

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 de Valorisation Energétique

Mémoire EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE Master

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

Présenté par

AGRI Sabrina & MEKHNACHE Kenza

Thème

Utilisation d'extrait de plante comme inhibiteur vert de corrosion de l'acier en milieu
acide HCl à 0,5M

Soutenue le 26/06/2023

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
Mme AOUDIA Kahina	MCA	Université de Bejaia	Président
Mme TIGHIDET Hassiba	MCB	Université de Bejaia	Examineur
Mme BRINIS Naima	MCA	Université de Bejaia	Encadrant
Mme BENDELLALI Thanina	Doctorante	Université de Bejaia	Co- Encadrant

Année Universitaire : 2022/2023

Remerciements

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

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promotrice Mme BRINIS Naima, Maître de Conférences à l'Université de Bejaïa, pour le temps qu'elle nous a consacré pour le déroulement de ce mémoire, sa patience, sa disponibilité, ses conseils précieux, sa compétence qu'elle nous a transmis mais aussi pour sa bonne humeur et sa modestie.

Nous voulons également remercier notre Co-encadreur Mlle BENDELLALI Thanina, doctorante au laboratoire LECVE à l'Université A. Mira de Bejaia, de nous avoir permis d'approfondir nos connaissances avec ses remarques, ses précieux conseils et ses encouragements.

Nos vifs remerciements vont à Mme AOUDIA Kahina, Maître de Conférences à l'Université de Bejaïa, d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire. Elle nous a fait l'honneur de nous aider tout au long de ce mémoire, on la remercie aussi pour l'intérêt qu'elle a manifesté à notre travail.

Nous exprimons également notre reconnaissance à Mme TIGHIDET Hassiba, Maître de Conférences à l'Université A. Mira de Bejaia, pour avoir accepté d'examiner notre travail.

On tient aussi à remercier toute l'équipe de laboratoire d'Electrochimie, Corrosion et Valorisation Énergétique (LECVE) et un grand merci pour Mme HIBER Laldja, Technicienne du laboratoire pour sa disponibilité.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenus et encouragés au cours de la réalisation de ce travail.

Espérons bien que ce modeste effort concrétisé dans le contenu de ce mémoire sera utile pour toutes personnes et pour toutes recherches.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mon cher frère que dieu l'accueille dans son vaste paradis. Il était toujours à mes côtés et à me soutenir et m'encourager après chaque échec.

A la femme généreuse et vaillante qui a trop souffert sans me laisser souffrir, qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureux, ma mère SAADIA.

A L'homme exceptionnel que je respect trop. Grâce à toi, j'ai toujours eu tout ce dont j'avais besoin, tu as été et tu seras toujours un exemple pour moi par tes qualités humaines, ta persévérance, et de ton perfectionnisme et de tes sacrifices.

A la femme extraordinaire, mon pilier indestructible, ma très chère tante qui était toujours à mes côtés depuis ma naissances, ALDJA.

A mes tés chers sœurs ZAHIDA, DJAZIRA, NADJAT, HASSIBA, DAHBIA et FATHMA.

A mon cher frère KARIM et sa petite famille

A mes très chers amis, Céline, Melly, Himou, Maliza ,Dila ,Joujou ,Imane ,Chahinez ,Ahmed ,Mourad ,Bilal ,Kiki et Hillal pour les moments inoubliables qu'on a vécus ensembles.

A mon binôme Kenza et toute sa famille.

Sabrina

Dédicace

Je dédie ce mémoire

*A mes chers parents à qui je ne trouve pas de mots
pour les remercier,*

Je n'oublierais jamais ce que vous faites pour moi

A mon frère faouze, sa Lamia et ma petite Nayla

A mes frère : Amazigh, Syfax

*A mes sœurs : Naïma, Souad, ainsi que leurs maris et
enfants.*

*A mes amies : Nadjet, Melissa, Joujou, Imene,
chahou, Katia, Noura*

Kenza

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....1

Chapitre I : Etude Bibliographique

I.1. Généralités sur la corrosion.....4

I.1.1. Définition de la corrosion.....4

I.1.2. Classification de la corrosion.....4

I.1.2.1. Corrosion chimique.....5

I.1.2.2. Corrosion électrochimique.....5

I.1.2.3. Corrosion biochimique ou bactérienne.....6

I.1.3. Facteurs de corrosion.....6

I.1.4. Aspect morphologie de la corrosion.....7

I.1.4.1. Corrosion uniforme (généralisée).....7

I.1.4.2. Corrosion localisée.....7

a) Corrosion galvanique.....8

b) Corrosion par pique.....8

c) Corrosion intergranulaire.....9

d) Corrosion par érosion.....9

e) Corrosion sous contrainte.....10

f) Corrosion caverneuse.....10

I.2. L'acier.....	11
I.2.1. Définition d'un acier.....	11
I.2.2. Différents types d'aciers.....	11
I.2.3. Fabrication de l'acier.....	12
I.2.4. Composition d'aciers.....	12
I.3. Diagramme de Pourbaix.....	13
I.4. Inhibiteurs de la corrosion.....	15
I.4.1. Définition.....	15
I.4.2. Propriétés.....	15
I.4.3. Classification.....	16
a) Classement selon la nature de l'inhibiteur.....	16
b) Classement selon les mécanismes d'action électrochimique.....	17
c) Classement selon l'action interfaciale.....	18
I.4.4. Domaines d'application.....	19
I.4.5. Utilisations industrielles des inhibiteurs.....	19
I.4.6. Mode d'action des inhibiteurs de corrosion.....	20
I.5. Inhibiteurs verts.....	21
I.5.1. Généralités.....	21
I.5.2. Types d'adsorption des extraits de plantes en milieu acide.....	28
I.5.3. Paronyque Argentée	29
a) Description botanique.....	29
b) Systématique.....	30
c) Composition chimique.....	30
d) Propriétés thérapeutiques.....	31
Références bibliographiques.....	32

Chapitre II : Conditions expérimentales et techniques d'étude

II.1. Introduction.....	36
II.2. Conditions expérimentales.....	36
II.2.1. Cellule électrochimique.....	36
II.2.2. Electrodes.....	37
II.2.3. Electrolytes.....	38
II.3. Dispositifs électrochimiques utilisés.....	41
II.4. Techniques d'études	42
II.4.1. La gravimétrie	42
II.4.2 : Techniques électrochimiques.....	43
II.4.2.1. Méthodes stationnaires.....	43
II.4.2.1.1. Suivi du potentiel en circuit ouvert (PCO)..... ;;	43
II.4.2.1.2. Courbes de polarisation (Tafel).....	44
II.4.2.2. Méthodes non stationnaires.....	46
II.4.2.2.1. La Spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE).....	46
Références bibliographiques.....	50

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1. Introduction.....	51
III.2. Etude gravimétrique.....	51
III.3. Etude électrochimique.....	54
III.3.1. Suivi du potentiel de corrosion en fonction de temps.....	54
III.3.2. Courbes de polarisation.....	55
III.3.3. Isotherme d'adsorption.....	60

III.3.4. Spectroscopie d'impédance électrochimique.....	63
III.4. Conclusion.....	68
Références bibliographiques.....	69
Conclusion générale.....	71

Liste des abréviations

PA : Paronychia argentea.

%Vol/Vol : pourcentage volumique.

ET : électrode de travail.

CE : contre électrode.

ER : électrode de référence.

ECS : électrode au calomel saturé en KCl.

E_{ocp} : potentiel en circuit ouvert (V/ECS).

R_p : résistance de polarisation (ohm).

n : nombre d'électrons mis en jeu.

A : surface de l'électrode (cm²).

M : masse molaire du métal (g/mol).

ρ : masse spécifique du métal (g/cm³).

F : constante de Faraday (C/mol).

i_{corr} : densité de courant de corrosion (mA/cm²).

E_{corr} : potentiel de corrosion (V/ECS).

β_c , β_a : pentes de Tafel cathodique et anodique (V/dec).

V_{corr} : vitesse de corrosion (mm/an).

R_e : résistance de l'électrolyte (ohm).

R_{tc} : résistance de transfert de charge (ohm).

C_{dl} : capacité de double couche (μF).

F_{max} : fréquence pour laquelle la partie imaginaire de l'impédance est maximale (Hz).

EI : efficacité inhibitrice de la corrosion (%).

θ : taux de recouvrement.

R^2 : coefficient de corrélation.

K_{ads} : constante d'équilibre du processus d'adsorption (mol^{-1}).

α : constante d'interaction entre particules adsorbées.

ΔG_{ads}° : énergie libre standard d'adsorption (KJ/mol).

ΔE : amplitude.

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Photos de matériaux soumis aux phénomènes de corrosion.....	4
Figure I.2 : Exemple de corrosion chimique.....	5
Figure I.3 : Exemple de corrosion électrochimique de fer.....	5
Figure I.4 : Exemple corrosion bactérienne.....	6
Figure I.5 : Corrosion uniforme ou généralisée.....	7
Figure I.6 : Corrosion galvanique qui résulte d'un assemblage de deux métaux différents.....	8
Figure I.7 : Piqures de corrosion.....	9
Figure I.8 : Corrosion au niveau des joints de grains d'une structure métallique.....	9
Figure I.9 : Etapes de développement du phénomène de corrosion érosion.....	10
Figure I.10 : Schéma de corrosion sous contrainte.....	10
Figure I.11 : Corrosion caverneuse.....	11
Figure I.12 : Aciers.....	11
Figure I.13 : Diagramme de phase fer-cémentite, permettant de visualiser les conditions d'existence des formes d'acier.....	13
Figure I.14 : Courbe d'équilibre E-pH de fer-eau à 25°C.....	14
Figure I.15 : Exemple de l'état de surface d'un métal en absence et en présence d'un inhibiteur de corrosion.....	15
Figure I.16 : Classement des inhibiteurs de corrosion.....	16
Figure I.17 : Schéma d'adsorption d'un inhibiteur organique sur la surface métallique.....	17
Figure I.18 : Exemple de mécanisme d'inhibition cathodique, anodique et mixte.....	18
Figure I.19 : Paronychia Argentea.....	29
Figure I.20 : Fleurs, feuilles et tige de la Paronychia argentea.....	30

Figure I.21 : Structure de la gypsogénine.....	31
---	-----------

Chapitre II

Figure II. 1 : Cellule électrochimique.....	36
Figure II. 2 : Electrode de travail en acier sous forme de plaque.....	37
Figure II.3 : Contre électrode (CE).....	37
Figure II. 4 : Electrode de référence (ER).....	38
Figure II. 5 : Schéma représentatif les étapes de préparation de broyat.....	39
Figure II. 6 : Infusion dans un ballon et filtration sous vide des extraits de plante.....	40
Figure II. 7 : Filtrat.....	40
Figure II.8 : Représentation de l'appareillage électronique PGP201 Potentiostat / Galvanostat.....	41
Figure II.9 : Représentation de l'appareillage électronique AUTOLAB.....	41
Figure II. 10 : Méthode gravimétrique.....	42
Figure II.11 : Les différentes allures des courbes OCP.....	44
Figure II. 12 : Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel.....	45
Figure II. 13 : Schéma de principe de l'impédance électrochimique.....	47
Figure II.14 : Représentation de l'impédance électrochimique : diagramme de Nyquist (a) et diagramme de Bode (b).....	49

Chapitre III

Figure III.1 : Variation de la perte de masse après presque 5 jours d'immersion dans le milieu HCl 0,5M en fonction du pourcentage volumique de l'extrait des fleurs de PA.....	52
Figure III.2 :(a) Evolution de la vitesse de corrosion et (b) de l'efficacité inhibitrice après presque 4 jours d'immersion dans le milieu HCl 0,5M en fonction du pourcentage volumique de l'extrait des fleurs de PA.....	53
Figure III.3 : Evolution du potentiel d'abandon des plaques d'acier en fonction de temps dans le milieu HCl 0,5M à différents pourcentages volumiques en inhibiteur PA.....	54

Figure III.4 : Courbes de polarisation anodique et cathodique de l'acier dans milieu HCl 0,5M à différents pourcentage volumique en extrait des fleurs de PA.....	56
Figure III.5 : Courbes de polarisation anodique et cathodique de l'acier dans milieu HCl 0,5M à différents pourcentage volumique en extrait des tiges de PA.....	56
Figure III.6 : Courbes de Tafel relatives à l'acier dans le milieu HCl 0,5 M à différents pourcentages volumique en extrait de PA : (a) des fleurs et (b) des tiges.....	57
Figure III.7 : Evolution de l'efficacité d'inhibition par les deux extraits (des fleurs et des tiges) de PA en fonction de leur pourcentage volumique dans le milieu corrosif HCl 0,5M...	59
Figure III.8 : Isothermes d'adsorption de l'extrait des fleurs de la plante PA sur l'acier dans la solution HCl 0,5M selon le modèle de : (a) Langmuir, (b) Temkin et (c) Frumkin.....	61
Figure III.9 : Isothermes d'adsorption de l'extrait des tiges de la plante PA sur l'acier dans la solution HCl 0,5M selon le modèle de : (a) Langmuir, (b) Temkin et (c) Frumkin.....	62
Figure III.10 : Diagramme d'impédance de Nyquist de l'acier dans HCl 0.5M en absence et en présence des deux extraits de la plante PA.....	64
Figure III.11 : Evolution de la résistance de transfert de charge et de la capacité de double couche en fonction de % volumique des deux extraits de PA.....	67
Figure III.12 : Evolution de l'efficacité d'inhibition par l'extrait des fleurs et des tiges de PA en fonction du pourcentage volumique.....	67

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau.I.1 : Principaux facteurs de corrosion.....	6
Tableau.I.2 : Effet inhibiteur de quelque plantes dans 3 différents milieux acides.....	28
Tableau.I.3 : Effet inhibiteur des différentes huiles essentielles dans le milieu HCl.....	27
Tableau.I.4 : Effet inhibiteur des différents extraits dans différents milieux acides.....	28

Chapitre III

Tableau.III.1 : Paramètres de corrosion de l'acier dans le milieu HCl 0,5 M contenant les différents pourcentages volumiques des extraits de plante PA : extrait des fleurs et extrait des tiges, calculé par la méthode d'extrapolation de Tafel.....	58
Tableau.III.2 : Valeurs calculées de k_{ads} et de ΔG°_{ads} pour les trois isothermes.....	63
Tableau.III.3 : Paramètres électrochimiques de la corrosion de l'acier déduits des mesures d'impédances électrochimiques dans le milieu agressif HCl 0.5M contenant les différents pourcentages volumiques en extraits de PA.....	66

Introduction générale

La corrosion est un problème crucial et universel qui affecte fortement l'environnement naturel et industriel. Elle résulte d'une action chimique ou électrochimique d'un environnement sur les métaux et les alliages. En général, les dommages causés peuvent être atténués, voire évités, par l'utilisation d'un matériau plus résistant [1]. Cependant, cela s'accompagne généralement de coûts supplémentaires.

La prévention et la protection contre la corrosion sont des aspects essentiels du contrôle et de préservation des métaux et des alliages. Il existe de nombreuses façons de protéger ou de réduire la dégradation des métaux et des alliages, notamment en modifiant leur composition, leurs propriétés de surface et en les protégeant de l'environnement corrosif [2]. En raison des coûts élevés et des problèmes associés aux matériaux résistants à la corrosion, l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion est une alternative réaliste et rentable qui peut être conçue.

L'utilisation des inhibiteurs de corrosion inorganiques, en particulier ceux qui contiennent du phosphate, du chromate et d'autres métaux lourds, est limitée par diverses réglementations environnementales en raison de leur toxicité et des difficultés d'élimination [3]. De nombreux chercheurs ont activement fait état de l'utilisation de plantes naturelles pour développer des inhibiteurs de corrosion écologiques et respectueux de l'environnement pour remplacer les inhibiteurs inorganiques et organiques synthétiques [4,5].

Les produits naturels extraits de sources végétales, ainsi que certains composés organiques non toxiques, qui contiennent des fonctions polaires avec l'azote, l'oxygène et le soufre dans les systèmes conjugués de leurs molécules ont été utilisés efficacement comme inhibiteurs dans de nombreux systèmes de corrosion [6,7]. Ils sont considérés comme une riche source de composés chimiques synthétisés naturellement qui peuvent être extraits par des procédures simples et à faible coût [8]. Ces extraits contiennent différents composés organiques hydroxy.

L'objectif de notre travail est d'évaluer l'effet inhibiteur des extraits de la partie aérienne de la plante *Paronychia argentea* (PA) sur la corrosion de l'acier en milieu acide HCl à 0,5M. Cette plante, appartenant à la famille des Caryophyllacées, présente de nombreuses propriétés médicinales, vantées depuis l'antiquité. De nos jours, elle entre dans la composition d'un grand nombre de médicaments et fait toujours l'objet de recherche [9].

Le travail que nous présentons dans ce manuscrit est constitué d'une introduction générale, de trois chapitres et d'une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus.

Le premier chapitre consiste en une étude bibliographique dans laquelle nous avons présenté des généralités sur la corrosion et sa protection, et sur l'utilisation d'inhibiteurs en général et d'inhibiteurs verts en particulier.

Le deuxième chapitre présente la mise en place du montage d'extraction et la description des méthodes et conditions expérimentales mises en œuvre au cours de l'étude des tests d'inhibition (gravimétrie, voltampérométrie et impédance électrochimique).

Les résultats expérimentaux sont regroupés dans le troisième chapitre, dans lequel, nous avons mis en évidence l'efficacité des deux extraits de la plante testé sur l'acier : extrait des fleurs et extrait des tiges séparément.

Références bibliographiques

- [1] **J. R. Davis**, «Corrosion control by materials selection», (2000).
- [2] **V. S. Sastri., E. Ghali and M. Elboujdaini**, «Corrosion Prevention and Protection Practical Solutions», John Wiley & Sons. Publishers, Ottawa (2007).
- [3] **Roy. P, Karfa. P, Adhikari. U, and Sukul. D**, «Corrosion inhibition of mild steel in acidic medium by polyacrylamide grafted Guar gum with various grafting percentage: effect of intramolecular synergism», Corrosion Science, vol.88, pp. 246– 253 (2014).
- [4] **P. B. Raja, Mathur Gopalakrishnan Sethuraman**, «Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media-A review», Materials 62 (2008):113-116.
- [5] **A. Zaabar, R. Aitout, D. Amoura, R. Maizia, D. Ait Abdesselam, L. Makhloufi and B. Saidani**, «OAT extract as a natural corrosion inhibitor for mild steel in 3% NaCl solution», Surface Review and Letters, Vol. 28, No. 10, 2150084 (2021).
- [6] **C. Verma, E. E. Ebenso, I. Bahadur and M. A. Quraish**, «An overview on plant extracts as environmental sustainable and green corrosion inhibitors for metals and alloys in aggressive corrosive media», Journal of Molecular Liquids, 266, 577 (2018).
- [7] **G. Sigirck, T. Tüken and M. Erbil**, «Assessment of the inhibition efficiency of 3, 4-diaminobenzonitrile against the corrosion of steel», Corrosion Science 102, 437(2016).
- [8] **K. Pandian, S. Vivekananthan, D. J. Thiruvadigal and S. Sagadevan**, « Natural Green Inhibitors-Versatile also for Corrosion Inhibition of Steel Structures», Innovations in Corrosion and Materials Science 7, 144 (2017).
- [9] **F. Draghi**, «L'ortie dioïque (Urtica dioica L) : Etude bibliographique», Thèse de Doctorat, Université de Nancy I (2005).

Chapitre I

Etude Bibliographique

I.1. Généralités sur la corrosion

I.1.1. Définition de la corrosion

Le terme corrosion provient du latin **corroder** qui signifie ronger, attaquer. La corrosion affecte tous les métaux. Elle résulte d'interactions physico-chimiques entre le matériau et son environnement entraînant des modifications de propriétés du métal souvent accompagnées d'une dégradation fonctionnelle de ce dernier (altération de ses propriétés mécanique, électroniques, optique, esthétiques, etc....). Evans puis Wagner et Traud sont les premiers à avoir défini la corrosion [1], ils ont défini la corrosion comme un processus électrochimique qui détériore le métal en réagissant avec l'environnement. Le processus de corrosion dégrade le fer à l'intérieur de l'acier, entraînant la perte de ses principales caractéristiques telles que la dureté ou la résistance.

L'**oxyde ferrique** ou la **rouille** consomme le métal. C'est le sous-produit le plus courant de la corrosion. (Voir la figure I.1).

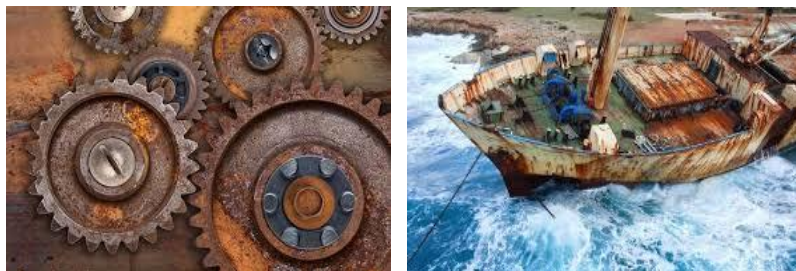


Figure I.1 : Photos de matériaux soumis aux phénomènes de corrosion

I.1.2. Classification de la corrosion

La corrosion d'un métal ou d'un alliage peut se développer selon différents processus qui caractérisent chacun un type de corrosion, on peut distinguer trois types de corrosion :

- Corrosion chimique
- Corrosion électrochimique
- Corrosion biochimique (bactérienne)

I.1.2.1. Corrosion chimique

Ce type de corrosion ne fait pas intervenir un passage de courant. Elle se produit en absence d'électrolytes et le plus souvent à température élevée, sans échange d'électrons entre un métal et un oxydant [2].



Figure I.2 : Exemple de corrosion chimique

I.1.2.2. Corrosion électrochimique

La corrosion électrochimique se manifeste lorsque le réactif est un liquide ou lorsqu'il existe une hétérogénéité soit dans le métal ou dans le réactif lui-même, présentant une dissymétrie de composition. L'existence de ces hétérogénéités détermine la formation d'une pile, alors un courant électrique circule entre l'**anode** et la **cathode** dans le réactif [3]. Les zones qui constituent les anodes sont attaquées (corrodées) tandis que les zones cathodiques sont le siège d'une ou plusieurs réactions de réduction. C'est le phénomène de corrosion le plus fréquent et le plus dangereux pour les métaux.

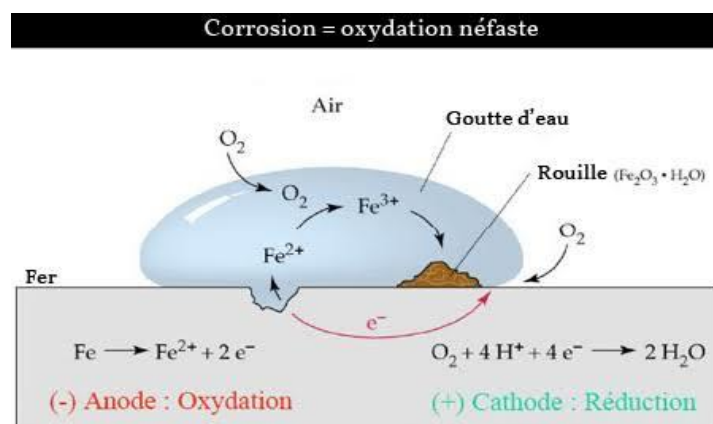


Figure I.3 : Exemple de corrosion électrochimique de fer

I.1.2.3. Corrosion biochimique ou bactérienne

Ce type de corrosion, appelée aussi bio-corrosion, rassemble tous les phénomènes de corrosion dans lesquels les bactéries agissent directement ou par l'intermédiaire de leur métabolisme en jouant un rôle primordial, soit en accélérant un processus déjà établi, soit en créant les conditions favorables à son établissement [4].

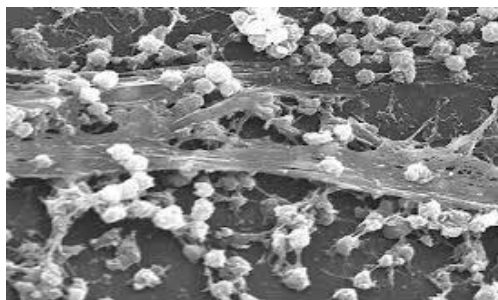


Figure I.4 : Exemple de corrosion bactérienne

I.1.3. Facteurs de corrosion

Les phénomènes de corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs et ils peuvent être classés en quatre principaux (tableau I.1).

Tableau.I.1 : Principaux facteurs de corrosion [5].

Facteurs relatifs au milieu corrosif	Facteurs métallurgiques	Facteurs définissant les conditions d'emploi	Facteurs dépendant du temps
-Concentration du réactif -Teneur en oxygène -pH du milieu -Température -Pression	-Procédés d'élaboration -Impuretés -Traitement thermique -Traitement mécanique	-Etat de surface -Forme des pièces -Emploi d'inhibiteur -Procédés d'assemblage	-Vieillessement -Tension mécanique -Modification des revêtements protecteurs

I.1.4. Aspect morphologie de la corrosion

Le processus de corrosion des métaux prend de nombreuses formes, qui sont classées principalement selon la forme qui se manifeste à la surface corrodée :

- Corrosion uniforme (généralisée),
- Corrosion localisée.

I.1.4.1. Corrosion uniforme (généralisée)

C'est la forme la plus classique de corrosion, mais pas toujours la plus importante en termes économiques ou sécuritaires. Elle affecte l'ensemble de la surface du métal en contact avec l'électrolyte [6]. C'est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface [7]. Elle se traduit par une dissolution uniforme de la surface métallique en contact avec l'agent agressif [8]. Cette forme de corrosion uniforme est relativement facile à quantifier par des mesures de perte de masse ou d'épaisseur est sa progression sur une structure en service peut être suivie par des contrôle périodiques [9].



Figure I.5 : Corrosion uniforme ou généralisée

I.1.4.2. Corrosion localisée

La corrosion localisée est un phénomène dans lequel la réaction de corrosion a lieu à un emplacement spécifiquement anodique d'un matériau. En pratique, ce type de corrosion provient d'hétérogénéité du matériau ou de l'environnement [10].

La corrosion localisée intervenant sur des sites discrets de la surface d'un métal exposé à un environnement corrosif et peut apparaître sous forme *de piqures, fissures* (inter-granulaire), par *crevasse*, etc.

Les différentes formes de la corrosion localisée sont :

a) Corrosion galvanique

C'est l'une des formes les plus courantes de corrosion en milieu aqueux. Elle est le résultat de la formation d'une pile électrochimique entre deux matériaux dans laquelle une des électrodes (l'anode) se consomme au bénéfice de l'autre (la cathode) qui reste intacte. Cette sélectivité des réactions est due à une hétérogénéité provenant soit du matériau, soit du milieu ou des conditions physico-chimiques à l'interface [11].

Les principaux facteurs favorisant la corrosion galvanique induite par le couplage de deux métaux sont essentiellement :

- La nature des métaux : composition, valeurs de la différence de potentiel, taux d'impuretés ;
- Les paramètres géométriques : surfaces relatives entre les zones cathodiques et anodiques, la distance entre les deux métaux ;
- Les propriétés locales de l'électrolyte : pH, température, turbulence, agitation.

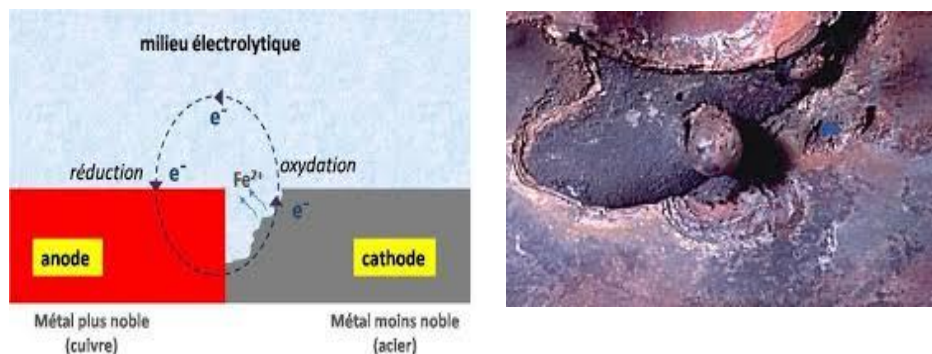


Figure I.6 : Corrosion galvanique qui résulte d'un assemblage de deux métaux différents

b) Corrosion par pique

C'est une dissolution localisée qui s'est produite par certains anions agressifs notamment le chlore, sur les surfaces protégées [12]. Cette forme de corrosion est particulièrement insidieuse, l'attaque se limite à des piqures, très localisées. Ces piqures de corrosion peuvent se développer rapidement et peuvent finir par perforer intégralement la surface métallique [13]. Ce qui laisse à dire que c'est la forme de corrosion la plus dangereuse car elle est difficilement réparable.

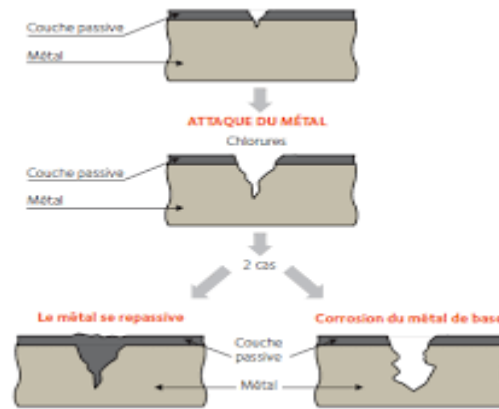


Figure I.7 : Piqures de corrosion

c) Corrosion intergranulaire

C'est une attaque localisée aux joints de grains par suite d'hétérogénéités locales. Ce type de corrosion peut être dû soit à la présence d'impuretés dans le joint, soit à l'enrichissement (ou l'appauvrissement) local de l'un des constituants [14].

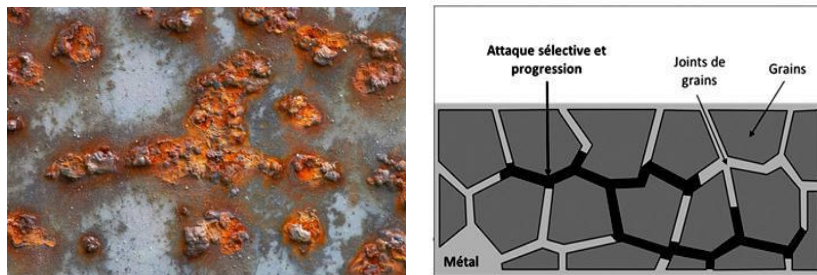


Figure I.8 : Corrosion au niveau des joints de grains d'une structure métallique

d) Corrosion par érosion

Cette corrosion est produite par le mouvement relatif d'un fluide corrosif et d'une surface métallique. L'aspect mécanique du mouvement est important et les phénomènes de frottement et d'usure peuvent intervenir. Cette forme de corrosion est liée à la vitesse de circulation du fluide, elle se caractérise par un amincissement local du métal qui prend la forme de rayures, de ravinements et d'ondulations [15].

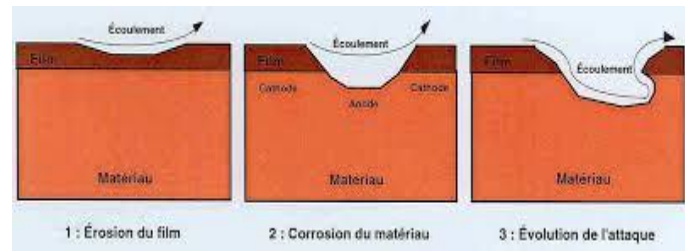


Figure I.9 : Etapes de développement du phénomène de corrosion érosion

e) Corrosion sous contrainte

La corrosion sous contrainte est une fissuration du métal qui résulte de l'action commune d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique [16]. Ce type de corrosion est défini comme le processus de développement des fissures, qui peut aller jusqu'à la rupture complète les pièces sont sous l'action combinée des contraintes mécanique et de l'environnement corrosif. Tout cela est force de tension [17].

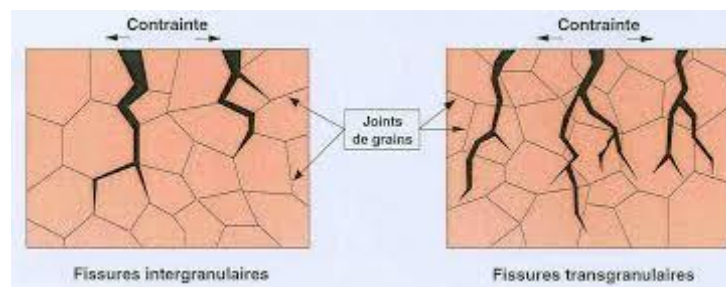


Figure I.10 : schéma de corrosion sous contrainte

f) Corrosion caverneuse

La corrosion caverneuse est généralement associée à la présence de petits volumes de solution stagnante dans des interstices, sous des dépôts et dans les joints ou crevasses. Cette attaque sélective du métal est observée dans les fissures et autres endroits peu accessibles à l'oxygène [18]. Elle est considérée comme beaucoup plus dangereuse que la corrosion uniforme car son taux est 10 à 100 fois plus élevé.

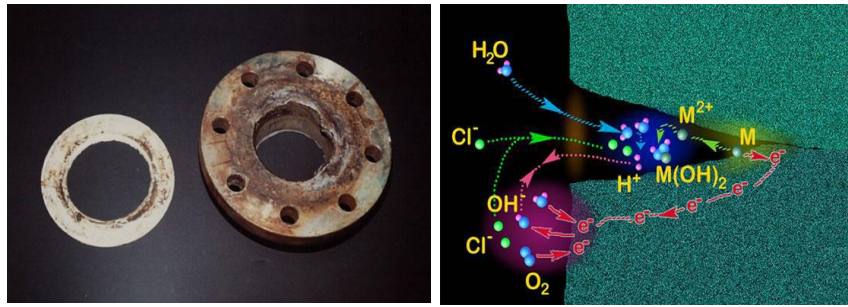


Figure I.11 : Aspect et mécanisme d'attaque de la corrosion caverneuse

I.2. L'acier

I.2.1. Définition d'un acier

L'acier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone, sa teneur en carbone est comprise entre 0.02% et 2% en masse. C'est essentiellement cette teneur qui confère à l'acier ses propriétés [19]. Ces dernières varient dans de grandes proportions avec la teneur en carbone et avec la teneur en éléments d'apport Ni, Cr, Mn, etc.

Les aciers sont élaborés pour résister à des sollicitations mécaniques ou des agressions chimiques ou une combinaison des deux.



Figure I.12 : Les aciers

I.2.2. Différents types d'aciers

Les aciers présentent un très grand nombre de nuance différente. On peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation. L'adoption de cette dernière nous permet de recenser quatre familles d'aciers :

- Les aciers au carbone d'usage général ;
- Les aciers de traitement thermiques ;
- Les aciers à outils ;
- Les aciers inoxydables.

I.2.3. Fabrication de l'acier

L'acier s'élabore actuellement de deux manières :

- Dans un **haut fourneau**, à partir du minerai de fer et de coke avec réduction du carbone dans un convertisseur ;
- Dans un **four électrique**, à partir d'acier de récupération. On parle d'acier de recyclage ou d'acier électrique [20].

I.2.4. Composition de l'acier

On distingue plusieurs types d'aciers selon le pourcentage de carbone qu'ils contiennent :

- les aciers **hypoeutectoïdes** (de 0,008 à 0,77 % de carbone) qui sont les plus mous ;
- les aciers **eutectoïdes** (0,77 % de carbone) ;
- les aciers **hypereutectoïdes** (de 0,77 à 2,11 % de carbone) qui sont les plus durs ;

La structure cristalline des aciers à l'équilibre thermodynamique dépend de leur concentration (essentiellement en carbone mais aussi des autres éléments d'alliage), et de la température. On peut aussi avoir des structures hors équilibre (par exemple dans le cas d'une trempe).

La structure du fer pur dépend de la température, en effet : [21]

- en dessous de 721°C et au-dessus de 1400°C, le fer (fer α) à une structure cristalline cubique à corps centré (structure cristalline à température ambiante) ;
- entre 721°C et 950°C jusqu'à 1400°C le fer (fer γ) a une structure cristalline cubique à faces centrées.

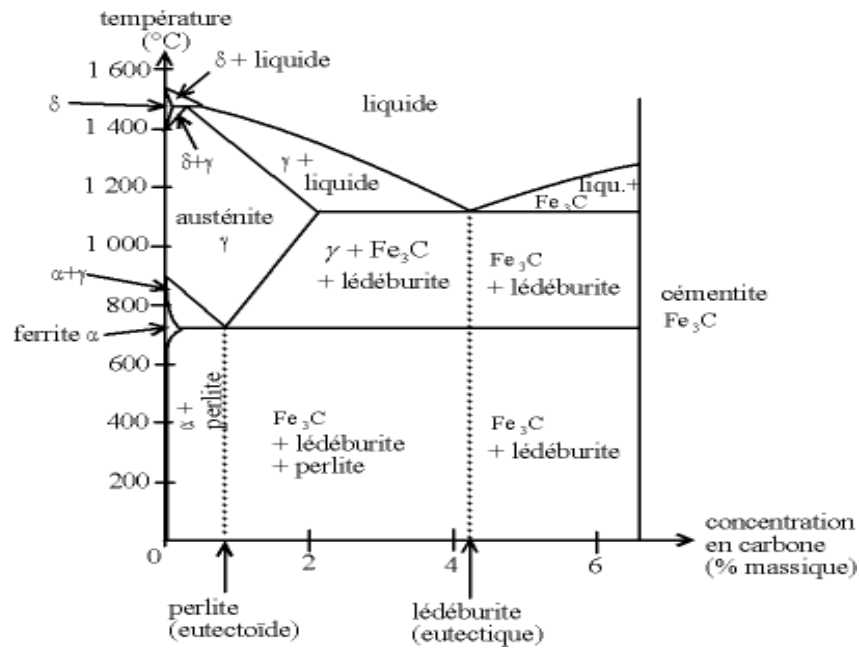


Figure I.13 : Diagramme de phase fer-cémentite, permettant de visualiser les conditions d'existence des formes d'acier [22]

La **cémentite** est un carbure de fer de formule Fe₃C (fractions massiques : 93,3 % de fer, 6,67 % de carbone), qui cristallise dans le système orthorhombique avec une masse volumique de 7,662 g/cm³, légèrement inférieure à celle du fer (7,874 g/cm³).

I.3. Diagramme de Pourbaix

Le diagramme de Pourbaix : potentiel-pH (E-pH), est utilisé pour l'étude des phénomènes de corrosion d'un métal en solution aqueuse sous différentes conditions de potentiel et de pH. Il permet de déterminer les domaines de stabilité des différentes espèces chimiques.

Le diagramme de Pourbaix localise les frontières des produits de corrosion insolubles du métal dissous avec les limites en concentration d'ions métalliques libres.

Dans le cas de fer, le diagramme de Pourbaix comprend trois domaines particuliers :

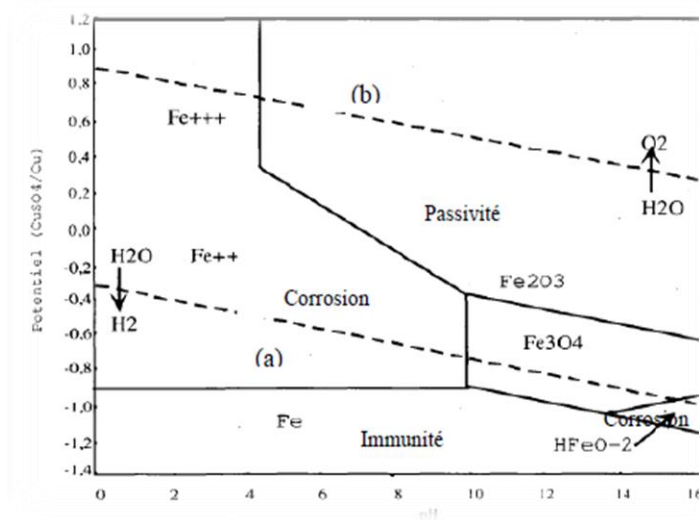


Figure I.14 : Courbe d'équilibre E-pH de fer-eau à 25°C [4].

➤ Domaine de passivité

Lorsque l'acier atteint un potentiel électropositif dans un électrolyte alcalin, la formation d'un complexe solide tel que le Fe_2O_3 ou le Fe_3O_4 a lieu. Ces complexes peuvent être formés et déposés sur la surface du fer en formant une couche protectrice.

➤ Domaine de corrosion

Lorsque l'acier atteint des potentiels plus électropositifs en présence d'un milieu acide (pH faibles) ou intermédiaires, le fer se corrode et les formes d'oxydation du métal sont des ions Fe^{2+} et Fe^{3+} .

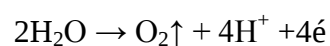
➤ Domaine d'immunité

La corrosion ne se produit pas, le fer est suffisamment cathodique pour rester à l'état métallique.

La région limitée par les lignes (a) et (b) de la figure.I.9 présente la zone de stabilité thermodynamique des molécules d'eau. Dans cette région, le potentiel et le pH sont considérablement stable.

La ligne (a) présente la ligne dévolution d'hydrogène qui est présentée par le mécanisme réactionnel suivant : $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\uparrow + 2\text{OH}^-$

La ligne (b) présente la ligne dévolution d'oxygène dont la réaction suivante :



I.4. Les inhibiteurs de la corrosion

I.4.1. Définition

Selon la définition donnée par la National Association of Corrosion Engineers (NACE), un inhibiteur de corrosion est un composé chimique qui, ajouté en faible concentration au milieu corrosif, ralentit ou stoppe le processus de corrosion du métal en contact avec le milieu corrosif [23]. 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.



Figure I.15 : Exemple de l'état de surface d'un métal en absence et en présence d'un inhibiteur de corrosion.

I.4.2. Propriétés

Un inhibiteur de corrosion doit vérifier un certain nombre de propriétés fondamentales [24] :

- Abaisser la vitesse de corrosion du métal tout en conservant les caractéristiques physico-chimique de ce dernier ;
- Etre efficace dans les conditions d'utilisation ;
- Etre stable aux températures d'utilisation et en présence des autres constituants du milieu, en particulier avec les oxydants,
- Etre soluble et dispersif dans le milieu,
- Etre efficace à faible concentration, respecter les normes de non-toxicité,
- Etre peu onéreux.

II.2.3. Classification

Il existe plusieurs possibilités de classer les inhibiteurs, celles-ci se distinguant les unes des autres de diverses manières (figure I.16). Des classements simples peuvent être proposés :

- Par réaction partielle ;
- Par mécanisme réactionnel ;
- Par domaine d'application (organique ou minérale) [25].

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

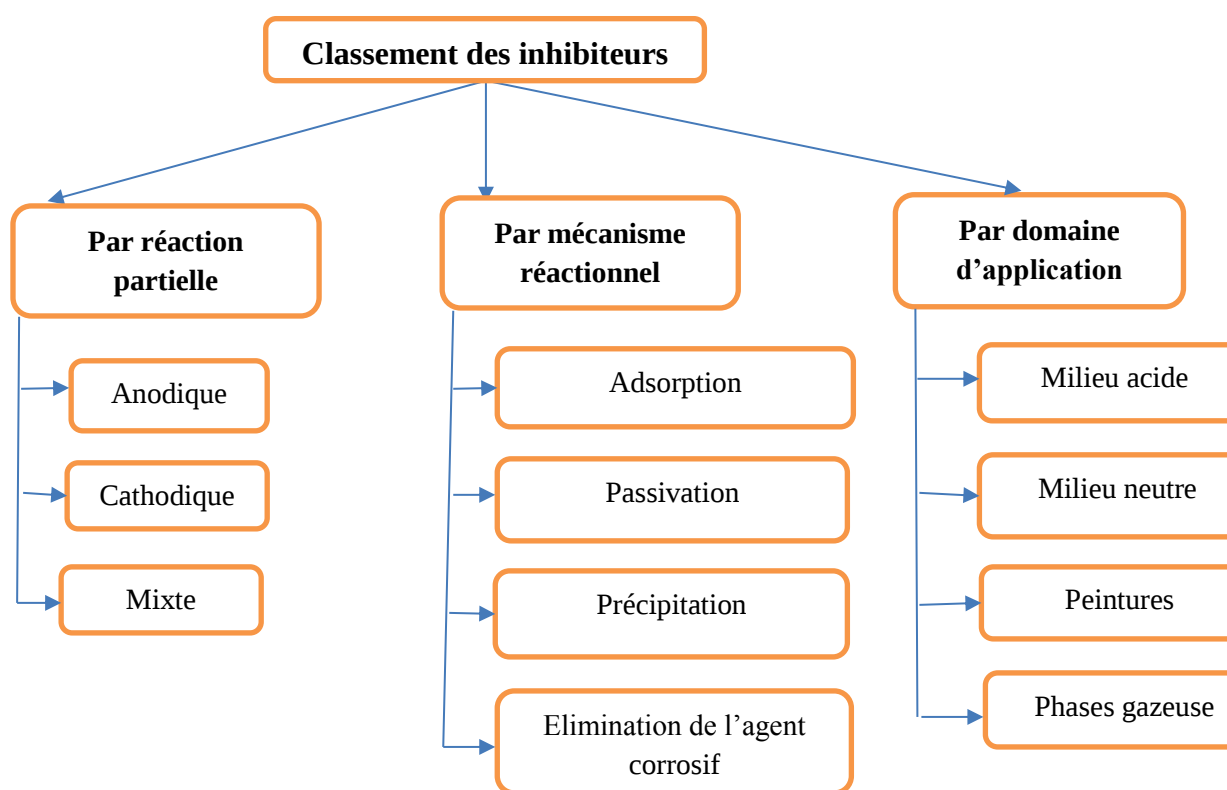


Figure I.16 : Classement des inhibiteurs de corrosion

a) Classement selon la nature de l'inhibiteur

➤ Inhibiteurs organiques

Les inhibiteurs organiques représentent un groupe très important d'inhibiteurs de corrosion. Leur utilisation est actuellement préférée à celle d'inhibiteurs inorganiques pour des raisons non toxiques essentiellement. L'action d'un inhibiteur organique est le résultat de son

adsorption à la surface du matériau. Après cette adsorption à la surface, ils ont une double action ralentissant simultanément les processus anodique et cathodique.

La plupart de ces inhibiteurs ont dans leur structure au moins un centre actif susceptible d'échanger des électrons avec le métal, tel l'azote, le phosphore ou le soufre [26, 27].

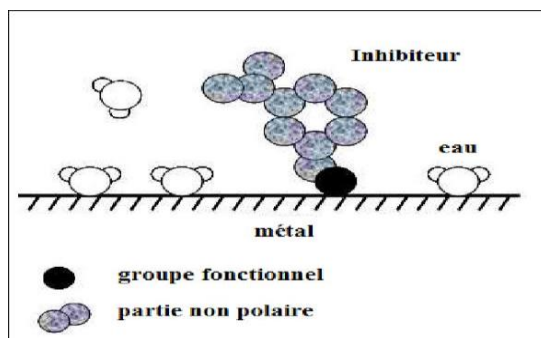


Figure I.17 : Schéma d'adsorption d'un inhibiteur organique sur la surface métallique

➤ Inhibiteurs inorganiques (minéraux)

Les molécules minérales sont utilisées souvent en milieu proche de la neutralité, voire en milieu alcalins, et plus rarement en milieu acides. Les produits se dissocient en solution et ce sont souvent leurs produits de dissociation qui assure les phénomènes d'inhibition (anions ou cations). Les phosphates, les chromates, molybdates, silicates,....

Le nombre de molécules en usage à l'heure actuelle va en restreignant, car la plupart des produits efficaces présentent un côté néfaste pour l'environnement [28].

b) Classement selon les mécanismes d'action électrochimique

Dans la classification relative au mécanisme d'action électrochimique partielle, on différencie les inhibiteurs selon leur influence sur la vitesse des réactions électrochimiques partielles. On peut distinguer :

➤ Les inhibiteurs anodiques

Les inhibiteurs anodiques diminuent la densité de courant de dissolution du métal et déplacent le potentiel de corrosion dans le sens positif. Ce type d'inhibiteurs doit être utilisé en quantité suffisante car dans le cas contraire, ils peuvent accentuer la corrosion des zones non protégées, c'est pour ça que les inhibiteurs anodiques sont souvent désignés comme dangereux.

➤ Les inhibiteurs cathodiques

Les inhibiteurs cathodiques, en revanche, diminuent la densité de courant de réduction du solvant et déplacent le potentiel de corrosion dans le sens négatif. Du fait de leur mode d'action, les inhibiteurs cathodiques sont considérés comme plus sûrs que les inhibiteurs anodiques car ils ne risquent pas de favoriser la corrosion localisée.

➤ Les inhibiteurs mixtes

Les inhibiteurs mixtes agissent à la fois sur les processus cathodiques et anodiques. Ces inhibiteurs diminuent la vitesse de deux réactions partielles, mais ils modifient peu le potentiel de corrosion [29].

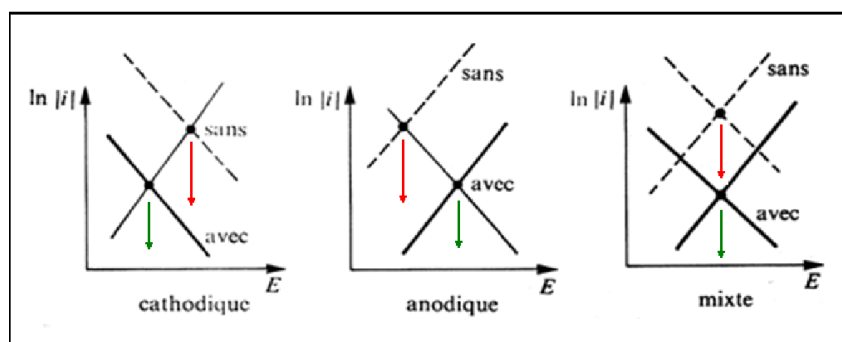


Figure I.18 : Exemple de mécanisme d'inhibition cathodique, anodique et mixte

c) Classement selon d'action interfaciale

➤ Les inhibiteurs d'adsorption

On parle d'adsorption lorsqu'il y a une simple fixation des molécules de l'inhibiteur à la surface de métal, sans qu'il n'y ait de réaction.

L'adsorption est un phénomène de surface universel car toute surface est constituée d'atome n'ayant pas toutes leurs liaisons chimiques satisfaites. Cette surface a donc tendance à combler ce manque en captant atomes et molécules se trouvant à proximité. La liaison entre l'espèce adsorbée et la surface métallique peut être essentiellement de deux types : physisorption et la chimisorption [30].

➤ Les inhibiteurs passivant

Ces inhibiteurs forment des films de passivation tridimensionnels entre la surface corrodée et les molécules d'inhibiteurs. Ils sont également incorporés dans les couches barrières et aussi

ces molécules inhibitrices conduisent à des réseaux homogènes et denses présente de fait une faible porosité et une bonne stabilité [31].

II.2.4. Domaine d'application

Souvent, on classe les inhibiteurs selon leur domaine d'application :

- **Inhibiteurs pour milieux neutres** : ils servent surtout à protéger des circuits d'eau de refroidissement. La corrosion en milieu neutre est due essentiellement à l'oxygène dissous et à la présence des agents agressifs tels les ions chlorures, sulfates et nitrates.
- **Inhibiteurs pour milieux acides** : Ils sont employés, entre autres, pour éviter une attaque électrochimique de l'acier lors du décapage. Dans l'industrie pétrolière on les ajoute aux fluides de forage.
- **Inhibiteurs pour milieux organiques** : Ils sont utilisés dans les lubrifiants pour moteurs par exemple. Ces liquides contiennent souvent des traces d'eau et des espèces ioniques qui peuvent provoquer une corrosion.
- **Inhibiteurs pour peintures** : Ils jouent un rôle important tels les pigments inorganiques ou les tannins.
- **Inhibiteurs pour milieux gazeux** : Ils sont employés pour une protection temporaire des objets emballés pendant le transport et le stockage. Ces composés s'absorbent sur la surface métallique et la protège contre la corrosion atmosphérique [32].

II.2.5. Utilisation industrielles des inhibiteurs

Les inhibiteurs ont plusieurs domaines conventionnels d'utilisation :

- Le traitement des eaux : eaux sanitaires, eaux des procédés industriels, eaux de chaudière, etc.
- L'industrie du pétrole : forage, extraction, raffinage, stockage et transport. A tous les stades de cette industrie, l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion est primordiale pour la sauvegarde des installations.
- La protection temporaire des métaux, que ce soit pendant le décapage acide, le nettoyage des installations ou le stockage à l'atmosphère (inhibiteurs volatils, incorporation aux huiles et graisses de protection temporaire) ou pour le traitement des huiles de coupe.
- L'industrie des peintures sur métaux ou les inhibiteurs sont des additifs assurant la protection anticorrosion des métaux [33].

II.2.6. Mode d'action des inhibiteurs de corrosion

Il n'existe pas de mode d'action unique pour les inhibiteurs de corrosion. Un même composé, peut avoir différents mécanismes d'action. Ces derniers sont imposés par le milieu corrosif et la nature du métal à protéger.

Quel que soit le mécanisme par lequel l'inhibiteur de corrosion agit, il existe néanmoins un certain nombre de considérations qui sont valables pour tous les inhibiteurs de corrosion :

- La corrosion étant un processus essentiellement électrochimique, l'action de l'inhibiteur ne peut se faire qu'au niveau d'une des étapes des réactions élémentaires (transport d'espèces en solution, formation d'intermédiaires superficiels, adsorption des espèces à la surface des phases solides de transfert de charge électronique).
- L'intervention de l'inhibiteur de corrosion dans le processus de transport des espèces peu probable, le mécanisme d'action d'un inhibiteur est le plus souvent à rechercher au voisinage immédiat de la surface du métal (au contact du métal) [34].

On peut concevoir l'action de l'inhibiteur de corrosion comme :

- L'interposition d'une barrière entre le métal et le milieu corrosif ; c'est le cas de milieux acides.
- Le renforcement d'une barrière préexistante, en général la couche d'oxyde d'hydroxyde formée naturellement en milieu neutre ou alcalin.
- La formation d'une barrière par interaction entre l'inhibiteur de corrosion avec une ou plusieurs espèces du milieu corrosif, ce type de mécanisme est également spécifique aux milieux alcalins ou neutres [35].

Le mécanisme d'action d'un inhibiteur peut être considéré sous deux aspects :

- Un aspect mécanistique (intervention dans les processus fondamentaux de la corrosion).
- Un aspect morphologique (intervention de la molécule de l'inhibiteur de corrosion dans la structure interfacial).

Il est clair que le mécanisme d'action va se différencier fortement en fonction du pH du milieu [36,37].

II.2.7. Inhibiteurs verts

II.2.7.1. Généralités

Les plantes ont été toujours considérées comme une source pour la préparation des médicaments, leurs utilisations ont trouvé ces dernières années un autre domaine d'application qui est l'inhibition de la corrosion. De ces plantes naturelles, on peut extraire plusieurs produits antioxydants.

Les inhibiteurs verts sont souvent des huiles ou des extraits obtenus à partir des plantes : écorces, racines, feuilles et graines par de simples méthodes d'extractions. Leur composition est complexe puisqu'elle est constituée d'un mélange de composés qui appartiennent aux différentes classes de la chimie organique telle que les phénols, les hydrocarbures, les alcools, les aldéhydes, les cétones, etc.

Un grand nombre, de composés organiques, a été étudié pour examiner leur potentiel d'inhibition de la corrosion. Toutes ces recherches révèlent que les composés organiques, en particulier ceux qui contiennent les atomes N, S et O, ont montré une efficacité d'inhibition significative mais la plupart de ces composés sont non seulement coûteux mais aussi toxique pour les êtres vivants. Ces effets toxiques ont conduit à envisager l'utilisation de produits naturels écologiques et inoffensifs comme des agents anticorrosifs. De nombreuses substances écologiques inhibitrices de la corrosion ont été développées, allant des terres rares [38,39] aux composés organiques [40].

A ce jour, plus de 4000 articles ont traité des extraits naturels de différentes parties de plantes (tiges, feuilles et graines), comme inhibiteurs de corrosion des métaux et leurs alliages dans différents milieux corrosifs [41].

Le tableau suivant résume quelques travaux de recherches qui ont été faits en utilisant les plantes comme inhibiteurs de corrosion [42]:

Tableau.I.2 : Effet inhibiteur de quelque plantes dans 3 différents milieux acides.

<i>Inhibiteur</i>	<i>Milieu</i>	<i>Métal</i>	<i>Année</i>
Milieu HCl			
OLEA EUROPAEA 	2M HCl	Acier au carbone	2007
MURRAYA KOENIGI 	1M HCl	Acier ordinaire	2010
SIPARUNA GUIANENSIS 	0,1 M HCl	Acier au carbone	2011
ARGANIA SPINOSA 	1M HCl	Acier ordinaire	2012
ACALYPHA TORYA 	1M HCl	Acier ordinaire	2013
PHOENIX DACTYLIFRA 	1M HCl	Acier au carbone	2015
GEISSOSPERMUM 	1M HCl	Acier carbone	2015

TABERNAEMONTANDIVARICAT 	1M HCl	Acier carbone	2016
THYMUS VULGARIS 	1M HCl	Acier inoxydable	2017
ROLLINIA OCCIDENTALIS 	1M HCl	Acier au carbone	2018
CANNON AMURICATA 	0,5M H ₂ SO ₄ 1M HCl	Acier carbone	2018
Milieu H₃PO₄			
ZENTH3OXYLUM ALATUM 	20% 50% 88% H ₃ PO ₄	Acier ordinaire	2004
ARTEMISIA 	2M H ₃ PO ₄	Acier carbone	2006
ROSEMARY 	2M H ₃ PO ₄	Acier carbone	2006

MANGROVE TANNINS 	NaCl et H_3PO_4	Acier carbone	2008
TRIBULUS TERRESTRIS L 	H_3PO_4	Acier ordinaire	2010
ACALYPHA INDICA L. ALCOHOLIC 	H_3PO_4	Acier ordinaire	2010
BAMBOO 	0,1M H_3PO_4	Acier carbone	2014
EUPHORBIA FACATA. L 	H_3PO_4	Acier carbone	2015
MUSA ACUMINATA 	H_3PO_4	Acier ordinaire	2015
RED ONION 	0,75M H_3PO_4	Acier carbone	2016

ZIZIPHUS LOTUS 	5,5M H_3PO_4	Acier carbone	2018
BORAGO OFFICINALIS.L 	1M H_3PO_4	Acier ordinaire	2018
Milieu H_2SO_4			
COMBRETUM BRACTEOSUM LEAVES 	H_2SO_4	Acier ordinaire	2009
NEUCLEA LATIFOLIA 	1M H_2SO_4	Acier ordinaire	2013
NYPAFRUTICANS WURMB 	0,1M H_2SO_4	Acier ordinaire	2014
TARGETES ERECTA 	0,5M H_2SO_4	Acier ordinaire	2014
ALOE VERA 	1M H_2SO_4	Acier inoxydable	2015

NICOTIANA TABACUM 	2M H_2SO_4	Acier ordinaire	2015
CASSIA TORA 	0,5M H_2SO_4	Acier ordinaire	2016
LANNEA COROMANDELIC 	1M H_2SO_4	Acier ordinaire	2017
POUPARTIA BIRREA BACK 	0,5M H_2SO_4	Acier ordinaire	2017
SIDA CORDIFOLIA 	0,5M H_2SO_4	Acier ordinaire	2018
AGAVE AMERICANA 	0,5M H_2SO_4	Acier ordinaire	2019
RUTA CHALEPENSIS 	2M H_2SO_4	Acier ordinaire	2010

La délocalisation géographique, les conditions climatiques et la période de récolte peuvent tous faire la différence dans la composition d'une même espèce et même de ses propriétés.

➤ Les inhibiteurs verts à base des huiles

Plusieurs études ont été menées sur l'inhibition de la corrosion par les huiles essentielles dans le milieu HCl et le tableau suivant représente quelques exemples [43]:

Tableau.I.3 : Effet inhibiteur des différentes huiles essentielles dans le milieu HCl

Source de l'inhibiteur	Concentration du milieu HCl	Type de métal	Efficacité inhibitrice	Remarques	Température (°K)
Huile essentielle du Pennyroyal(Ment hapulegium)	1M	Acier	80 % pour 2.76 g/l	Un inhibiteur cathodique	298
Huile essentielle de l' Artemisia	0.5M	Fer-blanc	81 % pour 0.5 g/l	/	298
Huile essentielle de l' Artemisia	1M	Acier	87 % pour 19 g/dm ³	Un inhibiteur cathodique	343
Huile essentielle de Jojoba	1M	Fer	100 % pour 0.515 g/l	Un inhibiteur cathodique	298
Huile essentielle de Clove	1M	Fer	100 % pour 0.515 g/l	/	298
Huile essentielle de Fennel(Foeniculum Vulgare)	1M	Acier au carbone	76 % pour 3ml/l	Un inhibiteur mixte	298

➤ Inhibiteurs verts à base d'extraits

Les extraits de plantes sont devenus une source d'inhibiteurs verts qui montrent une bonne efficacité anticorrosion. L'extrait du **Palmier Nain** a révélé la présence des polyphénols, des tannins, des flavonoïdes, des saponines, des terpenoïdes, des anthracénosides et des hétérosides cardiotoniques. Il a été évalué comme inhibiteur de corrosion des armatures en acier dans des milieux béton synthétique en présence des ions chlorure HCl (0.5M). L'étude électrochimique réalisée à différentes techniques a montré que l'extrait manifeste un effet protecteur du métal contre la corrosion et plus particulièrement la corrosion par piqure engendrée par les ions chlorures [44].

Le tableau suivant montre quelques résultats obtenus dans les milieux acides en utilisant comme substrat l'acier [43]:

Tableau.I.4 : Effet inhibiteur des différents extraits dans différents milieux acides

Inhibiteur	Milieu	Substrat	Concentration critique	Efficacité maximale
Extrait de Diethylether Verticillata	1M HCl	Acier doux	0.25 g/l	75 %
Extrait d'acétate d'éthyl Ptychotis verticillata			0.5 g/l	86 %
Extrait de la plante Justicia gendarussa	1M HCl	Acier doux	200 ppm	91.3 %
Extrait des grains de Coffea bridsoniae (café)	1M HCl	Acier au carbone	400 ppm avec BC _{DEC}	83.5 %
			400 ppm avec BC Ph. _{INF}	88.1 %
Extrait de la plante Medicago Sativa	2M H ₂ SO ₄ + 10% Ethanol	Acier au carbone	MS Ph.Aq 1.6 · 10 ⁻¹ g/l	93.87 %
			MS Ph.methanolique 1.0 · 10 ⁻¹ g/l	97.44 %
Extrait de la Henna	1M HCl	Acier au Carbone	3000 ppm	92.72 %
Un monoterpène naturel d'un dérivé phénolique de cymène : 2-isopropyl-5-méthylphénol	Na ₂ SO ₄ , NaCl ou 0.5M NaCl dans 2.0M H ₃ PO ₄	Acier doux	10 mM	91.2 %
Jus d' Abricot	1 M H ₃ PO ₄	Acier doux	40 g/l	73 %
Extrait de feuilles d' Osmanthus fragran	1M HCl	Acier au Carbone	0.34 g/l	96.8 % (45°C)

II.2.7.2. Types d'adsorption des extraits de plantes en milieu acide [45]

Deux types d'adsorptions peuvent être distingués dans l'étude des inhibiteurs d'origine végétale : la physisorption (formation de liaisons faibles) et la chimisorption.

Le premier type d'adsorption conserve l'identité des molécules adsorbées ; trois types de forces sont à distinguer :

- Les forces de dispersion (Van Der Waals, London) toujours présentes ;
- Les forces polaires, résultant de la présence de champ électrique ;
- Les liaisons hydrogène dues aux groupements hydroxyles ou amines.

La chimisorption, au contraire, consiste en la mise en commun d'électrons entre une partie polaire de la molécule avec la surface métallique, ce qui engendre la formation de liaisons chimiques très fortes et bien plus stables. Les électrons proviennent en grande majorité des doublés non appariés des molécules inhibitrices.

II.2.7.3. La Paronyque Argentée

La Paronyque argentée ou *Paronychia Argentea* est une espèce végétale appartenant à la famille des Caryophyllaceae originaire de l'Europe méridionale, l'Asie occidentale et de l'Afrique du nord. Cette famille est importante avec 87 genres et environ 2300 espèces présentant une large répartition.

Le nom *Paronychia* vient du grec *parnichia* qui signifie panaris (champignon touche les angles de la main ou du pied) qui désigne que la plante jadis employée pour guérir les panaris, et le nom *argentea* fait allusion à la couleur argentée des fleurs.

On l'appelle populairement en France "Herbe aux panaris" pour l'utilisation qui en fut faite autrefois pour soigner cette affection.

Par son appellation "Thé des arabes", il est rappelé qu'elle procure une tisane agréable au goût, apéritive et diurétique, que l'on consomme dans le Maghreb comme remède préventif contre la formation de calculs rénaux et vésiculaires.

La récolte de la plante se fait dans la période allant du mois d'Avril au mois de Juin, et les fleurs apparaissent dans la période Février-Juin suivant la zone d'habitation et le climat [46].

a) Description botanique [47,48]

Paronychia Argentea (figure.I.19) est une plante vivace herbacée de 20 à 40 cm de hauteur, rampante, à souche épaisse et à tiges rampante verte ou rougeâtre (en présence du soleil). Les tiges sont étalées, pubescentes, très fragiles, très mince (de 1 mm environ de largeur).

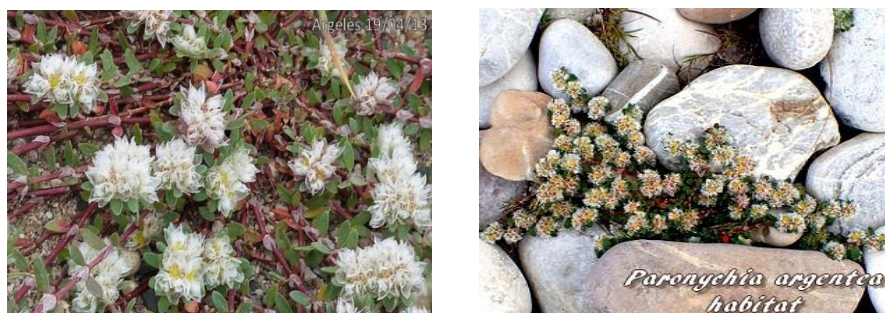


Figure I.19 : *Paronychia Argentea*

Elle est constituée des feuilles (Figure.I.20) jusqu'à 5 mm de long et 2 mm de large, ne sont pas poilues, elles sont lancéolées et parfois ovales avec des pointes aiguës. Les lobes du calice

sont de forme oblongue avec des marges membraneuses à capuchon et se terminant par une arrête aigues à la pointe.

Ses fleurs sont entourées de bractées argentées à 5 sépales verts qui se terminent par une pointe, elles n'ont pas de pétales et possèdent 5 étamines. Elles sont disposées en bouquets tout le long de la plante.

Les graines ovoïdes-arrondies, lisses, bruns-rouges de 1mm de longueur.



Figure I.20 : Fleurs, feuilles et tige de la *Paronychia argentea*.

b) Classe vernaculaire [49]

La classification classique de l'espèce Paronyque Argentée est représentée ci-dessous :

- **Règne :** Plantae
- **Sous-règne :** Viridiplantae
- **Division :** Magnoliophyta
- **Classe :** Magnoliopsida
- **Sous-classe :** Caryophyllidées
- **Ordre :** Caryophyllales
- **Famille :** Caryophyllacées
- **Genre :** *Paronychia*
- **Espèce :** *argentea*

c) Composition chimique

L'analyse phytochimique de la partie aérienne de cette espèce a révélé la présence de plusieurs composés qui ont non seulement un grand rôle fonctionnel dans les plantes, mais un rôle très important en pharmacologie.

Parmi ces composés, on trouve les polyphénols qui sont divisés en plusieurs catégories et les plus connus sont les acides phénoliques, les flavonoïdes, les tanins et les saponines.

D'après **Bottger S. et col. [50]**, les plantes appartenant à la famille des Caryophyllacées sont intéressantes par la présence de « Saponosides triterpéniques » dont le génine principale est la gypsogénine de formule moléculaire :

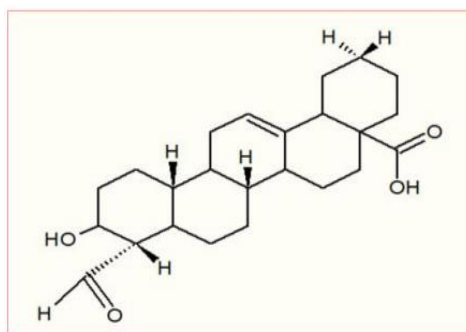


Figure I.21 : Structure de la gypsogénine.

La présence de la gypsogénine confère aux plantes des propriétés diurétiques, expectorant et un pouvoir aphrogène qui leur offre la possibilité d'être utiliser comme détergents [51].

d) Propriétés thérapeutiques

Paronychia argentea est utilisée en médecine traditionnelle pour traiter ou prévenir plusieurs maladies, ses parties aériennes sont utilisées dans la médecine populaire algérienne pour le traitement des maladies rénales comme une diurétique ou antilithiasique en favorisant la circulation de l'urine, anti-inflammatoire des voies urinaires, des reins et de la vésicule, aseptique et légèrement spasmodique. Autre traitement comme les infections respiratoires, le diabète et les douleurs abdominales.

Utilisé au Maghreb comme boisson et remède populaire à titre préventif contre la formation des calculs rénaux et vésiculaires [47]. En Jordanie, la partie aérienne en décoction est utilisé en médecine traditionnelle pour la dissolution des calculs rénaux et le traitement les maladies et les infections des voies urinaires [52].

La plante affirme une activité hypoglycémique [53,54] et possède des activités antimicrobiennes [55].

Références bibliographiques

- [1] **P. Brokate**, « Etude de la compétition entre corrosion uniforme et localisée par automates cellulaire », Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie curie, Paris (2016).
- [2] **R. SAHRAOUI**, « Utilisation de l'extrait de feuilles d'olivier sauvage comme inhibiteurs de corrosion de l'acier », Mémoire de projet de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique (2022).
- [3] **H. Barkat**, « Utilisation des extraits (méthanolique aqueux) de la plante Malva sylvestris comme inhibiteur de corrosion de l'acier au carbone dans un milieu acide », Mémoire de master, Université de Tébessa, (2017).
- [4] **A. Campa**, « Protection des surfaces métalliques contre la corrosion, technologie professionnelle pour les mécanicien », tome 2, Paris, Les Edition Foucher (1971).
- [5] **A. OUZZANE**, « Effet de tensioactifs non ionique sur la corrosion de l'acier en milieu chlorure », Mémoire de master, Université de Bejaia (2021).
- [6] **ISBN**, « Corrosion et inhibiteur des puits et collectes », Edition Technip, Paris (1981).
- [7] **Y. AZOUZ**, « Effets de la concentration de NaCl sur la corrosion de l'acier doux en prsence des cations Zn^{2+} et anions CrO_4^{2-} », Mémoire de magister, Université Hadj Lakhdar Batna (2010).
- [8] **W. Harzallah**, « Préparation et caractérisation de Dépôts Composites Electrodéposés en Présence d'inhibiteurs Organique », Mémoire de magister, Université de Mohamed Khider de Biskra, (2006).
- [9] **H. ZIOUI**, « Propriétés inhibiteurs de l'extrait de la plante d'ortie Vis-à-Vis de la corrosion de l'acier XC38 en milieu H_2SO_4 », Mémoire de master, UAMO de Bouira (2019).
- [10] **H. Yousfi**, « Etude des inhibiteurs de la corrosion pour protéger l'acier ordinaire en milieu agressif », Mémoire de master, Université Mouhamed El Bachir El ibrahimi de Bordj Bou Arréridj (2020).
- [11] **I. ZERZOUR**, « Etude de l'effet inhibiteur de corrosion des extraits des plantes Lactuca Virosa L. et Verbascum thaps L. sur l'acier X60 dans un milieu acide H_2SO_4 2M », Mémoire de master, Université de Larbi ben M'hidi d'Oum el Bouaghi (2020).
- [12] **B. Grosogeat, P. COLON**, « La corrosion », Société Francophone de Biomatériaux Dentaires B, (2010).
- [13] **I. Ghiaba**, « Etude de l'effet inhibiteur des huiles essentielles de anacyclus valentinus L sur la corrosion de l'acier X70 dans un milieu d'acier H_2SO_4 (0.5M) », Mémoire de master académique, Université KASDI MERBAH de Ouargla (2021).
- [14] **S. MESROURI**, « Suivi de la corrosion de l'acier par la méthode gravimétrique », Mémoire de master, Université Mohamed el Bachir El ibrahimi BORJ Bou ARRERIDJ (2021).

- [15] **L. Belbouab**, « Application d'un chélatant comme inhibiteur de corrosion de l'acier en milieu acide : analyse électrochimique », Mémoire de master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Bordj Bouarredj (2022).
- [16] **O. KIME**, « Etude de la propriété inhibitrice du composé N-ferrocenylmethyl-4-aminoacetophenone vis-à-vis de la corrosion de l'acier XC52 en milieu H_2SO_4 », Mémoire de master, Université de Hamma Lakhder El-oued (2022).
- [17] **A. BENSABA**, « Etude d'inhibition de la corrosion du fer en milieu acide par l'extrait de periploca », Mémoire master, Université de Ghardaïa (2020).
- [18] **Y. BOUMLITA**, « Dégradation des propriétés mécaniques de carbone de soudure d'un acier APIX70 en fonction de la succession des réparations application dureté », Mémoire de master, Université Badji Mokhtar de Annaba (2017).
- [19] « alliage des aciers », consultants métallurgiques, 28-06- 2006, L'a informé sur 28-020 2007.
- [20] **K. MOKRANI**, « Microstructure et caractérisation d'un acier BS2 », Mémoire de master, Université de Biskra (2019).
- [21] **S. Ouchenane**, « Influence des inhibiteurs sur la corrosion de l'acier A37 dans différents milieux et leurs effets biocides sur E. coli », Thèse de doctorat, Université de Annaba (2013).
- [22] **S. Saadoune**, « Synthèse et caractérisation d'inhibiteurs bi-fonctionnels : application à la corrosion des aciers de construction », Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas-Setif (2010).
- [23] **C. Chinogurei**, « Propriétés inhibitrices de l'huile de cade sur la corrosion de l'aluminium », Mémoire de master, Université de Badji Mokhtar Annaba, (2018).
- [24] **G. Palanisamy**, corrosion inhibitors, Intechope (2019).
- [25] **R. BENATMANE**, « Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier en milieu acide par les méthodes électrochimiques », Mémoire de master, Université Mohamed El Bachir Elibrahimi-Bordj Bou (2020).
- [26] **M. FAUSTIN**, « Etude de l'effet des alcaloïdes sur la corrosion de l'acier C38 en milieu acide chlorhydrique 1M », Thèse de doctorat, Université de Antilles et de la Guyane (2013).
- [27] **M. BENZARGOUN**, « Etude de l'effet inhibiteur sur l'extrait de plante calotropisProcera (krnaka) la corrosion de l'acier X70 en milieu acide HCl 1M », Mémoire de Magister, université de Ghardaïa,(2020).
- [28] **I. BOUALI**, « Etude d'inhibiteurs de corrosion métallique à base d'orthophosphates de zirconium lamellaires fonctionnalisés : synthèse, caractérisations et applications », Thèse de Doctorat, Université Caddi Ayyad, Marrakech (2018).
- [29] **A. Oulabas**, « Effets des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers ordinaires dans deux milieux acides », Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar de Annaba, Algérie (2019).

- [30] **I. Abid** « Contribution à l'étude de l'inhibition de la corrosion d'un acier au carbone dans un milieu acide HCl 1M par la compose organique 3-(1,3 dithian-2- ylidene) pentane-2,4 dione », Mémoire de Master, université de Tébessa (2020).
- [31] **H. TALBI**, « Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier au carbone (XC38) par l'extrait aqueux de plantes sahariennes dans le milieu acide chlorhydrique 1M », Thèse de Doctorat, université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen (2019).
- [32] **C. FIAUD**, « inhibiteur de corrosion », Université Pierre et Marie Curie, ENSC, Paris. Techniques de l'ingénieur, Traité corrosion-vieillessement, vol. Cor, 1005.
- [33] **F. MENNAD**, « Etude de la corrosion de l'acier API5CTGradN 80 dans des puits d'injection d'eau par l'inhibiteur N- (2-aminoéthyl) », Mémoire de master, Université Kasdi Merbeh Ouargla, (2015).
- [34] **Y. Zhang**, « Influence of phytic acid on the corrosion behavior of carbon steel with different surface treatment », J. Corr. Scie, 6pp. 658-667 (2018).
- [35] **L. Hamadi**, « Application des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers en milieu agressifs », Thèse de doctorat, Université de Batna 2, Algérie, (2020).
- [36] **R. FRIKHA**, « Etude in vivo de l'effet des extraits de la plante Paronychia argentéa L sur le syndrome métabolique induit par fructose », Mémoire de master, Université des Freres Mentouri de Constantine 1, (2020).
- [37] **H. BANOUEH**, « Evaluation in vitro de l'activité antilithiasique des extraits des feuilles et des fleurs de Paronychia argentéa, plante utilisée en médecine traditionnelle en Algérie », Mémoire de master, Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, (2019).
- [38] **M. Bethencorurt, F.J.Botana,J.J.Calvino, M.Marcos, M.A.Rodringuez et Chacon**, « Lanthanide compounds as environmentally-friendly corrosion inhibitors of aluminum alloys :areview», Corrosion science, vol. 40, n°111,pp. 1803-1819 (1998).
- [39] **M. Aeas, A. Conde et J.Damborenea**, « Cerium a Suitable green corrosion inhibitor for tinplate», Corrosion science, vol.44, p. 511-520 (2002).
- [40] **E. Cano, P. Pinilla, J. Polo et P. Bastidas**, « Copper a suitable green corrosion inhibition by fast green ;fuchsin acid and basic compound in citric acid solution», Material corrosion, vol .54,p.222-228 (2003).
- [41] **P. Raja et M.Sethuraman**, « Narural product as corrosion inhibtor for metals in media», Materils letters, vol.62,p.113 (2008).
- [42] **Mhamat Ali Adoum Mahamet**, « Etudes experimentales et théoriques de l'extrait de Spergularia Rubra (Sabine rouge) en tant qu'un inhibiteur vert de corrosion de l'acier au carbone X70 dans HCl 1M», Mémoire de master, Université Saad Dahleb de Blida (2022).
- [43] **M. Hiba** ; « Inhibition de la corrosion de l'acier (A 516 Gr -70) par l'extrait de la plante Lamium flexuosum Ten dans l'acide chloridrique », Mémoire de master, Université Larbi Tebessi – Tébessa, (2016).
- [44] **D. Benmessaoud Left, Mustapha Zertoubi, Said Khoudali, A. Missouri, Mounir Benaissa, Irhzo Abdellatif, Azzi Mohammed** ; « Nouvelle approche dans la protection

contre la corrosion des armatures métalliques utilisées dans les constructions du génie civil : effet d'un extrait de plante naturelle », 1er Congrès International sur les Ingénieries Civile, Mécanique et Electrique pour l'Energie CMEEE – Marrakech, 2015.

[45] **D. Benmessaoud, M. Zertoubi, A. Irhzo, M. Azzi** ; « Inhibition de la corrosion de l'acier (A 516 Gr -70) par l'extrait de la plante *Lamium flexuosum* Ten dans l'acide chloridrique », *J Mater Environ Sci*, 4 (6), 863-864, 2013.

[46] **Zama D., Meraihi Z., Tebibel S., Benayssa W., Benayache F., Benayache S., Vlietinck A.**; « Chloropyrifos-induced oxidative stress and tissue damage in the liver, kidney, brain and fetus in pregnant rats: the protective role of the butanolic extract of *Paronychia argentea* L », *Indian Journal of Pharmacology* 39, 145–150, 2007.

[47] **Beloued A.** ; «Plantes médicinales d'Algérie » ; OPU, Alger, pp. 74–84, 1998.

[48] **Dahel R.** ; « Guide illustré de la flore Algérienne » ; Wilaya D'Alger, Mairie de Paris p 68, 2009.

[49] <https://www.quelleestcetteplante.fr/index.php>

[50] **Bottger S., Melzig M. F.**; « Triterpenoid saponins of the Caryophyllaceae and Illecebraceae family », *Phytochemistry Letters* 4, p 59-68, 2011.

[51] **Paris R. R., Moyse H.** ; « Matière médicale » ; Tome 1, Edition Masson, 2^{ème} Edition; Paris, France ; p 420, 1986.

[52] **Alessandra B., Ammar B., Tiziana S. et Nunziatina D. T.**; « Secondary metabolites from *Pranychia argentea* » ; *Magn. Reson. Chem.*46 : 88-93, 2008.

[53] **Afifi, F.U., Al-Khalidi, B., Khalil, E.**, « Studies on the in vivo hypoglycemic activities of two medicinal plants used in the treatment of diabetes in Jordanian traditional medicine following intranasal administration » ; *Journal of Ethnopharmacology* 100, 314–318, 2005.

[54] **Carmona, M.D., Llorach, R., Obon, C., Rivera, D.**, “Zahraa’, a Unani multicomponent herbal tea widely consumed in Syria: components of drug mixtures and alleged medicinal properties”; *Journal of Ethnopharmacology* 102, 344–350, 2005.

[55] **Al-Bakri A. G., Affifi F. U.**, “Evaluation of antimicrobial activity of selected plant extracts by rapid XTT colorimetry and bacterial enumeration”; *Journal of Microbiological Methods* 68, 19–25, 2007.

Chapitre II

Conditions expérimentales et techniques d'étude

II.1.Introduction

Les phénomènes de corrosion sont très complexes. Ils nécessitent l'utilisation de différentes méthodes expérimentales pour estimer le taux de corrosion et estimer l'action de l'inhibiteur utilisé. Ce chapitre a pour but de présenter les différentes méthodes expérimentales utilisées afin de réaliser ce travail. Les techniques électrochimiques sont présentées de manière à souligner leur intérêt et leur pertinence dans l'étude des inhibiteurs de corrosion. Cette présentation permettra la compréhension et l'interprétation de la plupart des résultats expérimentaux obtenus. Par la suite, nous décrirons les différents appareils que nous avons utilisés pour réaliser cette étude et les conditions expérimentales.

II.2. Conditions expérimentales

II.2.1. Cellule électrochimique

Les tests électrochimiques ont été réalisés dans une cellule en verre contenant l'électrolyte et les trois électrodes : l'électrode de travail (ET), l'électrode de référence (ER) et la contre électrode (EC) appelée aussi l'électrode auxiliaire (Figure II.1). L'étude est réalisée à la température ambiante et en milieu aéré.

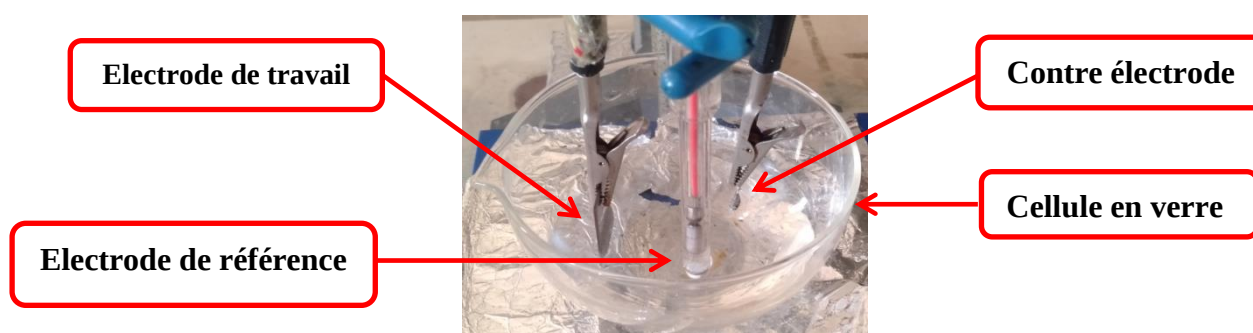


Figure II.1 : La cellule électrochimique.

II.2.2. Electrodes

Dans notre travail, nous avons étudié la corrosion de l'acier à l'aide d'un montage électrochimique à trois électrodes immergées dans 50ml de la solution d'étude.

➤ Electrode de travail

L'électrode de travail utilisée est une plaque en acier. Durant les mesures électrochimiques, la plaque est enrobée dans une résine de manière à ne laisser exposer à l'électrolyte qu'une surface égale à 4 cm^2 (figure.II.2).

Avant chaque manipulation, les plaques d'acier sont polies manuellement au papier émeri de grades 800 et 1200, rincée à l'eau distillée puis séchée.



Figure II.2 : Electrode de travail en acier sous forme de plaque.

➤ Contre électrode (CE) ou électrode auxiliaire

Une plaque de platine de petite surface inférieure à celle de l'électrode de travail est utilisée comme électrode auxiliaire. Le rôle de cette électrode est d'assurer le passage du courant dans la cellule électrochimique.



Figure II.3 : Contre électrode.

➤ Electrode de référence

C'est une électrode dont le potentiel est stable et reproductible quel que soit le milieu dans lequel est prolongée. L'électrode de référence utilisée est au calomel saturé au KCl noté

(ECS). Elle est placée aussi près que possible de l'électrode de travail afin de diminuer les erreurs de mesure dues à la chute ohmique.

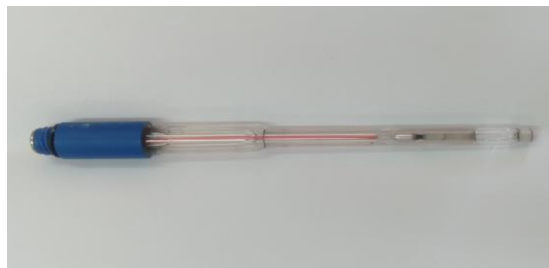


Figure II.4 : Electrode de référence ECS.

I.2.3. Electrolytes

➤ Milieu d'étude

Les tests de corrosion ont été réalisés en immergeant les plaques d'acier dans 50ml de solution de chlorure d'hydrogène HCl à 0.5M préparée à partir d'une solution commerciale d'acide chlorhydrique (36.5%). Les essais de corrosion ont été réalisés à température ambiante dans une solution non agitée.

➤ Préparation des poudres de la plante *Paronychia argentea*

Durant notre travail, nous avons testé la partie aérienne de la plante *Paronychia argentea*. Pour cela, nous avons séparé la fleur et la tige de la plante séchée (Figure.II.5). Ils ont été broyées à l'aide d'un broyeur électrique et le broyat obtenu a été conservé dans des sachets à température ambiante, dans un endroit sec et à l'abri de l'humidité et de la lumière jusqu'à son utilisation.

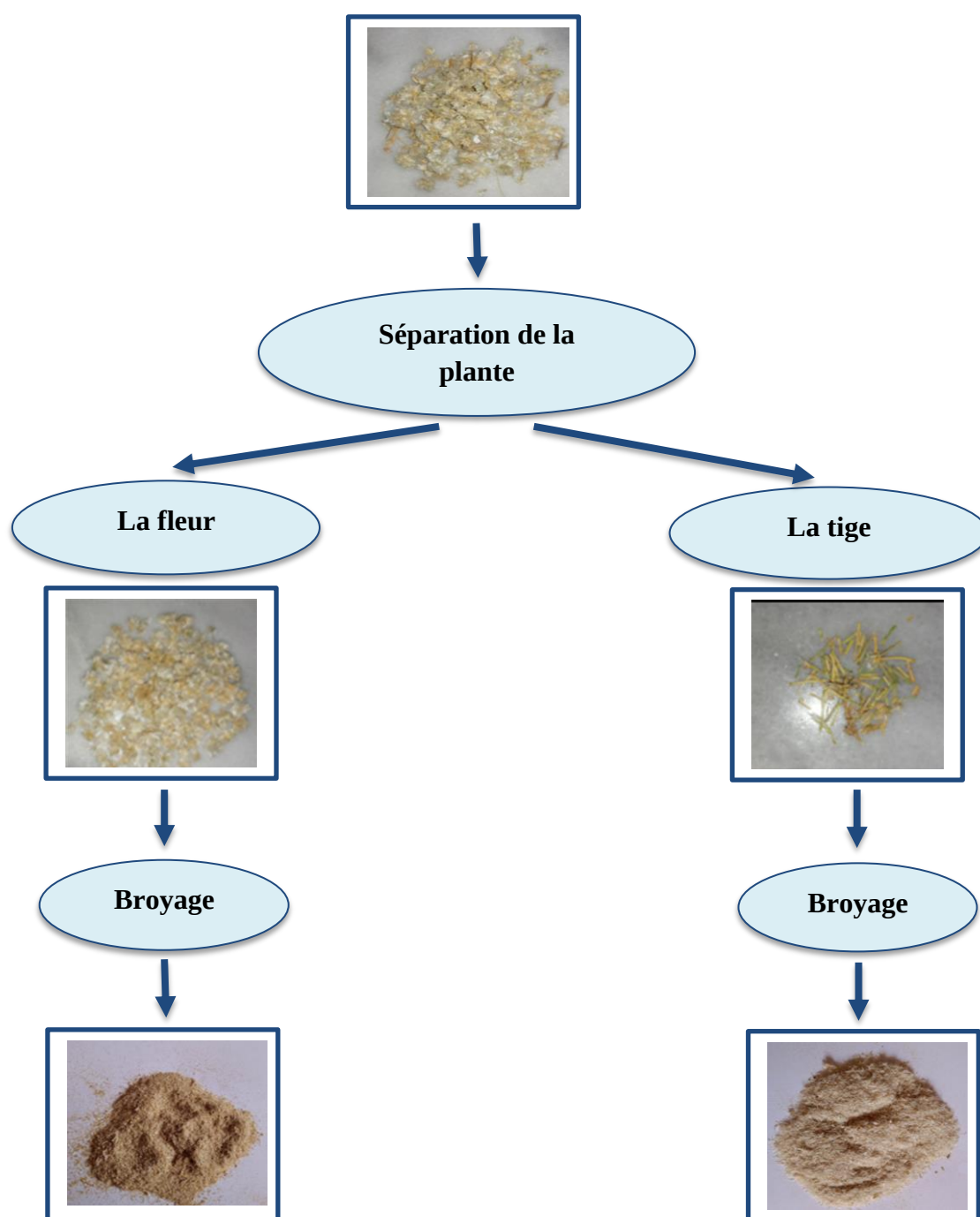


Figure II.5 : Schéma représentatif des étapes de préparation du broyat.

➤ **Préparation de l'extrait de plante *Paronychia argentea* par infusion**

L'infusion est une méthode d'extraction des principes actifs ou des arômes d'un végétal par dissolution dans un liquide initialement bouillant que l'on fait refroidir.

Le protocole de l'infusion de cette plante est le suivant :

- Peser 10 gramme de la matière végétale (tige ou fleur) ;
- Chauffer de l'eau distillé dans un ballon jusqu'à ébullition ;
- Mettre la matière végétale (10 g) dans l'eau bouillante ;
- Laisser bouillir pendant 2 à 3 min ;
- Laisser refroidir pendant 15 min ;
- Filtrer sous vide sur du papier filtre ;
- Récupérer le filtrat dans un flacon.



Figure II.6 : Infusion dans un ballon et filtration sous vide des extraits de plante.

La préparation de la solution corrosive en présence de l'extrait de plante se fait en ajoutant à un volume approprié de l'extrait, un volume de la solution de HCl 1M et de l'eau distillée afin d'obtenir une solution de HCl 0,5M et une concentration donnée de l'extrait. Dans le cadre de notre étude, l'extrait est ajouté dans la solution corrosive dans une gamme de pourcentage volumique compris entre 2 et 10% vol/vol, en vue de déterminer la concentration optimale.



Figure II.7 : Filtrat.

II.3. Dispositifs électrochimiques utilisés

Deux montages ont été utilisés afin de réaliser les mesures électrochimiques :

- Un voltalab Economical-Potentiostat de type PGP201 potentiostat/galvanostat guidé par un micro-ordinateur qui permet la réalisation de plusieurs mesures électrochimiques. Ce potentiostat est piloté par un logiciel volta master 4 permettant l'acquisition et le traitement éventuel des résultats expérimentaux (figure.II.8).



Figure II.8 : Représentation de l'appareillage électronique PGP201 Potentiostat/Galvanostat.

- Le deuxième montage ayant servi à cette étude est représenté par la figure.II.9. Le dispositif est constitué d'un seul appareil de mesure de marque AUTOLAB commandé par le logiciel GPES pour les mesures voltamétrique, et le FRA pour les mesures d'impédances électrochimiques. Durant notre étude, toutes les mesures électrochimiques ont été réalisées sous contrôle potentiostatique au moins trois fois afin de s'assurer de la reproductibilité des essais.



Figure II.9 : Représentation de l'appareillage électronique AUTOLAB.

II.4. Techniques d'étude

Afin d'étudier les propriétés inhibitrices de notre extrait, nous avons utilisé deux types de méthode : la méthode gravimétrique et les méthodes électrochimiques. Elles vont nous permettre de tester l'efficacité inhibitrice de l'extrait et de déterminer les mécanismes et le mode d'action de cet inhibiteur. Des méthodes d'analyses en solution et de surface ont été aussi utilisées durant notre travail.

II.4.1. La gravimétrie

Cette méthode relativement simple, ne nécessite pas un appareillage important, mais elle ne permet pas l'approche des mécanismes mis en jeu lors de la corrosion. Elle consiste à exposer des échantillons de surface S dans un milieu corrosif maintenu à température constante pendant un temps t bien déterminé et à mesurer la différence de masse Δm des échantillons avant m_i et après m_f pour chaque essai. La vitesse de corrosion V_{corr} est donnée par la relation suivante [1] :

$$V_{corr} = \frac{\Delta m}{S \cdot t} \quad \text{Eq.II.1}$$

Avec : $\Delta m = m_i - m_f$

La gravimétrie est une méthode précise comparant aux méthodes électrochimiques. Cependant, elle présente trois inconvénients : elle est destructive, longue et ne donne qu'une vitesse moyenne sur la durée de l'essai.

La figure.II.10 montre une image des tests gravimétriques réalisés au laboratoire :

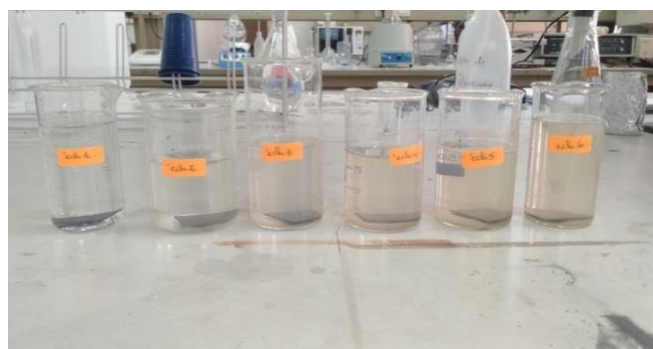


Figure II.10 : Méthode gravimétrique.

II.4.2. Techniques électrochimiques

Les méthodes électrochimiques peuvent être classées selon deux groupes : les méthodes stationnaires et les méthodes non-stationnaires dites transitoires. D'un point de vue phénoménologique, la caractérisation de l'adsorption d'un composé est possible par le suivi dans le temps du potentiel en circuit ouvert. On obtient par cette mesure une caractérisation de la modification de l'interface métal/milieu. L'aspect plus quantitatif (tracé des courbes de polarisation, spectroscopie d'impédance) permet, quant à lui, d'accéder à des valeurs de paramètres physiques décrivant l'état du système.

II.4.2.1. Méthodes stationnaires

III.1.1. Suivi du potentiel à circuit ouvert (OCP)

Le potentiel en circuit ouvert est appelé aussi potentiel spontané, potentiel d'abandon, potentiel de repos ou encore potentiel libre [2]. C'est une grandeur électrochimique immédiatement mesurable. C'est la seule mesure qui n'entraîne absolument aucune perturbation de l'état du système étudié. Au bout d'un temps suffisamment long pour qu'un régime stationnaire soit établi, l'électrode métallique prend, par rapport à la solution, un potentiel appelé potentiel de corrosion (E_{corr}). Toutes les valeurs de ce potentiel (E_{corr}) sont référées par rapport à un potentiel de référence (électrode de référence). Le suivi du potentiel libre en fonction de temps est une information parfois utile pour appréhender le comportement d'un matériau au contact d'un milieu corrosif humide. Il fournit des informations sur les transformations préliminaires et sur la nature des processus en cours à l'interface métal/électrolyte : corrosion, passivation, etc... [3].

Cette technique consiste à mesurer le potentiel de l'électrode de travail en fonction du temps d'immersion. Elle nous permet de déterminer le type d'inhibiteur (anodique ou cathodique) suivant le sens de déviation du potentiel par rapport au potentiel mesuré en absence d'inhibiteur. Si l'inhibiteur a un caractère mixte, aucune indication n'est donnée par la faible variation du potentiel [4].

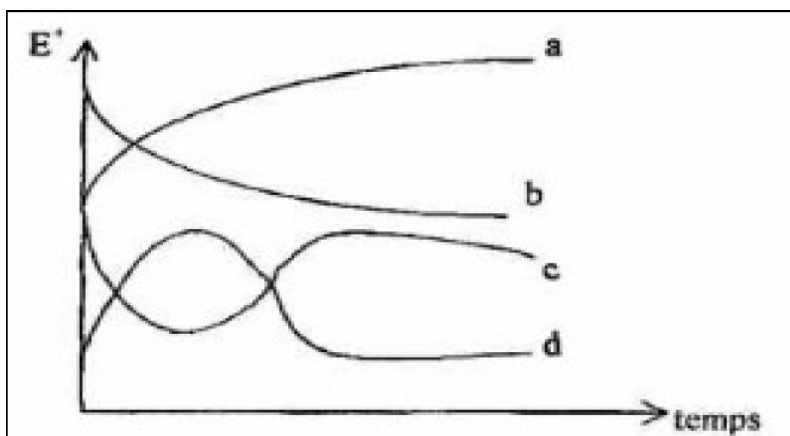


Figure II.11 : Les différentes allures des courbes OCP.

- **La courbe a** : représente la passivation du métal (formation d'une couche), le potentiel devient de plus en plus noble.
- **La courbe b** : représente la dissolution du métal, le potentiel est lié à l'oxydation, le potentiel devient de moins en moins noble, ou plus négatif.
- **La courbe c** : elle est formée de deux parties, le potentiel devient d'abord plus négatif, puis tend vers des valeurs plus positives, il y a une attaque suivie de passivation. La première partie est le début d'oxydation du métal (démarrage d'oxydation mais non durable) tandis que la deuxième partie est la partie dont le métal subit une passivation. Durant cette deuxième partie, le métal forme des complexes.
- **Courbe d** : formée de deux parties, le potentiel devient plus noble puis se déplace vers des valeurs plus négatives. C'est le cas lorsqu'au moment de son immersion, le métal est recouvert d'une couche protectrice, celle-ci se développe dans un temps plus ou moins long puis elle est détruite. Le métal est alors mis à nu.

III.1.2. Courbes de polarisation (Tafel)

Les courbes de polarisation permettent de confirmer les indications données par l'évolution du potentiel de corrosion en fonction du temps, d'estimer la vitesse de corrosion et l'influence de l'inhibiteur sur chacune des réactions élémentaires anodique et cathodique de l'électrode de travail.

Cette méthode permet de déterminer d'une façon précise les paramètres électrochimiques d'un métal au contact d'un électrolyte à savoir : le courant de corrosion (I_{corr}), le potentiel de corrosion (E_{corr}), les pentes de Tafel (b_a et b_c) et la résistance de polarisation (R_p). Elle donne

des mesures rapides et les taux de corrosion calculés sont d'une précision égale ou supérieure aux méthodes classiques de perte de poids.

Elle consiste à imposer une rampe linéaire de potentiel E à l'électrode de travail et à mesurer sa réponse en courant I . Le balayage en potentiel permet d'obtenir la courbe de polarisation $I = f(E)$ qui est caractéristique des phénomènes électrochimiques se déroulant à l'interface électrode de travail/électrolyte sur la plage de potentiels étudiée.

Pour déterminer expérimentalement les paramètres électrochimiques, une présentation logarithmique de la densité de courant est mieux adaptée, car elle met en évidence la relation linéaire entre le logarithme de la densité de courant et le potentiel (figure.II.12)

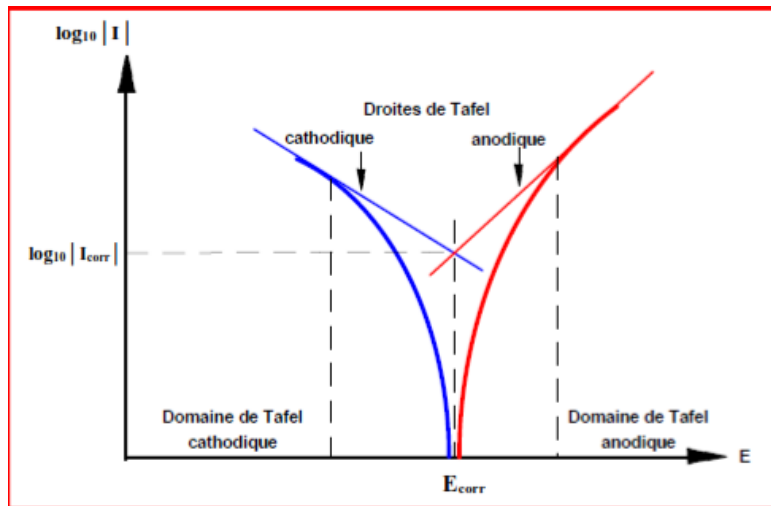


Figure II.12 : Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel.

➤ Détermination de la vitesse de corrosion

La vitesse de corrosion V_{corr} du métal, exprimée en épaisseur de matériau dissout par unité de temps, est reliée au courant de corrosion i_{corr} par la relation suivante [5]:

$$V_{corr} = \frac{(i_{corr} \cdot t \cdot M)}{n \cdot F \cdot \rho} \quad \text{Eq.II.2}$$

Où: t : le temps d'immersion en s,

M : la masse molaire du métal, $M_{Fe} = 55,8$ g/mol,

n : le nombre d'électrons échangés dans la réaction d'oxydation du métal,

F : la constante de Faraday (96485 C/mol),

ρ : la masse spécifique du métal (7,86 g/cm³).

➤ Détermination de la résistance de polarisation

La résistance de polarisation R_p (ohm/cm) reliée au courant de corrosion, est donnée par la relation de Stern et Garry [6] :

$$R_p = \left(\frac{b_a b_c}{2.3(b_a + b_c)} \right) * \left(\frac{1}{i_{corr}} \right) \quad \text{Eq.II.3}$$

Où: b_a et b_c sont les coefficients de Tafel qui peuvent être estimés à partir du tracé des droites de Tafel.

i_{corr} : la densité de courant de corrosion en A/cm^2

II.4.2.2. Méthodes non stationnaires

Les différentes techniques non stationnaires ou transitoires se distinguent les unes des autres par la forme du signal respectif appliqué (une impulsion, un balayage ou une modulation).

Dans cette partie, on ne va définir que la méthode utilisée lors de nos expériences qui est la Spectroscopie d'impédance électrochimique

II.4.2.2.1. La spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE)

La spectroscopie d'impédance électrochimique est une méthode non-stationnaire qui permet d'avoir des informations sur les étapes élémentaires qui constituent le processus électrochimique global. La méthode d'impédance est une des puissantes techniques utilisées dans le domaine de l'électrochimie et des matériaux. Elle donne des renseignements sur les propriétés de transport de charge au sein des matériaux et des phénomènes électrochimiques qui se produisent aux interfaces électrode- solution [7].

➤ Principe du phénomène

Lors de la mise en contact d'une électrode et d'un électrolyte, différents phénomènes physiques et physico-chimiques s'amorcent, chacun suivant sa propre cinétique, et conduisent le système vers un équilibre thermodynamique. Ces phénomènes vont dépendre en partie du potentiel de surface de l'électrode et de celui présent au sein d'électrolyte. Du côté de l'électrode, le potentiel est constant en tout point de la surface. Par contre, dans la solution, ceci a pour conséquence de créer une variation de potentiel et de courant dans l'électrolyte, qui conduit au concept de résistance d'électrolyte, l'électrode de référence et la contre-électrode sont placées relativement loin de la surface de l'électrode de travail [8].

La spectroscopie d'impédance électrochimique permet de distinguer les divers processus (réaction de transfert de charge, adsorption, transport de masse....) d'une réaction globale lorsqu'elles ont des constantes de temps suffisamment différentes. Seuls les processus rapides (transfert de charge) sont caractérisés à haute fréquence (HF) ; lorsque la fréquence appliquée diminue ou basse fréquence (BF), il apparaîtra la contribution des étapes les plus lentes, comme les phénomènes d'adsorption ou de diffusion (en solution ou bien dans une couche poreuse).

Son principe consiste à superposer au potentiel de l'électrode, en un point stationnaire de la courbe $I = f(E)$, une modulation de potentiel sinusoïdale de faible amplitude et à suivre la réponse en courant pour différentes fréquences du signal perturbateur.

A l'instant t , la valeur du potentiel de l'électrode est exprimée en fonction de sa composante stationnaire E_0 et d'un terme sinusoïdal :

$$E(t) = E + \Delta E / \sin(\omega t) \quad \text{Eq.II.4}$$

La réponse en courant du système et :

$$I(t) = I + \Delta I / \sin(\omega t - \varphi) \quad \text{Eq.II.5}$$

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

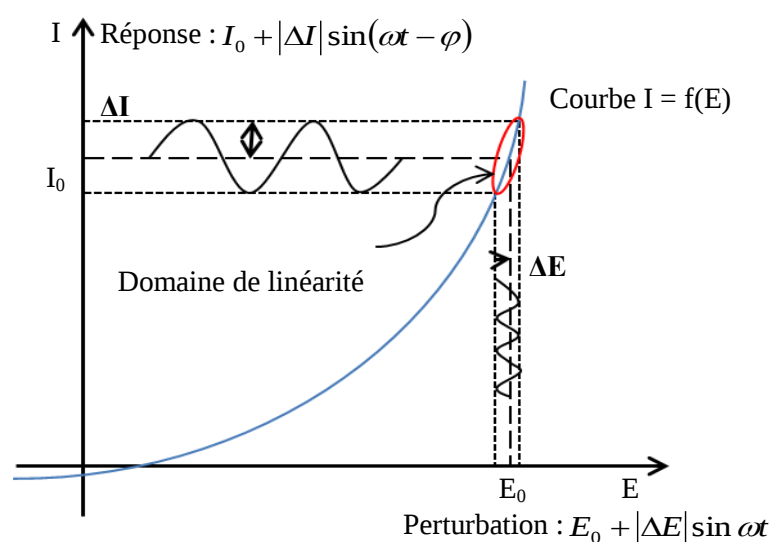


Figure II.13 : Schéma de principe de l'impédance électrochimique.

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 :

$$Z(\omega) = \frac{\Delta E(\omega)}{\Delta I(\omega)} \quad \text{Eq.II.6}$$

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

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

$$\text{Forme algébrique : } Z(\omega) = Z_r(\omega) + jZ_j(\omega)$$

$$\text{Forme exponentiel : } Z(\omega) = |Z(\omega)| e^{j\varphi(\omega)}$$

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

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

$$Z_r(\omega) = |Z(\omega)| \cos(\varphi) \quad \text{Eq.II.7}$$

$$Z_j(\omega) = |Z(\omega)| \sin(\varphi) \quad \text{Eq.II.8}$$

$$\text{Tel que : } |Z(\omega)| = \sqrt{(Z_r + Z_j)^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1}(Z_j / Z_r)$$

Il existe deux modes de représentation des diagrammes d'impédance électrochimique (Figure.II.14. (a)) : la première représentation en coordonnées cartésiennes est dite dans le plan complexe de Nyquist ou l'opposé de la partie imaginaire $-Z_j(\omega)$ est tracé en fonction de la partie réelle Z_r pour différentes fréquences.

La représentation de Bode (Figure.II.14. (b)) est la deuxième représentation classique pour visualiser les diagrammes. Dans ce cas, le module de l'impédance $|Z(\omega)|$ et le déphasage φ sont tracés en fonction de la fréquence en coordonnées bi logarithmiques.

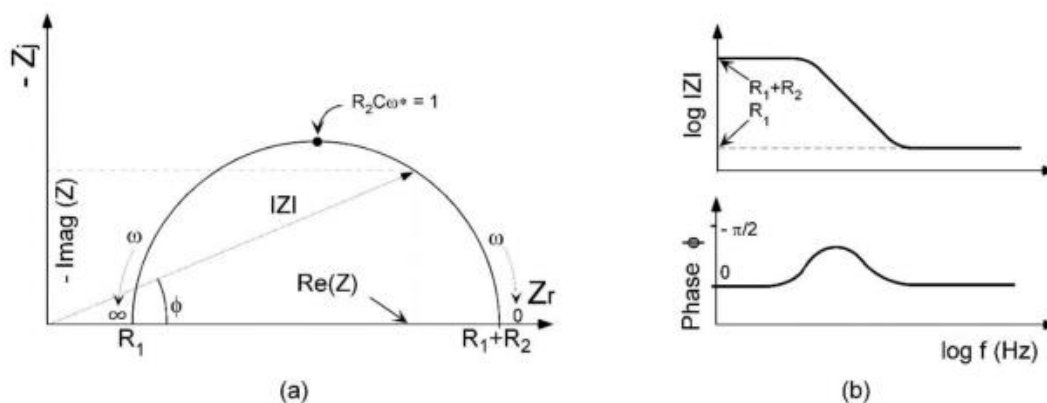


Figure II.14 : Représentation de l'impédance électrochimique : diagramme de Nyquist **(a)** et diagramme de Bode **(b)**.

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 en haute fréquence alors que la représentation de Bode offre la vision complète du domaine de fréquence, tout en étant moins représentatif pour identifier certains phénomènes caractéristiques.

Références bibliographiques

- [1] **R.K. Ahmed**, « Bee pollen extract an an eco-friendly corrosion inhibitor for pure copper in hydrochloric acid », Journal of Molecular, 316,(2020).
- [2] **H. Mazille**, « Corrosion des métaux et alliages : corrosion génie industriel, centre d'actualisation scientifique et technique », INSA, Lyon, 1984.
- [3] **F. Constantine**, « Etude de l'efficacité d'inhibiteurs de corrosion utilisés dans les liquides de refroidissement », Thèse doctorat, Université de Pitesti Roumanie, (2011).
- [4] **A.D. Mercer**, « Testing techniques in corrosion inhibition, 6th Symposium européen sur les inhibiteurs de corrosion », Ferrara, Italy, 729, (1985).
- [5] **Y. Belloul. C. Djouhra**; « Propriétés protectrices d'un polysavon 80C12 réducteur de frottement hydrodynamique application à l'inhibition de la corrosion du cuivre »; mémoire de magister, .Université A. MIRA; Bejaia, (2018).
- [6] **K. E. Heusler, G. H. Cartledge**; « the influence of iodide ions and carbon monoxide on the anodic dissolution of active iron »; J. Electrochem. Soc. 108, (1961).
- [7] **B.Mezhoud**; « Synthèse des inhibiteurs contre la corrosion des aciers »; mémoire de magister, Université MENTOURI; Constantine, (2011).
- [8] **A. BELAID**, « Etude par spectroscopie d'impédance électrochimique l'épaisseur d'un film de sulfate de métaux au niveau des installations industriels et des puits pétroliers de la région Ourhoud », Mémoire de master, Université d'El OUED, (2013).

Chapitre III

Résultats et discussion

III.1. Introduction

La majorité des inhibiteurs utilisés aujourd'hui sont, soit synthétisés à partir de matières premières peu coûteuses, soit ils proviennent de composés organiques ayant des hétéroatomes tels que l'azote, le soufre, le phosphore et l'oxygène dans leur système aromatique ou dans leur chaîne carbonée. Cependant, la plupart de ces substances anticorrosives sont toxiques et nuisibles à l'être humain et l'environnement. La toxicité de ces composés se manifeste durant la synthèse ou durant leurs applications. Ces inconvénients ont orienté la recherche vers les substances naturelles qui peuvent offrir des propriétés inhibitrices vis-à-vis des métaux et des alliages.

Plusieurs inhibiteurs de corrosion ont été développés à partir de matières premières naturelles. Certains produits naturels tels que les acides aminés, les biopolymères, les protéines et l'extraction de plantes ont montré une bonne influence en tant qu'inhibiteurs de corrosion [1]. Les extraits de plantes qui peuvent être extraits par des procédures simples et peu coûteuses sont considérés comme une bonne source d'inhibiteurs verts synthétisés naturellement [2].

L'objectif de notre travail est d'étudier l'efficacité inhibitrice de l'extrait des fleurs et des tiges de la plante médicinale *Paronychia Argentea* (PA), obtenu par la méthode de l'infusion dans l'eau. Le milieu corrosif considéré est l'acide chlorhydrique concentré à 0.5M.

III.2. Etude gravimétrique

Les mesures de la perte en poids sont souvent prises comme une première approche de l'étude de l'inhibition de la corrosion d'un métal dans une solution électrolytique. Cette méthode présente l'avantage d'être facile à mettre en œuvre et qui ne nécessite pas un appareillage spécial et important [3,4].

Les plaques d'acier sont immergées dans la solution corrosive HCl à 0,5M sans et avec addition de différents pourcentages volumiques de l'extrait de fleur de PA. Le phénomène de corrosion étant un phénomène lent, la masse des plaques et l'efficacité de l'extrait est déterminé après un intervalle de temps de 2 heures d'immersion pendant 5 jours à la température ambiante.

L'ensemble des résultats obtenus de la perte en masse en fonction du temps d'immersion en absence et en présence de différents pourcentages volumiques de l'extrait de fleur de PA dans la solution HCl à 0,5M sont présentés sur la figure.III.1

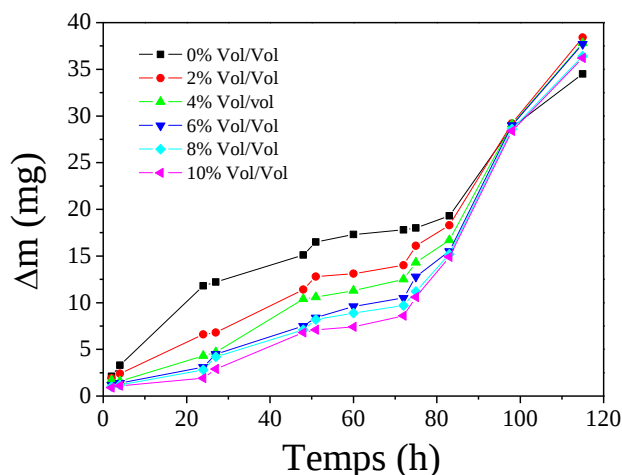


Figure.III.1 : Variation de la perte de masse après presque 5 jours d'immersion dans le milieu HCl 0,5M en fonction du pourcentage volumique de l'extrait des fleurs de PA.

La figure.III.1 montre une augmentation progressive de la perte de poids de l'acier avec le temps d'immersion et en absence de l'extrait dans le milieu HCl 0,5 M. Cependant, la présence de l'extrait des fleurs de PA réduit de manière significative la perte de poids de l'acier. Ce comportement s'accroît avec l'augmentation de la quantité de l'extrait ajouté.

La diminution de la perte de poids en présence de l'extrait est probablement attribuée à la formation d'une couche protectrice composée par les molécules inhibitrices de l'extrait des fleurs de PA.

La présence de plusieurs groupements : oxygène, carbone, azote et aromatiques, est la principale raison de la protection de l'acier dans un milieu acide chlorhydrique à 0,5 M en présence d'un inhibiteur [5,6]. Dans le cas présent, cela est dû à la présence de constituants phytochimiques efficaces dans l'extrait des fleurs de PA.

Sur la base des résultats obtenus à partir des données de la perte de poids, l'efficacité d'inhibition de l'extrait des fleurs de PA a été calculée par la relation suivante :

$$EI(\%) = \left[\frac{\Delta m - \Delta m_{inh}}{\Delta m} \right] \times 100 \quad \text{Eq.III.1}$$

Où Δm et Δm_{inh} sont les valeurs de la perte de poids de l'acier après immersion sans et avec extrait des fleurs de PA respectivement.

Nous avons calculé parallèlement la vitesse de corrosion de l'acier dans la solution HCl 0,5M à partir de l'équation déjà définie dans le chapitre II (Eq.II.1).

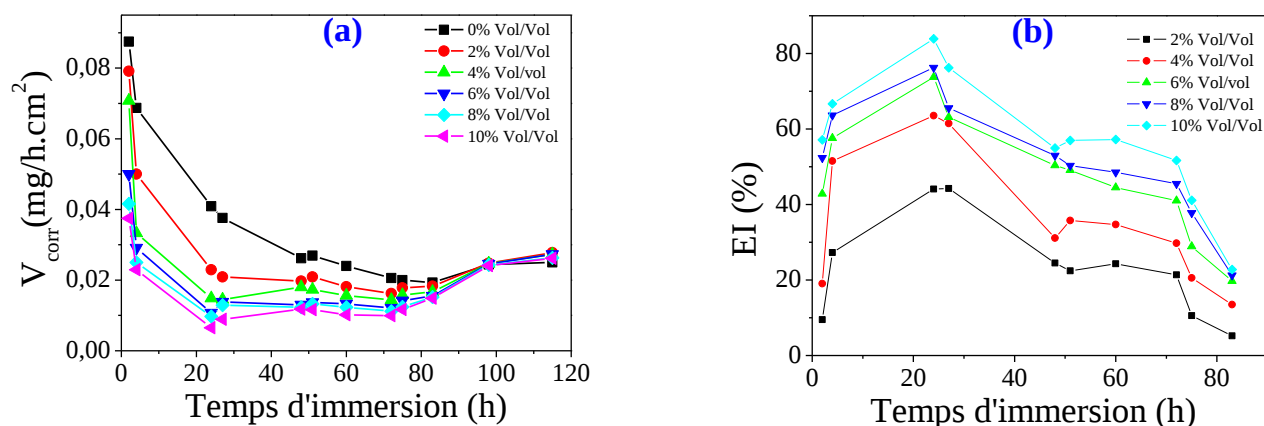


Figure.III.2 :(a) Evolution de la vitesse de corrosion et (b) de l'efficacité inhibitrice après presque 4 jours d'immersion dans le milieu HCl 0,5M en fonction du pourcentage volumique de l'extrait des fleurs de PA.

La figure.III.2 est la représentation graphique de la vitesse de corrosion (V_{corr}) et de l'efficacité de l'inhibition (EI) en fonction du temps d'immersion pour chaque pourcentage volumique en extrait des fleurs de PA ajouté à solution corrosive. On voit clairement que l'extrait inhibe efficacement la corrosion de la acier. En effet, la vitesse de corrosion diminue progressivement avec l'augmentation du pourcentage volumique de l'extrait, et la présence de 10% de ce dernier fait diminuer la vitesse de corrosion de 5 fois dès l'immersion et de 3,5 fois après 24h.

L'efficacité maximale atteinte est de 83% pour un pourcentage volumique de 10 et après 3 jour d'immersion, puis elle décroît jusqu'à une valeur de 22,79 % après 83h. La propriété de l'efficacité d'inhibition par l'extrait des fleurs de PA est probablement due à sa capacité d'être adsorbé sur la surface de l'acier en formant une couche protectrice assez stable couvrant la surface de l'acier.

III.3. Etude électrochimique

L'évaluation de l'efficacité inhibitrice déterminée par la méthode gravimétrique ne permet pas d'accéder aux mécanismes mise en jeu lors de la corrosion. Cependant, la technique électrochimique (Suivi du potentiel de corrosion, courbes de polarisation, spectroscopie d'impédance électrochimique) constitue une méthode plus complète puisqu'elles étudient la base des mêmes phénomènes de corrosion. L'aspect qualitatif de ces techniques permet d'accéder à des vitesses de réaction et à des valeurs de paramètres physiques décrivant l'état du système.

III.3.1. Suivi du potentiel de corrosion en fonction du temps

Avant d'étudier de manière approfondie le comportement de l'acier dans le milieu HCL à 0,5M contenant diverses quantités en extrait des fleurs de PA, il est intéressant de suivre d'abord l'évolution de son potentiel d'abandon en fonction de temps. En effet, les valeurs mesurées de ce potentiel résultent des réactions qui se déroulent à l'interface métal/solution. Cette mesure permet également de connaître la durée d'immersion nécessaire à l'établissement d'un régime stationnaire indispensable aux mesures potentiodynamiques ou d'impédances électrochimique. La valeur du potentiel libre, qui est le potentiel de corrosion, ne nous renseigne pas sur les cinétiques électrochimiques et ne permet pas d'accéder à la vitesse de corrosion [7].

Les courbes obtenues pour différents pourcentages volumique en extrait des fleurs de PA durant 60 minutes sont reportées sur la figure.III.3.

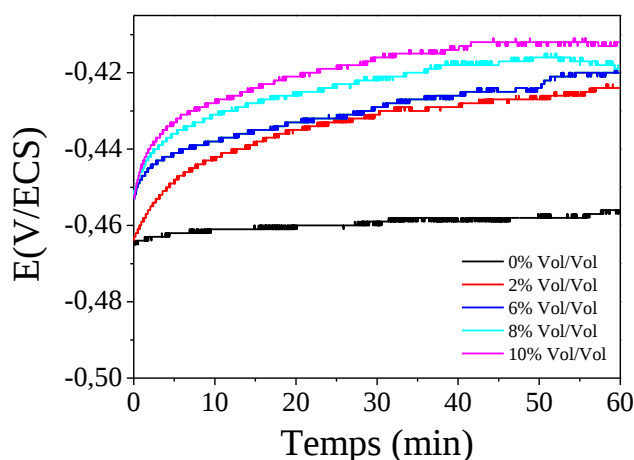


Figure.III.3 : Evolution du potentiel d'abandon des plaques d'acier en fonction de temps dans le milieu HCl 0,5M à différents pourcentages volumiques en inhibiteur PA

L'évolution du potentiel pour le test réalisé en absence de l'extrait des fleurs de PA caractérise la corrosion de l'acier avec formation de produits de corrosion. Le potentiel libre se stabilise après 20 minutes d'immersion à une valeur de - 458 mV/ECS dans le milieu HCl à 0.5M pour atteindre un état quasi stationnaire.

En présence des différents pourcentages volumique de l'extrait des fleurs de PA, nous observons un anoblissement du potentiel et il est d'autant plus marqué que la quantité en extrait est importante (10 %). Ceci peut être expliqué par le fait que les molécules composant l'extrait s'adsorbent de plus en plus efficacement sur la surface de l'acier formant une couche protectrice.

D'après ces résultats, l'évolution anodique du potentiel avec l'augmentation de la quantité en extrait des fleurs de PA, nous pouvons conclure que notre extrait est plutôt d'une action à tendance anodique [8].

III.3.2.Courbes de polarisation

Le comportement électrochimique de notre électrode de travail en acier dans le milieu d'étude est traduit par les courbes de polarisation i en fonction de E ($i = f(E)$). Les mesures ont été effectuées dans un intervalle de potentielle allant du potentiel d'abondan à -1000 mV pour les tracés cathodiques et du potentiel d'abondan à +500 mV pour les tracés anodiques, avec une vitesse de balayage de 1mV.s^{-1} .

Les courbes de polarisation anodique et cathodique enregistrées après 20 min d'immersion dans le milieu corrosif HCl 0.5M en absence et en présence de l'extrait des fleurs et de l'extrait des tiges de plante de PA sont illustrées sur la figure.III.4. et la figure.III.5 respectivement.

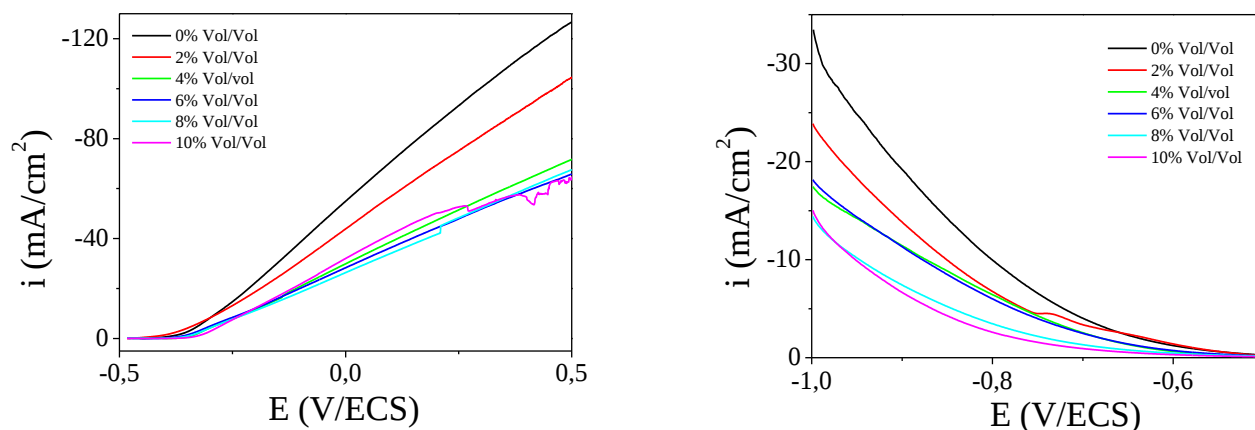


Figure.III.4 : Courbes de polarisation anodique et cathodique de l'acier dans milieu HCl 0,5M à différents pourcentage volumique en extrait des fleurs de PA.

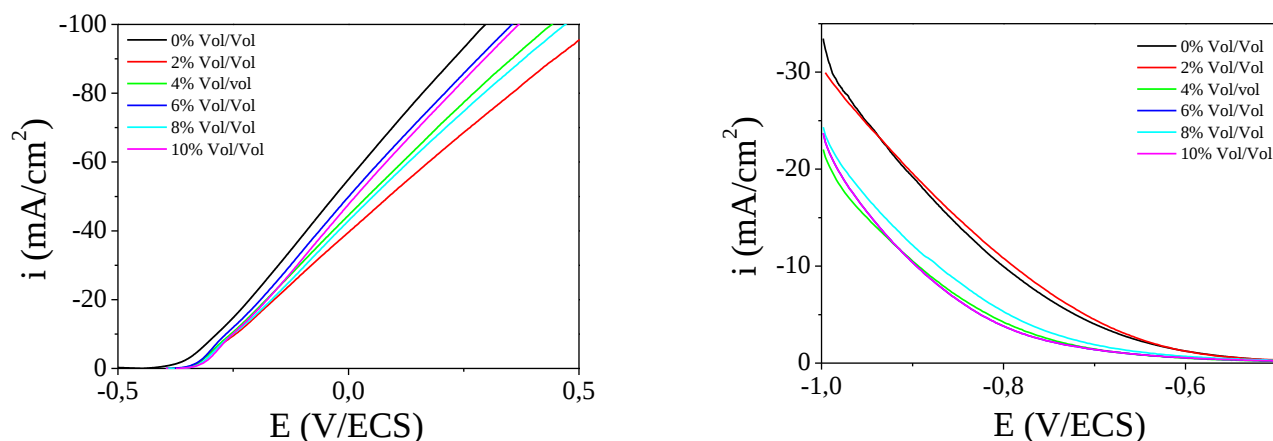


Figure.III.5 : Courbes de polarisation anodique et cathodique de l'acier dans milieu HCl 0,5M à différents pourcentage volumique en extrait des tiges de PA.

Dans le domaine cathodique, l'ajout des deux extraits de PA fait diminuer relativement les densités de courant de réduction de proton par rapport à la solution sans inhibiteur pour les différents pourcentages volumiques. Ce comportement traduit une action cathodique des deux extraits, qui peut être attribuée à l'adsorption des molécules composants les extraits sur les zones cathodiques.

Dans le domaine anodique, on enregistre un même comportement, c'est-à-dire diminution du courant anodique en présence des deux extraits. Cependant, l'ajout de l'extrait des fleurs de PA montre une diminution importante des courants anodiques et cathodiques comparant aux résultats obtenus en présence de l'extrait des tiges de PA.

Ces résultats nous permettent de conclure que les courants cathodiques et anodiques sont affectés par l'ajout des deux extraits et par conséquent, l'action de ces deux extraits est de type mixte.

Le tracé des courbes de Tafel (figure.III.6 (a) et (b)) nous permet d'accéder et d'exploiter les différents paramètres électrochimiques de la corrosion de l'acier dans ce milieu en absence et en présence des deux extraits de plante PA.

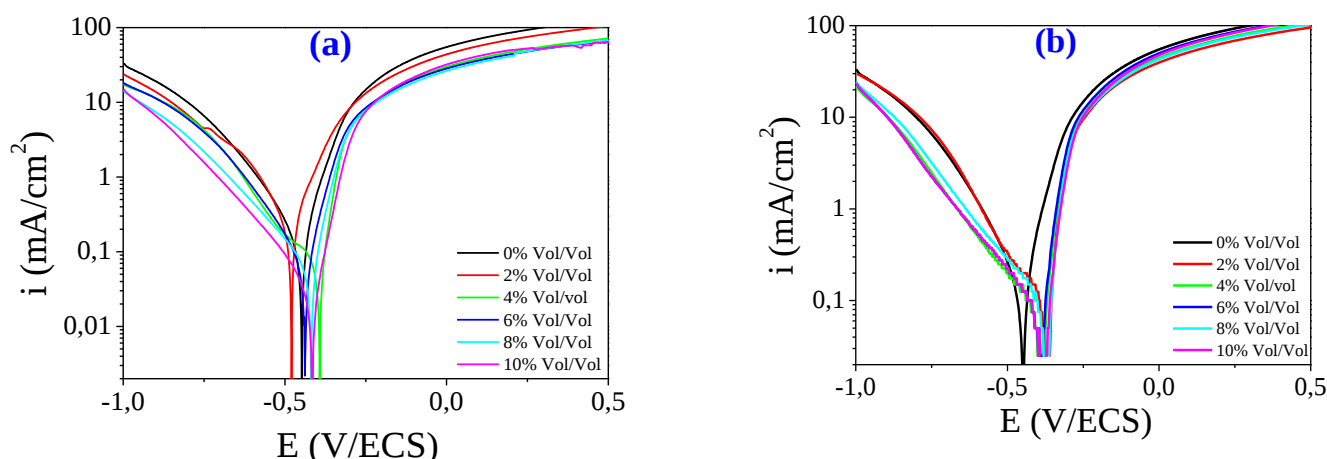


Figure.III.6 : Courbes de Tafel relatives à l'acier dans le milieu HCl 0,5 M à différents pourcentages volumique en extrait de PA : **(a)** des fleurs et **(b)** des tiges

Les valeurs des densités de courant de corrosion (i_{corr}), du potentiel de corrosion (E_{corr}), des pentes de Tafel cathodique et anodique (β_c et β_a), de l'efficacité de l'extraits (EI), de la résistance de polarisation (R_p) et de la vitesse de corrosion (V_{corr}) pour différents pourcentages volumiques des deux extraits dans le milieu HCl 0,5M sont reportées dans le tableau.III.1.

Tableau.III.1 : Paramètres de corrosion de l'acier dans le milieu HCl 0,5 M contenant les différents pourcentages volumiques des extraits de plante PA : extrait des fleurs et extrait des tiges, calculé par la méthode d'extrapolation de Tafel.

PA	V (%Vol /Vol)	E _{corr} (V/ECS)	i _{corr} (mA/cm ²)	β _c (V/dec)	β _a (V/dec)	R _p (ohm.cm ²)	V _{corr} (mm/an)	EI (%)
Extrait des fleurs	0	-0,443	1,199	0,448	0,229	54,95	13,91	-
	2	-0,476	0,548	0,318	0,167	86,87	6,36	54,29
	4	-0,383	0,329	0,348	0,125	121,53	3,82	72,56
	6	-0,438	0,275	0,283	0,114	128,48	3,19	77,06
	8	-0,423	0,236	0,353	0,110	154,50	2,74	80,31
	10	-0,438	0,181	0,273	0,109	187,12	2,09	85
Extrait des tiges	0	-0,443	1,199	0,448	0,229	54,95	13,91	-
	2	-0,368	0,534	0,359	0,084	55,42	6,195	53,21
	4	-0,384	0,403	0,418	0,100	87,05	4,675	66,38
	6	-0,393	0,352	0,400	0,089	89,92	4,084	70,64
	8	-0,376	0,325	0,393	0,08	88,92	3,771	72,89
	10	-0,382	0,212	0,386	0,083	140,09	2,459	82,31

L'efficacité inhibitrice (EI) est déterminée par la relation suivante :

$$EI(\%) = \frac{i_{corr} - i_{corr}^{ext}}{i_{corr}} * 100 \quad \text{Eq.III.2}$$

Ou i_{corr} et i_{corr}^{ext} sont les densités de courant de corrosion en absence et en présence de l'extrait respectivement, déterminés par extrapolation des droites de Tafel.

Les valeurs de la résistance de polarisation R_p sont calculées par application de la relation Stern-Geary :

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

Et la vitesse de corrosion est calculée à partir de l'équation (Eq.II.2) déjà définie dans le chapitre 2.

Les résultats obtenus montrent que les valeurs des densités de courant de corrosion diminuent en fonction du pourcentage volumique des extraits ajoutés dans la solution corrosive. Un déplacement du potentiel de corrosion vers des valeurs plus anodiques est enregistré. Ce comportement est un signe de la difficulté de l'oxydation de l'acier, ce qui dénote de l'adsorption des molécules composants les deux extraits à la surface de l'acier [9].

Une légère modification des pentes des droites de Tafel est observée en présence des extraits de PA. Ce résultat nous amène à suggérer que le mécanisme de réduction du proton n'est pas modifié par la présence des extraits de PA, ceci indique que ces derniers agissent seulement par un simple blocage des sites actifs à la surface de l'acier [10,11], et leurs actions sont de type mixte en milieu HCl 0,5M.

La résistance de polarisation et l'efficacité inhibitrice augmentent alors que la vitesse de corrosion diminue avec l'accroissement du pourcentage volumique en extraits. L'efficacité maximale atteinte en présence de l'extrait des fleurs et de l'extrait des tiges de PA est de 85% et 82,31% respectivement pour un pourcentage volumique de 10%.

Le résultat de l'efficacité obtenu en présence de l'extrait des fleurs de PA est en accord avec ceux déjà obtenus par gravimétrie et il présente une meilleure efficacité d'inhibition contre la corrosion de l'acier en milieu HCl 0,5M comme le montre la figure.III.7.

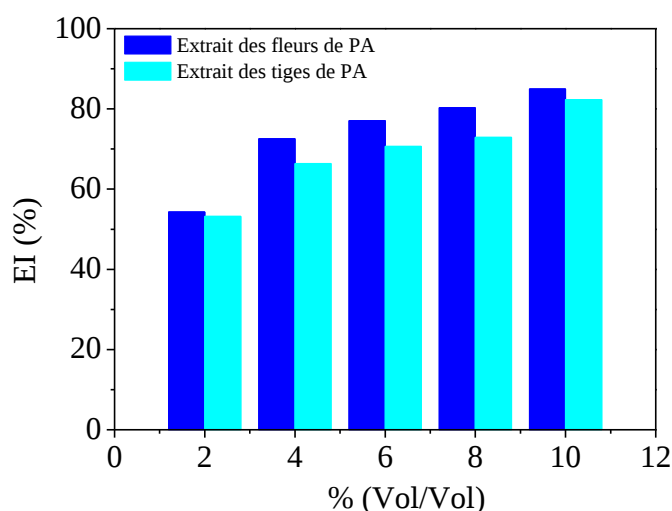


Figure.III.7 : Evolution de l'efficacité d'inhibition par les deux extraits (des fleurs et des tiges) de PA en fonction de leur pourcentage volumique dans le milieu corrosif HCl 0,5M.

III.3.3. Isotherme d'adsorption

L'inhibition de la corrosion des métaux en solution par les inhibiteurs de corrosion est expliquée par leur adsorption. Cette dernière est décrite par deux principaux types, à savoir, l'adsorption physique (physisorption) et l'adsorption chimique (chimisorption) [12]. Elle dépend de la charge du métal, de sa nature de la structure chimique de l'inhibiteur et du type d'électrolyte.

Afin de confirmer ou d'affirmer l'hypothèse que l'action d'un inhibiteur est basée sur un mécanisme d'action par simple adsorption à la surface du métal, bloquant ainsi les sites actifs, différents types d'isothermes ont été testés : Langmuir, Temkin et Frumkin [13].

Dans notre étude, les valeurs du taux de recouvrement (θ) pour les différents pourcentages volumiques en extrait des fleurs et des tiges de la plante PA, obtenus à partir des courbes de Tafel, ont été utilisées pour déterminer l'isotherme correspondante au processus d'adsorption. Le choix d'un modèle adéquat dépend de la valeur du coefficient de corrélation R^2 .

La valeur du taux de recouvrement de la surface du métal par l'extrait adsorbé (θ) est définie par la relation suivante :

$$\theta = \frac{i_{corr} - i_{corr}^{ext}}{i_{corr}} \quad \text{Eq.III.4}$$

Où i_{corr} et i_{corr}^{ext} correspondent respectivement aux densités de courant enregistrées dans la solution de HCl 0,5M en absence et en présence de l'extrait de la plante PA.

Le taux de recouvrement θ est relié au pourcentage volumique de l'extrait de plante PA par les équations suivantes :

- **Isotherme de Langmuir :**

$$\frac{C_{ext}}{\theta} = \frac{1}{k_{ads}} + C_{ext} \quad \text{Eq.III.5}$$

- **Isotherme de Temkin :**

$$e^{(-2a\theta)} = k_{ads} \cdot C_{ext} \quad \text{Eq.III.6}$$

- **Isotherme de Frumkin :**

$$\left(\frac{\theta}{1-\theta} \right) \cdot e^{(-2a\theta)} = k_{ads} \cdot C_{ext} \quad \text{Eq.III.7}$$

C_{ext} est le pourcentage volumique de l'extrait de plante PA, k_{ads} est la constante d'équilibre du processus d'adsorption et a est une constante d'interaction entre particules adsorbées.

Les résultats des calculs des différentes isothermes pour l'extrait des fleurs et l'extrait des tiges de la plante PA sont représentés sur la figure.III.8 et la figure.III.9 respectivement.

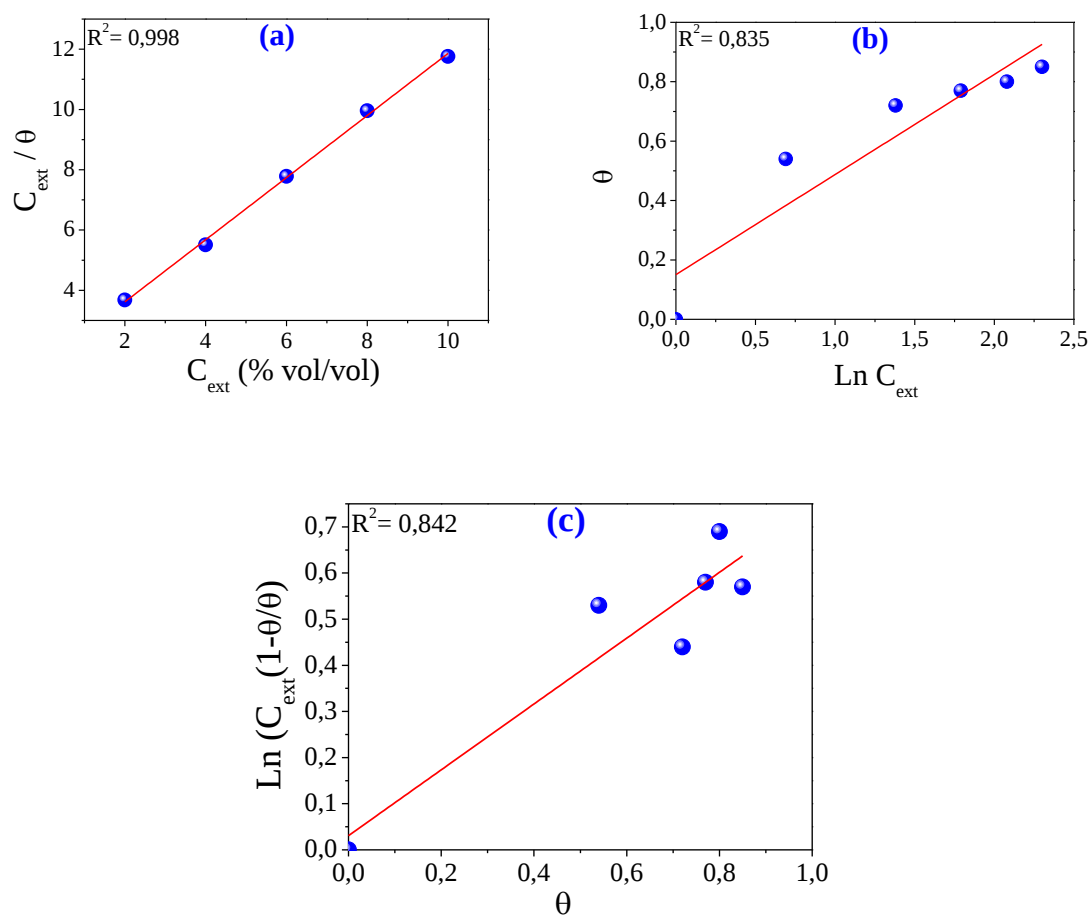


Figure.III.8 : Isothermes d'adsorption de l'extrait des fleurs de la plante PA sur l'acier dans la solution HCl 0,5M selon le modèle de : **(a)** Langmuir, **(b)** Temkin et **(c)** Frumkin

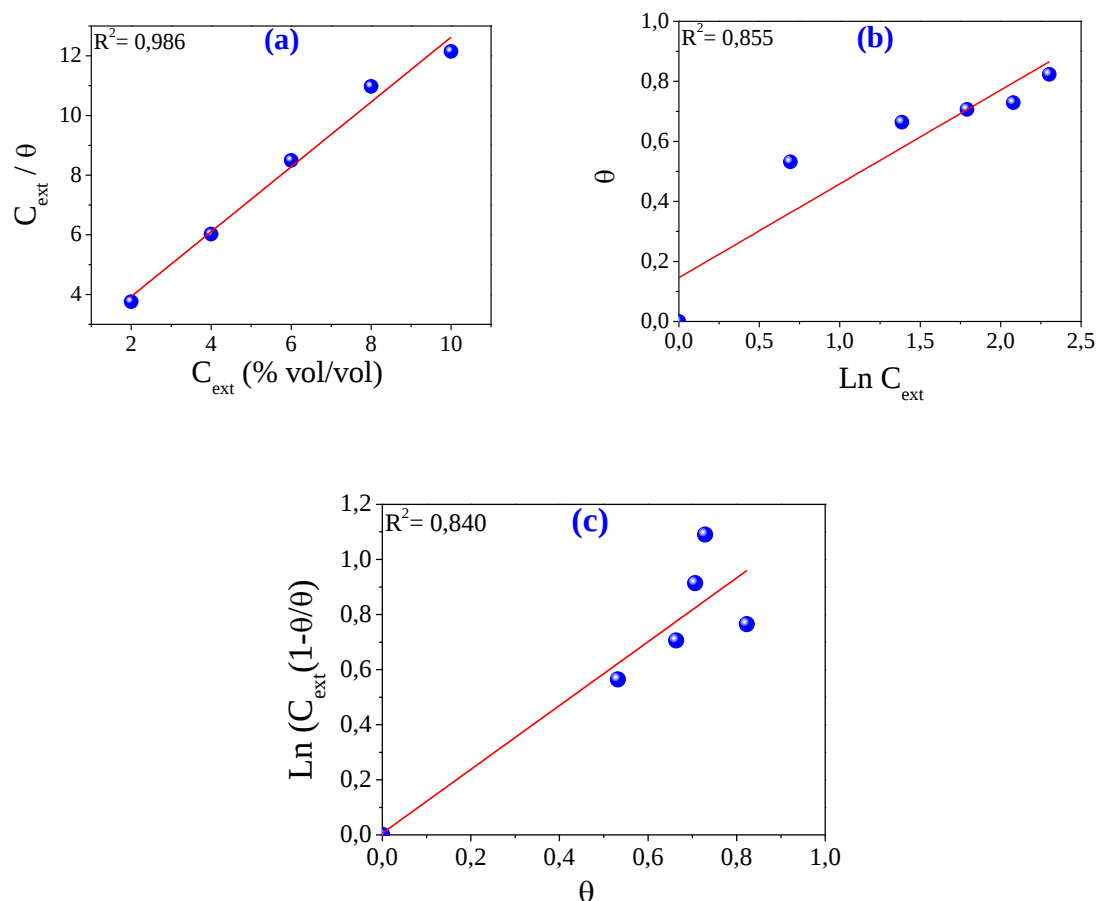


Figure.III.9: Isothermes d'adsorption de l'extrait des tiges de la plante PA sur l'acier dans la solution HCl 0,5M selon le modèle de : **(a)** Langmuir, **(b)** Temkin et **(c)** Frumkin

D'après les résultats, on remarque que la valeur du coefficient de corrélation linéaire pour l'isotherme de Langmuir est très proche de 1 pour les deux extraits, ce qui confirme que les molécules qui constituent les deux extraits s'adsorbent sur la surface de l'acier en formant des liaisons physiques.

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

$$k_{ads} = \frac{1}{55.5} \exp\left(\frac{-\Delta G_{ads}^{\circ}}{RT}\right) \quad \text{Eq.III.8}$$

R est la constante des gaz parfaits (8.314 kJ/mol.°K), T est la température absolue (298°K), et la valeur de 55.5 est la concentration d'eau en solution exprimée en (mol/l) [15] .

Les valeurs de k_{ads} et de ΔG_{ads}° trouvées par les trois isothermes et dans le cas des deux extraits sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau.III.2 : Valeurs calculées de k_{ads} et de ΔG_{ads}° pour les trois isothermes.

	Type d'isotherme	Langmuir	Temkin	Frumkin
Extrait des fleurs	k_{ads} (mol ⁻¹)	1,35	6,65	32,46
	ΔG_{ads}° (kJ/mol)	-10,69	-14,64	-18,57
Extrait des tiges	k_{ads} (mol ⁻¹)	0,568	6,85	165,289
	ΔG_{ads}° (kJ/mol)	-8,549	-14,718	-22,60

Pour savoir le type d'adsorption (physique, chimique ou mixte), la valeur négative de ΔG_{ads}° indique la spontanéité du processus d'adsorption et la stabilité de la couche adsorbée sur la surface métallique. Dans le cas d'une **adsorption physique**, les valeurs de ΔG_{ads}° sont voisines de -20 KJ/mol ou inférieures, elles sont liées à des interactions électrostatiques entre les molécules chargées et le métal chargé. Pour une **adsorption chimique**, les valeurs de ΔG_{ads}° sont proche ou supérieures à - 40 KJ/mol impliquent un transfert de charges entre les molécules organiques et la surface métallique. Si les valeurs de ΔG_{ads}° sont comprises entre -20 et -40 KJ/mol, l'adsorption peut se faire via un processus d'**adsorption mixte** [16 ,17].

Dans notre cas, les valeurs de ΔG_{ads}° calculées pour les deux extraits, des fleurs et des tiges, sont égale à -10,69 KJ/mol et -8,549 KJ/mol respectivement. Ces valeurs sont négatives et inférieur à - 20 KJ/mol indiquent que les molécules qui forment les deux extraits s'adsorbent spontanément à la surface de l'acier en formant une couche stable par interactions électrostatiques entre les molécules chargées des deux extraits et le métal chargé, ce qui confirme que l'adsorption est de type physique.

Par ailleurs, la valeur du coefficient d'adsorption k_{ads} dans le cas de l'extrait des tiges de PA est inférieure à celle trouvée pour l'extrait des fleurs de PA, ce qui indique une adsorption plus forte dans ce dernier cas confirmant son efficacité.

III.3.4. Spectroscopie d'impédance électrochimique

La technique d'impédance électrochimique permet de caractériser les mécanismes complexes, mettant en jeu plusieurs étapes réactionnelles et ayant des cinétiques caractéristiques différentes [18]. Les résultats de cette méthode sont obtenus sous forme de diagramme de

Nyquist. L'analyse du spectre d'impédance permet d'associer à chacune des étapes observables des diagrammes de Nyquist des grandeurs physiques représentatives. Ceci peut être abordé par la modélisation du spectre en proposant un circuit électrique équivalent [19].

Les mesures d'impédance électrochimique sont effectuées au potentiel d'abandon dans le milieu corrosif en régime linéaire avec un signal sinusoïdal d'amplitude de 10 mV sur un domaine de fréquence allant de 100 kHz à 10 mHz.

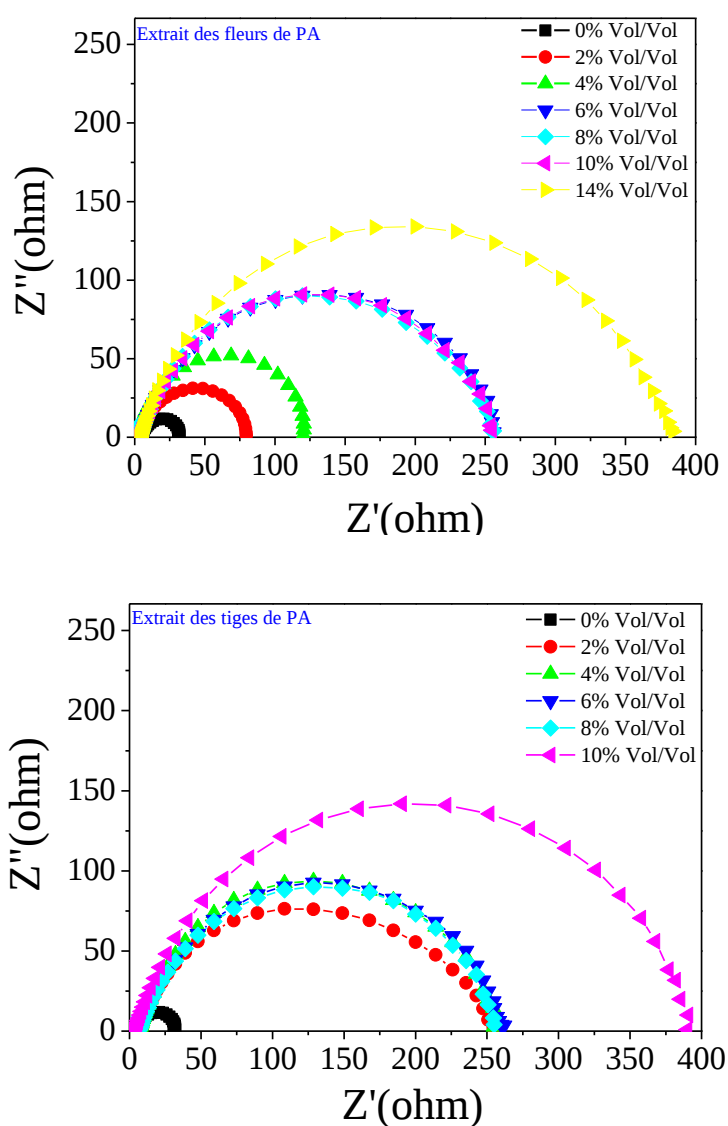


Figure III.10: Diagramme d'impédance de Nyquist de l'acier dans HCl 0.5M en absence et en présence des deux extraits de la plante PA.

Les spectres d'impédance, en représentation de Nyquist, obtenus au potentiel de corrosion pour différents pourcentages volumiques des deux extraits (des fleurs et des tiges) de la plante PA (figure.III.7) montrent la présence d'une seule boucle capacitive de forme semi-circulaire. Ce type de diagramme indique généralement que le processus de dissolution de l'acier est contrôlé par un processus de transfert de charge [9]. Il est bien clair, d'après la figure.III.7, que l'addition des extraits de PA provoque une augmentation de la taille des boucles (diamètre des boucles), donc une résistance croissante à la corrosivité du milieu. Ce comportement peut être dû à la formation d'une couche protectrice suite à l'adsorption des extraits sur la surface de l'acier [20,21].

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

$$C_{dl} = \frac{1}{2 \pi f_{\max} R_{tc}} \quad \text{Eq.III.9}$$

Où $f_{\max}$ est la fréquence pour laquelle la partie imaginaire de l'impédance est maximale.

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

$$EI(\%) = \frac{(R_{tc}^{inh} - R_{tc}^{\circ})}{R_{tc}^{inh}} * 100 \quad \text{Eq.III.10}$$

Où R_{tc}^{inh} et R_{tc}° représentent, respectivement les valeurs de la résistance de transfert de charge en présence et en absence des extraits de PA.

Les valeurs des paramètres électrochimiques pour les différents pourcentages volumiques en extraits de PA obtenues par la spectroscopie d'impédance électrochimique sont rassemblées dans le tableau.III.3

Tableau.III.3 : Paramètres électrochimiques de la corrosion de l'acier déduits des mesures d'impédances électrochimiques dans le milieu agressif HCl 0.5M contenant les différents pourcentages volumiques en extraits de PA.

PA	V	R_e	R_{tc}	f_{max}	C_{dl}	EI
	(%)	(ohm)	(ohm)	(ohm)	($\mu F/cm^2$)	(%)
Extrait des fleurs	0	3,67	26,62	11,78	5,075 E-4	-
	2	3,74	75,86	30,92	6,785 E-5	64,90
	4	4,05	116,78	42,56	3,202 E-5	77,19
	6	4,20	252,78	90,80	6,934 E-6	89,46
	8	3,99	253	90,73	6,933 E-6	89,47
	10	4,25	254,24	90,94	6,883 E-6	89,52
	14	4,5	377,84	134,12	3,141 E-6	92,95
Extrait des tiges	0	3,67	26,62	11,78	5,075 E-4	-
	2	3,34	239,73	76,00	8,73 E-6	90,37
	4	4,48	250,05	93,04	6,84 E-6	90,18
	6	6,02	254,91	92,50	6,75 E-6	89,76
	8	7,04	255,90	92,70	6,71E-6	90,03
	10	4,35	382,08	141,35	2,95 E-6	93,65

D'après ce tableau, nous constatons que la résistance de l'électrolyte R_e reste presque constante et proche de 4 ohm. L'ajout des l'extraits de PA dans la solution corrosive fait augmente la résistance de transfert de charge (R_{tc}) et diminuer la capacité du double couche (C_{dl}). La diminution de cette dernière peut être attribuée à l'adsorption des molécules des deux extraits à l'interface acier/électrolyte conduisant à la formation d'un film barrière insoluble qui conduit à la protection du métal contre la corrosion[9]. La variation de la résistance de transfert de charge et de la capacité de double couche sont illustrés sur la figure.III.3

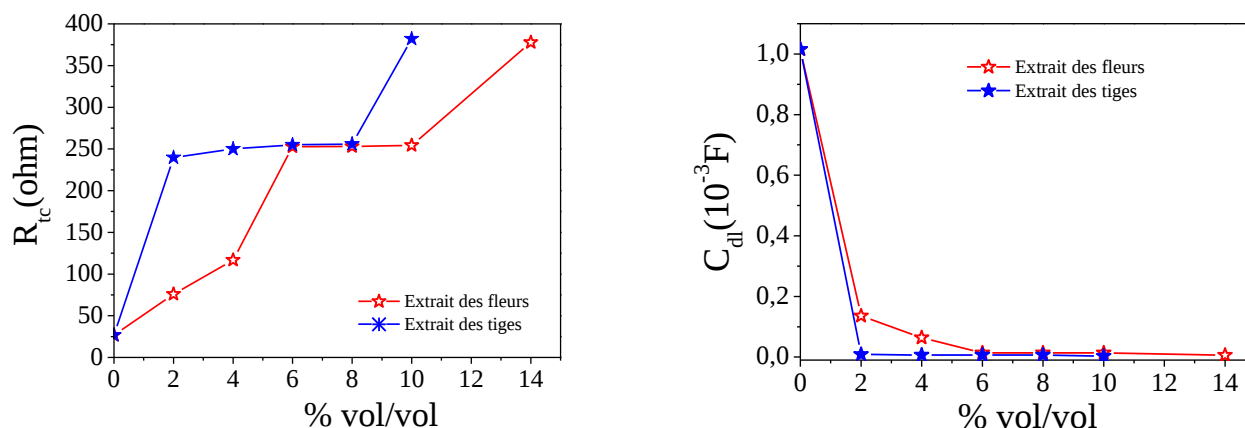


Figure.III.11 : Evolution de la résistance de transfert de charge et de la capacité de double couche en fonction de % volumique des deux extraits de PA.

L'efficacité d'inhibition des deux extraits de PA présenté sur la figure.III.6 est proportionnelle avec le pourcentage volumique ajouté à la solution corrosive et atteint la valeur de 89,52 % et de 93,65 % pour l'extrait des fleurs et des tiges de PA respectivement pour un pourcentage volumique de 10. Ce résultat confirme bien que les deux extraits inhibent efficacement la corrosion de l'acier.

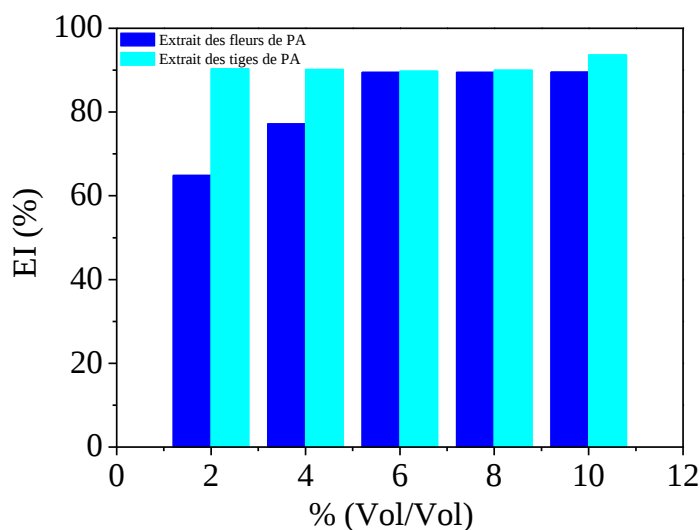


Figure.III.12 : Evolution de l'efficacité d'inhibition par l'extrait des fleurs et des tiges de PA en fonction du pourcentage volumique.

III.4. Conclusion

Le comportement à la corrosion de l'acier par l'extrait de la plante PA a été évalué par la méthode gravimétrique et les diverses méthodes électrochimiques. Les résultats obtenus montrent que l'extrait des fleurs et des tiges de PA ont une influence sur la perte en poids de l'acier en milieu corrosif HCl 0,5M. L'efficacité inhibitrice des deux extraits augmente avec l'augmentation de leurs pourcentages volumiques.

L'étude de la polarisation potentiodynamique a montré que les deux extraits agissent comme des inhibiteurs mixtes. Ils s'adsorbent à la surface de l'acier en formant des liaisons physiques selon l'isotherme de Langmuir. Les valeurs négatives de l'énergie libre calculées indiquent que le processus d'adsorption est spontané.

Les résultats obtenus par spectroscopie d'impédance électrochimique montre que la résistance de transfert de charge augmente et la capacité de la double couche diminue en présence des deux extraits de PA.

Références bibliographiques

- [1] **Sigircik. G, Tuken. T, and Erbil. M**, « Assessment of the inhibition efficiency of 3,4-diaminobenzonitrile against the corrosion of steel» *Corrosion Science*, vol. 102, pp. 437–445, (2016).
- [2] **Krishnaveni. K and Ravichandran. J**, «Effect of aqueous extract of leaves of *Morinda tinctoria* on corrosion inhibition of aluminum surface in HCl medium» *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 24, no. 8, pp. 2704–2712,(2014).
- [3] **A. Zaabar, R. Aitout, L. Makhloufi, K. Belhamel, et B. Saidani**, « Inhibition of acid corrosion of mild steel by aqueous nettle extract» , *Pigment Resin Technol*,1080(2014)145.
- [4] **A. Zaabar** . «oat extract as a naturel corrosion inhibitor for mild steel in 3% Nacl solution », *surf. Rev.Lett*, 2150084-458, (2021).
- [5] **Karthiga N.; Rajendran S.; Prabhakar P.; Rathish R.J.** «Corrosion Inhibition by Plant Extracts - An Overview. *Int. J. Nano. Corr. Sci. Engg.* », 2, 31-49, 2015.
- [6] **Matamala G.; Smeltzer W.; Droguett G.**« Comparison of Steel Anticorrosive Protection Formulated with Natural Tannin Extracted from Acacia and from Pine Bark. *Corros. Sci.*», 20, 42, 1351-1362,2000.
- [7] Constantine, «Etude de l'efficacité d'inhibiteurs de corrosion utilisé dans les liquides de refroidissement», Thèses, INSA de Lyon ; Universitateadin Pitesti. Facultatea den Liter, Romania, 2011.
- [8] **J. M. Abdel-Kader, A. A. EL-Warraky, A. M. Abdel-Aziz** «Corrosion inhibition of mild steel by sodium tungstate in neutral solution: Part 1: Behaviour in distilled water» *Br. Corros.J.* 33 (2) 139,(1998).
- [9] **Aida ZAABAR**; «Utilisation de l'extrait de le plante d'ortie (*Urticadioical*) comme inhibiteur de corrosion de l'acier dans les milieu HCl 0,5M et NaCl 3%», Mémoire de Magister, Université de Bejaia,(2010).
- [10] **A. Ehsan, M.G. Mahjani, M. Hosseini, R. Safari, R. Moshrefi, H. Mohammad Shiri**, «Evaluation of *Thymus vulgaris* plant extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for stainless steel 304 in acidic solution by means of electrochemical impedance spectroscopy, electrochemical noise analysis and density functional theory» *J. Coll Inter Sc*,490(137), (2017).
- [11] **G.Salinas-Solano, J. Porcayo-Calderon, L.M. Martinez de la Escalera, J. Canto, M. Casales- Diaz, O. Sotelo-Mazon, J. Henao L. Martinez- Gomez**, «Development and evaluation of a green corrosion inhibitor based on rice bran oil obtained from agro-industrial waste», *IndustCrps & Product*, (119)111,(2018).
- [12] **W.BOSKHEDENA**, thèse doctorat, université Mentouri- Constantine, 2018.
- [13] **A. Benchikh, R. Aitout, L. Makhloufi, L. Benhaddad, et B. Saidani**, «Soluble conducting poly(aniline-coorthotoluidine) copolymer as corrosion inhibitor for carbon steel in 3%NaCl solution », *Desalination* 249,466-474,(2009).

- [14] **Fouda,A.S.,Ellithy.A.S.**, , «Inhibition effect of 4-phenylthiazole derivatives on corrosion of 304L stainless steel in HCl solution », Corrosion Science 51,868-875,2009.
- [15] **L. Wang, X. Yin, W. Wang, L.Jin, Z. Li**, « N-benzylidene-4-dodecylaniline: a new Schiff base corrosion inhibitor for copper», International Journal of Electrochemical science, (9) 6088-6102,(2014).
- [16] **E. Khamis, F. Belluci, R.M. Latanision, E. S.H. El-Ashry**, , «Acid corrosion inhibition of nickel by 2-(triphenosphoranylidene) succinic anhydride», corrosion science»,(47)677-686,(1996).
- [17] **F.M. Donahue, K.** «Nobe.Theory of organic corrosion inhibitors: adsorption and linear free energy relationships, Journal of the Electrochemical Society», 112 886, (1965).
- [18] **V. F. Lvovich**, «Impedance spectroscopy: application to electrochemical and dielectric phenomena». John Wiley & Sons, (2012).
- [19] **S. S de A. A Pereira et al**, «Inhibitory action of aqueous garlic peel extract on the corrosion of carbon steel in HCl solution», Corros Sci, vol.65, p360-366, 2012.
- [20] **Shuba H.N., Venkatesha T.V, Vathsala K., Pavitra M.K, Punith Kumar M.K**, “«préparation of Self Assemble sodium oleate Mono layer on Mild Steel and Its corrosion inhibition behavior in Saline water», ACS Applied Materials & interfaces 5(21), 10738-10744, (2013).
- [21] **Haruna K., Obot I.B., Ankah N.K., Sorour A.A., Saleh T.A., Gelatin** : « A green corrosion inhibitor for carbon Steel in oil well acidizing environment, Journal of Molecular Liquids» 264, 515-525 ,(2018).
- [22] **Dong, L., Yuanhua, L., Yigang, D. and Dezhi, Z**, «Corrosion inhibition of carbon steel in hydrochloric acid solution by rice bran extracts, Anti-Corrosion Methods and Materials», Vol. 58 No. 4, pp. 205-210, (2011).
- [23] **Makhloufi, L., Saidani, B., Cachet, C. and Wiart, R**, «Cementation of Ni²⁺ ions from acidic sulfate solution on a rotating zinc disc», Electrochim. Acta, Vol. 43 Nos 21/22, pp. 3159-3164,(1998).

Conclusion générale

La corrosion reste un problème important pour de nombreux systèmes industriels qui utilisent de l'eau ou des acides dans leurs applications, comme les systèmes de refroidissement, les condenseurs, les échangeurs de chaleur et les moteurs.

Les extraits de plantes naturelles constituent un des principales sources inhibitrices de la corrosion des métaux. Ils sont disponibles, non toxiques, respectueux de l'environnement, biodégradables, hautement efficaces et renouvelables.

L'objectif principal de cette étude était de tester l'extrait de la partie aérienne de la plante *Paronychia argentea* (PA) en tant qu'inhibiteur vert de corrosion de l'acier dans la solution HCl à 0,5M.

Les résultats obtenus par les mesures de la perte de poids et les tests électrochimiques ont démontré que l'extrait des fleurs et des tiges de la plante *Paronychia Argentea* agissent comme des inhibiteurs de corrosion de l'acier dans le milieu acide. En effet, l'efficacité d'inhibition des extraits de la plante *Paronychia Argentea* augmente avec l'augmentation du pourcentage volumique en extraits. Les mesures de polarisation anodique et cathodique ont montré que les extraits de la plante PA agissent comme des inhibiteurs de type mixte. Cependant, l'extrait des fleurs de PA présente une meilleure résistance à la corrosion. Les tracés des taux de recouvrement en fonction de la concentration en extraits obéissent à l'isotherme de Langmuir.

Les résultats obtenus par spectroscopie d'impédance électrochimique ont montré que la résistance de transfert de charge augmente et parallèlement, la capacité de la double couche diminue avec l'augmentation du pourcentage volumique en extraits de PA. Les molécules formant ces dernières forment une couche protectrice couvrant toute la surface de l'acier bloquant ainsi ses sites actifs, et par conséquent l'efficacité inhibitrice augmente.

Plusieurs perspectives peuvent être dégagées à la lumière de ce travail afin d'ouvrir la voie à des travaux ultérieurs. En effet, il serait très intéressant de compléter l'étude entamée en étudiant l'influence de la variation de la température sur l'efficacité inhibitrice des extraits de la plante PA. Il est également souhaitable de compléter cette étude par des méthodes de caractérisation de surface et de composition.

Résumé

Dans ce travail, nous avons mené une étude sur la protection de l'acier contre la corrosion en utilisant l'extrait de la partie aérienne de la plante *Paronychia Argentéa* en milieu acide HCl 0,5M. Cette étude a été effectuée principalement par la méthode gravimétrique, les méthodes électrochimiques stationnaires (la polarisation potentiodynamique et la chronopotentiométrie) et transitoires (Spectroscopie d'Impédance Electrochimique). Les résultats obtenus indiquent que l'extrait des fleurs et des tiges de PA présentent une efficacité inhibitrice très importante. Ils s'adsorbent à la surface de l'acier en bloquant les sites actifs par formation de liaisons physique. Les résultats obtenues montrent que les extraits de PA inhibent efficacement la corrosion de l'acier dans le milieu HCl 0,5M en forment un film protecteur.

Mots-clés : Corrosion, Acier, Extrait de plante, Gravimétrie, SIE

Abstract

In this work, we carried out a study on the protection of steel against corrosion using the extract of the aerial part of the *Paronychia Argentéa* PA plant in 0.5M HCl acid medium. The study was carried out mainly using gravimetric, stationary (potentiodynamic polarization and chronopotentiometry) and transient (Electrochemical Impedance Spectroscopy) electrochemical methods. The results obtained indicate that extracts from PA flowers and stems have a very high inhibitory efficacy. They adsorb to the steel surface blocking the active sites by forming physical bonds. The results show that PA extracts effectively inhibit steel corrosion in 0.5M HCl by forming a protective film.

Key words : Corrosion, Steel, Plant extract, Gravimetry, EIS.