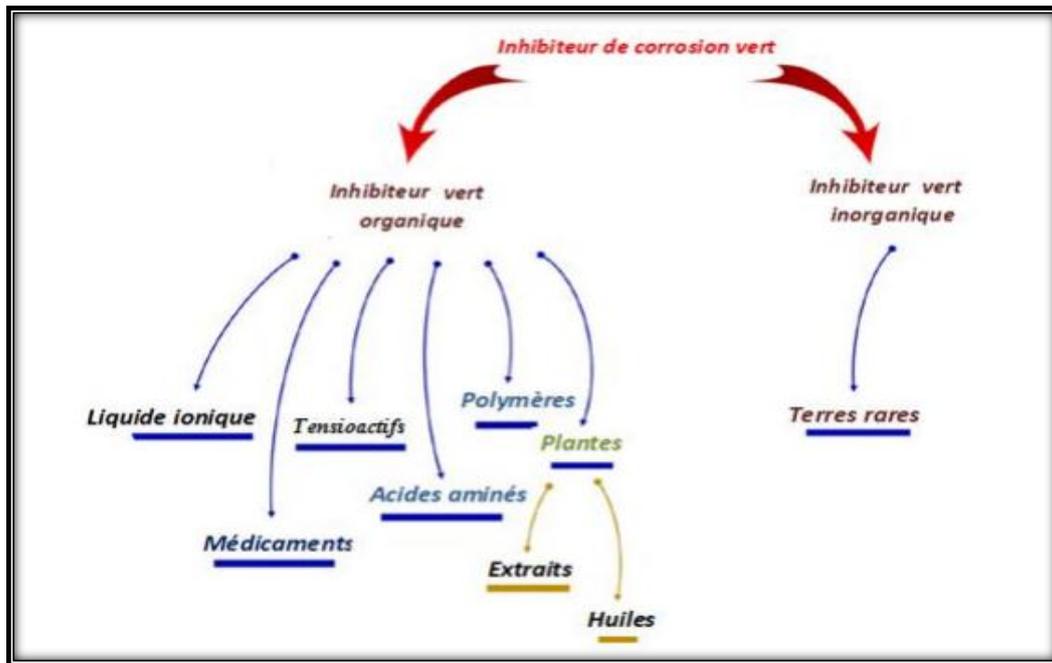


Figure I.14 Les différentes classes des inhibiteurs verts de corrosion [11].

Plusieurs études ont été faites sur l'utilisation des extraits naturels des différentes parties de plantes (tiges, feuilles et graines) comme inhibiteurs de corrosion des métaux dans des milieux corrosifs. Nous nous intéressons à l'étude de l'extrait de la plante d'*Arundo Donax* autant qu'inhibiteur de corrosion de l'acier en milieu H_2SO_4 .

I.5 Arundo Donax

I.5.1 Description botanique d'*Arundo Donax* (La Canne de Provence)

La Canne de Provence plus connue sous son nom scientifique *Arundo Donax* est une graminée de grande taille qui investit surtout les régions méditerranéennes humides. Cette plante se présente sous la forme de chaumes rigides pouvant atteindre les 6m de hauteur et des tiges épaisses et cylindriques mesurant de 3 à 5cm de diamètre en conditions favorables sur lesquelles évoluent de grandes feuilles rubanées, retombantes de couleur vert glauque. Celles-ci se terminent par des inflorescences sous forme d'épillets vert-pâle pouvant atteindre 50 cm. C'est une plante assez rustique même si l'hiver elle semble toute desséchée et résiste au gel jusqu'à $-5C^{\circ}$, avec un entretien très facile. La Canne de Provence se plaît sur un sol humide, sablonneux et bien drainé en hiver. Elle nécessite pour se développer une exposition abritée et bien ensoleillée. Elle est utilisée en haie brise-vent et aussi appréciée par les jardiniers pour ses propriétés à stabiliser les sols. Attention à ne pas la confondre avec le roseau ou le bambou [51].



Figure I.15 Photographie d'*Arundo Donax*.

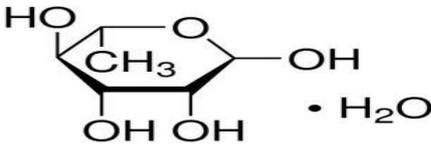
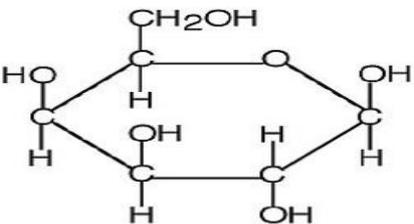
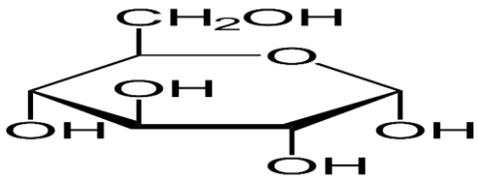
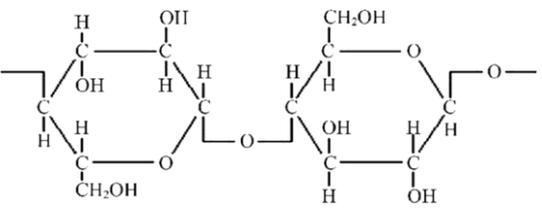
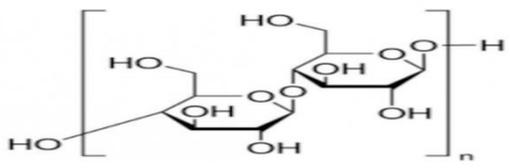
I.5.2 Classification

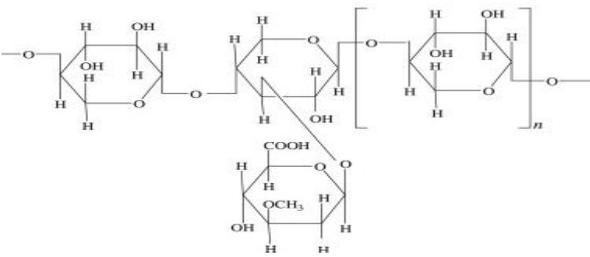
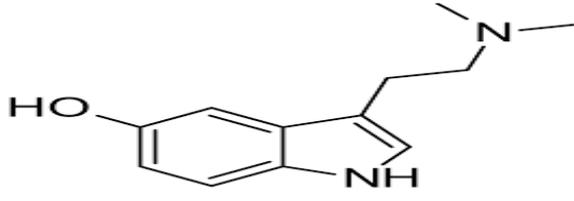
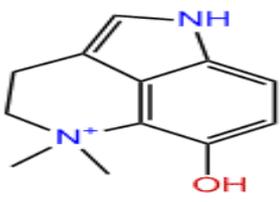
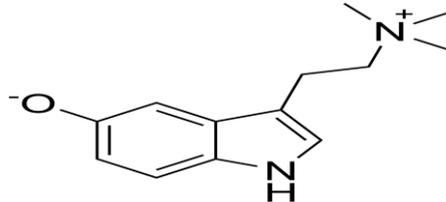
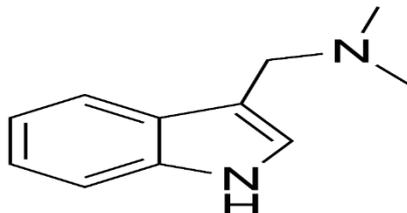
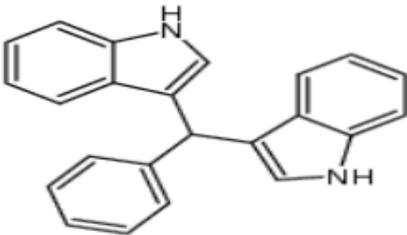
- **Nom français** : Canne de Provence.
- **Nom latin** : *Arundo Donax*.
- **Famille** : poacées.
- **Type** : graminée.
- **Origine** : Extrême-Orient.
- **Couleur de la fleur** : vert-pâle, violacé.
- **Hauteur** : jusqu'à 6 mètres.
- **Germination** : non.
- **Semis** : non.
- **Bouture** : oui.
- **Plantation** : toute l'année hors période de gel.
- **Floraison** : fin d'été [52].

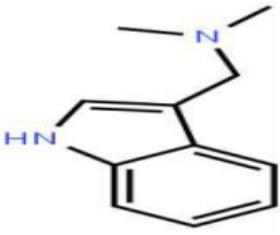
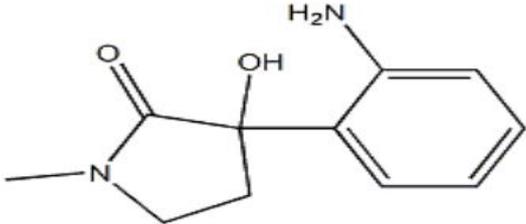
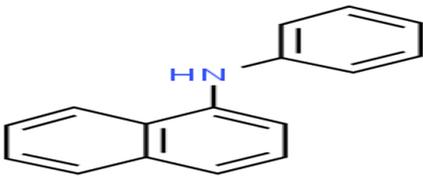
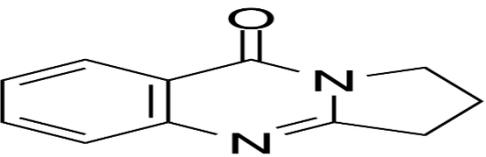
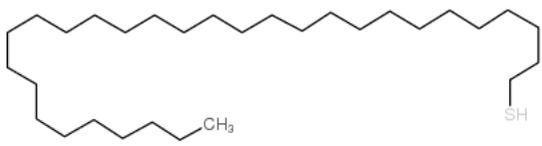
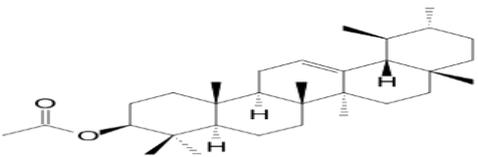
I.5.3 Composants chimiques d'*Arundo Donax*

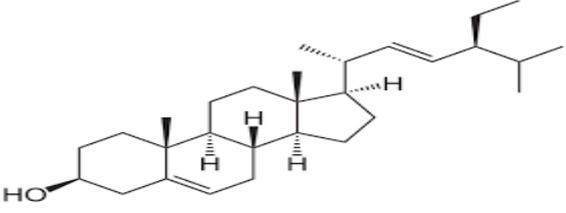
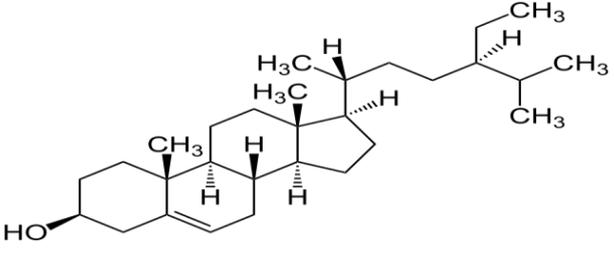
La plante d'*Arundo Donax* contient plusieurs composants chimiques qui se présentent dans le tableau suivant :

Tableau I.4 : Les différents composants chimiques d'*Arundo Donax* [52].

Composants chimiques		Structure
Sucres et Celluloses	Rhamnose	
	Galactose	
	Glucose	
	Cellulose	
	α -Cellulose	

	Hémicellulose	
Indole-3-alkylamine bases	Bufoténine	
	Dihydro-Bufoténine	
	Bufoténidine	
	Gramine	
	Bisindole	

Alkaloids	Donaxine	
	Donaxaridine	
	N-phenyl naphthylamine	
	Déoxyvasicinone	
Triterpènes	Triacontane	
	α-Amyrin acetate	

	Triacontanol	 <chem>CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCO</chem>
Stérols	Stigmasterol	 <chem>CC(C)C/C=C/C[C@H]1CC[C@@H]2[C@@]1(CC[C@H]3[C@H]2CC=C4[C@@]3(CC[C@@H](C4)O)C)C</chem>
	β -Sitosterol	 <chem>CC(C)C[C@H]1CC[C@@H]2[C@@]1(CC[C@H]3[C@H]2CC=C4[C@@]3(CC[C@@H](C4)O)C)C</chem>

Références bibliographiques

- [1] M. Saad, A. Abdellaoui, « Etude de l'influence de la corrosion sur le comportement mécanique de l'acier », Mémoire de Master, Université de M'sila, 2022.
- [2] D. Landolt, «Corrosion et chimie de surfaces des métaux, volume 12 de Traité des matériaux», EPFL Press, 552 pages, 2003.
- [3] V. S. Sastri, «Green Corrosion Inhibitors: Theory and Practice», John Wiley & Sons, 2012.
- [4] M. M. Mansouri, «Etude de corrosion en utilisant les inhibiteurs», Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2020.
- [5] S. Bensaada, M. Bouziane, F. Mohammedi, B. Zergui, et A. Bouras, «Effet des inhibiteurs de corrosion $ZnCl_2$, Na_2MoO_4 et $ZnCl_2 + Na_2MoO_4$ sur le comportement de l'acier pour armature à béton en milieu oxydant $NaCl$ », Larhyss Journal., vol. 10, n°14, p. 49, 2013.
- [6] C. Chinogurei, «Propriétés inhibitrices de l'huile de cade sur la corrosion de l'Aluminium », mémoire de Master, Univ. Badji Mokhtar Annaba, 2018.
- [7] F. Boumeguet, D. Iabbassen, « Etude de l'inhibition de la corrosion de zinc dans l'acide chlorhydrique par l'extrait de la plante d'Ortie. », Mémoire de Master, Université de Béjaia, 2022.
- [8] P. Robert, J. P. Scharff, «Chimie industrielle», 2^{ème} édition, Paris, Milan, Barcelone: Masson, 2002.
- [9] B. Lefevre, « Corrosion des aciers revêtus de zinc dans les zones confinées des carrosseries automobiles », Thèse de doctorat, Université de Paris VI France, 2004.
- [10] N. Bouamama, S. Madene, H. Tighidet, « Elaboration d'un revêtement à base d'oxyde de cérium destiné à la protection de la corrosion de l'acier en milieu marin », Mémoire de Master, Université de Bejaia (Algérie) 2015.
- [11] L. Hamadi, « Application des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers en milieux agressifs », Thèse de doctorat, Université de Batna 2, 2020.
- [12] D. Landolt, « Traité des matériaux. Vol. 12. Corrosion et chimie de surfaces des métaux», Librairie Mollat Bordeaux, 1997.
- [13] M. Colombié, «Matériaux métalliques, Phénomènes de Corrosion, 4^{ème} partie. Les différentes formes de corrosion aqueuse », Dunod, 2010.

- [14] M. C. Nebbar, « Etude de la tenue à la corrosion de l'acier N80 et évaluation de l'efficacité d'un inhibiteur de corrosion », Magister, Université Mohamed Khider Biskra, 2010.
- [15] L. Ihaddadene, « Etude de la corrosion et la protection des pipelines de réseau de collecte d'huile de la région TFT –SECTEUR NORD- », Thèse de doctorat, Université Akli Mouhand Oulhadje de Bouira, 2018.
- [16] M. Y. Aliouat, « Etude de la corrosion bactérienne des aciers API-5L grade B pour pipelines utilisés dans le transport d'eau », Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille France, 2015.
- [17] F. Dabosi et al, «Corrosion localisée», Les Ulis, France: Les Editions de Physique, 1994.
- [18] A. Mansri, A. Bendraoua, «Composites à base de Copolymères et de Bentonite pour la Coagulation /Floculation , Rétention des Polluants et pour l'inhibition de la Corrosion, Thèse de doctorat, USTO, 2016.
- [19] M. Matsumura, «Erosion-Corrosion: An Introduction to Flow Induced Macro-Cell Corrosion», Bentham Science Publishers, 2012.
- [20] F. Bellenger, «Etude et contrôle de la corrosion feuilletante des alliages d'aluminium 2024 et 7449 par bruit électrochimique et émission acoustique: analyse microstructurale et caractérisation de l'endommagement», Thèse de doctorat, Lyon, INSA, 2002.
- [21] A. Maillet, «Interactions argilite de Tournemire / fer métal en contexte in situ : résultats à 10 ans de contact», Thèse de doctorat, Poitiers, 2012.
- [22] A. Oulabbas, « Effets des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers ordinaires dans deux milieux acides», Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar de Annaba, 2019.
- [23] S. Ketcham et I. Shaffer, «Corrosion par exfoliation des alliages d'aluminium», ASTM International, 14 pages, 1972.
- [24] A. Aliouali, «Etude du comportement à la corrosion de l'aluminium dans différents milieux», Magister, Université de Batna 2, 2017.
- [25] C. Harik, « Effet inhibiteur de tensioactif anionique synthétisé à partir de gasoil algérien sur la corrosion de l'acier doux », Mémoire de Master, Université de Blida1, 2016.
- [26] F. Lekmine, « Etude de la corrosion sous contraintes dans les pipelines », Thèse de doctorat, Université de Mohamed Khider Biskra, 2012.

- [27] C. Fiaud, C. Lemaitre, et N. Pébère, « Corrosion et anticorrosion, chapitre 13 », Lavoisier Paris, 2002.
- [28] S. Payan, « Comportement à la corrosion galvanique de matériaux composites à matrice d'alliage d'aluminium renforcée par des fibres de carbone haut-module », Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, 2001.
- [29] R. Mehibil, « Etude de l'efficacité inhibitrice de quelques nouveaux inhibiteurs, dits non polluants, sur la corrosion de deux types d'alliages d'aluminium », Mémoire de Magister, Université de Skikda, 2008.
- [30] L. Babouri, « Etude de la résistance à la corrosion des alliages de cuivre en milieu salin », Thèse de doctorat, Université de Skikda, 2008.
- [31] R. Baboian, R. S. Treseder, National Association of Corrosion Engineers, « NACE corrosion engineer's reference book », 3rd edition, Houston, TX: NACE International, 2002.
- [32] 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, Lyon, INSA, 2004.
- [33] S. Bensaaa, « Cours de la Corrosion », Université de Biskra, 63 pages, 2019.
- [34] J. Catonné et L. Lacourcelle, « Les Revêtements Protecteurs dans l'Industrie », Principe-Application-Choix, Cast Lyon, 1977.
- [35] H. Bensabra, « Cours de corrosion et protection des métaux », Université de Jijel, p. 3, 2016.
- [36] W. Harzallah, « Préparation et Caractérisation de Dépôts Composites Electrodeposités en Présence d'Inhibiteurs Organiques », Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider de Biskra, 2006.
- [37] C. Fiaud, « Inhibiteurs de Corrosion, m160 », Technique de l'ingénieur, 2000.
- [38] S. Mahdia et Z. Chahira, « Étude de l'effet inhibiteur du Thymol sur la corrosion de l'acier en milieu acide chlorhydrique. Approche électrochimique et théorique (DFT) », Université de Djilali Bounaama de Khamis Miliana, 2018.

[39] P. Bommersbach, « Evolution des propriétés d'un film inhibiteur de corrosion sous l'influence de la température et des conditions hydrodynamiques : caractérisation par techniques électrochimiques », Thèse de doctorat, Lyon, INSA, 2005.

[40] H. Messaoudi, « Nouvelle voie d'inhibition de la corrosion du cuivre par la caféine: corrélation entre la simulation par la DFT et l'étude expérimentale », Thèse de doctorat, Université de 20 aout 1955, 2014.

[41] D. Landolt, «Corrosion et chimie de la surface des métaux», Presses polytechniques et Universitaires Romandes, première édition, 1993.

[42] H. Hamani, « Synthèse, caractérisation et étude du pouvoir inhibiteur de nouvelles molécules bases de Schiff», Thèse de doctorat, Université de Ferhat Abbas de Setif, 2015.

[43] M. Faustin, « Étude 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, Antilles-Guyane, 2013.

[44] F. Ropital, « Corrosion et dégradation des matériaux métalliques.Compréhension des phénomènes et applications dans l'industrie pétrolière et des procédés», Editions TECHNIP, 2009.

[45] I. Anoune, « Résistance à la corrosion des revêtements composites nickel-alumine sur différents substrats », Magister, Université de Batna 2, 2014.

[46] S. Zaitri, R. Aitout, et F. Goudji, « Utilisation des huiles essentielles de plantes comme inhibiteurs de corrosion de l'acier », Thèse de doctorat, université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2020.

[47] N. Mme Aimeur, « Contribution à l'étude de la biocorrosion de l'acier au carbone en eau de mer naturelle, Influence de certaines bactéries genre *Bacillus* sur l'inhibition de cette corrosion. », Thèse de doctorat, Université de Tizi Ouzou-Mouloud Mammeri, 2019.

[48] H. B. Ouici, « Synthèse de quelques composés organiques azotés et leurs utilisations en tant qu'inhibiteurs vis-à-vis la corrosion d'un acier doux en milieu HCl 5% », Thèse de doctorat, Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid, 2014.

[49] K. Kadirvelu et J. Ravichandran, « Effect of aqueous extract of leaves of *Morinda tinctoria* on corrosion inhibition of aluminium surface in HCl medium », *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 24, p. 2704, 2014.

[50] M. Arenas, A. Conde, et J. de Damborenea, « Cerium: A suitable green corrosion inhibitor for tinplate », *Corrosion Science*, vol. 44, p. 511, 2002.

[51] N. Guellier, « Canne de Provence (*Arundo donax*) : plantation, taille, entretien », *Binette & Jardin*, 2013.

[52] K. Sachan, A. K. Chaudhary, S. Ahmad, et K. Nagarajan, « *Arundo Donax* L.: A Scientific update », *Indian Drugs*, vol. 60, n° 03, p. 03, 2023.

Chapitre II

Dans ce deuxième chapitre nous allons exposer la partie expérimentale de notre étude et présenter les méthodes et le matériels mis en œuvre tout au long de ce travail. Les techniques électrochimiques sont à leur tour présentées, de manière à souligner leur intérêt et leur pertinence dans l'étude des inhibiteurs. Les techniques d'analyse de surface utilisées permettent d'apporter des informations souvent complémentaires aux résultats issus des techniques électrochimiques.

II.1 Techniques d'étude

Le processus électrochimique global peut être divisé en plusieurs réactions chimiques ou électrochimiques élémentaires. Compte tenu de la complexité des phénomènes de corrosion, l'utilisation de techniques électrochimiques stationnaires et transitoire est essentielle pour prendre en compte les étapes les plus lentes qui limitent la vitesse globale de réaction d'une part et pour la séparation de diverses réactions élémentaires dans les processus électrochimiques d'autre part [1].

Trois méthodes ont été choisies pour évaluer l'efficacité de notre inhibiteur *Arundo Donax* (AD) à savoir la perte de masse, les méthodes électrochimiques et les techniques d'analyse de surface.

II.1.1 La gravimétrie (Perte de masse)

Dans la méthode gravimétrique les échantillons de métal de surface (S) sont exposés à un milieu corrosif à température constante pendant un temps déterminé (t), et la différence de masse des échantillons en absence et en présence de l'inhibiteur (Δm) est mesurée avant et après chaque test. L'avantage de cette méthode réside dans sa simplicité de mise en œuvre et ne nécessite pas de matériel important, mais elle ne permet pas de remonter aux mécanismes mis en jeu lors de la corrosion [2]. La vitesse de corrosion est donnée par la relation suivante :

$$v = \frac{\Delta m}{s.t} \quad (\text{II.1})$$

v : peut être exprimé en (g.cm⁻².h⁻¹) ;

$$\Delta m = m_i - m_f ;$$

m_i : masse de l'échantillon avant test en (g) ;

m_f : masse de l'échantillon après test en (g) ;

s : surface de l'échantillon exposé au milieu corrosif en (cm²) ;

t : temps d'immersion en (h) ;

La valeur de l'efficacité inhibitrice est donnée par la formule suivante :

$$\eta(\%) = \frac{w - w_{inh}}{w} * 100 \quad (\text{II. 2})$$

Où w et w_{inh} représentent respectivement les vitesses de corrosion en absence et en présence de l'inhibiteur.

II.1.2 Méthodes électrochimiques

Les techniques électrochimiques ont permis d'appréhender l'étude selon deux points de vue. D'un point de vue phénoménologique d'abord, la caractérisation de l'adsorption est possible soit par suivi dans le temps du potentiel en circuit ouvert, caractéristique de la modification de l'interface entre un métal et son environnement, soit par la voltamétrie cyclique à vitesse de balayage élevée. L'aspect plus quantitatif (courbes de polarisation à vitesse de balayage modérée, spectroscopie d'impédance) permet, quant à lui, 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, capacité du film). Les méthodes électrochimiques peuvent être classées selon deux groupes distincts : les méthodes stationnaires et les méthodes non-stationnaires dites transitoires [3]. L'intérêt de ces méthodes tient au fait qu'il est possible en quelques heures, voir quelques minutes, de réaliser les essais et de remonter à la vitesse de corrosion [4].

II.1.2.1 Méthodes stationnaires

Les techniques électrochimiques stationnaires permettent de déterminer l'étape la plus lente qui limite la vitesse de réaction globale du processus et offrent la possibilité d'analyser un système dans un état quasiment d'équilibre thermodynamique, en prenant en considération tous les couples redox présents dans la solution [3, 4].

II.1.2.1.1 Suivi du potentiel en circuit ouvert

Le potentiel en circuit ouvert désigné aussi par potentiel spontané, potentiel d'abandon, de repos ou encore potentiel libre, c'est la grandeur électrochimique la plus facile à mesurer. De plus, il s'agit de la grandeur électrochimique la plus immédiatement mesurable. En outre, c'est la seule mesure électrochimique qui n'apporte absolument aucune perturbation à l'état du système étudié.

Le suivi temporel du potentiel de corrosion répond à deux objectifs : d'une part, il permet d'avoir une première idée du comportement de la surface en milieu corrosif (corrosion, formation d'une couche passive) et d'autre part de déterminer le temps nécessaire pour atteindre l'état stationnaire, indispensable pour les tracés potentiodynamiques et les diagrammes d'impédances. Cette mesure est effectuée entre l'électrode de travail et l'électrode de référence [5].

Ainsi les valeurs du potentiel de corrosion (E_{corr}) peuvent fournir des informations sur les types de l'inhibiteur [6] :

- Si une substance est ajoutée en faible quantité dans un milieu agressif, et si cette substance fait diminuer uniquement la vitesse de réaction cathodique, elle est appelée inhibiteur cathodique. Elle se caractérise par un déplacement de potentiel vers des valeurs plus négatives.
- Si un composé ajouté à une faible quantité ralentit uniquement le processus anodique, c'est un inhibiteur anodique. E_{corr} se déplace vers des valeurs plus positives.
- Si l'inhibiteur à un caractère mixte, aucune indication n'est donnée par la faible variation de potentiel.

II.1.2.1.2 Courbe de polarisation

La Voltamétrie à balayage linéaire consiste à imposer une rampe de potentiel, entre l'électrode de travail et l'électrode de référence, par variation linéaire du potentiel dans le temps, et à mesurer le courant traversant l'électrode de travail. On trace ainsi une courbe de variation intensité-potentiel appelée courbe de polarisation. On impose le plus souvent une vitesse de balayage suffisamment faible, pour pouvoir considérer notre système quasi-stationnaire [7].

Par extrapolation des droites de Tafel (**Figure II.1**), cette méthode permet de déterminer les paramètres électrochimiques d'un métal au contact de l'électrolyte à savoir : le courant de corrosion (I_{corr}), le potentiel de corrosion (E_{corr}), et la résistance de polarisation (R_p).

La détermination de la vitesse de corrosion à partir des courbes de polarisation est étroitement liée à la cinétique régissant le processus électrochimique. Pour déterminer expérimentalement ces paramètres électrochimiques, 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 [8].

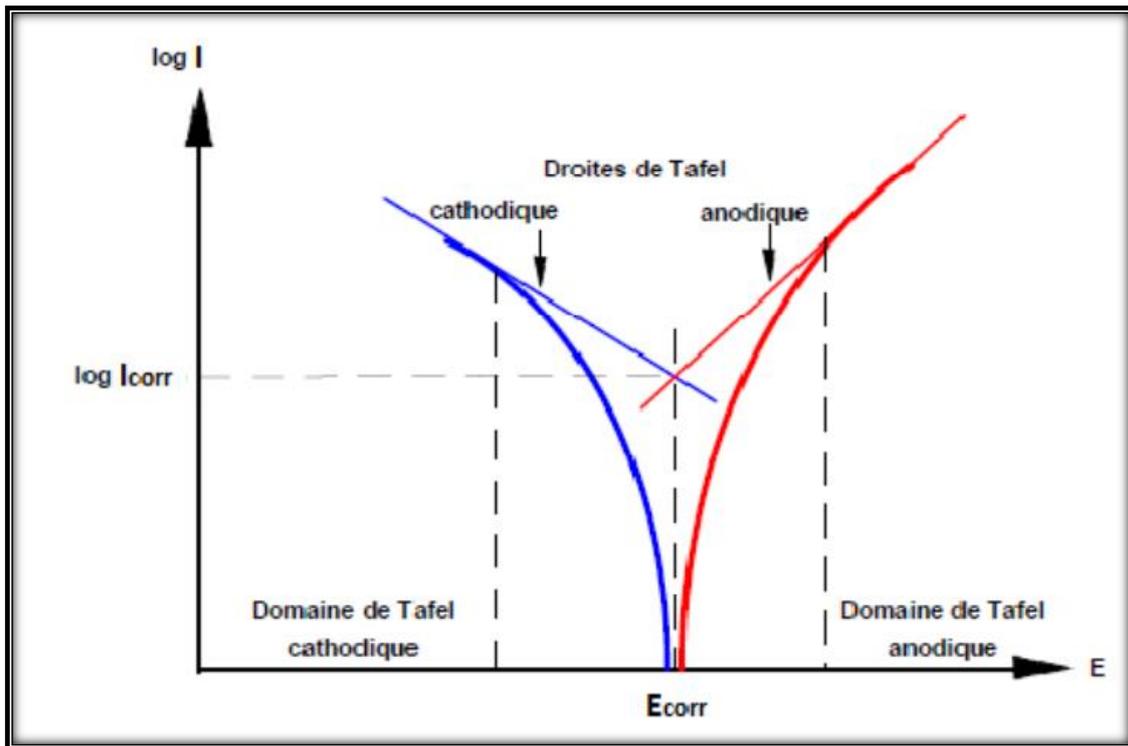


Figure II. 1 : Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel [9].

Le tracé permet de confirmer les indications données par l'évolution du potentiel de corrosion et de les préciser en distinguant l'influence de l'inhibiteur sur chacune des réactions élémentaires, anodique et cathodique, à l'électrode [10].

Cependant ces techniques stationnaires sont insuffisantes pour caractériser des mécanismes complexes mettant en jeu plusieurs étapes réactionnelles avec des caractéristiques cinétiques distinctes (comme lors des processus d'inhibition). L'utilisation des techniques transitoires devient alors nécessaire.

II.1.2.2 Méthodes transitoires

Les techniques dites non-stationnaires ou transitoires permettent la séparation des différentes réactions élémentaires du processus électrochimique global. Ces techniques ont été développées afin de pallier un certain nombre de contraintes apparues lorsqu'on veut étudier les mécanismes réactionnels mis en jeu [11].

II.1.2.2.1 Chronopotentiométrie

Cette méthode consiste à imposer une densité de courant constante et à suivre l'évolution du potentiel en fonction du temps. Cette variation de potentiel est liée au changement de la concentration de l'espèce étudiée au niveau de l'électrode. En effet, cette méthode permet d'évaluer le nombre de réaction se produisant à l'électrode de travail [11, 12].

II.1.2.2.2 La Spectroscopie d'Impédance Electrochimique (SIE)

L'impédance électrochimique est une technique non stationnaire, fondée sur la mesure de fonctions de transfert, suite à l'application d'une perturbation de faible amplitude. Le potentiel ou le courant de perturbation est un signal sinusoïdal, appliqué en un point de fonctionnement E_0 qui est supposé quasi-stationnaire pendant la durée de la mesure.

Cette technique permet de différencier les divers phénomènes élémentaires sur la base de leur constante du temps [13] :

- Les phénomènes électrochimiques rapides sont sollicités dans le domaine des hautes fréquences (transfert de charges et la double couche électrique).
- Les phénomènes lents apparaissent dans le domaine de basses fréquences tel que le processus de diffusion ou d'adsorption.

a. Principe de la technique :

La spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) en mode « potention » consiste à mesurer la réponse en courant d'un système (interface électrode/électrolyte) soumis à un potentiel subissant une perturbation sinusoïdale de faible amplitude autour d'un potentiel constant E_0 (**Figure.II.2**). Il est aussi possible d'utiliser le mode « galvano ». Dans ce cas, c'est une perturbation sinusoïdale en courant de faible amplitude qui est appliquée au système et c'est la réponse en potentiel qui est mesurée [6]. Les systèmes électrochimiques étudiés n'étant généralement ni linéaires, ni stables dans le temps, un certain nombre de précautions s'imposent. Il faut s'assurer que le système reste « quasi-stable » sur toute la durée de la mesure, et que l'amplitude de la sinusoïde est suffisamment faible pour que la fonction $I = f(E)$ puisse satisfaire le critère de linéarité dans le domaine perturbé (**Figure. II.2**). Ainsi, la mesure de l'impédance électrochimique tout au long de la courbe courant-potentiel conduit à une caractérisation complète de l'interface.

Le signal perturbateur appliqué $E(t)$ s'écrit :

$$E(t) = E_0 + |\Delta E| \sin(\omega t) \quad (\text{II.3})$$

La réponse en courant du système est :

$$I(t) = I_0 + \sin(\omega t - \varphi) \quad (\text{II.4})$$

Avec : ω , la pulsation (en rad.s^{-1}) reliée à la fréquence f par $\omega = 2\pi f$ et φ le déphasage entre $I(t)$ et $E(t)$.

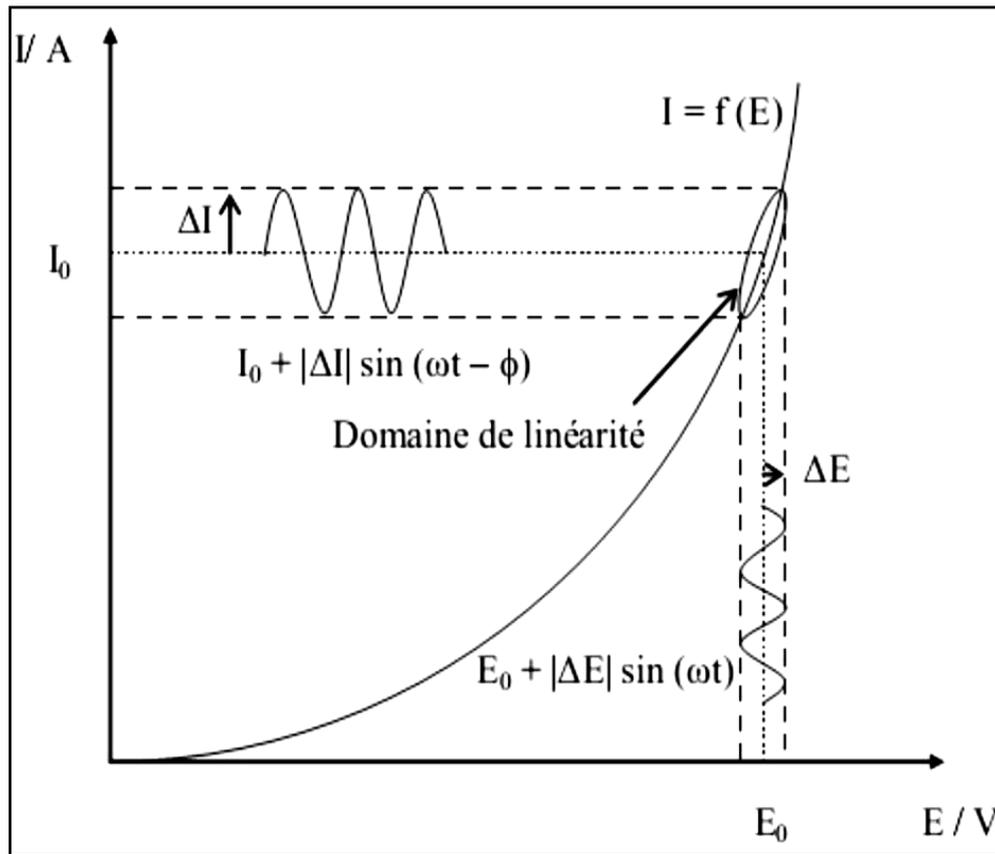


Figure II.2: Schéma d'un système électrochimique non linéaire soumis à une perturbation de potentiel sinusoïdale.

La spectroscopie d'impédance électrochimique repose sur la mesure d'une fonction de transfert $Z(\omega)$ suite à la perturbation volontaire du système électrochimique étudié. Pour une fréquence donnée, l'impédance électrochimique se définit comme étant le nombre complexe $Z(\omega)$ résultant du rapport :

$$Z(\omega) = \frac{\Delta E(\omega)}{\Delta I(\omega)} \quad (\text{II.5})$$

$\Delta E(\omega)$ et $\Delta I(\omega)$ correspondent aux transformées de Fourier des grandeurs temporelles correspondantes.

$Z(\omega)$ peut-être écrit sous deux formes équivalentes :

-Forme algébrique :

$$Z(\omega) = Z_r(\omega) + jZ(\omega) \quad (\text{II.6})$$

-Forme exponentiel :

$$Z(\omega) = |Z(\omega)| e^{j\varphi(\omega)} \quad (\text{II.7})$$

$|Z(\omega)|$: le module de l'impédance ; φ : le déphasage ; Z_r : la partie réelle ; Z_j : la partie imaginaire.

Pour passer d'une forme à l'autre, il suffit d'utiliser les relations suivantes :

$$Z_r(\omega) = |Z(\omega)| \cdot \cos(\varphi) \quad (\text{II.8})$$

$$Z_j(\omega) = |Z(\omega)| \cdot \sin(\varphi) \quad (\text{II.9})$$

Tel que :

$$|Z(\omega)| = \sqrt{Z_r^2 + Z_j^2} \quad \varphi = \tan^{-1} \left(\frac{Z_j}{Z_r} \right)$$

b. Représentation graphique des données

Il existe deux modes de représentation des diagrammes d'impédance électrochimique (Figure II.3) :

-Plan complexe de Nyquist où l'opposé de la partie imaginaire $-Z_j(\omega)$ est tracé en fonction de la partie réelle Z_r pour différentes fréquences. Chaque point du diagramme correspond à une fréquence donnée du signal d'entrée. Pour cette représentation, il est nécessaire d'utiliser des repères orthonormés, car sinon les diagrammes sont déformés et l'interprétation peut être faussée. Nos résultats expérimentaux d'impédance seront donnés selon cette représentation.

-Plan de Bond qui consiste à porter le logarithme du module ($\log|Z|$) et l'angle de déphasage (φ) de l'impédance en fonction du logarithme de la fréquence ($\log(f)$). L'analyse f en fréquence de l'impédance électrochimique permettra de différencier les divers phénomènes élémentaires en fonction de leur fréquence caractéristique (ou constante de temps). Les phénomènes électrochimiques rapides (transfert de charge) sont sollicités dans le domaine des hautes fréquences, tandis que les phénomènes lents (diffusion, adsorption) se manifestent à basses fréquences.

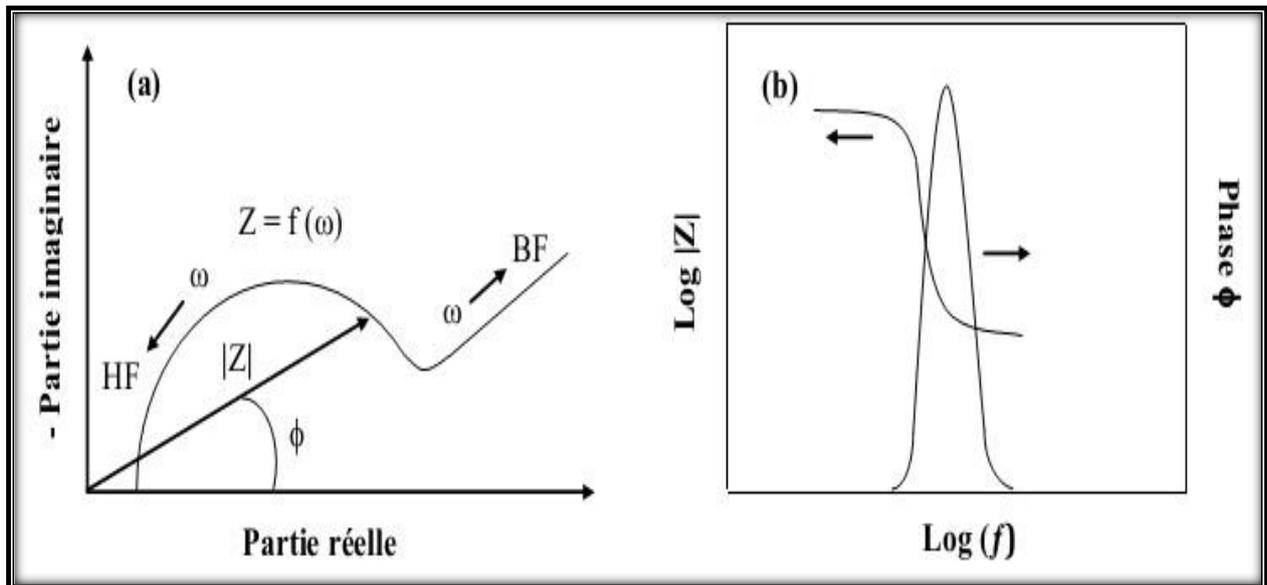


Figure II.3 : Représentation de l'impédance $Z(\omega)$: (a) diagramme de Nyquist et (b) diagramme de Bode.

Ces deux représentations d'un même résultat sont complémentaires, chacune d'entre elles montre un aspect particulier du diagramme d'impédance. La représentation de Nyquist permet de voir les différentes « boucles et droites » du diagramme mais masque les résultats haute fréquence (HF) alors que la représentation de Bode offre la vision complète du domaine de fréquence, tout en étant moins représentatif pour identifier certains phénomènes caractéristiques.

c. Transfert de charge pur

L'impédance globale $Z(\omega)$ dans le plan de Nyquist, qui prend en compte la résistance d'électrolyte (R_e) à la limite des hautes fréquences et la capacité de la double couche (C_{dl}), se réduit à un demi-cercle comme la montre la Figure (II.4) L'impédance faradique Z_f se réduit donc à une seule résistance de transfert de charge notée R_t ou R_{tc} à la limite des basses fréquences.

$$Z_f = \frac{R.T}{n.F.I_0} \quad (\text{II.10})$$

La capacité de la double couche peut être calculée à partir de la fréquence critique f_{max} correspondant à la valeur maximale de la partie imaginaire de l'impédance, et de la résistance de transfert de charge :

$$C_{dl} = \frac{1}{2.\pi.f_{max}. R_{tc}} \quad (\text{II.11})$$

Le schéma électrique équivalent correspondant comporte une résistance de transfert de charge R_t à la limite des basses fréquences et une capacité de double couche C_{dl} .

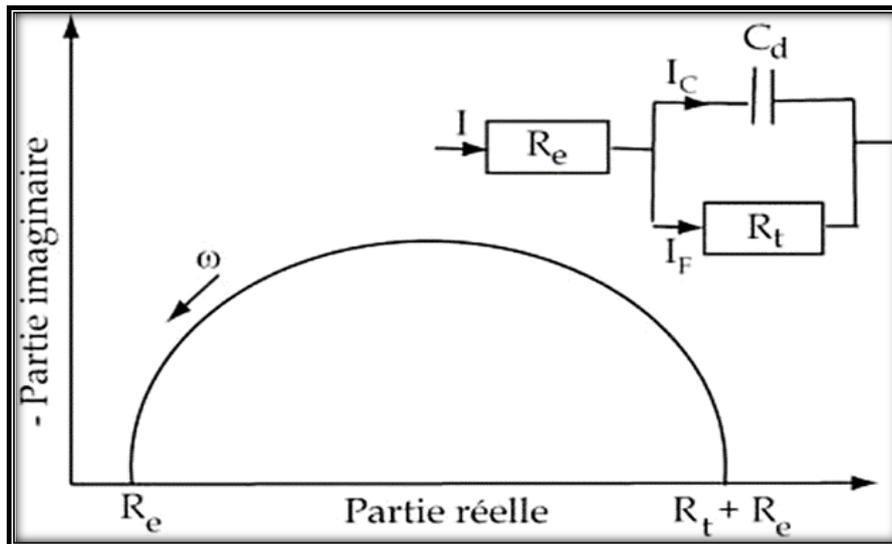


Figure II.4 : Représentation, dans le plan de Nyquist, de l'impédance électrochimique, dans cas d'un processus de transfert de charge et circuit électrique équivalent [3].

II.1.3 Les techniques 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 [14].

II.1.3.1 Angle de contact

Un angle de contact correspond à l'angle formé entre un produit liquide et une surface solide sur laquelle il a été déposé [15]. On parle de mouillage ou de mouillabilité pour caractériser un étalement plus ou moins important de la goutte sur les matériaux. Dans le cas de l'eau ou d'autres composés polaires, on parlera de surface hydrophobe lorsque l'angle de contact mesuré est élevé. Dans le cas contraire, il s'agira d'une surface hydrophile. Cet angle, qui est d'autant plus faible que le produit liquide s'étale sur la surface solide, est dépendant des interactions entre :

- La surface solide et le produit liquide.
- Le produit liquide et l'air.
- La surface solide et l'air.

Cet angle est donc lié aux différentes tensions interfaciales mises en jeu et sa détermination permet d'évaluer la mouillabilité de la surface étudiée par le produit liquide testé. La mouillabilité étant liée à l'énergie de surface du support, la mesure de l'angle de contact permet donc de caractériser l'adhésion entre le produit liquide et la surface solide [16].

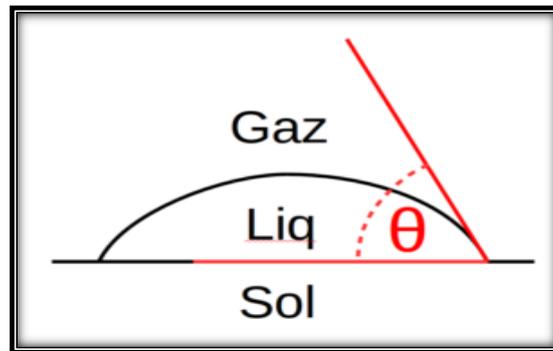


Figure II.5 : Schéma de l'angle de contact [16].

II.1.3.2 Diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X est une technique utilisée en laboratoire pour caractériser les matériaux cristallisés qui se présentent sous forme de poudre ou de massifs. Cette technique permet d'obtenir des informations à l'échelle d'atome. L'échantillon qui est analysé par cette technique est de nature inorganique comme les métaux, les céramiques, les alliages et les films minces...etc. Cette technique est largement utilisée en géologie, science des matériaux, sciences de l'environnement, chimie, ainsi que l'industrie pharmaceutique...etc. Elle est basée sur la diffusion élastique des rayons X sur la surface de l'échantillon à analyser. La diffraction est basée sur le phénomène d'interférences constructives des rayons X après interaction avec les différents plans (hkl) atomiques de l'échantillon analysé. Les directions dans lesquelles les interférences sont constructives, appelées pics de diffraction, peuvent être déterminées par la loi de Bragg [15, 17].

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (\text{II.12})$$

Où d est la distance inter-réticulaire, θ est l'angle d'incidence des rayons X, n est un nombre entier et λ est la longueur d'onde des rayons X incidents.

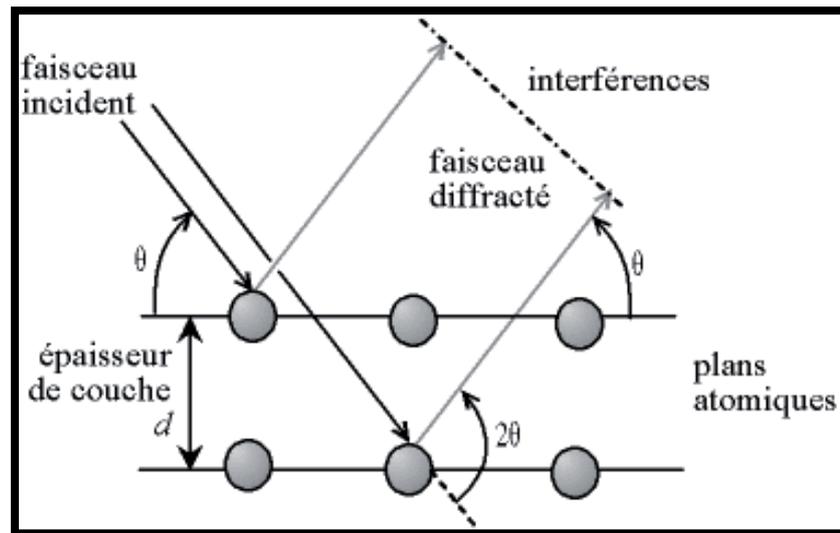


Figure II.6 : Loi de Bragg donnant les directions où les interférences sont constructives [17].

II.2 Conditions expérimentales

II.2.1 Préparation des électrodes

II.2.1.1 Matériau utilisé

Le matériau utilisé dans cette étude est un acier au carbone API 5L X42, connu sous le nom de tube L290 (selon la norme ISO 3183). Il est couramment utilisé dans les industries pétrolières, les raffineries, les centrales électriques...etc.

- **API signifie** : American Petroleum Institute
- **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).

La composition chimique de cet acier est présentée dans le **Tableau II. 1**.

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

Éléments	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Nb	Ti	Fe
Teneur (%)	0.23	1.18	0.1	0.1	0.01	0.4	0.4	0.035	0.020	97.595

II.2.1.2 Préparation des surfaces

Avant chaque essai pour une technique particulière, les échantillons d'acier X42 doivent passer par un traitement de surface, à savoir un polissage mécanique effectué à l'aide d'une polisseuse avec différents papiers abrasifs du carbure de silicium (SiC) de granulométries décroissantes (de 120 jusqu'à 2500 μm) en vue de l'obtention d'un aspect miroir. Ensuite, la surface des échantillons a été rincée avec de l'eau distillée et puis séchée avant la mise en contact avec le milieu corrosif pour garder le même état de surface pour chaque expérience.

II.2.2 Milieu électrolytique

Le milieu corrosif utilisé pour étudier l'efficacité de l'extrait *d'Arundo Donax* (AD) sur la protection de l'acier X42 contre la corrosion est constitué par une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) de concentration 0.5 M qui a été préparé par dilution avec l'eau distillée de l'acide commercialisé à 97 %. Le volume de la solution considérée est de 100 ml.

II.2.3 Préparation de l'extrait (AD)

L'inhibiteur utilisé lors de cette investigation est à base d'extrait de plante *d'Arundo Donax* (AD) Le choix de cette plante est guidé par plusieurs facteurs :

- ✓ Produit naturel.
- ✓ Non toxique.
- ✓ La disponibilité.
- ✓ Non couteuse.

Les feuilles *d'Arundo Donax* ont été cueillies durant trois mois de l'année 2024, (février Mars, Avril), elles ont été séchées dans une étuve, à température de 45°C pendant 24h afin d'éliminer toutes traces d'eau. Après séchage, les feuilles ont été broyées afin d'obtenir une poudre fine et homogène qui va servir pour la préparation de l'extrait. Ce dernier est obtenu par la méthode à reflux dans l'eau, en mélangeant 10 g de poudre sèche dans 100 ml d'eau distillée, puis chauffé pendant une heure (**Figure II.7**). Le reflux sera filtré par la suite afin d'éliminer toutes contamination.

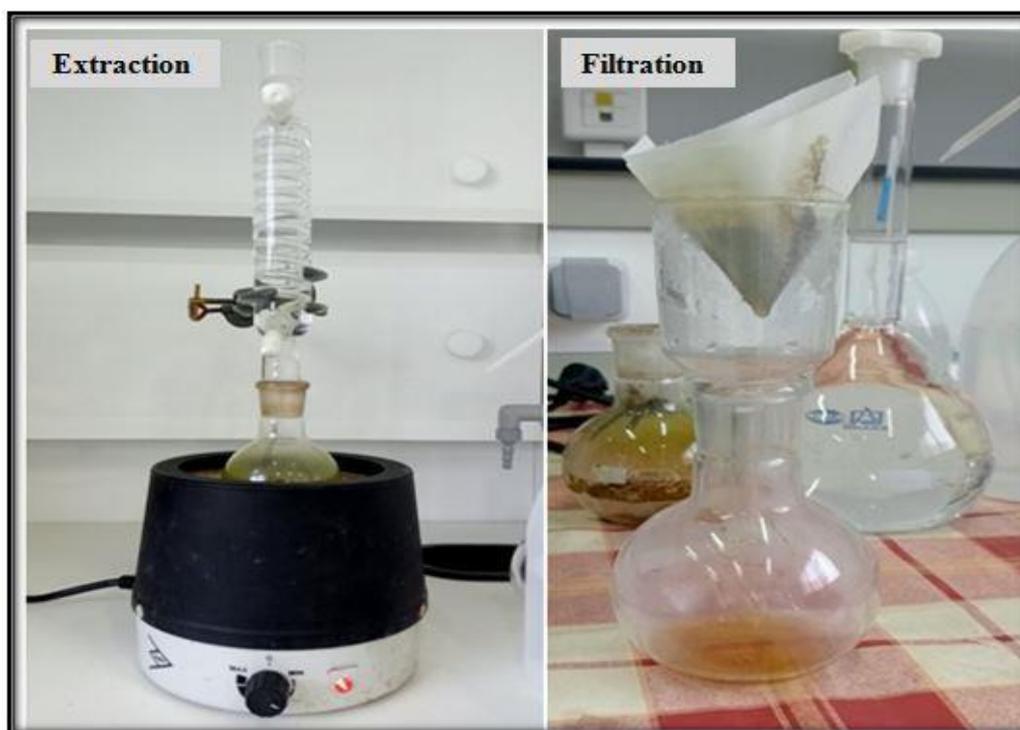


Figure II.7 : Schéma du montage d'extraction à reflux.

La concentration de l'extrait est déterminée en portant 10 ml du filtrat à évaporation et le résidu obtenu est pesé [18]. Avant chaque expérience un volume de la solution de H_2SO_4 1M est ajouté à un volume approprié de l'extrait et de l'eau distillée afin d'obtenir une solution de H_2SO_4 0.5M et une concentration donnée de l'extrait. Dans le cadre de notre étude, l'inhibiteur est ajouté dans une gamme de concentrations comprises entre 0.12 et 1.26 g. L^{-1} en vue de déterminer la concentration optimale.

II.2.4 Cellule électrochimique

Les expériences électrochimiques ont été effectuées en utilisant un montage classique constitué d'une cellule en verre à un seul compartiment et de trois électrodes (voir **Figure II.8**).

- **La cellule** est cylindrique, en verre pyrex à double paroi et a une contenance d'environ 100 ml, ayant une entrée sortie pour une éventuelle recirculation d'un fluide thermostaté. Avant chaque expérience, la cellule a été nettoyée et rincée à l'eau distillée.
- **L'électrode de référence (ER)** est de calomel saturé (ECS), caractérisée par la chaîne électrochimique : $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2/\text{KCl}$ saturé. Elle présente un potentiel de (+ 0.241 V) par rapport à l'électrode standard d'hydrogène (ENH) à 25°C. Elle est placée près de l'électrode de travail afin de minimiser l'influence de la chute ohmique.

- **L'électrode de travail (ET)** qui est l'échantillon à étudier, est une plaque en acier (API 5L-X42) de surface active de 1cm^2 est enrobée de résine à l'exception de la surface exposée à tester, disposé face à la contre électrode.
- **L'électrode auxiliaire (contre électrode CE)** est une grille en platine, son rôle est d'assurer le passage de courant dans la cellule électrochimique sans limitation.

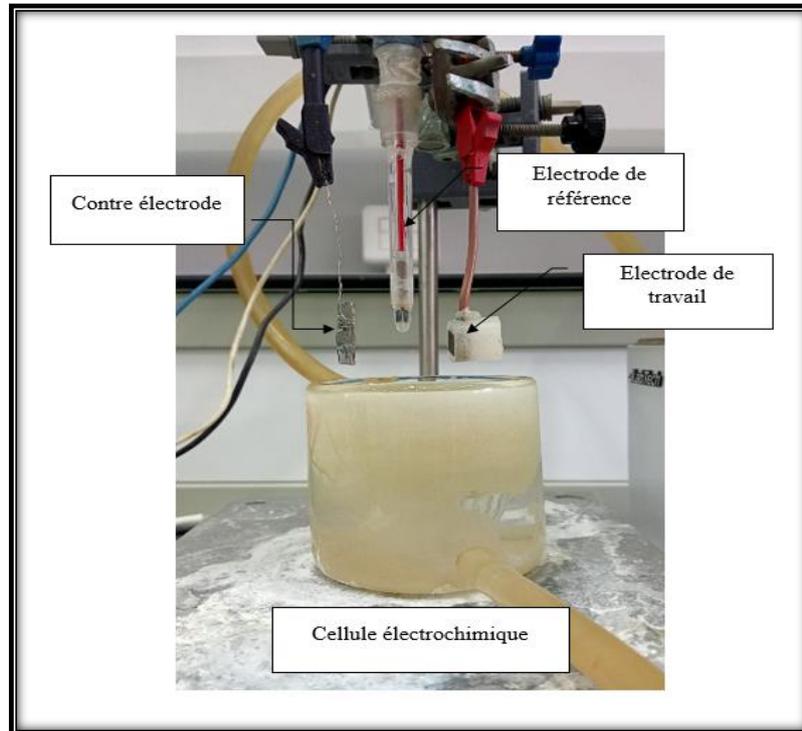


Figure II.8 : photo de la cellule électrochimique à trois électrodes.

II.3 Dispositifs expérimentaux

Pour effectuer nos expérimentations, nous avons utilisé deux montages énumérés ci-dessous :

II.3.1 Dispositif expérimental de mesure potentiodynamique, potentiostatique et galvanostatique

Schématisé par la figure II.9, ce montage est constitué de :

- Une cellule de mesure** : elle comporte essentiellement la cellule en verre, l'électrode de travail, l'électrode de référence et la contre électrode ;
- Un bain marie** : c'est un petit réservoir de stockage d'eau, mené d'une pompe ayant un système de régulation de température. Cette eau nous servira du fluide thermostat pour maintenir la température de l'électrolyte à une valeur voulue ;

-Un **potentiostat** : de type PGP 201 assisté par un micro-ordinateur : il permet la réalisation de plusieurs mesures électrochimiques (potentiostatique, chronopotentiométrie, galvanostatique, saut de potentiel, etc.).

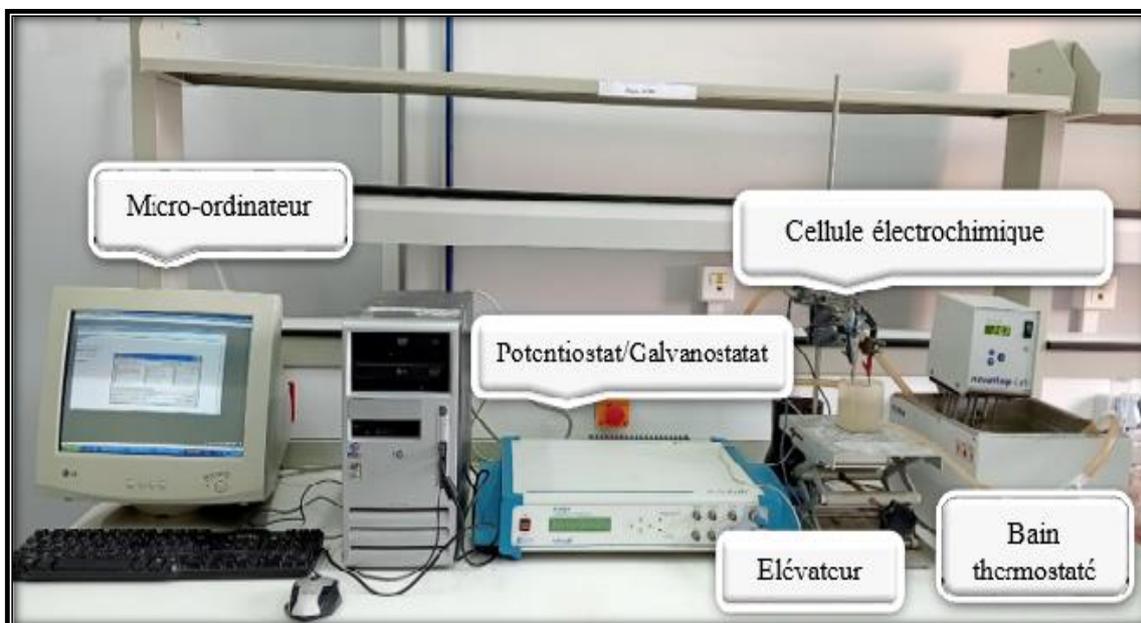


Figure II.9 : Dispositif expérimental de mesure potentiodynamique, potentiostatique et galvanostatique.

II.3.2 Dispositif expérimental de mesure de l'impédance électrochimique

Le montage ayant servi à cette étude est représenté par la figure II.10. Il est constitué essentiellement d'un impédance mètre de marque AUTOLAB intégrant à la fois un potentiostat/galvanostat. Cet analyseur de fréquence est piloté par un logiciel (Nova 1.9) permettant d'effectuer des mesures d'impédance. La gamme d'amplitude, des perturbations sinusoïdales, préconisée par le constructeur va de 0.01 à 0.35V. Les fréquences de mesures et le nombre de points sont ajustés automatiquement.

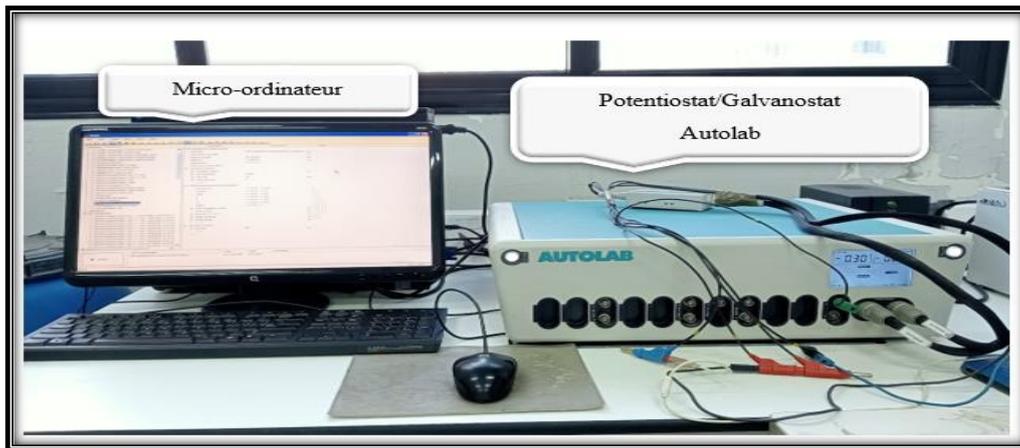


Figure II.10 : Dispositif expérimental de mesure de l'impédance électrochimique.

II.4 Protocoles expérimentaux

II.4.1 Protocole de mesure de la perte de masse

Cette technique a été utilisée afin d'étudier l'efficacité de l'inhibiteur. Les échantillons de l'acier X42 préalablement préparés et pesés, sont immergés dans une solution corrosive H_2SO_4 0.5M, sans et avec addition de différentes concentrations de l'inhibiteur AD à une température de $25^\circ C$ à l'air atmosphérique. Après chaque 24 heures d'immersion, les pièces d'acier sont retirées, puis lavées avec l'eau distillée. Les produits de corrosion sont éliminés de la surface du métal. Ensuite, après rinçage à l'eau distillée et séchage, l'échantillon est pesé. La perte de masse a été suivie pendant 14 jours et l'efficacité inhibitrice est déterminée après chaque 24h d'immersion.

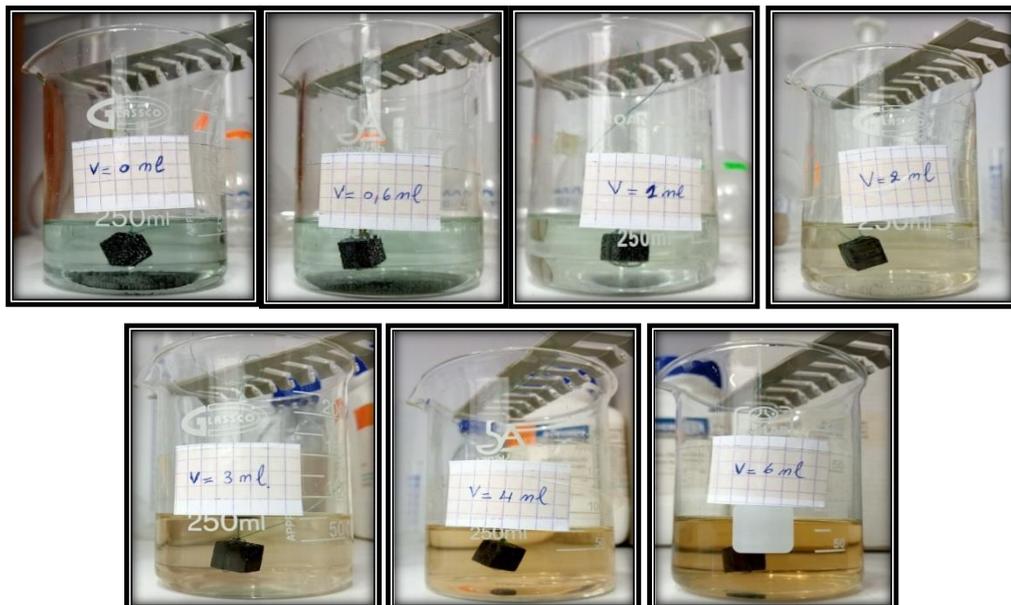


Figure II.11: Echantillon d'acier dans une solution corrosive avec et sans inhibiteur.

II.4.2 Protocole des mesures électrochimiques

II.4.2.1 Courbes de polarisation intensité-potentiel

Les courbes intensité-potentiel sont obtenues en mode potentiodynamique pour différentes concentrations de l'extrait (*AD*) et pour différentes températures. Le potentiel appliqué à l'échantillon varie de façon continue, avec une vitesse de balayage égale à 1 mV.s^{-1} , de -900 à -200 mV. Avant le tracé des courbes de polarisation, l'électrode de travail est maintenue à son potentiel d'abandon pendant 20 min.

II.4.2.2 Suivi de potentiel de corrosion

Le potentiel de corrosion a été suivi en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur (*AD*) pendant deux heures à la température ambiante ($T=25 \text{ }^\circ\text{C}$).

II.4.2.3 Diagrammes d'impédance électrochimique

Les spectres d'impédance électrochimique ont été enregistrés au potentiel de corrosion, pour différentes concentrations de l'inhibiteur (*AD*). Les mesures ont été effectuées dans la gamme de fréquence 100 kHz -10 mHz et avec une amplitude de 10 mV. Le paramètre d'amplitude de perturbation a été préalablement optimisé.

II.4.2 Protocole de mesures d'analyse de surface

II.4.2.1 L'angle de contact

Les échantillons sont constitués des plaques rectangulaires en acier X42 de surface égale à 6 cm^2 . Les échantillons polis, rincés et séchés ont été immergés pendant 1h dans H_2SO_4 0.5M, en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur (*AD*) à une température de 25°C à l'air atmosphérique. Ensuite ils ont été retirés de la solution et séchés avant d'être placés sur la platine du goniomètre G10 de KRÜSS® (**Figure II.12**)

Les essais ont été réalisés par la méthode de la goutte posée. Cette méthode consiste à déposer une goutte du solvant (eau) $5 \text{ } \mu\text{l}$ 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'eau déposées à des endroits différents de la surface.

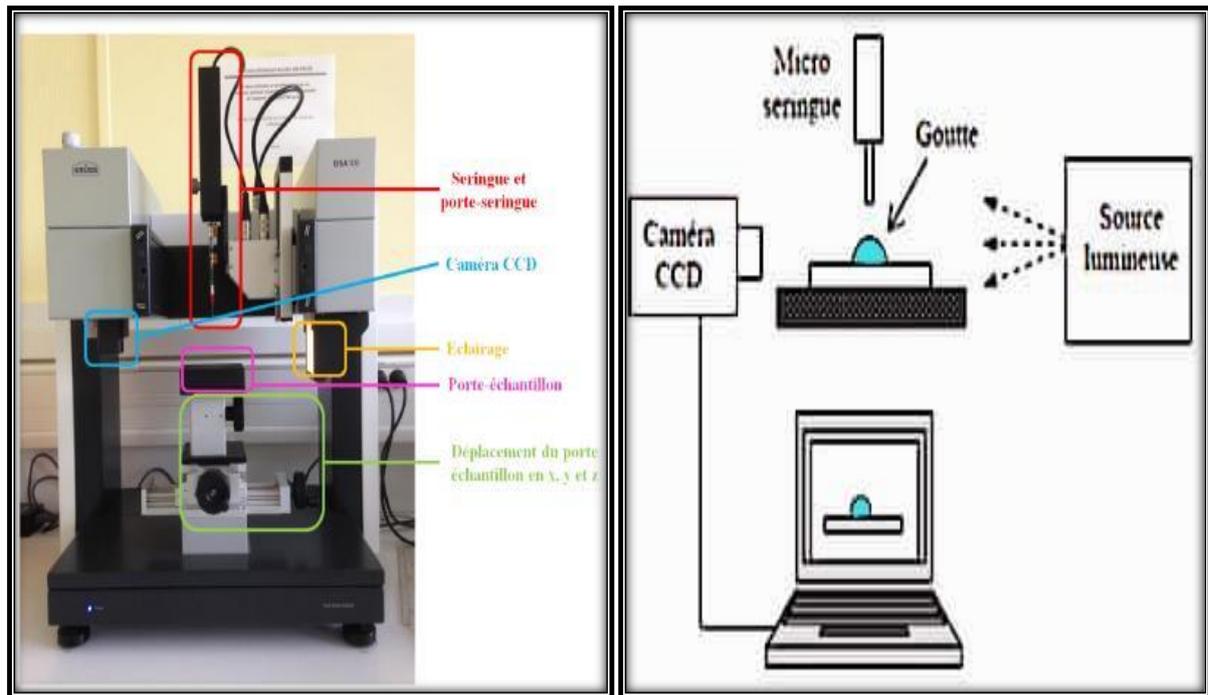


Figure II.12: Photographie du goniomètre Krüss et schéma de principe de la mesure d'angle de contact.

II.4.2.2. Diffraction des rayons X

Cette technique permet une analyse qualitative et quantitative. Elle permet de déterminer la nature de chaque phase cristalline ou semi-cristalline au sein d'un échantillon mais aussi de remonter à la structure atomique du système cristallin analysé (paramètres de maille, positions atomique). Les positions et les intensités des raies de diffraction de la plupart des matériaux ont été étudié et son répertoriés dans des bases de données. La composition d'un diffractomètre expérimentales avec ces données permet de retrouver la nature de chaque phase constitutive de l'échantillon.

Dans notre cas, La diffraction des rayons X se voit comme l'un des outils les plus utilisés pour déterminer la nature des composés formés sur la surface de l'électrode.

L'appareil utilisé pour l'analyse par un diffractomètre de type Panalytical Empyrean® série 3 (**Figure II.13**). L'analyse est effectuée en mode Gonio, avec l'introduction d'un monochromateur sur le préfix coté diffracté afin d'éviter le phénomène de fluorescence du fer, sous une tension d'accélération de 45 kV et une intensité de 40 mA avec anode en cuivre. Le pas angulaire d'enregistrement est de 0.0260 degré (2θ) et un temps de 20 secondes/pas. L'analyse est faite après immersion des échantillons d'acier X42 dans une solution de H_2SO_4 0.5M en absence et en présence d'extrait (AD) pendant 24h.



Figure II.13 : Photographie d'un diffractomètre de type Panalytical Empyrean®.

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 voltamaster 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 MATLAB®. 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 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 MATLAB® et ZsimpWin®.

Références bibliographiques

- [1] B. Laidi, « Etude de la résistance à la corrosion des alliages de cuivre en milieu salin ». Mémoire de Magister, Université de Skikda, 2008 .
- [2] M. Lebrini, « Synthèses et études physicochimiques de nouveaux thiadiazoles inhibiteurs de corrosion de l'acier en milieu acide », Thèse de doctorat, Lille 1, 2005.
- [3] P. Bommersbach, « Evolution des propriétés d'un film inhibiteur de corrosion sous l'influence de la température et des conditions hydrodynamiques: caractérisation par techniques électrochimiques », Thèse de doctorat, Lyon, INSA, 2005.
- [4] E. L. Liening, « Electrochemical corrosion testing techniques », National Association of Corrosion Engineers Process Industries Corrosion the Theory and Practice, p. 85, 1986.
- [5] E. L. Din-Stirbu, « Comportement à la corrosion des alliages d'aluminium utilisés dans l'industrie automobile pour la fabrication de radiateur de chauffage », Thèse de doctorat, Lyon, INSA, 2005.
- [6] A. Zaabar, « Electrodeposition, par voltampérométrie et cémentation, des métaux cuivre et zinc en présence d'extrait de la plante d'ortie (*Urtica dioica* L.) », Appl. L'extrait À Corros, thèse de doctorat , Université de Bejaia , 2015.
- [7] V. G. Levich, Physicochemical Hydrodynamics. Prentice-Hall, 1962.
- [8] M. BILEL, « Synthèse des inhibiteurs contre la corrosion des aciers », Mémoire de Magister, Université Mentouri-Constantine ,2011.
- [9] H. Hamani, « Synthèse, caractérisation et étude du pouvoir inhibiteur de nouvelles molécules bases de sch », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Setif-1 , 2015.
- [10] N. Harckerman, R. M. Hurd, 1st International Congress on Metallic Corrosion, Butterworths, London, P 166 ,1962.
- [11] F. Dabosi, C. Deslouis, M. Duprat, et M. Keddou, « Corrosion inhibition study of a carbon steel in neutral chloride solutions by impedance techniques », Journal of Electrochemical Society, vol. 130, n° 4, p. 761, 1983.
- [12] N. Brinis, « Application des polymères conducteurs à l'inhibition de la corrosion de l'acier », Mémoire de Magister, Université Abderrahmane Mira de Béjaia, 2009.
- [13] D. Landolt, « Traité de matériaux vol 12: Corrosion et chimie des surfaces des métaux ». Press.Univ.Polytech.Romaines, 1993.
- [14] S. Audisio et G. Béranger, Anticorrosion et durabilité dans le bâtiment, le génie civil et les ouvrages industriels. PPUR Presses polytechniques, 2010.
- [15] A. Ziouani, « Etude expérimentale et théorique d'inhibition de la corrosion de l'acier en

milieu HCl 1M de quelques bases de schiffe synthétisées », Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2023.

[16] jeanclaude, « Mesure d'angle de contact liquide-solide », Laboratoire Calnesis, Oct .2017.

[17] F. Serna, J. Lagneau, et J.-M. Carpentier, « La diffraction des rayons X: une technique puissante pour résoudre certains problèmes industriels et technologiques », Chimie Nouvelle, p. 1, 2014.

[18] A. M. Abdel-Gaber, B. A. Abd-El-Nabey, et M. Saadawy, « The role of acid anion on the inhibition of the acidic corrosion of steel by lupine extract », Corrosion science, vol. 51, n° 5, p. 1038, 2009.

Chapitre III

Ce chapitre représente une étude électrochimique et physico-chimique de l'efficacité inhibitrice de l'extrait de la canne de provence, du nom scientifique « *Arundo Donax* » sur la corrosion de l'acier X42 en milieu acide sulfurique H_2SO_4 0.5M. L'extrait d'*Arundo Donax* est obtenu par la méthode à reflux dans l'eau. Nous avons choisi l'eau comme solvant d'extraction pour son impact vis-à-vis de l'environnement.

III.1 Etude gravimétrique

La méthode de la perte de masse est souvent utilisée comme une première approche de l'étude de l'efficacité de l'inhibiteur de corrosion d'un métal dans une solution électrolyte. Cette méthode est facile à installer et elle ne nécessite pas de matériel important.

Les dimensions des échantillons de l'acier utilisées sont : $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 0.9\text{cm}$. Ces échantillons sont immergés dans le milieu corrosif H_2SO_4 0.5M sans et avec addition de différentes concentrations en inhibiteur (*AD*). Le processus de corrosion étant un phénomène lent, l'efficacité inhibitrice est déterminée après chaque 24 heures d'immersion pendant 14 jours à la température ambiante ($25 \pm 1^\circ\text{C}$).

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

$$\eta(\%) = \left[\frac{w - w_{inh}}{w} \right] * 100 \quad (\text{III.1})$$

Où W et W_{inh} sont les valeurs de la perte de masse de l'acier après immersion sans et avec inhibiteur (*AD*), respectivement.

L'ensemble des résultats obtenus de la perte de masse et du rendement (pourcentage de l'efficacité inhibitrice) en absence et en présence de différentes concentrations de l'extrait (*AD*) dans la solution H_2SO_4 0.5M sont présentés sur la **Figure III.1**.

L'analyse des résultats obtenus de la **Figure III.1** montre clairement que l'extrait (*AD*) possède d'excellentes propriétés inhibitrices de la corrosion de l'acier X42 en milieu H_2SO_4 0.5M, l'augmentation de la concentration de l'extrait (*AD*) conduit à une diminution de la vitesse de corrosion, et un accroissement de l'efficacité inhibitrice (η). Cette diminution peut être expliquée par l'adsorption des molécules de l'inhibiteur (*AD*) sur la surface de l'acier X42.

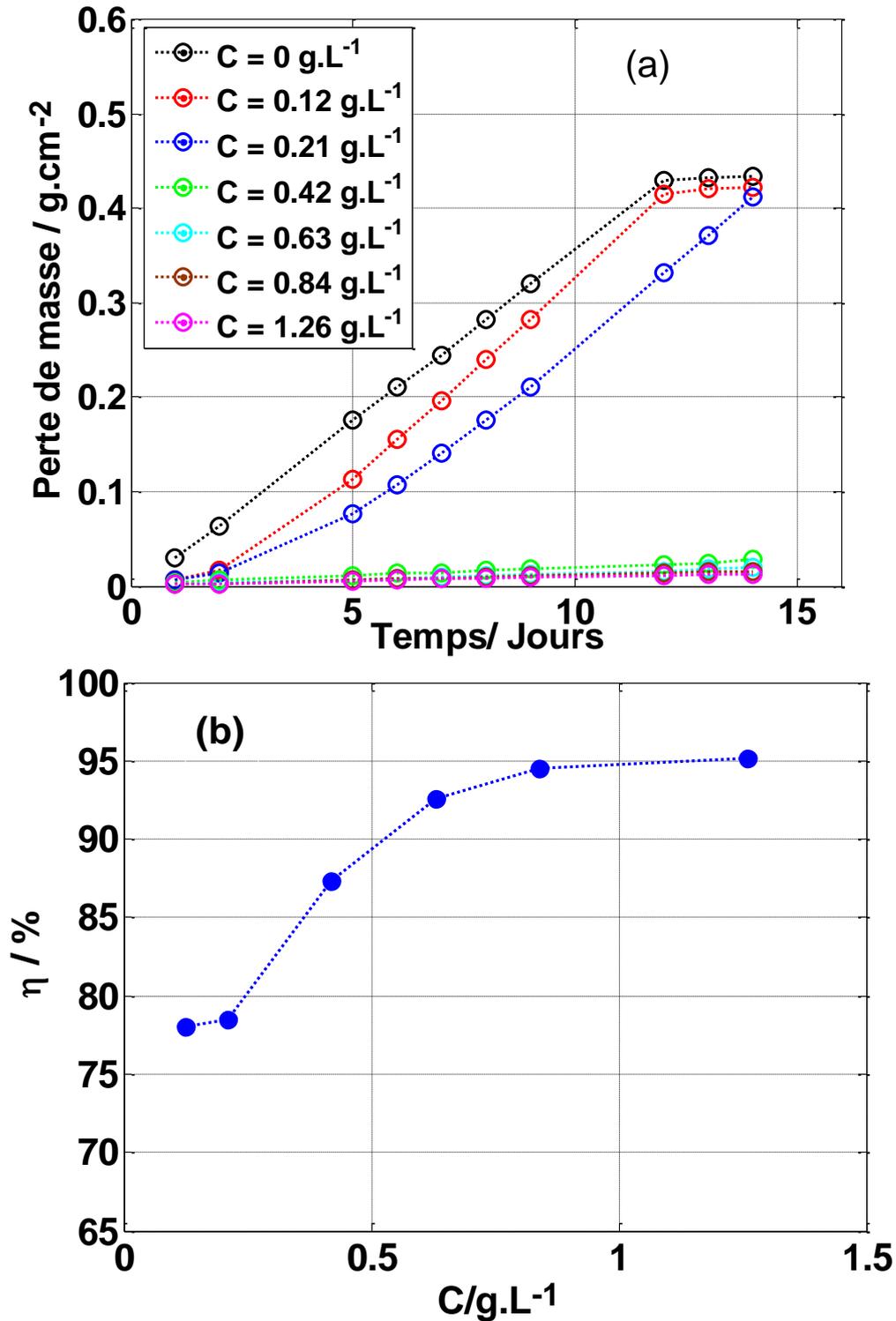


Figure III.1. (a) Variation de la perte de masse en fonction de temps (b) l'efficacité inhibitrice, déduite après 1 jours d'immersion, en fonction de la concentration en inhibiteur vert (AD) dans H₂SO₄ 0.5M.

III.2 Etude électrochimique

L'étude de la corrosion par la perte de masse ne permet pas d'accéder aux mécanismes mis en jeu lors de la corrosion. L'étude électrochimiques constituent une technique plus complète puisqu'elles étudient la base même du phénomène de corrosion [1]. L'aspect quantitatif de ces techniques permet d'accéder à la vitesse de corrosion, au type de corrosion, les différentes étapes élémentaires de la réaction électrochimique (diffusion, transfert d'électron, adsorption et désorption) 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'entamer d'une manière approfondie l'étude de comportement de l'acier X42 dans le milieu agressif H_2SO_4 0.5M, il est nécessaire de suivre en premier lieu l'évolution de son potentiel libre en fonction de temps. Les valeurs du potentiel déterminées par cette technique résultent des réactions qui se déroule à l'interface métal/solution, et elles ne renseignent pas sur les cinétiques électrochimiques et ne permettent pas d'accéder à la vitesse de corrosion, par contre cette technique permet de savoir la durée d'immersion nécessaire pour un établissement d'un régime stationnaire indispensable au mesure potentiodynamiques ou d'impédance électrochimique [2].

Les courbes obtenus pour une durée d'immersion de 2h des différentes concentrations en inhibiteur (*AD*) sont représentées sur la **Figure III.2**.

La **Figure III.2** montre que les courbes chronopotentiométriques évoluent vers des valeurs plus positives en potentiel. L'essai réalisé en absence d'inhibiteur est d'un potentiel qui caractérise la formation de produit de la corrosion sur la surface de l'électrode de travail et qui se stabilise à une valeur proche de (-0.46 V_{ECS}) après un temps d'immersion de 2000s.

Avec l'addition de l'extrait (*AD*) dans la solution corrosive H_2SO_4 0.5M, nous observons l'accroissement des valeurs du potentiel (anodiquement), ceci peut être expliquer par le fait que les molécules d'inhibiteur s'adsorbe de plus en plus efficacement sur la surface de l'acier X42 pour rendre le dégagement d'hydrogène de plus en plus difficile [3,4]. Ainsi, on remarque que le potentiel de corrosion se stabilise après 2000s d'immersion pour toutes les concentrations.

En se basant sur ces résultats, on peut conclure que l'action de cet inhibiteur est de type mixte, car la différence entre le potentiel de corrosion (E_{corr}) sans et avec inhibiteur est inférieur à 85mv ($|\Delta E| < 85mV$) [5, 6].

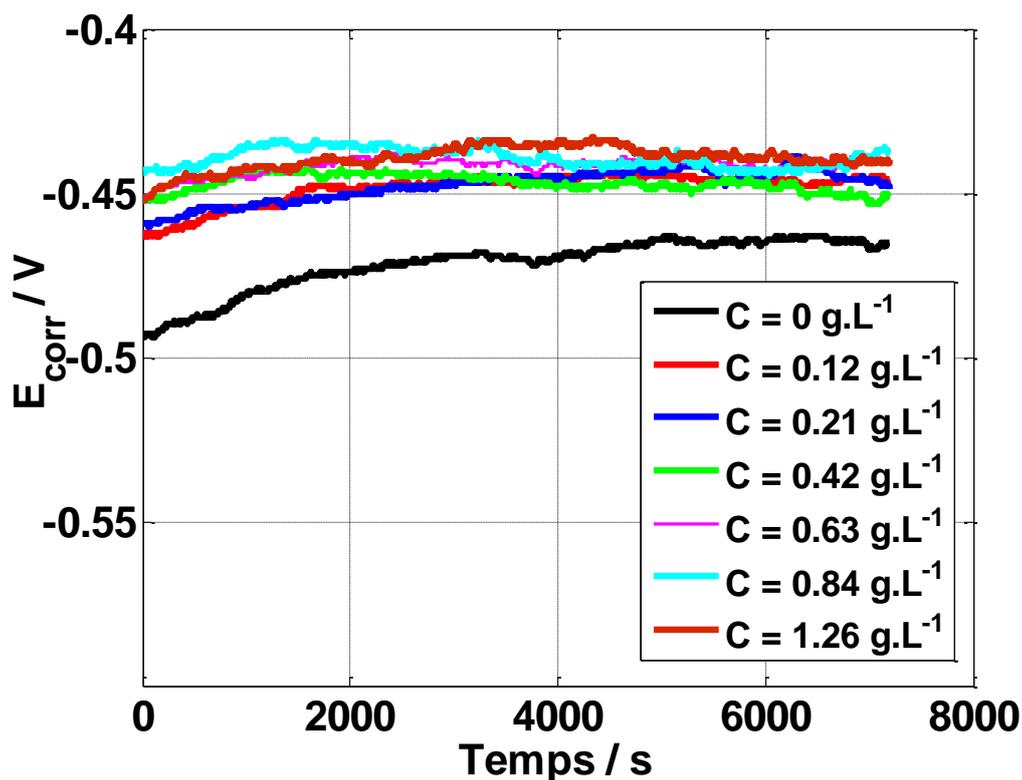


Figure III.2. Evolution du potentiel de corrosion de l'électrode de l'acier X42 en fonction du temps dans H_2SO_4 0,5M à différentes concentrations en inhibiteur.

III.2.2 Courbes de polarisation

Le comportement électrochimique de l'électrode de travail dans le milieu corrosif est traduit par les courbes de polarisation $i=f(E)$. Elles sont obtenues avec une vitesse de balayage de $1\text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ en partant du potentiel plus négatif (-0.9 V_{ECS}) vers un potentiel plus positif (-0.2 V_{ECS}).

La **Figure III.3** montre les courbes de Tafel, enregistrées après 20 minutes d'immersion en absence et en présence de l'extrait d'inhibiteur (*AD*) à différentes concentrations en milieu H_2SO_4 0.5M à 25°C .

- **Domaine cathodique**

L'addition de l'inhibiteur (*AD*) provoque une diminution importante des densités du courant cathodique par rapport à la solution à blanc correspondant à la réduction du proton ($2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$). Cette diminution est proportionnelle à la concentration, ce qui traduit l'action cathodique de l'inhibiteur qui peut être attribuée à l'adsorption des molécules de ce dernier (*AD*) sur les zones cathodiques [7, 8].

- **Domaine anodique**

L'ajout de l'inhibiteur (*AD*) induit la diminution du courant anodique avec l'augmentation progressive de la concentration de l'extrait, signe de la difficulté de l'oxydation du métal ($Fe \rightarrow Fe^{+2} + 2e^-$). Cela dénote l'adsorption de l'inhibiteur sur la surface de l'acier.

Ces résultats montrent clairement que les courants cathodiques et anodiques sont affectés par l'ajout de l'inhibiteur.

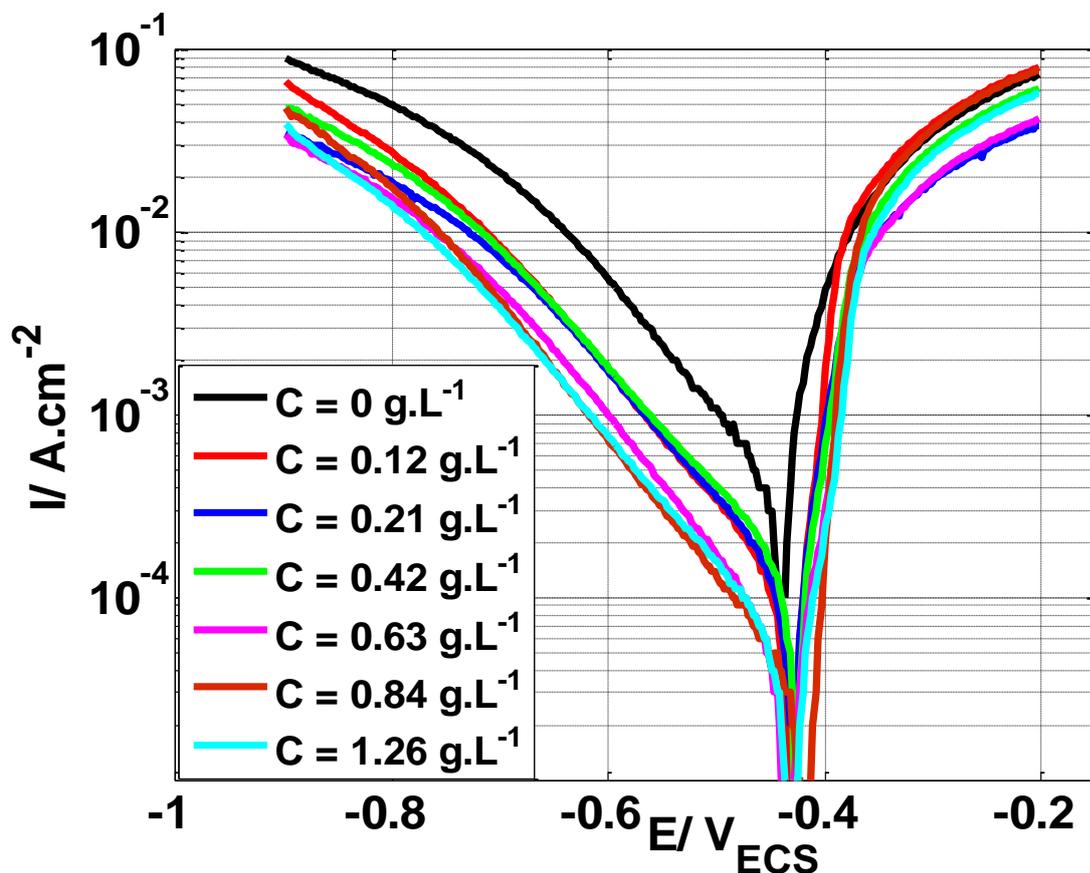


Figure III.3 : Courbes de Tafel de l'acier X42 dans H_2SO_4 0,5M à différentes concentrations en inhibiteur (*AD*), $V_b = 1 \text{ mV.s}^{-1}$ et $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

L'exploitation des courbes de Tafel (**Figure III.3**) nous a permis d'accéder aux différents paramètres électrochimiques de la corrosion de l'acier X42 dans le milieu H_2SO_4 0.5M, en absence et en présence de l'inhibiteur (*AD*).

Les valeurs des densités de courant de corrosion (i_{corr}) obtenus par extrapolation des droites de Tafel, le potentiel de corrosion (E_{corr}), les pentes de Tafel cathodiques et anodiques (b_c et b_a), l'efficacité d'inhibition (η) pour différentes concentrations en inhibiteur (*AD*) en milieu H_2SO_4 0.5M sont reportées dans le **Tableau III.1**.

L'efficacité inhibitrice (η) est déterminée par la relation suivante [7,8] :

$$\eta(\%) = \theta * 100 \quad (\text{III.2})$$

Avec θ est la valeur du temps de recouvrement de la surface du métal par l'inhibiteur adsorbé, elle est définie par la relation suivante [9]:

$$\theta = \left[1 - \frac{i_{corr(inh)}}{i_{corr}} \right] \quad (\text{III.3})$$

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

Tableau III.1. Paramètres de la corrosion de l'acier X42 dans le milieu H_2SO_4 0,5M contenant les différentes concentrations de l'inhibiteur (AD), calculés par la méthode d'extrapolation de Tafel.

Concentration de l'inhibiteur (AD) ($g.L^{-1}$)	i_{corr} ($mA.cm^{-2}$)	b_a ($mV.dec^{-1}$)	$-b_c$ ($mV.dec^{-1}$)	$-E_{corr}$ (mV_{ECS})	R_p ($\Omega.cm^2$)	η (%)
0	0,4310	24,1	139,2	452,6	37,36	-
0,12	0,1227	27,2	140,7	446,4	140,66	72,09
0,21	0,1143	33,9	129,0	441,5	130,67	74,41
0,42	0,0730	35,6	118,8	447,5	221,99	83,02
0,63	0,0547	31,4	126,4	443,1	303,80	87,44
0,84	0,0520	26,9	123,9	442,5	313,00	87,81
1,26	0,0501	30,6	133,8	440,8	323,34	88,34

Les valeurs de la résistance de polarisation (R_p) sont calculées par la relation de Stern-Geary [10] :

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

Les résultats obtenus par les courbes de Tafel montrent que le potentiel de corrosion (E_{corr}) se déplace vers des valeurs plus positives (valeurs anodiques) avec l'addition de l'inhibiteur dans le milieu corrosif H_2SO_4 0.5M et ce déplacement est peut-être dû à l'adsorption de l'inhibiteur (AD) sur la surface de l'acier X42. Ceci confirme les résultats obtenus par les courbes du suivi du potentiel de corrosion Figure III.1.

En se basant sur ces résultats, on peut conclure que l'action d'inhibiteur (AD) est de type mixte, car la différence entre le potentiel de corrosion (E_{corr}) sans et avec inhibiteur est inférieur à 85mV ($|\Delta E| = 11.8mV_{ECS}$) [11,12]. Ainsi, les résultats obtenus montrent que :

- La densité de courant de corrosion (i_{corr}) diminue alors que la résistance de polarisation (R_p) croît avec l'augmentation de la concentration en inhibiteur.
- L'ajout de l'inhibiteur (AD) provoque la modification des pentes cathodiques (b_c) des droites de Tafel, ce qui indique l'influence de l'inhibiteur (AD) sur la cinétique de réduction de l'hydrogène [13].
- L'ajout de l'inhibiteur (AD) a également affecté les valeurs des pentes anodiques (b_a), ce qui peut être dû à l'adsorption des molécules d'extrait sur les sites anodiques de l'acier X42 [3, 13].
- L'efficacité inhibitrice (η) augmente avec l'augmentation de la concentration en inhibiteur et on constate que l'efficacité inhibitrice (η) varie légèrement au-delà $0.63g.L^{-1}$ (elle atteint la valeur maximale de 88% pour $1.26g.L^{-1}$ en inhibiteur (AD)).

III.2.3 Spectroscopie d'impédance électrochimique

L'étude des diagrammes d'impédance électrochimique au potentiel de corrosion permet une analyse plus complète du mécanisme d'action de l'inhibiteur, comparativement aux méthodes stationnaires, puisqu'elle permet de séparer les différents mécanismes intervenant lors du processus d'inhibition. En effet, les propriétés du film ainsi que le mécanisme de transfert de charge peuvent être identifiés, en particulier en fonction des différents paramètres imposés au système [14].

Pour caractériser le mécanisme de corrosion de l'acier X42 en milieu H_2SO_4 0.5M en absence et en présence de l'inhibiteur vert, 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 10mV sur un domaine de fréquence allant de 100KHz à 10mHz.

Les spectres d'impédance sont représentés par le diagramme de Nyquist et Bode.

Les spectres d'impédance obtenus au potentiel de corrosion enregistrés, après 20 min d'immersion dans la solution H_2SO_4 0.5M avant et après l'addition de différentes concentrations en inhibiteur (*AD*) sont représentés dans la **Figure III.4**.

Les diagrammes d'impédance de Nyquist obtenus au potentiel de corrosion pour différentes concentrations en inhibiteur **Figure III.4** montrent la présence d'une seule boucle capacitive à hautes fréquences, caractéristique de la relaxation de la double couche en parallèle avec le transfert de charge [15]. Ce type de diagramme indique généralement que le processus de dissolution de l'acier X42 est contrôlé par un processus de transfert de charge.

D'après la **Figure III.4**, l'addition de l'inhibiteur (*AD*) fait augmenter le diamètre des boucles capacitives, donc la résistance croît à la corrosivité du milieu, cela peut être dû à la formation d'une couche protectrice suite à l'adsorption des molécules de l'extrait (*AD*) sur la surface du métal [16, 17].

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. Cette inhomogénéité peut résulter de la rugosité de la surface de l'électrode, de la formation de produits de corrosion, l'oxydation du métal ou encore de l'adsorption de l'inhibiteur [15, 18].

La forme semi-circulaire des diagrammes d'impédance nous a conduit à choisir un circuit électrique simple afin d'obtenir les paramètres caractéristiques de l'interface électrochimique métal/électrolyte.

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.5**, 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.

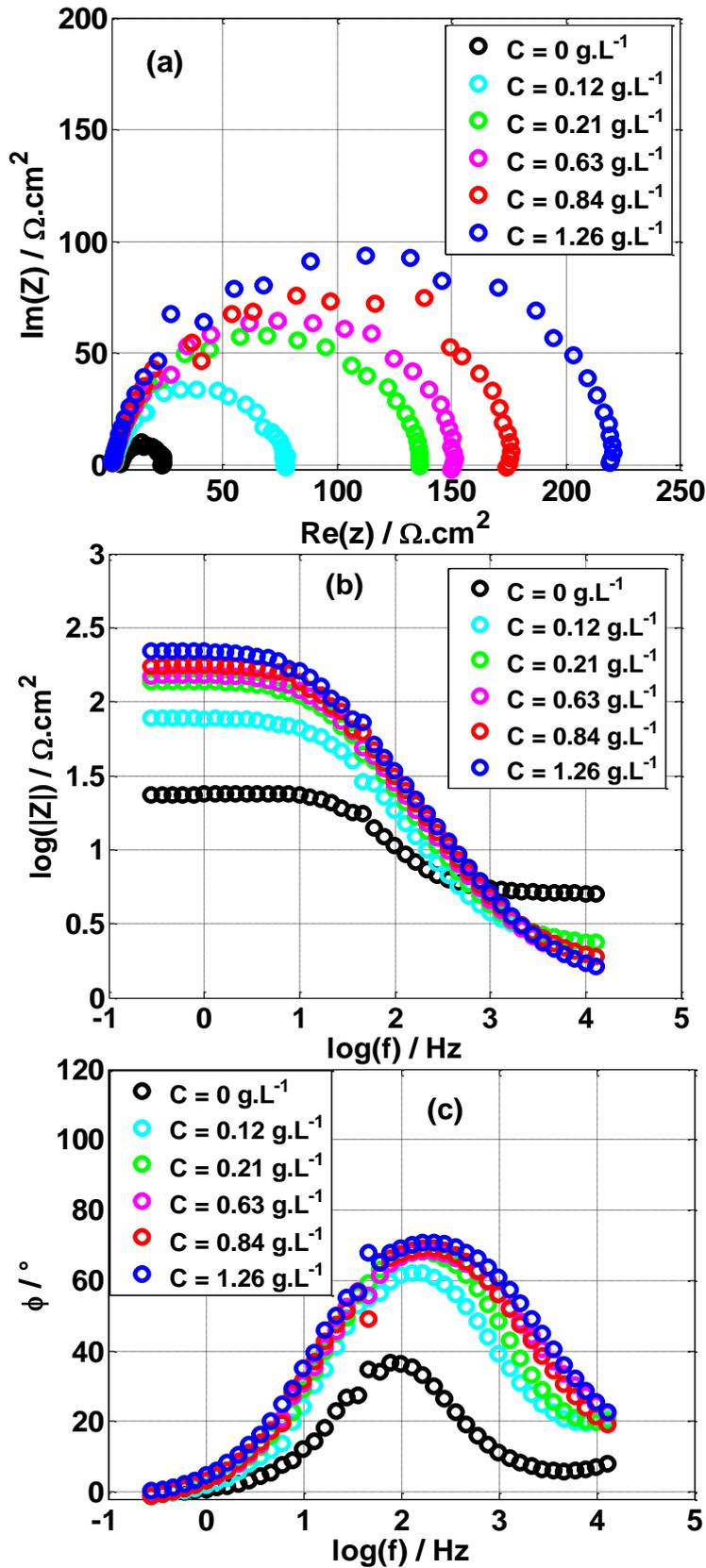


Figure III.4 : Diagrammes d'impédance électrochimique de l'acier X42 dans H₂SO₄ 0,5 M en absence et présence de différentes concentrations de l'extrait (AD) à E_{corr} et T = 25 °C.

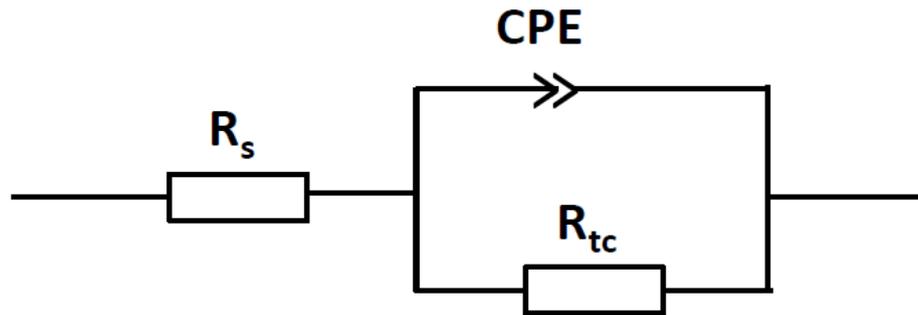


Figure III.5 : Circuit électrique équivalent proposé pour modéliser les diagrammes d'impédance de Nyquist précédemment présentés.

Les valeurs de la capacité de la double couche (C_{dl}) sont calculées par la relation de Brug [11,19,20].

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

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

$$\eta(\%) = \frac{(R_{tc}^{inh} - R_{tc}^{\circ})}{R_{tc}^{inh}} * 100 \quad (\text{III.6})$$

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

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 regroupées 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 H_2SO_4 0,5M contenant les différentes concentrations de l'inhibiteur AD.

Concentration de l'inhibiteur AD (g.L ⁻¹)	R_s ($\Omega.cm^2$)	Q ($s^n \Omega^{-1} cm^{-2}$). 10^5	n	C_{dl} ($F.cm^{-2}$). 10^5	R_{tc} ($\Omega.cm^2$)	η (%)	χ^2 (10^{-2})
0	5,111	31,41	0,921	17,725	19,21	-	1.52
0,12	2,288	19,67	0,867	6,048	78,81	75,62	1.28
0,21	2,508	11,15	0,904	4,667	134,9	85,76	4.44
0,63	1,436	13,57	0,854	3,178	157,1	87,77	4.69
0,84	2,136	10,22	0,885	3,412	178,7	89,25	6.73
1,26	1,826	9,212	0,887	3,0516	222,9	91,38	6.53

D'après les résultats du tableau, nous constatons que l'ajout de l'extrait AD provoque une diminution de la valeur de capacité de la double couche (C_{dl}) et augmente 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.

La double couche électrochimique formée à l'interface métal / solution peut être considérée comme un condensateur électrique et la diminution de sa capacité est due au départ des molécules d'eau et autres ions initialement adsorbés sur l'électrode par les constituants organiques de l'inhibiteur qui prennent leur place en formant un film protecteur, généralement moins conducteur. La morphologie, la texture et l'épaisseur du film formé changent avec l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur. En effet, plus l'extrait AD s'adsorbe, plus la capacité de la double couche diminue [4, 11, 21].

Ce **Tableau III.2** montre aussi que l'efficacité d'inhibition de l'extrait AD est proportionnelle avec la concentration de l'inhibiteur et atteint une valeur maximale de 91,38% pour 1,26 g.L⁻¹ (l'efficacité inhibitrice reste presque constante au-delà de 0.84g. 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 de masse.

III.3 Isotherme d'adsorption

Dans une solution agressive, l'action d'un inhibiteur est supposée être due à son adsorption à la surface du métal. Le processus d'adsorption est influencé par de nombreux facteurs tels que le métal (état de surface, nature chimique), le milieu (concentration et température), l'inhibiteur (concentration, structure moléculaire, solubilité, liaisons surface-inhibiteur-métal) [21].

Les quantités adsorbées à l'équilibre pour un système adsorbat-adsorbant sont généralement caractérisées par des isothermes d'adsorptions déterminés à une température donnée. Afin de trouver l'isotherme d'adsorption le plus adéquat à notre cas d'étude, différents types d'isothermes ont été testés à savoir : Langmuir, Temkin et Frumkin (Voir la **Figure III.6**).

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

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

- Le modèle d'isotherme d'adsorption de Langmuir suppose qu'il existe à la surface un nombre fixe de sites énergétiquement identique. 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 :

$$\frac{C^{inh}}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C^{inh} \quad (\text{III.8})$$

- Afin de tenir compte de la variation de l'enthalpie d'adsorption (ΔH_{ads}) avec (θ), l'isotherme de Tamkin suppose qu'elle décroît linéairement en fonction de (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 sous la forme suivante [11,13,15] :

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

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

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

Les Figures III.6a, III.6b et III.6c représentent les différents modèles d'isotherme d'adsorption de l'inhibiteur AD sur la surface de l'acier X42 à $T=25^\circ\text{C}$. Le choix d'un modèle adéquat dépend de la valeur du coefficient de corrélation (R^2).

La courbe C/θ en fonction de la concentration C de l'extrait AD est linéaire avec un meilleur coefficient de corrélation égale à 0.9944 ($R^2=0.9944$, Figure III.6a), ce qui montre que l'adsorption de l'inhibiteur à la surface de l'acier en milieu acide sulfurique H_2SO_4 0.5M obéit à l'isotherme d'adsorption de Langmuir.

La constante d'adsorption (constante d'équilibre) peut être calculée à partir de l'ordonnée à l'origine de la courbe linéaire C/θ , K est liée à l'énergie libre standard d'adsorption (ΔG_{ads}°) par la relation III.14 [23] :

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

Où :

- R est la constante des gaz parfait ($8.314 \text{ KJ.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$).
- 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 être donc calculée. Les valeurs de (ΔG_{ads}°) donnent des informations sur la spontanéité du processus d'adsorption, la stabilité de la couche adsorbée sur la surface métallique et le type d'adsorption (physique, chimie et mixte).

Généralement, 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 physique), alors que celles proches de -40 KJ.mol^{-1} ou supérieures impliquent un transfert de charge entre les molécules organiques et la surface métallique (adsorption chimique), si cette valeur est comprise entre -20 et -40 KJ.mol^{-1} , l'adsorption peut se faire via l'adsorption mixte [17, 18, 19].

Pour notre cas d'étude, la valeur de (ΔG_{ads}°) est égale à $-16,32 \text{ KJ.mol}^{-1}$, ΔG_{ads}° est négative et proche en valeur absolue à 20 KJ.mol^{-1} , ce qui indique que les molécules de l'inhibiteur *AD* s'adsorbent spontanément sur la surface de l'acier X42 par des interactions physiques (physisorption).

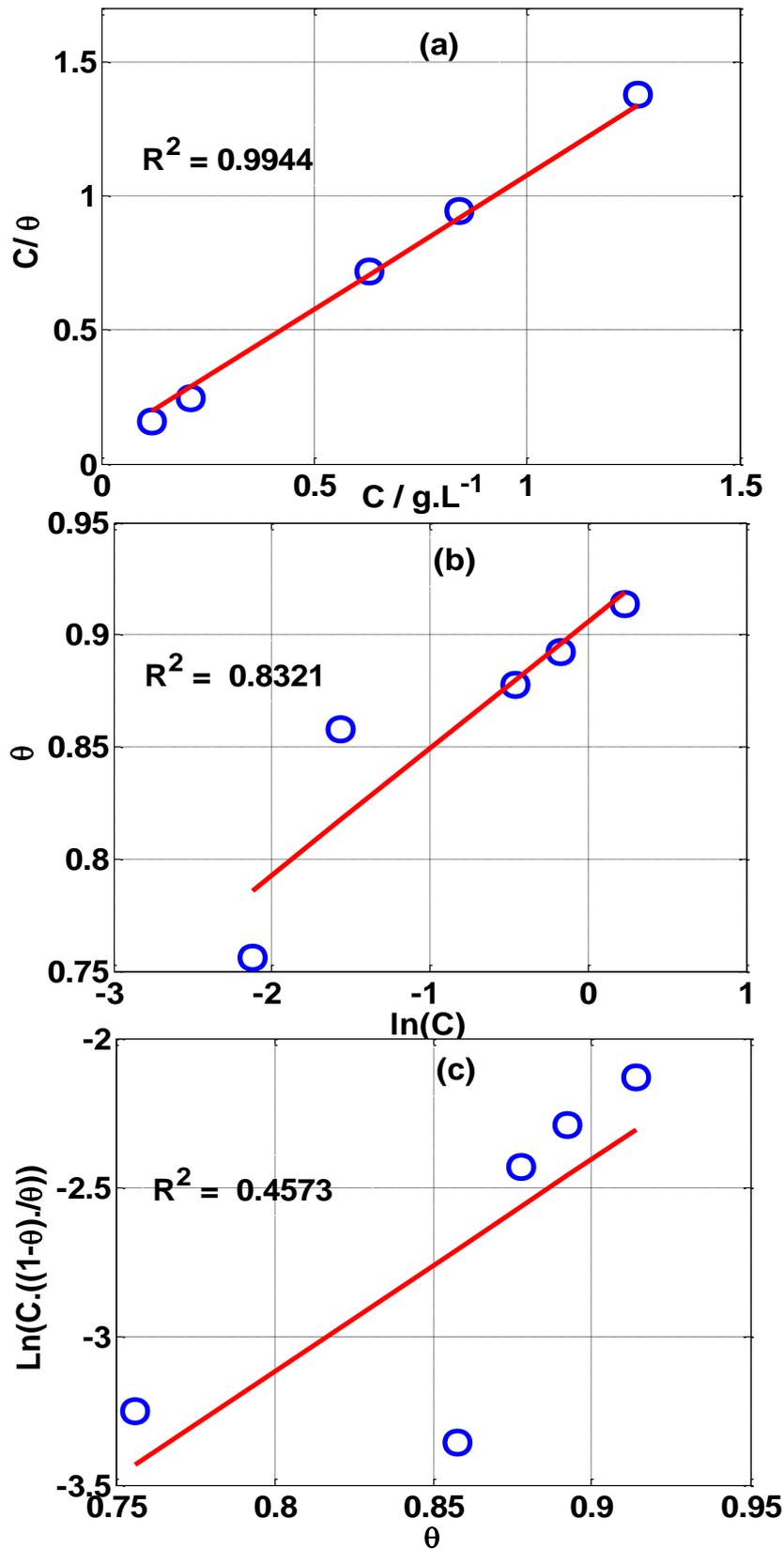


Figure III.6: Isothermes d'adsorption selon le modèle : (a) de Langmuir, (b) de Temkin et (c) de Frumkin de l'acier X42 dans H₂SO₄ 0,5M en présence de l'extrait (AD).

III.4 Effet de température

La température est l'un des facteurs susceptibles de modifier à la fois le comportement d'un acier dans un milieu corrosif et la nature de l'interaction métal/inhibiteur.

Afin d'évaluer l'influence de ce facteur sur le pouvoir inhibiteur de l'extrait *AD*, nous avons effectué des mesures électrochimiques (courbes de polarisation) sur l'acier avant et après l'addition de l'extrait *AD* de concentration 0.84 g/L en milieu H_2SO_4 0.5M dans un intervalle de température de 25°C à 50°C après 20 minutes de temps d'immersion (**Figure III.7a** et **III.7b**).

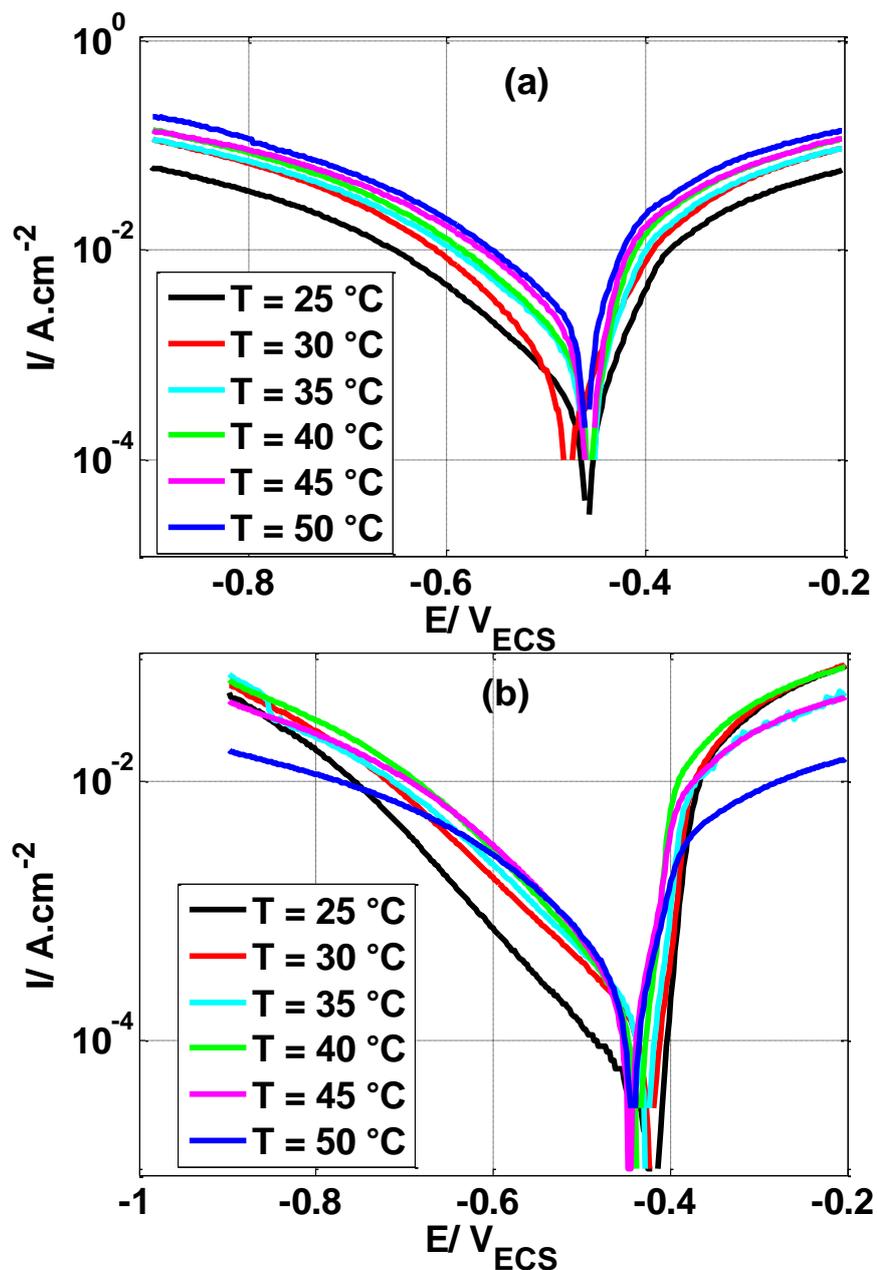


Figure.III. 7: Effet de la température sur les courbes de Tafel dans H_2SO_4 0,5 M (a) absence de l'extrait *AD* et (b) contenant 0,84 $g.L^{-1}$ de l'extrait (*AD*), $v_b=1 mV.s^{-1}$

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 X42 dans le milieu agressif H_2SO_4 0,5M sans et avec 0,84 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)	η (%)
25	Blanc	452,60	0,4310	-
	0,84	442,50	0,0520	87,81
30	Blanc	484,00	0,5409	-
	0,84	434,20	0,1214	77,60
35	Blanc	464,90	0,8580	-
	0,84	438,30	0,1700	83,68
40	Blanc	465,40	0,9164	-
	0,84	449,20	0,1781	80,56
45	Blanc	465,20	1,0678	-
	0,84	454,10	0,2020	81,08
50	Blanc	468,80	1,8821	-
	0,84	450,80	0,2237	88,11

D'après les résultats du **Tableau III.3**, on observe que l'augmentation de la température provoque un accroissement des valeurs de la densité du courant de corrosion (i_{corr}) que ce soit, pour la solution témoin (sans inhibiteur) ou celle avec inhibiteur AD ceci est en accord avec la loi d'Arrhenius (équation III.15).

Dans le milieu corrosif seul H_2SO_4 0,5M présente une croissance régulière et rapide, confirmant une dissolution métallique croissante avec l'augmentation de la température [28], mais l'augmentation du courant de corrosion avec la température est peu remarquée quand l'inhibiteur est présent dans la solution. Ainsi, l'efficacité inhibitrice (η) varie légèrement avec l'augmentation de la température, par conséquent, cet inhibiteur peut être juger efficace même à haute température.

Dans cette étude, la dépendance, de type Arrhenius observée entre la vitesse de corrosion et la température. La loi d'Arrhenius 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.

La **Figure III.8** illustre la variation du logarithme de la densité de courant de corrosion en fonction de l'inverse de la température absolue. Cette variation de $\ln i_{corr} = f(1/T)$ est linéaire de forme : $y = ax + b$.

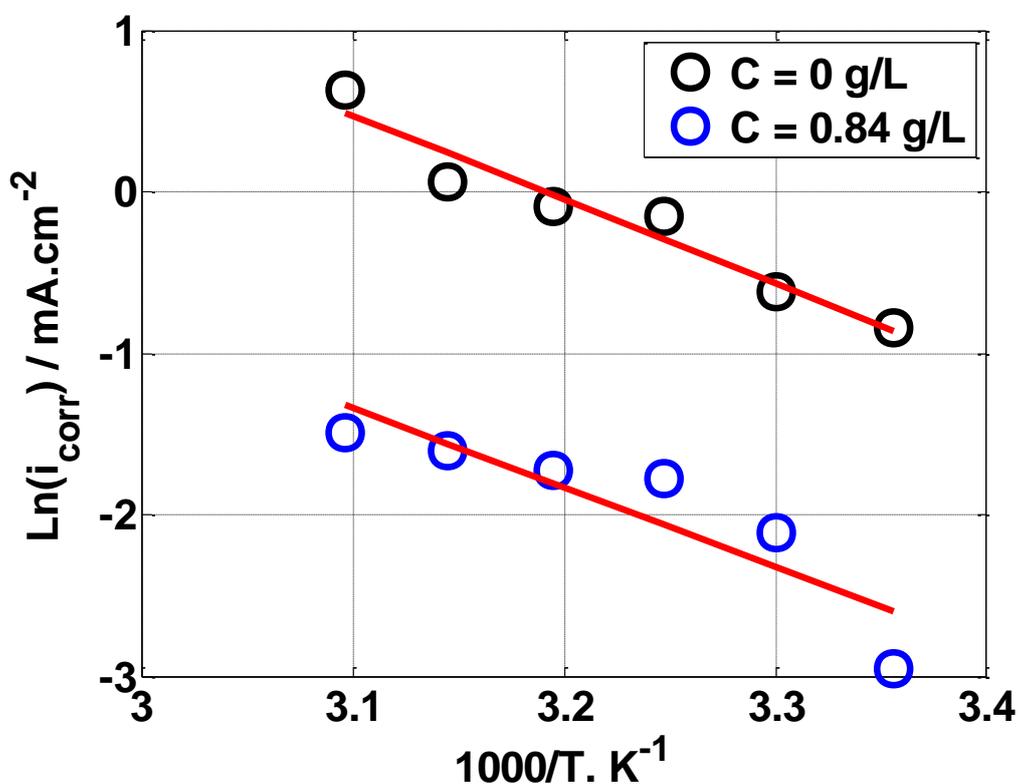


Figure III.8: Variation de $\ln(i_{corr})$ en fonction de $1/T$ dans H_2SO_4 0,5 M en absence et en présence de 0,84 g.L⁻¹ de l'extrait AD.

A partir des droites obtenues, nous pouvons calculer les énergies d'activation. La valeur de l'énergie d'activation est estimée à 28.69 KJ.mol⁻¹ pour la solution exempte d'inhibiteur et à 11.95 KJ.mol⁻¹ pour celle contenant 0.84 g.L⁻¹ en inhibiteur AD. La diminution de la valeur de l'énergie d'activation en présence de l'inhibiteur AD est typique à la chimisorption de cet inhibiteur sur la surface de l'acier X42 [10]. Nous constatons que les molécules organiques de l'inhibiteur AD s'adsorbent sur la surface métallique par des liaisons fortes (chimiques).

Putilova et al considèrent que l'augmentation du pouvoir protecteur avec l'augmentation de la température est due au changement de la nature de l'adsorption à des faibles températures, l'inhibiteur est adsorbé physiquement tandis que la chimisorption est favorisée à haute température [29, 30].

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 sur la surface de l'électrode).

En effet, la caractérisation DRX a été réalisée sur les électrodes d'acier X42 ayant immergé pendant 24h dans H₂SO₄ 0,5M) en absence et en présence de 0.84 g.L⁻¹ de l'inhibiteur AD et à la température ambiante (25 ± 1 °C), les diagrammes DRX sont présentés dans la **Figure III.9**.

D'après la **Figure III.9a**, le spectre de l'échantillon immergé dans la solution corrosive en absence de l'inhibiteur présente plusieurs pics associés aux fer métalliques distingués à 2θ = 44.70°, 65.39°, 82,50° et à 99.40° et aux oxydes de fer (produits de corrosion) (FeOOH à 2θ = 35°, Fe₂O₃ à 2θ= 35,70°, 36,60°, 40.60°, 42.40°, 43.80°), ce qui confirme que l'échantillon est attaqué par la solution corrosive H₂SO₄.

Par contre l'échantillon immergé dans la solution H₂SO₄ contenant 0.84 g.L⁻¹ de l'inhibiteur AD (**Figure III.9b**), présente seulement les pics caractéristique du fer à (2θ= 44.70°, 65°, 82,50° et 99.40°), c'est-à-dire que les pics d'oxydes de fer (produits de corrosion) ont été disparus. Ces résultats confirment l'effet efficace de l'inhibiteur AD sur la protection de l'acier X42 contre la corrosion dans le milieu corrosif par formation d'un film protecteur sur la surface de l'acier.

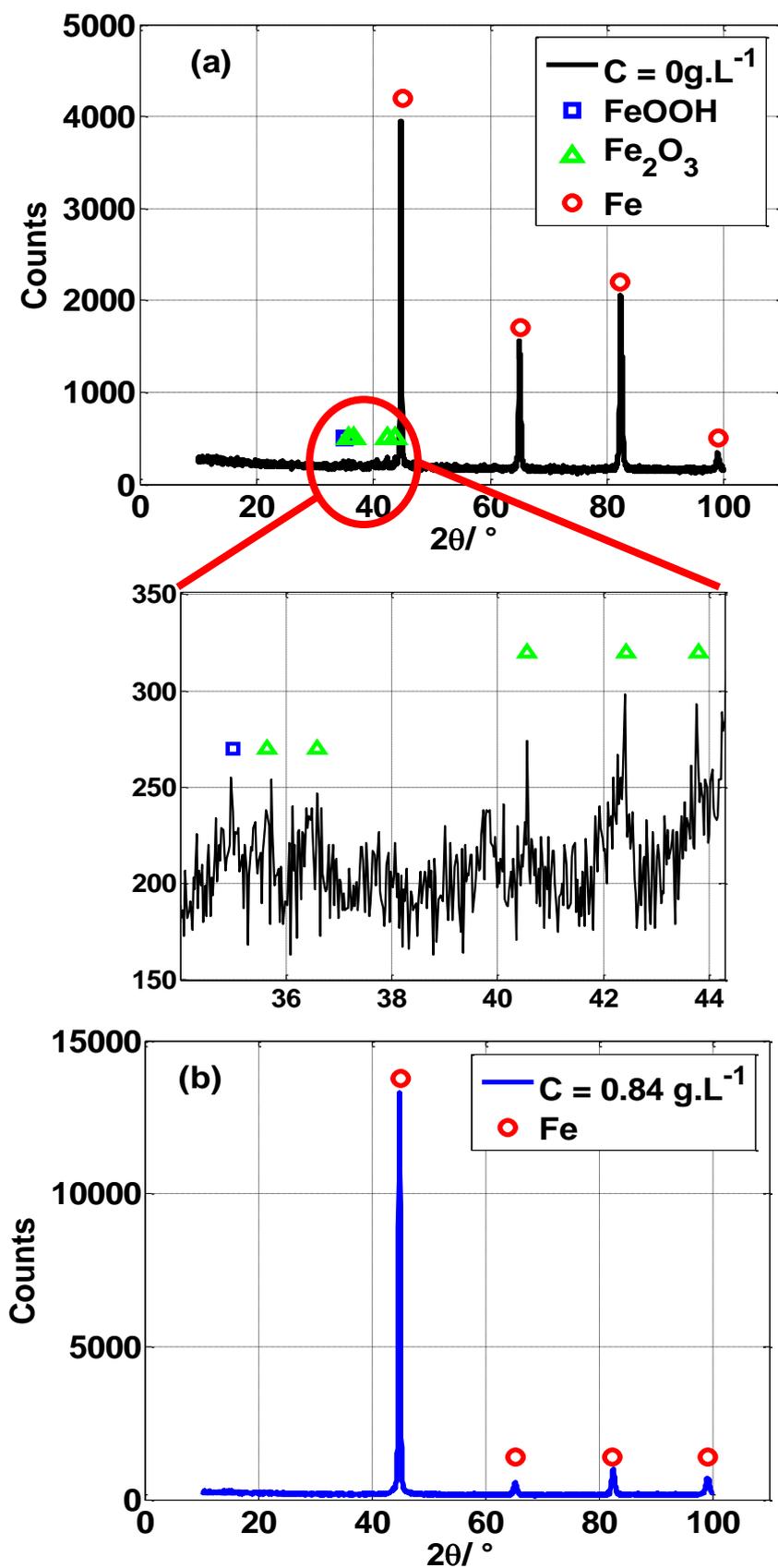


Figure III.9: Spectres DRX de l'acier X42 après 24h d'immersion (a) en absence de l'extrait (RD), (b) en présence de l'extrait (AD).

III.5.2 Angle de contact

Les mesures de l'angle de contact ont été réalisées sur les électrodes de l'acier X42 ayant immergé pendant 1h dans H_2SO_4 0,5 M en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur *AD* et à la température ambiante (25 ± 1 °C) (**Figure III.10**).

D'après la **Figure III.10**, Nous remarquons que l'addition de l'inhibiteur *AD* dans le milieu H_2SO_4 a fait augmenter l'angle de contact c'est-à-dire, l'angle de contact accroît avec l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur (la valeur de l'angle de contacte passe de 42° à 73° en absence et en présence de l'inhibiteur respectivement). Ce résultat indique que l'ajout de l'inhibiteur modifie la surface de l'acier et rendre la surface de l'électrode hydrophobe.

A partir de ces résultats, On peut conclure que le caractère hydrophobe du film organique formé sur la surface de l'acier X42 est à l'origine de la protection contre la corrosion [32].

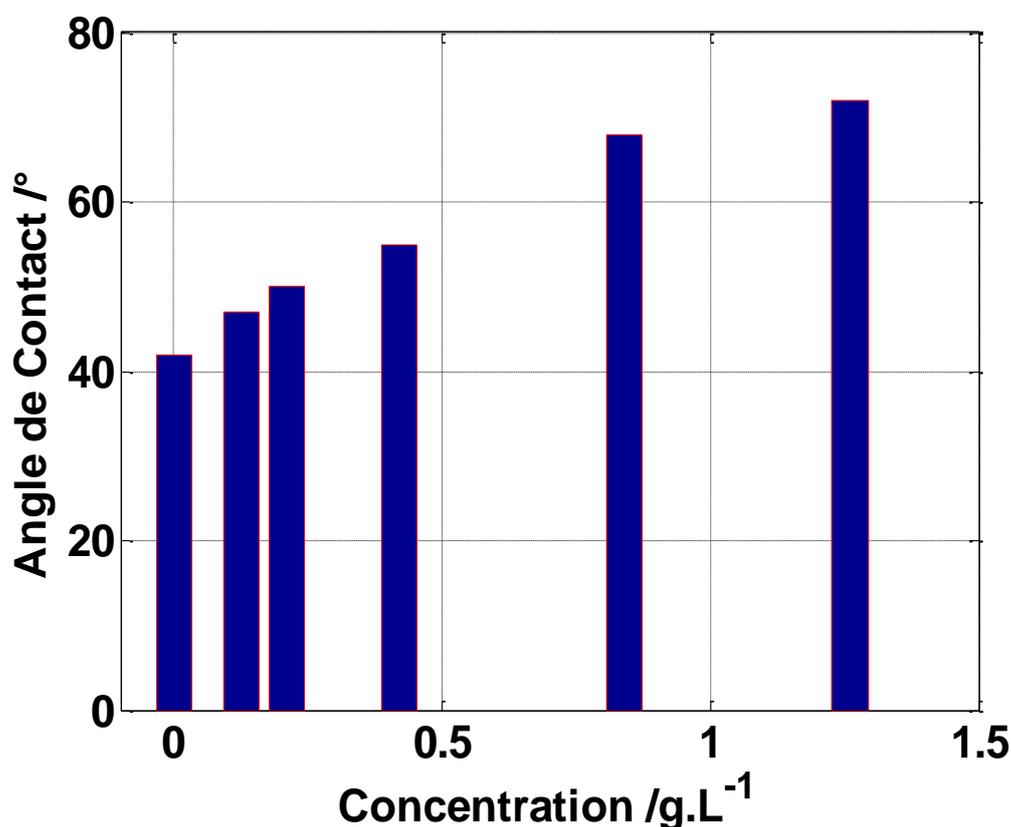


Figure III.10: Mesures de l'angle de contact dans H_2SO_4 0.5 M, après 1h du temps d'immersion en absence et en présence de différentes concentrations de l'extrait (*AD*).

Références bibliographiques

- [1] M. Lebrini, « Synthèses et études physicochimiques de nouveaux thiadiazoles inhibiteurs de corrosion de l'acier en milieu acide », Thèse de doctorat, Lille 1, 2005.
- [2] A. Oulabbas, « Effets des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers ordinaires dans deux milieux acides », Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar de Annaba, 2019.
- [3] 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 », *Construction and Building Materials*, vol. 245, p. 118464, 2020.
- [4] G. Bahlakeh, B. Ramezanzadeh, A. Dehghani, et M. Ramezanzadeh, « Novel cost-effective and high-performance green inhibitor based on aqueous Peganum harmala seed extract for mild steel corrosion in HCl solution: detailed experimental and electronic/atomic level computational explorations », *Journal of Molecular Liquids. Mol*, vol. 283, p. 174, 2019.
- [5] F. E. Hajjaji et al., « New imidazolium ionic liquids as ecofriendly corrosion inhibitors for mild steel in hydrochloric acid (1 M): Experimental and theoretical approach », *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 123, p. 346, 2021.
- [6] N. Anusuya, J. Saranya, P. Sounthari, A. Zarrouk, et S. Chitra, « Corrosion inhibition and adsorption behaviour of some bis-pyrimidine derivatives on mild steel in acidic medium », *Journal of Molecular Liquids*, vol. 225, p. 406, 2017.
- [7] A. Zaabar, R. Aitout, L. Makhloufi, K. Belhamel, et B. Saidani, « Inhibition of acid corrosion of mild steel by aqueous nettle extracts », *Pigment & resin technology*, vol. 43, n° 3, p. 127, 2014.
- [8] A. Zaabar et al., « Oat extract as a natural corrosion inhibitor for mild steel in 3% NaCl solution », *Surface Review and Letters*, vol. 28, n° 10, p. 2150084, oct. 2021.
- [9] M. Mehdipour, B. Ramezanzadeh, et S. Y. Arman, « Electrochemical noise investigation of Aloe plant extract as green inhibitor on the corrosion of stainless steel in 1 M H₂SO₄ », *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 21, p. 318, 2015.
- [10] A. Zaabar, « Electrodéposition, par voltampérométrie et cémentation, des métaux cuivre et zinc en présence d'extrait de la plante d'ortie (*Urtica dioica* L.) », Application de l'extrait à la corrosion, 2015.
- [11] C. M. Fernandes et al., « *Ircinia strobilina* crude extract as corrosion inhibitor for mild steel in acid medium », *Electrochimica Acta*, vol. 312, p. 137, 2019.

- [12] T. K. Chaitra, K. N. S. Mohana, et H. C. Tandon, « Thermodynamic, electrochemical and quantum chemical evaluation of some triazole Schiff bases as mild steel corrosion inhibitors in acid media », *Journal of Molecular Liquids*, vol. 211, p. 1026, 2015.
- [13] W. Li, Q. He, C. Pei, et B. Houa, « Experimental and theoretical investigation of the adsorption behaviour of new triazole derivatives as inhibitors for mild steel corrosion in acid media », *Electrochimica Acta*, vol. 52, n° 22, p. 6386, 2007.
- [14] S. S. de A. A. Pereira et al., « Inhibitory action of aqueous garlic peel extract on the corrosion of carbon steel in HCl solution », *Corrosion Science*, vol. 65, p. 360, 2012.
- [15] B. P. Markhali, R. Naderi, M. Mahdavian, M. Sayebani, et S. Y. Arman, « Electrochemical impedance spectroscopy and electrochemical noise measurements as tools to evaluate corrosion inhibition of azole compounds on stainless steel in acidic media », *Corrosion Science*, vol. 75, p. 269, 2013.
- [16] E. de Britto Policarpi et A. Spinelli, « Application of *Hymenaea stigonocarpa* fruit shell extract as eco-friendly corrosion inhibitor for steel in sulfuric acid », *Journal of the Taiwan institute of Chemical Engineers*, vol. 116, p. 215, 2020.
- [17] H. Ashassi-Sorkhabi et E. Asghari, « Effect of hydrodynamic conditions on the inhibition performance of l-methionine as a “green” inhibitor », *Electrochimica Acta*, vol. 54, n° 2, p. 162, 2008.
- [18] T. Rabizadeh et S. K. Asl, « Casein as a natural protein to inhibit the corrosion of mild steel in HCl solution », *Journal of Molecular Liquids*, vol. 276, p. 694, 2019.
- [19] G. J. Brug, A. L. van den Eeden, M. Sluyters-Rehbach, et J. H. Sluyters, « The analysis of electrode impedances complicated by the presence of a constant phase element », *Journal of electroanalytical chemistry and interfacial electrochemistry*, vol. 176, n° 1-2, p. 275, 1984.
- [20] M. D. D. Ayagou et al., « Electrochemical impedance spectroscopy of iron corrosion in H₂S solutions », *Electrochimica Acta*, vol. 282, p. 775, 2018.
- [21] L. Hamadi, « Application des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers en milieux agressifs », Thèse de doctorat, Université de Batna 2, 2020.
- [22] S. A. Xavier Stango et U. Vijayalakshmi, « Studies on corrosion inhibitory effect and adsorption behavior of waste materials on mild steel in acidic medium », *Journal of Asian Ceramic Societies*, vol. 6, n° 1, p. 20, 2018.
- [23] A. S. Fouda et A. S. Ellithy, « Inhibition effect of 4-phenylthiazole derivatives on corrosion of 304L stainless steel in HCl solution », *Corrosion Science*, vol. 51, n° 4, p. 868, 2009.
- [24] A. Dehghani, G. Bahlakeh, B. Ramezanzadeh, et M. Ramezanzadeh, « A combined experimental and theoretical study of green corrosion inhibition of mild steel in HCl solution

by aqueous *Citrullus lanatus* fruit (CLF) extract », *Journal of Molecular Liquids*, vol. 279, p. 603, 2019.

[25] 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 », *Journal of Bio- and Tribo-Corros.*, vol. 7, n° 3, p. 121, 2021.

[26] C. Wang, C. Zou, et Y. Cao, « Electrochemical and isothermal adsorption studies on corrosion inhibition performance of β -cyclodextrin grafted polyacrylamide for X80 steel in oil and gas production », *Journal of Molecular Structure*, vol. 1228, p. 129737, 2021.

[27] P. Bommersbach, C. Alemany-Dumont, J.-P. Millet, et B. Normand, « Formation and behaviour study of an environment-friendly corrosion inhibitor by electrochemical methods », *Electrochimica Acta*, vol. 51, n° 6, p. 1076, 2005.

[28] H. Hamani, « Synthèse, caractérisation et étude du pouvoir inhibiteur de nouvelles molécules bases de Schiff », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas de Setif, 2015.

[29] M. Faustin, « Étude 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, Antilles-Guyane, 2013.

[30] K. C. R. Ferreira et al., « Corrosion inhibition of carbon steel in HCl solution by aqueous brown onion peel extract », *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 11, n° 1, p. 406, 2016.

[31] A. Dehghani, G. Bahlakeh, B. Ramezanzadeh, et M. Ramezanzadeh, « Applying detailed molecular/atomic level simulation studies and electrochemical explorations of the green inhibiting molecules adsorption at the interface of the acid solution-steel substrate », *Journal of Molecular Liquids*, vol. 299, p. 112220, 2020.

[32] M. Yeganeh, I. Khosravi-Bigdeli, M. Eskandari, et S. R. Alavi Zaree, « Corrosion inhibition of L-methionine amino acid as a green corrosion inhibitor for stainless steel in the H_2SO_4 solution », *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 29, p. 3983, 2020.

Conclusion générale

Le présent travail a été consacré à l'étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier API 5L X42 dans le milieu acide sulfurique à 0,5M par l'extrait de plante *Arundo Donax* (AD) biodégradable et respectueux de l'environnement.

La démarche suivie pour étudier les propriétés inhibitrices de l'extrait AD est basée sur l'utilisation de plusieurs méthodes telles que: l'étude gravimétrique, les techniques électrochimiques (chronopotentiométrie, voltampérométrie, spectroscopie d'impédance électrochimique). Cette étude a été complétée par des techniques d'analyse de surface à savoir l'angle de contact et la diffraction des rayons X.

Les principaux résultats que nous avons obtenus de cette étude peuvent être résumés comme suit:

- L'étude gravimétrique montre que l'ajout de l'inhibiteur (AD) provoque une nette diminution de la vitesse de corrosion et présente une meilleure efficacité inhibitrice de 94% au-delà de 0.84 g/L.
- L'étude potentiodynamique (courbes de polarisation) a montré que la présence de l'extrait (AD) dans le milieu H_2SO_4 affecte les courants cathodiques et anodiques et fait varier le potentiel anodiquement. Ce résultat nous laisse penser que l'extrait de la plante AD suit un mécanisme d'action mixte à tendance anodique.
- Les mesures par l'impédance électrochimique montrent que l'addition de l'inhibiteur AD 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.
- Les tracés des isothermes d'adsorption (Langmuir, Temkin et Frumkin) ont montré que l'adsorption de l'extrait AD obéit à l'isotherme de Langmuir. La valeur négative de ΔG_{ads}° indique la spontanéité du processus d'adsorption et la stabilité de la couche adsorbée sur la surface métallique.
- L'étude de l'effet de la température sur l'évolution de l'efficacité inhibitrice de l'extrait AD a été faite dans l'intervalle 25 à 50°C montre que le pouvoir inhibiteur de cet extrait varie légèrement avec l'accroissement de la température.
- La diminution de la valeur de l'énergie d'activation en présence de l'inhibiteur AD est typique à la chimisorption de cet inhibiteur sur la surface de l'acier X42.
- Les résultats de la caractérisation de surface par la diffraction des rayons X ont montré qu'aucun produit de corrosion n'a été formé sur la surface de l'acier X42 en présence de l'inhibiteur AD.

○ L'angle de contact augmente avec l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur *AD*. Ceci confirme la formation d'un film hydrophobe protège l'acier X42 contre la corrosion.

Les résultats de cette étude sont encourageants et nous pouvons envisager quelques perspectives pour la poursuite de ce travail:

○ Il serait plus judicieux d'étudier l'influence des conditions hydrodynamiques, dans les mêmes conditions opératoires, sur l'efficacité de l'inhibiteur *AD*.

○ Il serait très utile d'étudier la synergie entre les molécules de l'inhibiteur *AD* 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) et la microscopie électronique à balayage (MEB) couplée à l'EDX.

○ Il serait donc intéressant de compléter cette étude par d'autres méthodes électrochimiques non-invasives telles que le bruit électrochimique.

Résumé

Le développement d'inhibiteurs de corrosion verts a pris une importance considérable ces dernières années en raison de leur impact minimal sur l'environnement et de leur nature durable. L'objectif de cette étude est de tester l'efficacité inhibitrice de l'extrait de la *Canne de Provence* (*Arundo Donax* (AD)) en tant qu'inhibiteur de corrosion de l'acier X42 dans le milieu acide sulfurique 0,5 M. L'efficacité inhibitrice de (AD) a été étudiée en utilisant plusieurs méthodes à savoir : la gravimétrie, les méthodes électrochimiques et d'analyse de surface.

Les résultats obtenus montrent que l'extrait (AD) inhibe efficacement la corrosion de l'acier X42 dans la solution corrosive et son efficacité est proportionnelle à sa concentration. Cet inhibiteur présente un caractère d'inhibition mixte et suit l'isotherme d'adsorption de Langmuir. Les interactions à l'interface acier/extrait (AD) est typique à la chimisorption. Les résultats de la caractérisation de la surface de l'acier confirment la formation d'un film hydrophobe sur la surface de l'acier X42.

Mots-clés: Corrosion, inhibiteur AD, milieu acide sulfurique, méthodes électrochimiques, techniques d'analyse de surface, acier X42.

الملخص

كشفت العديد من الدراسات أن المثبطات الطبيعية وغير السامة مهمة مرة أخرى بسبب مصادرها الصديقة للبيئة. الهدف من هذه الدراسة هو اختبار فعالية مستخلص القصب الذي يعرف بالاسم العلمي أرونودونالكس كمثبط لتآكل الفولاذ X42 في وسط حمض الكبريتيك 0,5 M. تمت دراسة الفعالية المثبطة للقصب من خلال عدة تقنيات.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن مستخلص القصب يمنع بشكل فعال تآكل الفولاذ X42 في الوسط الحمضي وأن كفاءته تتناسب مع تركيزه. يتميز هذا المثبط بخاصية تثبيط مختلطة و يتبع ارتباط لنجموير. تعتبر التفاعلات في واجهة استخراج الفولاذ X42 نموذجية للامتصاص الكيميائي. تؤكد نتائج التحليل السطحي للفولاذ تشكيل طبقة واقية على سطح الفولاذ X42 قادرة على حمايته من التآكل.

الكلمات المفتاحية

التآكل، مثبط AD ، البيئة الحمضية، التقنيات الكهروكيميائية ، طرق التحليل السطحي، الفولاذ X42.