



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ DE 20 AOÛT 1955 - SKIKDA

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE DES PROCÉDÉS

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de :

Master

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique

Étude de l'efficacité d'un extrait de feuilles d'olivier comme inhibiteur naturel de corrosion de l'acier C-1020 dans les milieux H_2SO_4 1M et NaCl 3% : approche gravimétrique et formulation d'un revêtement protecteur.

Réalisées par : -Fellouri Souha
-Bouguerra Dounia
-Chaouche nour el houda

Soutenu le 22/06/2026, devant le jury suivant :

N°	Nom et Prénom	Grade	Établissement d'affiliation	Qualité
1	Damous Maamar	MCA	Université de 20 Août 1955 - Skikda	Encadrant
2	Khalfaoui Malika	MCA	Université de 20 Août 1955 - Skikda	Examinatrice
3	Boussaha El hadi	professeur	Université de 20 Août 1955 - Skikda	Président
4	Boultif Walid	MCB	Université de 20 Août 1955 – Skikda	Examineur

Année Universitaire **2025- 2026.**

Remerciement

Tous nos remerciements vont tout premièrement à Dieu Tout-Puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a données afin de réaliser ce travail.

Un grand merci à M. Boussaha El Hadi, M. Boultif Walid, Mme Taier Meriem ainsi qu'à M. Damous Maamar pour leur gentillesse, leurs précieux conseils et leurs encouragements tout au long de notre travail. Nous les remercions infiniment pour leur aide et leur accompagnement.

Nous remercions également nos chers parents, tous les professeurs, les intervenants et toutes les personnes qui ont guidé notre réflexion par leurs propos, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques. Nous remercions également toutes celles et ceux qui ont accepté de nous rencontrer et de répondre à nos demandes au cours de nos recherches.



Dédicace

Ce moment est le fruit de nombreuses années de travail acharné, de patience et de quête pour réaliser un rêve. Je dédie ma graduation à mes chers parents qui ont été mon soutien et mon appui à chaque étape de ma vie, ainsi qu'à mes frères et sœurs et à tous ceux qui m'ont entouré de leur amour, encouragement et prières. Je tiens également à remercier tous ceux qui ont contribué à mon éducation et m'ont soutenu, et je me remercie moi-même pour la patience, la persévérance et la force qui m'ont permis d'atteindre ce moment. Aujourd'hui, je récolte le fruit de mes efforts et je suis fier de ce que j'ai accompli.

Souha





Dédicace

Grâce à Dieu.

Merci à moi-même,

Merci à ma famille et merci à mes collègues de travail

Nour



Dédicace

À celui qui a été mon soutien à chaque étape, qui m'a appris la valeur de la patience et du travail acharné, à la lumière qui a éclairé mon chemin, à mon cher père, je t'offre ce modeste travail en reconnaissance de tout le soutien et des sacrifices que tu as faits pour moi.

À ma chère mère, source de tendresse et de générosité, et dont les prières ont été le secret de ma réussite, je t'offre le fruit de mon effort et de mon travail, en espérant avoir pu apporter de la joie à ton cœur.

À mes frères et sœurs, je vous remercie pour votre soutien et votre patience à mes côtés, et particulièrement mon grand frère qui a été le soutien inébranlable et qui m'a toujours aidée de toutes les manières. À mes collègues qui m'ont accompagnée dans ce travail, et à une personne proche de moi qui a été présente dans les moindres détails malgré la distance qui nous séparait, je vous exprime toute ma gratitude et mon profond respect.

Dounia

Sommaire :

Liste des figures	
Liste des tableaux.....	
Liste des abréviations	
Introduction générale	

Chapitre I : Généralités sur la corrosion et ses enjeux

I.1.Introduction	27
I.1.Définition et classification de la corrosion.....	27
I.1. 1. Définition et mécanismes fondamentaux	27
I.1.2.1. Mécanismes fondamentaux	28
I.1.2.2. Les principales formes de corrosion	28
I.1.2.2.1. Corrosion uniforme ou généralisée	29
I.1.2.2.2. Corrosion localisée	30
I.1.2.2.3. Corrosion galvanique	31
I.1.2.2.4. Corrosion érosion	32
I.1.2.2.5. Corrosion par crevasses (caverneuse)	32
I.1.2.2.6. Corrosion Par Piqures	33
I.1.2.2.7. Corrosion inter granulaire (inter cristalline)	33
I.1.2.2.8. Corrosion sélective	34
I.1.2.2.9. Corrosion frottement	35
I.1.2.2.10. Corrosion sous contrainte	35
I.2. Facteurs influents et paramètres cinétique	35
I.2.1. Les facteurs physico chimiques influencent la vitesse de corrosion	35
I.2.1.1. Effet de la température	37
I.2.1.2. Le pH	37
I.2.1.3. Effet de L'acidité	37
I.2.1.4. Activité biologique	37
I.2.1.5. La salinité	37
I.2.2. Méthodes d'évaluation et de suivi de la corrosion.....	38

I.2.2.1. Méthodes classiques	38
I.2.2.2. Méthodes électrochimiques	38
I.3. Enjeux économiques et stratégies de protection	39
I.3.1. Impact économique de la corrosion	39
I.3.2. Les méthodes de lutte contre la corrosion	40
I.3.2.1. Prévention par une forme adaptée des pièces	40
I.3.2.2. Prévention par un choix judicieux des matériaux	40
I.3.2.3. Protection par revêtements	41
I.3.2.4. Protection par d'inhibiteurs	41

Chapitre II : Les inhibiteurs de corrosion approche classique et naturelles

II.1. Introduction	45
II.1.1. Historique	45
II.1.2. Définition	45
II.1.3. Propriétés des inhibiteurs	46
II .1.4. Mécanismes d'action et classification des inhibiteurs	46
II .1.4.1. Selon la nature de produit chimique	47
II .1.4.2. En fonction de leur mode d'action chimique	48
II .1.4.3. Selon leur mécanisme réactionnel	49
II .1.4.4. Selon leur domaine d'application	50
II.2. Intérêt et développement des inhibiteurs d'origine naturelle	52
II .3. Aperçu des substances naturelles utilisées comme inhibiteurs	55

Chapitre III : Présentation du matériau végétal : les feuilles d'olivier (olea europaea L)

III .1. Généralités sur l'olivier et ses produits	58
III.1.1. Historique	58
III.1.2. Caractéristiques de l'olivier	58
III.1.3. Morphologie et Description botanique	59
III.1.4. Propriétés nutritionnelles.....	60
III.2. Les feuilles d'olivier (FO)	61

III.2.1. Définition.....	61
III.2.2. Historiquement	62
III.2.3. Descriptions des feuilles d'olives	63
III.2.4. Composition chimique des FO	64
III.2.5. Propriétés des feuilles d'olivier	65
III.2.6. Utilisations traditionnelles des feuilles d'olivier	66
III.2.7. Intérêt des FO pour la santé	66
III.3. L'extraction	67
III.3.1. Définition d'extraction	67
III.3.2. l'extraction solide-liquide	67
III.3.3. l'extraction liquide-liquide	67
III.3.4. Mécanisme de l'extraction solide-liquide	67
III.3.5. Transfert de matière et cinétique d'extraction.....	68
III.3.6. Facteurs influençant l'extraction solide-liquide	69
III.3.7. Méthode d'extraction.....	71

Chapitre IV : Matériels et méthodes

IV.1. Introduction	76
IV.2. Matériel et procédures expérimentales.....	76
IV.2.1. Matériaux utilisés	76
IV.2.1.1. Composition chimique du matériau utilisée.....	76
IV.2.1.2. Caractéristique mécanique	78
IV.3. Les milieux corrosifs	78
IV.3 .2. Préparation de la solution corrosive (NaCl 3%)	78
IV.3.3. Préparation de la solution corrosive 3 H ₂ SO ₄ 1M	79
IV.4. Élaboration de l'extrait de feuilles d'olivier (EFO)	79
IV.4.1 Échantillonnage.....	79
IV.4.2. Élaboration de la poudre à partir des FO.....	79
IV.5. Test phytochimique	80
IV.5.1. Préparation de l'échantillon	81

IV.5.3. Réaction de caractérisation.....	81
IV.5.4. Synthèse qualitative	82
IV.6. L'extraction	84
IV.6.1. Matériels utilisées.....	84
IV.6.2. Produits utilisées.....	85
IV.6.3. Mode opératoire	85
IV.8. L'élaboration des différentes concentrations à partir de l'extrait brute	88
IV.9. Méthode gravimétrie	88
IV.10. Dispositif expérimental de corrosion	89
IV.1.1. Techniques spectroscopiques	90
IV.11.1. La spectroscopie ultra-violette	91
IV.11.2. préparation d'échantillon pour analyse UV-Visible	91
Protocole pour la préparation et l'évaluation d'un revêtement anticorrosion	93

Chapitre V : Résultats et discussion

V.1. Résultats du test phytochimique	97
V.2. Calcul du rendement de l'extraction	101
V.3. Résultats obtenus par la méthode gravimétrie	103
V.3.1. Résultats du milieu corrosif NaCL 3%	103
V.3.2. Résultats du milieu corrosif H ₂ SO ₄ 1M	116
V.4. Le milieu protecteur : Résine polyster.....	130

Liste des figures

Liste des figures :

Fig.I.1 : variation du taux de corrosion en fonction du Ph.....	
Fig.I.2 : Corrosion Généralisée.	
Fig.I.3 : Corrosion localisée.	
Fig.I.4 : Principe de la corrosion galvanique et. Corrosion galvanique de L'aluminium par couplage avec le bronze	
Fig.I.5 : Corrosion-érosion dans une zone turbulente	
Fig.I.6 : Corrosion par crevasses.	
Figure.1.7 : Corrosion Par Piqures.....	
Fig.I.8 : Corrosion inter granulaire	
Fig.I.9 : coupe métallographique d'uneSélective Corrosion sélective d'un laiton.	
Fig.I.10 : Diminution du risque de corrosion-érosion	
Fig.I.11 : Schéma récapitulatif des modes d'adsorption	
Fig.II.1 : Formation des couches barrières anodiques interférant avec les réactions électrochimiques, dans le cas d'une étude en milieu acide	
Fig.III.1 : l'olivier.	
Fig.III.2 : Répartition de la production d'olives par destination.	
Fig.III.3 : Feuilles d'olivier.....	
Fig.III.4 : Utilisation des FO pour la consommation humaine.	
Fig.III.5 : extraction solide-liquide.	
Fig.III.6 : Extraction liquide-liquide	
Diagramme explicatif des phases de transfert de soluté.	

Liste des figures

Fig.III.7 :	Fig.III.8 :	Schéma du montage de l'extraction à reflux
Fig.III.9 :	Schéma du montage de l'extraction par entraînement à la vapeur d'eau.	
Fig.III.10 :	Schéma du montage de l'extraction par du CO ₂ supercritique.	
Fig.III.11 :	Schéma du montage de l'extraction assistée par micro-onde	
Fig.IV.1 :	Oxford instruments X-MET 7000.	
Fig.IV.2 :	Résultats d'analyse de la composition chimique de l'échantillon donné par OX FORD X-MET 7000.	
Fig.IV.3 :	Élaboration de la solution corrosive à 3% de NaCl.	
Fig.IV.4 :	préparation de la solution corrosive H ₂ SO ₄ 1M.	
Fig.IV.5 :	Les feuilles avant et après séchage.	
Fig.IV.6 :	Broyage des feuilles séchées.	
Fig.IV.8 :	Test phytochimique FO.	
Fig.IV.9 :	Agitation du mélange pendant 24h.	
Fig.IV.10 :	Montage de filtration Buchner (sous vide).	
Fig.IV.11 :	Montage de l'évaporateur rotatif.	
Fig.IV.12 :	Récupération de l'extrait.	
Fig.IV.13 :	Préparation de l'électrolyte	
Fig.IV.14 :	méthode de perd de masse.	
Fig.IV.15 :	Effet de la température sur la corrosion.	
Figure.IV.16 :	Montage spectrophotomètre UV	
Fig.IV.17 :	La concertation de l'extrait en fonction de l'absorbance.	
Fig.IV.18 :	Préparation du revêtement.	

Liste des figures

Fig.IV.19 :	Application du revêtement.....
Fig.IV.20 :	Séchage à température ambiante.
Fig.IV.21 :	Immersion des échantillons dans les solutions préparées.....
Fig.V.1 :	Mise en évidence des flavonoïdes.....
Fig.V.2 :	Mise en évidence des alcaloïdes par le test de Mayer.
Fig.V.4 :	Mise en évidence des Anthraquinones libres
Fig.V.3 :	Mise en évidence des alcaloïdes par le test de wagner.
Fig.V.5 :	Mise en évidence des tanins..... .
Fig.V.6 :	Mise en évidence des saponines.....
Fig.V.7 :	Mise en évidence des glycosides.
Fig.V.8 :	L'évolution de la vitesse de corrosion de l'acier(C-1020) en fonction de la concentration de l'extrait des feuilles d'olive en milieu Nacl 3%, à la température ambiante.....
Fig.V.9 :	L'évolution de l'efficacité inhibitrice de l'acier (C-1020) en fonction de la concentration de l'extrait des feuilles d'olive en milieu Nacl 3%, à la température ambiant.....
Fig.V.10 :	L'évolution de la vitesse de corrosion de l'acier (C-1020) à différente concentration d'extrait des feuilles d'olive en fonction du temps d'immersion en milieu NaCl 3% à la température ambiante.
Fig.V.11 :	L'évolution de l'efficacité inhibitrice de l'acier (C-1020) à différente concentration d'extrait des feuilles d'olive en fonction du temps d'immersion en milieu NaCl 3% à la température ambiante.
Fig.V.12 :	Effet de la température sur la vitesse de corrosion de l'acier dans Nacl 3% en absence et en présence des différentes concentrations de l'extrait des FO pour tim= 30min.

Liste des figures

Fig.V.13 : Effet de la température sur l'efficacité inhibitrice de l'acier dans NaCl 3% en absence et en présence des différentes concentrations de l'extrait des FO pour $t_{im}=30\text{min}$

Fig.V.14 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion de l'acier dans NaCl 3% en absence et en présence de l'extrait des FO pour $t_{im}=1\text{h}$

Fig.V.15 : Effet de la température sur l'efficacité inhibitrice de l'acier dans NaCl 3% en absence et en présence des différentes concentrations de l'extrait des FO pour $t_{im}=1\text{h}$

Fig.V.16 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion de l'acier dans NaCl 3% en absence et en présence des différentes concentrations de l'extrait des FO pour $t_{im}=3\text{h}$

Fig.V.17 : Effet de la température sur l'efficacité inhibitrice de l'acier dans NaCl 3% en absence et en présence des différentes concentrations de l'extrait des FO pour $t_{im}=3\text{h}$

Figure.V.18 : L'évolution de la vitesse de corrosion de l'acier (C-1020) en fonction de la concentration de l'extrait des feuilles d'olive en milieu H_2SO_4 1M, à la température ambiante.

Fig.V.19 : L'évolution de l'efficacité inhibitrice de l'acier (C-1020) en fonction de la concentration de l'extrait des feuilles d'olive en milieu H_2SO_4 1M, à la température ambiante.

Fig.V.20 : L'évolution de la vitesse de corrosion de l'acier (C-1020) à différente concentration d'extrait des feuilles d'olive en fonction du temps d'immersion en milieu H_2SO_4 1M, à la température ambiante.

Fig.V.21 : L'évolution de l'efficacité inhibitrice de l'acier (C-1020) à différente concentration de l'extrait des feuilles d'olive en fonction du temps d'immersion dans le milieu H_2SO_4 1M, à la température ambiante.

Liste des figures

- Fig.V.22** : Effet de la température sur la vitesse de corrosion de l'acier dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence des différentes concentrations de l'extrait des FO pour $t_{im} = 30min$
- Fig.V.23** : Effet de la température sur l'efficacité de l'inhibiteur de l'extrait dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence des différentes concentrations de l'extrait des FO pour $t_{im} = 30min$
- Fig.V.24** : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et de l'acier dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence d'extrait des FO $t_{im} = 1h$
- Fig.V.25** : Effet de la température sur l'efficacité inhibitrice de l'acier dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence d'extrait des FO $t_{im} = 1h$
- Fig.V.26** : Effet de la température sur la vitesse de corrosion de l'acier dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence d'extrait des FO $t_{im} = 3h$
- Fig.V.27** : Effet de la température sur la vitesse l'efficacité inhibitrice de l'acier dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence d'extrait des FO $t_{im} = 3h$
- Fig.V.28** : L'évolution de la vitesse de corrosion de l'acier (C-1020) en fonction de la concentration du revêtement anticorrosion préparé, en milieu H₂SO₄ 1M, à la température ambiante
- Fig.V.29** : L'évolution de l'efficacité inhibitrice de l'acier (C-1020) en fonction de la concentration du revêtement anticorrosion préparé, en milieu H₂SO₄ 1M, à la température ambiante.
- Fig.V.30** : L'évolution de la vitesse de corrosion de l'acier (C-1020) à différentes concentrations du revêtement anticorrosion contenant l'extrait des feuilles d'olivier, en fonction du temps d'immersion dans un milieu H₂SO₄ 1M
- Fig.V.31** : L'évolution de l'acier (C-1020) à différentes concentrations du revêtement anticorrosion contenant l'extrait des feuilles d'olivier, en fonction du temps d'immersion dans un milieu H₂SO₄ 1M

Liste des tableaux :

Tableau I.1 : Classification de la tenue en corrosion en fonction du taux de corrosion

.....

Tableau I.2 : Les facteurs de la corrosion

Tableau II-1 : Des études sur l'effet anticorrosion des inhibiteurs verts

Tableau.III.1 : Répartition botanique de l'espace oleaeuropea

Tableau.III.2 : Composition du fruit de l'olivier

Tableau.III.4 : composition chimique des feuilles d'olivier fraîches

Tableau.III.5 : Composition des FO frais en acides aminés (indiquée en g/Kg d'azote total)

Tableau IV.1 : Composition chimique de l'acier (C-1020)

Tableau IV.2 : Propriété mécanique de l'acier (C-1020)

Tableau.V.1 : Criblage phytochimique de l'extrait FO

Tableau.V.2 : les paramètres de corrosion mesurent par gravimétrie de l'acier au carbone (C1020) dans NaCl 3% pendant 1h en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur

Tableau.V.3 : les paramètres de corrosion mesurent par gravimétrie de l'acier au carbone (C-1020) dans NaCl 3% pendant 3h en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur

Tableau.V.4 : les paramètres de corrosion mesurent par gravimétrie de l'acier au carbone (C-1020) dans NaCl 3% pendant 5h en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur

Tableau.V.5 : les paramètres de corrosion mesurent par gravimétrie de l'acier au carbone (C-1020) dans NaCl 3% pendant 7h en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur

Tableau.V.6 : les paramètres de corrosion mesurent par gravimétrie de l'acier au carbone (C-1020) dans Nacl 3% pendant 9h en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur

Tableau.V.7 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans Nacl 3% en absence et en présence d'extrait des FO tim= 30min à T=40°C.

Tableau.V.8 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans Nacl 3% en absence et en présence d'extrait des FO. tim= 30min à T=60°C

Tableau.V.9 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans Nacl 3% en absence et en présence d'extrait des FO. tim=30 min à T=80.....

Tableau.V.10 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans Nacl 3% en absence et en présence d'extrait des FO tim= 1h à T=40°C.....

Tableau.V.11 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans Nacl 3% en absence et en présence d'extrait des FO. tim= 1h à T=60.....

Tableau.V.12 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans Nacl 3% en absence et en présence d'extrait des FO tim= 1h à T=80°

Tableau.V.13 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans Nacl 3% en absence et en présence d'extrait des FO tim= 3h à T=40°C.....

Tableau.V.14 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans Nacl 3% en absence et en présence d'extrait des FO tim= 3h à T=60°C.....

Tableau.V.15 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans NaCl 3% en absence et en présence d'extrait des FO $t_{im}=3h$ à $T=80^{\circ}C$

Tableau.V.16 : Les valeurs de la vitesse de corrosion mesurés par gravimétrie de l'acier (C 1020) dans H_2SO_4 1M pendant 1h en absence et en présence des différentes concentrations de l'inhibiteur à la température ambiante

Tableau.V.17 : les paramètres de corrosion mesurés par gravimétrie de l'acier (C-1020) dans H_2SO_4 1M pendant 3h en absence et en présence des différentes concentrations de l'inhibiteur a la température ambiant

Tableau.V.18 : Les paramètres de corrosion mesurés par gravimétrie de l'acier (C-1020) dans H_2SO_4 1M pendant 5h en absence et en présence des différentes concentrations de l'inhibiteur a la température ambiant

Tableau.V.19 : Les paramètres de corrosion mesurés par gravimétrie de l'acier (C-1020) dans H_2SO_4 1M pendant 7h en absence et en présence des différentes concentrations de l'inhibiteur a la température ambiant

Tableau.V.20 : les paramètres de corrosion mesurés par gravimétrie de l'acier(C-1020) dans H_2SO_4 1M pendant 9h en absence et en présence des différentes concentrations de l'inhibiteur a la température ambiant.

Tableau.V.21 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans H_2SO_4 1M en absence et en présence d'extrait des FO $t_{im}=30min$ à $T=40^{\circ}C$

Tableau.V.22 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans H_2SO_4 1M en absence et en présence d'extrait des FO $t_{im}=30min$ à $T=60^{\circ}C$

Tableau.V.23 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans H_2SO_4 1M en absence et en présence d'extrait des FO $t_{im}=30min$ à $T=80^{\circ}C$

Tableau.V.24 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence d'extrait des FO tim= 1h à T=40°C

Tableau.V.25 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de L'acier dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence d'extrait des FO tim= 1h à T=60°C

Tableau.V.26 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence d'extrait des FO tim= 1h à T=80°C

Tableau.V.27 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence d'extrait des FO tim= 3h à T=40°C

Tableau.V.28 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence d'extrait des FO tim= 3h à T=60°C

Tableau.V.29 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence d'extrait des FO tim= 3h à T=80°C

Tableau .V.30 : Les valeurs de la vitesse de corrosion de l'acier (C-1020) dans H₂SO₄ 1 M pendant 1h, en absence et en présence de différentes concentrations du revêtement anticorrosion préparé, à la température ambiante.....

Tableau .V.31 : Les valeurs de la vitesse de corrosion de l'acier (C-1020) dans H₂SO₄ 1 M pendant 3h, en absence et en présence de différentes concentrations du revêtement anticorrosion préparé, à la température ambiante.....

Tableau .V.32 : Les valeurs de la vitesse de corrosion de l'acier (C-1020) dans H₂SO₄ 1 M pendant 5 h, en absence et en présence de différentes concentrations du revêtement anticorrosion préparé, à la température ambiante.....

Tableau .V.33 :Les valeurs de la vitesse de corrosion de l'acier (C-1020) dans H_2SO_4 1 M pendant 7h, en absence et en présence de différentes concentrations du revêtement anticorrosion préparé, à la température ambiante.....

Tableau .V.34 :Les valeurs de la vitesse de corrosion de l'acier (C-1020) dans H_2SO_4 1 M pendant 9h, en absence et en présence de différentes concentrations du revêtement anticorrosion préparé, à la température ambiante.....

Liste des abréviations

FO : Feuille d'olivier.

ISO : organisation internationale de normalisation.

NACE : Association Nationale de l'Ingénierie de corrosion.

PH : potentiel d'hydrogène.

Fe : fer.

HCL : Acide chlorhydrique.

H₂SO₄ : Acide sulfurique.

NaCl : Le chlorure de sodium.

CO₂ : Dioxyde de carbone.

UV : Ultraviolet.

S : Surface de l'échantillon.

h : heure.

T : Température.

°C : Celsius.

V : Volume de la solution.

m : la masse.

M : molarité.

E% : Efficacité en pourcentage.

C : Concentration.

V_{cor} : Vitesse de corrosion.

Kg : kilogramme.

t : Temps.

Δm : Variation de masse.

R : Rendement.

Introduction générale

La corrosion est le produit d'une réaction chimique ou électrochimique entre un environnement et les métaux ainsi que les alliages. Les implications sont significatives dans plusieurs domaines, notamment dans le secteur industriel : L'arrêt de production, le remplacement de pièces corrodées, les accidents et les risques de pollution sont des occurrences récurrentes, souvent accompagnées d'importantes conséquences économiques [1].

Ainsi, ce processus entraîne une diminution de la longévité des métaux et par conséquent une défaillance rapide de leurs caractéristiques que les sociétés ne peuvent supporter. Particulièrement lorsque cela compromet la sûreté des employés, ou encore lors de défaillances dues à la corrosion entraînant des interruptions imprévues et une pollution environnementale qui menace l'élimination sûre des déchets radioactifs devant être conservés dans des conteneurs pendant plusieurs décennies [2].

Il s'agit de problèmes fréquents auxquels fait face l'industrie, nécessitant souvent le remplacement du métal utilisé par un autre matériau plus résistant. Néanmoins, cela entraîne souvent des coûts additionnels, ce qui implique de lourdes conséquences économiques. C'est pour cette raison qu'on met souvent en œuvre des efforts importants dans le contrôle de la corrosion pour en prévenir ou, au minimum, en assurer le contrôle [3].

Alors que les règles européennes sur les rejets industriels se durcissent de plus en plus en matière d'écologie, l'élaboration d'inhibiteurs de corrosion écoresponsables et biodégradables s'affirme aujourd'hui comme un défi crucial. De plus en plus, les travaux de recherche se focalisent sur la conception de molécules organiques non toxiques, non polluantes, résistantes à l'oxydation [4].

Les inhibiteurs sont des substances qui, lorsqu'introduites en petites quantités, interagissent avec une surface ou un contexte métallique et contribuent à freiner le phénomène de corrosion, apportant un certain degré de défense à la surface par la création d'un film. En même temps, ces substances doivent satisfaire à des critères spécifiques [5,6].

Ces inhibiteurs ne renferment ni métaux lourds, ni substances toxiques, ils sont à la fois biodégradables et renouvelables. De nombreuses études démontrent que l'emploi des huiles et extraits de plantes pour la protection des métaux permet d'obtenir des

niveaux d'efficacité élevés. Étant donné que ces produits sont de plus en plus perçus comme des sources d'inhibiteurs verts [7].

Dans le contexte de cette étude scientifique, l'extraction des principes actifs présents dans les feuilles d'olivier (*Olea europaea*) a été réalisée afin d'examiner leur potentiel à prévenir la corrosion de l'acier dans divers environnements hostiles. Une fois le précieux extrait végétal obtenu, il a été mis en œuvre comme un agent anticorrosion naturel. Son efficacité a été évaluée dans deux environnements corrosifs distincts : un environnement acide (acide sulfurique) et un environnement basique (chlorure de sodium).

La recherche a utilisé la méthode de perte de masse, consistant à immerger des échantillons d'acier dans des solutions corrosives, avec ou sans l'inhibiteur, à diverses concentrations d'extrait de feuilles d'olivier. L'objectif était de mesurer les taux de corrosion et d'évaluer l'efficacité de l'extrait dans la minimisation de la détérioration du métal. Ces études ont démontré l'impact de la concentration de l'inhibiteur sur le taux de corrosion à diverses températures, ce qui a facilité l'évaluation de la performance de l'extrait en tant qu'inhibiteur écologiquement durable.

Par ailleurs, des évaluations phytochimiques ont été effectuées afin de déterminer qualitativement les principaux composés organiques secondaires présents dans l'extrait, comme les flavonoïdes, les tanins et les polyphénols. Ces substances sont reconnues pour leur aptitude à s'adsorber sur le métal et créer une barrière protectrice réduisant la corrosion.

L'ensemble des tests et évaluations en laboratoire ont été effectués dans les locaux de l'Université 20 Août 1955 de Skikda, dans le cadre d'une recherche visant à mettre en valeur les ressources végétales locales et à concevoir des inhibiteurs de corrosion naturels et performants qui pourraient constituer une option sûre et pérenne face aux inhibiteurs chimiques conventionnels.

Le premier chapitre est consacré à l'étude théorique du phénomène de la corrosion. Il présente une définition générale de la corrosion, les différents mécanismes responsables de son apparition, ses principales formes, ainsi que les facteurs influençant son développement. Ce chapitre expose également les conséquences de la corrosion dans le domaine industriel et les principales méthodes de protection des matériaux métalliques.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des inhibiteurs de corrosion. Il traite de leur définition, de leur mode d'action, de leur classification ainsi que des principales caractéristiques qu'ils doivent présenter pour assurer une protection efficace des métaux. Une attention particulière est accordée aux inhibiteurs verts d'origine naturelle, considérés comme une alternative écologique aux inhibiteurs chimiques conventionnels.

Le troisième chapitre porte sur le procédé d'extraction (Extraction). Il présente les principes fondamentaux de l'extraction des composés bioactifs d'origine végétale, les différentes techniques d'extraction, les facteurs influençant leur rendement ainsi que les caractéristiques des extraits obtenus. Une attention particulière est accordée à l'extraction des composés actifs des feuilles d'olivier destinés à être utilisés comme inhibiteurs naturels de corrosion.

Le quatrième chapitre décrit la partie expérimentale de cette étude. Il présente les différents matériaux, réactifs chimiques et équipements utilisés, ainsi que le protocole expérimental adopté pour la préparation de l'extrait des feuilles d'olivier et l'évaluation de son efficacité inhibitrice vis-à-vis de la corrosion de l'acier par la méthode de perte de masse.

Le cinquième et dernier chapitre est consacré à la présentation, à l'analyse et à la discussion des résultats expérimentaux obtenus. Il met en évidence l'influence de la concentration de l'extrait des feuilles d'olivier ainsi que de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité de l'inhibition. Les résultats sont ensuite comparés aux données de la littérature afin de tirer les principales conclusions et de proposer des perspectives pour les travaux futurs.

Chapitre I

Généralités sur la corrosion et ses enjeux

I.Introduction

La corrosion est l'altération d'un matériau due à une intervention ou une réaction chimique avec son environnement. Elle est généralement associée aux questions d'exploitation et de maintenance des équipements.

C'est un phénomène qui est fréquemment ardu à éviter. La majorité des conceptions de systèmes industriels prennent en compte l'impact de la corrosion sur la longévité des matériels. La corrosion touche presque tous les domaines industriels et ces dommages sont évalués à plusieurs milliards de dollars chaque année [8].

Dans ce chapitre, nous fournissons des définitions et décrivons les divers types de corrosion, ainsi que leur morphologie. De plus, nous présentons une liste exhaustive des différentes méthodes de protection contre la corrosion.

I.1.Définition et classification de la corrosion

I.1.1.Définition et mécanismes fondamentaux

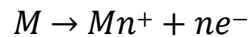
Selon le 'petit Robert', la corrosion se définit comme l'action de corroder, d'altérer progressivement et lentement par une réaction chimique. La corrosion, dérivée du latin « corroder », se traduit par ronger ou attaquer .Dans l'ensemble, et de manière générale. La corrosion des métaux est le résultat d'une réaction électrochimique naturelle entre un métal (ou un alliage) et une phase aqueuse. Ce phénomène s'inscrit dans un processus électrochimique complexe étroitement associé à la structure atomique de la matière [9]. Concernant les matériaux métalliques, la norme ISO 8044 (1999) définit la corrosion comme « l'interaction physico-chimique entre un métal et son environnement qui entraîne des changements dans les caractéristiques du métal et souvent une détérioration fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique formé par ces deux éléments ». Ainsi, la corrosion se définit comme la détérioration du matériau ou de ses caractéristiques due à une réaction chimique avec son environnement. Cette définition reconnaît la corrosion comme un processus destructeur : elle dégrade le matériau ou diminue ses caractéristiques, le rendant impropre à l'usage prévu et naturel elle tend à transformer les métaux et les alliages en leur état initial d'oxyde, de sulfure, de carbonate ou autre sel, plus stable dans l'environnement ambiant [10].La corrosion ne

touche pas uniquement l'acier, elle a un impact sur tous les métaux, ainsi que sur les céramiques et les polymères. Elle découle d'interactions chimiques ou physiques entre le matériau et son environnement [9].

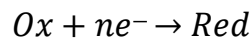
I.1.2.1.Mécanismes fondamentaux

Malgré la diversité des types de corrosion mentionnés précédemment, les processus fondamentaux de la corrosion d'un métal en milieu aqueux ont tous une source électrochimique.

Ces processus découlent d'une série de réactions qui ont lieu à la jonction entre le métal et la solution, impliquant des électrons et diverses espèces chimiques. On peut décrire ces réactions électrochimiques de la manière simplifiée suivante : ➤ Réaction anodique de dissolution du métal (M)



➤ Réaction cathodique de réduction d'une espèce de l'électrolyte (Ox)



L'espèce menacée doit être présente en nombre suffisant dans l'environnement [11].

Quand un métal est exposé à une solution corrosive, plusieurs réactions peuvent se produire

- ❖ Corrosion du métal.
- ❖ Immunité du métal.
- ❖ Passivité du métal.
- ❖ Couverture du métal par un minéral [12].

I.1.2.2.Les principales formes de corrosion

La corrosion peut influencer le métal de diverses façons, en fonction de sa composition et des conditions environnementales. En fonction de la forme et des lieux d'apparition de l'attaque, on distingue principalement deux catégories de corrosion : la corrosion généralisée et la corrosion localisée. La majorité de leurs sous-catégories découle des disparités dans la morphologie du métal [13].

I.1.2.2.1. Corrosion uniforme ou généralisée

La corrosion générale est la forme la plus courante et peut être identifiée bien avant qu'un problème ne survienne pour affecter la durabilité de la structure métallique. Le taux de corrosion uniforme est significativement influencé par des facteurs tels que le débit, le pH et la température du milieu (Fig.I.1) [14].

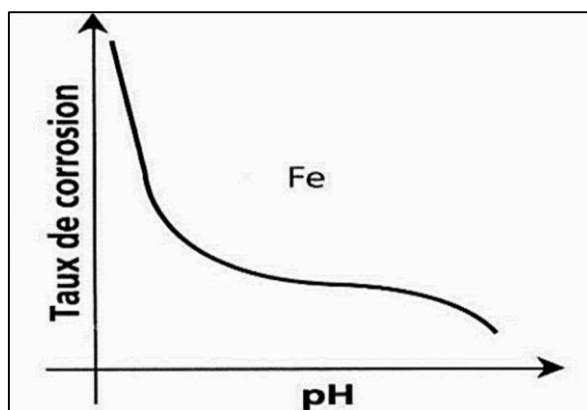


Fig.I .1: variation du taux de corrosion en fonction du Ph.

Cette corrosion se manifeste par une action sur l'ensemble de la surface de l'échantillon exposée à l'environnement [15].

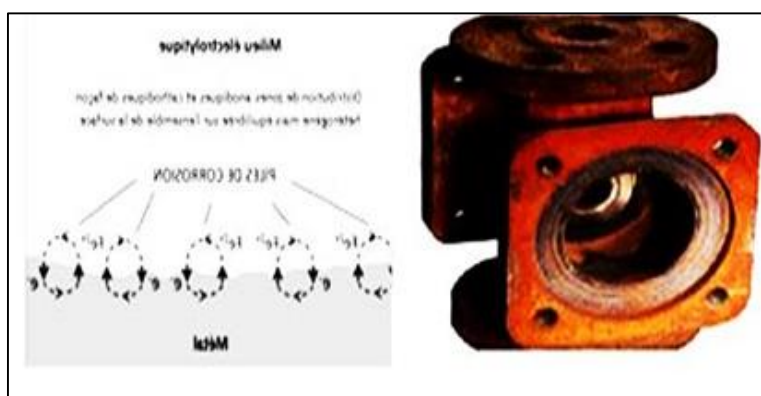


Fig.I.2 : Corrosion Généralisée [16].

Tableau I.1. Classification de la tenue en corrosion en fonction du taux de corrosion [17].

Taux de corrosion	tenue
$< 0,05 \text{ mm/an}$	Excellente
0,05 à 0,130 mm/an	Bonne
0.130 à 1.25 mm/an	Satisfaisante
$> 1.25 \text{ mm/an}$	Non satisfaisante

I.1.2.2.2. Corrosion localisée

La forme la plus sournoise est celle de la corrosion localisée. Elle se produit sur une section du métal qui correspond à un emplacement spécifiquement anodique, nettement identifié, dont la surface est bien moindre comparée au reste de la structure métallique qui constitue la zone cathodique (Fig. I.3). Effectivement, même pour une perte de poids négligeable, ce genre de corrosion peut avoir des conséquences désastreuses. On peut réduire ou prévenir la corrosion uniforme en sélectionnant judicieusement le matériau, en modifiant l'environnement ou en utilisant une protection cathodique [18].

La corrosion localisée est caractérisée comme une agression qui se produit dans un environnement spécifiquement anodique d'une surface matérielle. Dans ce contexte de réaction, on identifie clairement les zones anodiques et cathodiques [19]. On identifie plusieurs formes de corrosion localisée:



Fig.I.3 : Corrosion localisée.

I.1.2.2.3. Corrosion galvanique

Corrosion galvanique entre deux métaux distincts immergés dans un électrolyte, lorsqu'il y a une disparité de potentiel. Si ces métaux sont en contact (autrement dit, s'ils sont électriquement connectés), un courant électrique se forme. L'anode, qui est le métal le moins noble, subit une corrosion [20].

L'attaque peut être perçue comme étant concentrée en un lieu spécifique, cependant, la nature de l'usure est diffuse (Fig.I.4) [21].

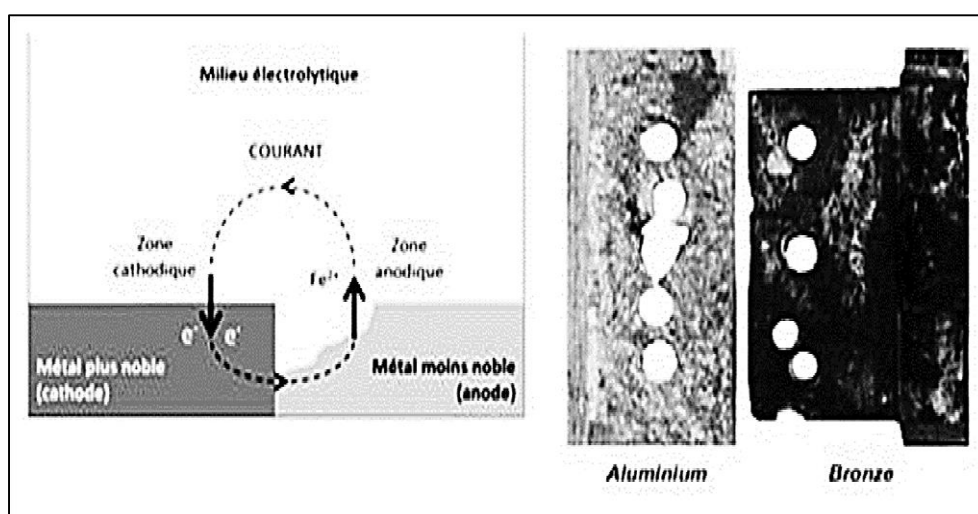


Fig.I.4 : Principe de la corrosion galvanique et. Corrosion galvanique de L'aluminium par couplage avec le bronze [22].

I.1.2.2.4. Corrosion érosion

C'est le résultat d'une action combinée d'une réaction électrochimique et d'un retrait mécanique de matière. Elle se produit fréquemment sur des métaux soumis à l'écoulement rapide de fluides (Fig.I.5) [23].

L'érosion-corrosion a des effets sur divers matériaux (comme l'aluminium et l'acier), elle résulte de la combinaison d'une réaction électrochimique et d'une élimination mécanique de la substance, et est généralement accentuée par le passage rapide d'un fluide.

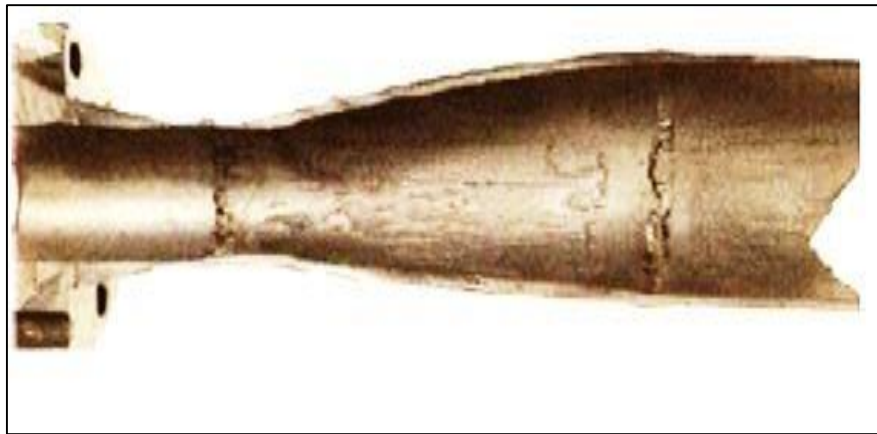


Fig .I.5: Corrosion-érosion dans une zone turbulente [22].

I.1.2.2.5. Corrosion par crevasses (caverneuse)

Elle résulte d'une disparité dans l'accessibilité de l'oxygène entre deux sections d'une structure, formant ainsi une cellule électrochimique. On observe cette attaque sélective du métal dans les fissures et d'autres zones difficilement accessibles à l'oxygène (Fig. I.6). Le développement de la corrosion par crevasses (caverneuses) ne diffère pas essentiellement de celui de la corrosion par piqûres. Toutefois, le profil et la dynamique de l'assaut sont complètement différents. Elle s'étend en largeur à travers l'interstice ou sous le dépôt, et non pas en profondeur comme c'est le cas pour les perforations. La corrosion par crevasses peut devenir dangereuse, en particulier dans l'eau de mer [24].



Fig.I.6 : Corrosion par crevasses.

I.1.2.2.6. Corrosion Par Piqures

Il s'agit d'une sorte de corrosion localisée causée par certains anions, en particulier les halogènes et spécifiquement les chlorures, sur des métaux qui sont couverts par une fine couche d'oxyde. Elle génère généralement des cavités d'environ quelques dizaines de micromètres de diamètre [25].

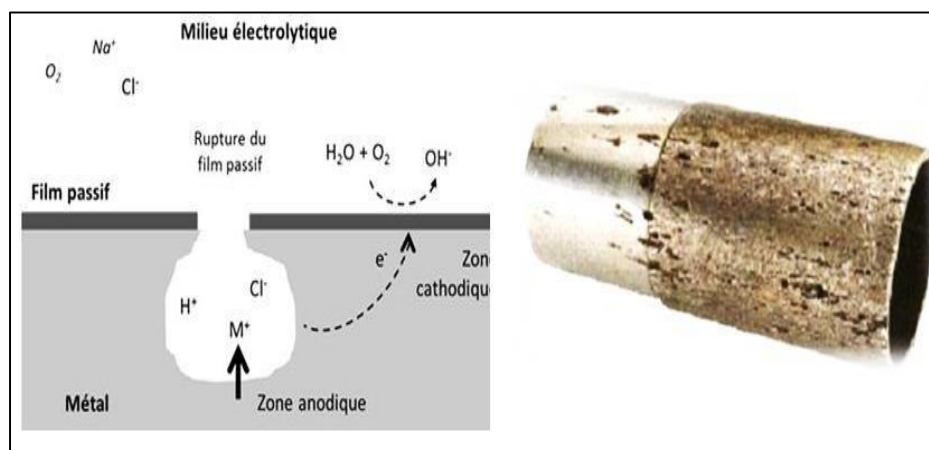


Fig.I.7 : Corrosion Par Piqures.

I.1.2.2.7. Corrosion inter granulaire (inter cristalline)

Il s'agit d'une corrosion localisée qui cible les joints de grains, ce qui affaiblit la structure sur le plan mécanique.

Il s'agit souvent d'une attaque ciblée sur les joints de grains, qui sont généralement des phases précipitées lors d'un processus thermique. C'est une forme de corrosion particulièrement risquée car, même si le volume de métal attaqué est minime, les attributs mécaniques du métal sont modifiés puisque les fissures créées dégradent le métal. Par exemple, l'acier inoxydable austénitique est sensibilisé à chaud par précipitation du carbure de chrome aux joints des grains [26].

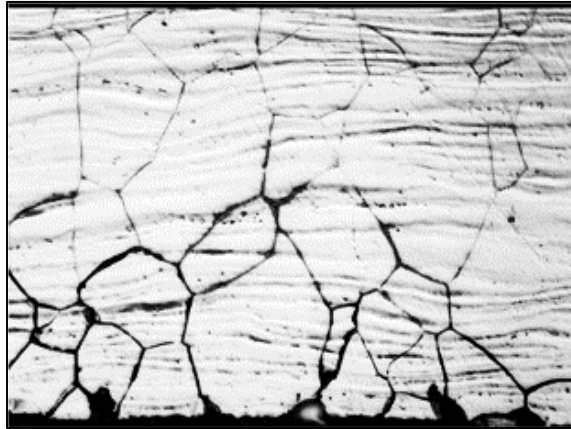


Fig.I.7 : Corrosion inter granulaire [22].

I.1.2.2.8. Corrosion sélective

Il s'agit de l'oxydation d'un élément de l'alliage, qui entraîne la création d'une structure métallique poreuse [27].

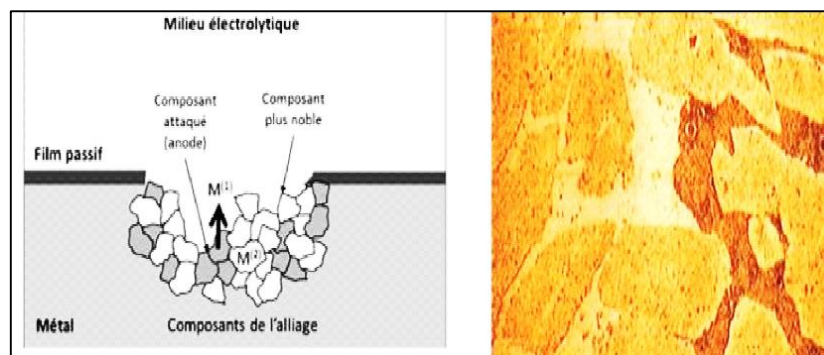


Fig.I.8 : coupe métallographique d'une Sélective Corrosion sélective d'un laiton [22].

I.1.2.2.9. Corrosion frottement

Quand deux surfaces métalliques sont en contact et qu'elles glissent l'une sur l'autre, leurs surfaces peuvent subir une usure accélérée et devenir inadaptées à de futurs mouvements.

Pour que la corrosion par frottement se produise, il est nécessaire que :

- Il y ait une pression de contact entre les deux métaux.
- Des vibrations soient présentes.
- Un glissement survienne entre les deux surfaces.
- L'oxygène soit présent.

Il apparaît que ce phénomène est causé par le déchirement et l'oxydation des particules métalliques à la suite du frottement et de l'augmentation de température subséquente. Les répercussions sont :

L'accroissement des jeux, le blocage, l'émergence de défauts susceptibles de causer des ruptures par fatigue [28].

I.1.2.2.10. Corrosion sous contrainte

Il s'agit d'une fissuration du métal induite par la combinaison d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique.

La corrosion sous contrainte (CSC), comme son appellation le suggère, découle de l'interaction combinée d'une contrainte mécanique (qu'elle soit résiduelle ou appliquée) et d'un environnement nuisible au matériau. Aucun de ces éléments pris isolément ne serait en mesure de nuire à la structure. Cette forme de corrosion, particulièrement insidieuse et préjudiciable aux installations, se manifeste par des fissures inter ou transgranulaires dont le sens de propagation principal est perpendiculaire à la plus forte contrainte [27].

I.2 .Facteurs influents et paramètres cinétique**I.2.1. Les facteurs physico chimiques influencent la vitesse de corrosion :**

Les processus de corrosion sont influencés par une multitude de facteurs et peuvent être catégorisés en quatre principales divisions (Tableau I.2) [28].

Tableau I.2 : Les facteurs de la corrosion [29].

Facteurs relatifs au milieu	-Concentration de la solution -Niveau d'O₂, d'impuretés, de gaz dissous (CO₂, NH₃, facteurs relatifs H₂S...) - Le pH du milieu, la salinité et la résistivité - Température, pression
Facteurs métallurgique	-Composition de l'alliage, hétérogénéités cristallines - impuretés, inclusions. - Méthodes de préparation - Traitement thermique et mécanique - Ajouts protectri
Facteurs relatifs aux conditions d'emploi	-État de la surface, imperfections de production -Création de pièces -Sollicitations mécaniques -Utilisation d'inhibiteurs -Méthodes d'assemblage (joint galvanique, soudure...) -Oxyde de surface -Existence de bactéries

Facteurs dépendant du temps	-Vieillessement -Restrictions mécaniques (internes ou externes) -Conditions d'obtention de l'oxygène dissous (ou autres gaz) - Changement des couches de protection - Possible formation d'un dépôt calcaire (ou autre)
-----------------------------	--

I.2.1.1.Effet de la température :

L'accroissement de la température tend à booster les processus de corrosion, étant donné qu'il réduit les zones de stabilité des métaux et accélère les dynamiques de réactions et de transport. Toutefois, l'importance de son impact varie selon l'environnement corrosif dans lequel le matériau est présent [28].

I.2.1.2.Le pH :

Le pH, qui se trouve entre 7.5 et 8.5, peut être altéré lors de l'oxydation de la matière organique accompagnée d'une production de CO_2 . Ce dernier peut atteindre des valeurs inférieures dans les zones anoxiques où se forme de l'hydrogène sulfuré, l'échange de CO_2 avec l'atmosphère est ant significatif et pouvant légèrement altérer le pH [29].

I.2.1.3.Effet de L'acidité :

Un grand nombre de protons dans la solution renforce l'agressivité de l'environnement. La corrosion s'intensifie à mesure que le pH de l'environnement diminue [29].

I.2.1.4.Activité biologique

Dans les heures qui suivent, un biofilm se forme, contenant des bactéries, des micro-algues et des débris. Au-delà de l'augmentation de la charge des structures [29].

I.2.1.5.La salinité

Les ions chlorures sont agressifs et peuvent souvent se manifester par des corrosions localisées. Leur présence dans une solution entraîne des effets supplémentaires : d'une

part, leur concentration locale provoque une acidification de l'environnement et, d'autre part, la salinité affecte la conductivité de l'eau.

I.2.2.méthodes d'évaluation et de Suivre de la corrosion

Étant donné que l'interface métal-environnement est un système complexe, évaluer la vitesse de corrosion demeure une question cruciale qui n'est jamais simple. Donc, chaque méthode d'évaluation du taux de corrosion adoptera une perspective distincte de ce paramètre en fonction des hypothèses sur lesquelles repose la technique employée. Les techniques les plus fréquemment utilisées incluent : la gravimétrie, une technique de mesure directe très ancienne, les approches électrochimiques stationnaires (courbes de polarisation), ainsi que les méthodes transitoires (spectroscopie d'impédances électrochimiques) [30, 31].

I.2.2.1.Méthodes classiques

On peut exprimer la vitesse de corrosion en termes de diminution de masse, d'abaissement d'épaisseur ou de densité du courant. On peut la définir de manière simple à partir des analyses suivantes

a- Mesures de réduction de poids : Les méthodes de perte de poids fournissent une évaluation directe du taux de corrosion de l'acier plongé dans la solution électrolytique en présence d'agents corrosifs, mais elles comportent certains désavantages : elles sont dévastatrices, chronophages et ne révèlent qu'une vitesse moyenne sur la période de test. Pour calculer précisément la perte de masse, l'échantillon corrodé a dû être soigneusement nettoyé afin de retirer tous les produits de corrosion avant d'effectuer la pesée.

b- Évaluation de la diminution d'épaisseur : Réalisée par une mesure directe, elle exige un accès à la surface en cours de corrosion. L'utilisation de mesures ultrasonores simplifie la récupération d'informations, qui demeure pourtant sporadique, tant en termes de géométrie que de temps [30].

I.2.2.2.Méthodes électrochimiques

Les tests électrochimiques fournissent des informations pertinentes sur la rapidité des processus de corrosion, ainsi que sur le fonctionnement des inhibiteurs. Ils peuvent être divisés en deux catégories distinctes

- Approche stationnaire.
- Approche transitoire.

I .3. Enjeux économiques et stratégies de protection

I.3.1.Impact économique de la corrosion

Sur le plan économique, la corrosion revêt une importance capitale. Par exemple, on estime que la corrosion cause la destruction d'environ un quart de la protection en acier chaque année, ce qui correspond approximativement à 150 millions de tonnes par an, soit 5 tonnes par seconde. Ces pertes auraient pu être plus importantes sans la protection contre la corrosion.

Tous les secteurs économiques sont affectés par la corrosion. On estime que le coût de la corrosion représente environ un quart du produit national brut en Algérie [32].

Ce chiffre prend en compte :

- **Pertes directes**

Les pertes directes incluent le coût de remplacement des pièces, les frais de main-d'œuvre, le coût de maintenance et d'inspection, le prix des revêtements, inhibiteurs, etc.

- **Pertes de produits**

En raison de la perforation des installations, on pourrait observer des pertes d'eau, d'huile, de gaz et d'autres produits.

- **Perte de production**

Réduction d'un transfert de masse ou de chaleur en raison de l'accumulation de produits corrosifs à l'intérieur des tuyaux.

- **Pertes par contamination des produits**

Dans une installation de fabrication de détergents, une quantité minime de Cu issue d'une corrosion légère des tubes en cuivre peut compromettre un lot complet de savon.

- **Pertes indirectes**

Elles sont difficiles à mesurer ; elles se rapportent au manque à gagner, aux pertes en termes de production et de productivité [33].

I.3.2. Les méthodes de lutte contre la corrosion

La prévention de la corrosion devrait être intégrée dès l'étape de planification. Autrement dit, il faut tenir compte de la corrosion depuis le démarrage d'un projet jusqu'à son aboutissement. L'objectif est d'assurer une certaine longévité à un objet. De plus, l'option choisie doit être conforme aux exigences de protection de l'environnement naturel et doit faciliter le recyclage ou l'élimination des divers éléments après leur usage.

Les techniques suivantes sont incluses dans la lutte contre la corrosion

- Évitement grâce à une sélection appropriée des pièces.
- Évitement par le choix stratégique des matériaux.
- Défense par l'application de revêtements.
- Défense via l'utilisation d'inhibiteurs.
- Protection électrochimique [34].

I.3.2.1. Prévention par une forme adaptée des pièces

En modifiant la forme des éléments, l'ingénieur fabricant est en mesure de réduire les dangers de corrosion. Effectivement, la configuration d'un objet peut avoir un impact décisif sur sa longévité.

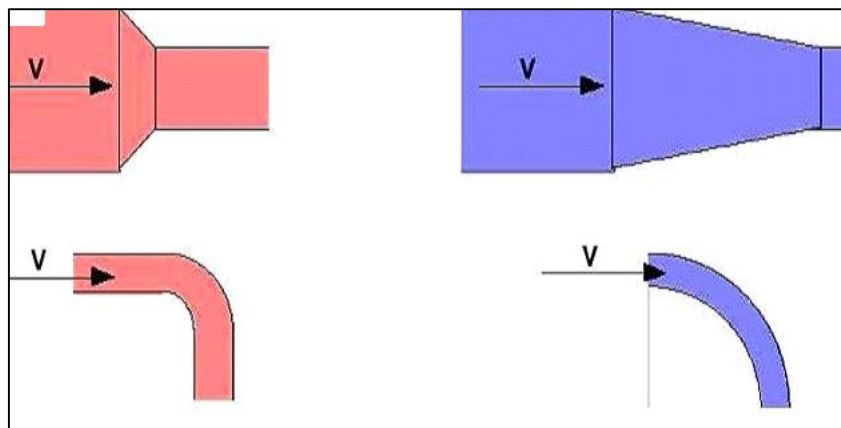


Fig.I.9 : Diminution du risque de corrosion-érosion [36].

I.3.2.2. Prévention par un choix judicieux des matériaux

La sélection du matériau doit être principalement basée sur les impacts négatifs de l'environnement et les conditions d'opération. Aucun métal ou alliage n'est totalement résistant à la corrosion, cependant, on sait que certains matériaux peuvent résister à la corrosion dans des environnements hostiles.

Et la résistance à la corrosion n'est qu'un des nombreux critères à considérer lors de la sélection des matériaux. La résistance à la corrosion est une caractéristique du système métal-environnement et non du métal pris isolément [37].

I.3.2.3. Protection par revêtements

➤ Les revêtements métalliques

Les revêtements agissent comme une barrière physique entre l'environnement hostile et le métal à préserver. Leur performance est conditionnée à la fois par leur comportement face à l'environnement hostile et par l'intégrité du revêtement. [38] On fait la distinction entre

• Revêtements cathodique (ou nobles)

Le chrome, le nickel et le cuivre constituent des revêtements plus nobles qu'un substrat en acier, contrairement au zinc, au cadmium ou à l'aluminium. Dans les deux situations, la couche crée une barrière entre le métal sous-jacent et l'environnement corrosif [39].

• Revêtements anodiques (ou sacrifiés)

Dans le cas où le dépôt est moins noble que le substrat, le phénomène se retourne. Le dépôt agit comme l'anode et se dégrade, tandis que le substrat, qui sert de cathode, demeure intact. De plus, il est important de souligner que la longévité du revêtement est liée à son épaisseur [39].

Les revêtements organiques

Les revêtements organiques créent une barrière plus ou moins étanche entre le matériau et l'environnement. Ils sont classés en trois catégories [39]:

- Les produits de peinture et de vernis.
- Les bitumes.
- Les revêtements polymétriques.

I.3.2.4. Protection par d'inhibiteurs

Les inhibiteurs de corrosion représentent une méthode innovante pour combattre la corrosion des métaux et des alliages. L'originalité réside dans le fait que la protection

contre la corrosion ne s'effectue pas directement sur le métal, mais plutôt par l'intermédiaire de l'environnement corrosif. D'après la norme ISO8044, un inhibiteur est « une substance chimique intégrée au système de corrosion à une concentration sélectionnée pour son efficacité ; cette dernière conduit à une réduction de la vitesse de corrosion du métal sans altérer de façon significative la concentration de n'importe quel agent corrosif présent dans l'environnement agressif » [37].

On peut faire la distinction entre

- **L'adsorption physique** : qui découle d'une interaction électrostatique entre les ions ou les dipôles des molécules organiques et la surface du métal qui porte une charge électrique. Une propriété essentielle de cette adsorption est sa « quasi-réversibilité ». Elle est fonction de la charge de la surface et de celle de l'inhibiteur [40].
- **La chimisorption** : constitue le type d'interaction le plus significatif entre un inhibiteur et un métal. L'adsorption chimique implique un transfert ou une cession d'électrons entre les molécules de l'inhibiteur et les orbitales inoccupées de la surface métallique. Cela facilite la formation de liaisons de coordination ou de liaisons covalentes. La chimisorption est un processus spécifique à chaque métal et irréversible. C'est une procédure lente, influencée par la température et marquée par une énergie d'activation élevée [41].
- **La liaison par hydrogène** : participe à l'adsorption d'une molécule inhibitrice sur une surface métallique revêtue d'une couche d'oxyde. Quand elle n'est pas trop intense, la liaison hydrogène est perçue comme une liaison électrostatique [40].

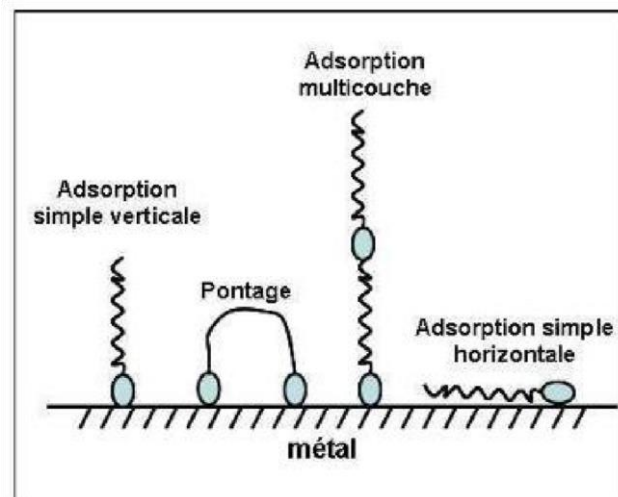


Fig.I.10 : Schéma récapitulatif des modes d'adsorption [40].

CHAPITRE II

Les inhibiteurs de corrosion approche classique et naturelles

II.1.Généralités sur les inhibiteurs de corrosion

II.1.introduction

Concernant la prévention de la corrosion, on peut intervenir sur le matériau en lui-même (sélection appropriée, formes adaptées, contraintes selon les applications, ...), sur la surface du matériau (revêtement, peinture, toute sorte de traitement de surface, ...) ou encore sur l'environnement avec lequel le matériau est en interaction (inhibiteurs de corrosion) [38].

Il est courant d'utiliser des inhibiteurs pour protéger les alliages et les métaux de la corrosion. Les composés organiques ont démontré une inhibition importante. Toutefois, leur emploi est restreint en raison de leur impact polluant, de leur prix et de leur non-biodégradabilité. Ces préoccupations ont conduit à orienter les recherches vers l'emploi de composés naturels en tant qu'agents anticorrosion, qui sont écologiques et sans danger.

II.1.1.Historique

Comme pour de nombreux autres domaines, identifier l'origine précise de l'inhibition, considérée comme une technologie distincte, s'avère complexe. Le concept d'inhiber est très ancien et remonte au Moyen Âge : les artisans spécialisés dans la fabrication d'armes ajoutaient de la farine ou de la levure pour prévenir la fragilisation des armes lors du processus de désoxydation acide. Toutefois, il y a quelques décennies, on a constaté que l'accumulation de calcaire à l'intérieur des tuyaux transportant certaines eaux naturelles offre une protection à ces derniers. Au lieu de travailler constamment sur l'amélioration de la résistance à la corrosion des tuyaux eux-mêmes, il se révèle plus judicieux de modifier les concentrations minérales des solutions qu'ils véhiculent, responsables de ces dépôts calcaires dits « protecteurs ».

Moins de 30 publications abordaient l'inhibition en 1945. Dans un article de 1948, Waldrip mentionnait un rapport de 1943 en lien avec sa discussion sur la prévention de la corrosion des puits pétroliers. Durant la période allant de 1945 à 1954, un grand nombre d'articles ont été écrits sur le sujet de l'inhibition. Ces publications abordaient divers aspects tels que l'inhibition dans les secteurs de l'aviation, des chaudières et des circuits de refroidissement, moteurs à diesel, sels pour le déneigement, raffineries pétrolières, navires pétroliers... Les publications de cette période illustrent une avancée

considérable en matière d'inhibition technologique. Au cours des quarante dernières années, on a recensé un nombre grandissant de résumés, d'articles et autres publications abordant ce thème : en 1970, on comptait 647 articles traitant de l'inhibition [42,43].

II.1.2.Définition

Les inhibiteurs de corrosion représentent une méthode innovante pour combattre la corrosion des métaux. L'innovation réside dans le fait que la protection contre la corrosion ne s'applique pas directement sur le métal, mais via l'environnement corrosif [44].

- **D'après la norme ISO 8044 (Organisation internationale de normalisation)**

Un inhibiteur est une composante chimique intégrée au processus de corrosion à une concentration sélectionnée pour son efficacité. Cette action conduit à une réduction de la vitesse de corrosion du métal sans affecter significativement la concentration d'aucun élément corrosif présent dans l'environnement hostile [45].

- **D'après l'Association Nationale des Ingénieurs de Corrosion (NACE)**

Un inhibiteur est un agent qui, lorsqu'introduit dans un milieu en faible concentration, freine la corrosion [46].

II.1.3.Propriétés des inhibiteurs

- Il est nécessaire de diminuer la vitesse de corrosion du métal tout en préservant ses propriétés physico-chimiques,
- être conforme aux normes actuelles de non-toxicité et de protection environnementale,
- fonctionner efficacement à une faible concentration,
- rester stable en présence d'autres composants,
- maintenir sa stabilité dans l'intervalle des températures utilisées [47].

II .1.4.Mécanismes d'action et classification des inhibiteurs

On peut classer les inhibiteurs de différentes façons, chaque méthode présentant ses propres distinctions :

- Soit en fonction du type de produits (inhibiteurs organiques ou minéraux) ;
- Soit en se basant sur leur mode d'action électrochimique (inhibiteurs cathodiques, anodiques ou mixtes) ;

- En fonction de leurs mécanismes d'action (adsorption, passivation, précipitation et élimination de l'agent corrosif) ;
- Selon le champ d'application [48,49].

❖ Selon la nature de produit chimique

1. Les inhibiteurs organiques

Les inhibiteurs organiques sont habituellement employés dans un environnement acide : néanmoins, du fait de leur toxicité pour l'environnement, leur utilisation s'accroît en milieu neutre ou alcalin.

Les inhibiteurs organiques sont souvent composés de dérivés de l'industrie pétrolière. Ils possèdent une section non polaire, hydrophobe, composée d'une ou plusieurs chaînes hydrocarbonées et une section polaire, hydrophile, formée d'un ou de plusieurs groupes fonctionnels : amine ($-NH_2$), hydroxyle ($-OH$), mercapto ($-SH$), phosphonate ($-PO_3H_2$), sulfonate ($-SO_3H$), carboxyle ($-COOH$) et leurs dérivés (les groupes fonctionnels couramment utilisés, qui permettent l'adhésion à la surface du métal). On identifie deux groupes de ce genre d'inhibiteurs : les composés synthétiques, majoritairement onéreux et toxiques pour les humains et l'environnement, et les composés dérivés de sources naturelles tels que les extraits et huiles végétales, biodégradables, plus économiques et sans impact nocif sur l'environnement [49,50].

2. Les inhibiteurs non organiques

En règle générale, les inhibiteurs inorganiques sont employés dans des environnements neutres ou alcalins. Selon la quantité d'oxygène dissous dans le milieu corrosif, ils peuvent être considérés comme passivés ou non passivés [51].

3. Les inhibiteurs de nature minérale

Voire alcalin, et moins fréquemment en milieu acide. Les substances se séparent en solution et ce sont leurs produits de séparation qui provoquent les phénomènes d'inhibition (anions ou cations). Les oxo-anions inhibiteurs majeurs incluent les ions de type XO_4^{n-} , tels que les chromates, molybdates, phosphates, silicates, etc. Les principaux cations sont le Ca^{2+} et Zn^{2+} et ceux qui créent des sels non solubles avec certains anions comme l'hydroxyle OH^- . Actuellement, l'utilisation de molécules se réduit progressivement, étant donné que la majorité des produits efficaces ont un impact négatif sur l'environnement. Toutefois, on a élaboré de

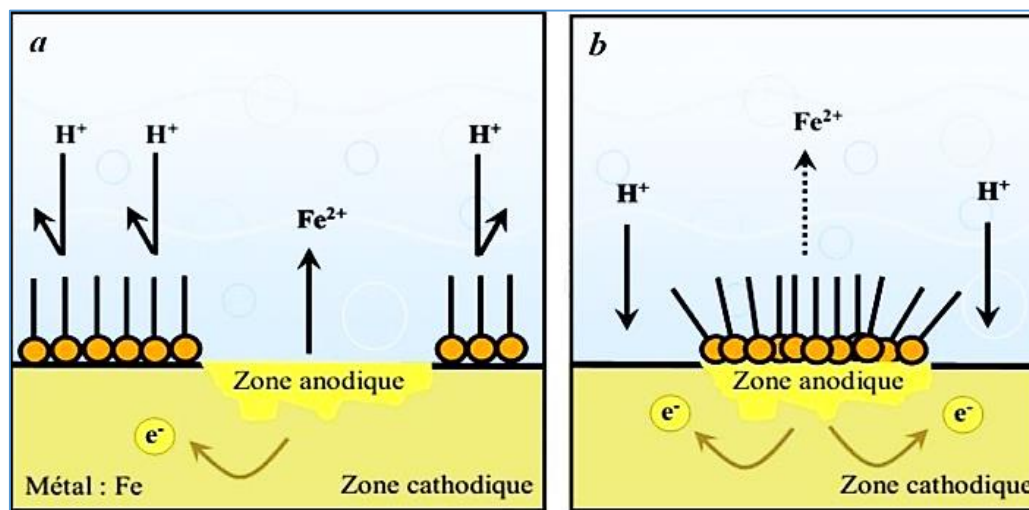
nouveaux complexes organiques de chrome (III) et d'autres cations (Zn^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Sr^{2+} , Al^{2+} , Zr^{2+} , Fe^{2+} ...) qui sont non toxiques et efficaces contre la corrosion [52,53].

❖ En fonction de leur mode d'action chimique

On distingue trois catégories d'inhibiteurs en fonction de leur effet sur la rapidité des réactions électrochimiques partielles : les inhibiteurs anodiques, cathodiques et mixtes.

1. Les inhibiteurs anodiques

Ces inhibiteurs réduisent la densité du courant anodique partiel et déplacent le potentiel de corrosion vers une direction positive, ralentissant ainsi la réaction d'oxydation (site d'oxydation du métal). Ils sont en grand nombre. Il s'agit de composés inorganiques tels que les ortho phosphates, les silicates et les chromates [54,48,55].



a) Blocage des sites cathodiques

b) Blocage des sites anodiques

FigI.6 : Formation des couches barrières anodiques interférant avec les réactions électrochimiques, dans le cas d'une étude en milieu acide. [56 ,57]

2. Les inhibiteurs de cathodique

Ces inhibiteurs diminuent la réaction cathodique en empêchant l'oxygène d'arriver à la surface à protéger et orientent le potentiel de corrosion vers le négatif, ralentissant ainsi la réaction de réduction (site où se produit la réduction de l'oxygène dissous en environnement aéré ou site où a lieu la réduction du proton H^+ dans un milieu acide). Il s'agit généralement de cations qui ont la capacité de se déplacer vers la surface cathodique, où ils se précipitent sous forme de sels basiques ou d'hydroxydes, créant

ainsi des films à la fois adhérents et denses. Les inhibiteurs cathodiques se composent de mélanges de zinc, nickel, magnésium, phosphates alcalins et combinaisons d'arsenic [54,48,55].

2. Les inhibiteurs mixtes

Ils exercent des effets tant sur l'anode que sur la cathode, du fait de l'association d'un agent oxydant (comme les nitrates ou les chromates) et d'un non-oxydant qui précipite, tels que les ortho phosphates ou les silicates. Peu importe le mécanisme électrochimique qui commande la corrosion, un inhibiteur cathodique n'est jamais nocif, même en grande quantité. Toutefois, si l'on procède à un contrôle de corrosion par réaction anodique (situation la plus courante), une infime quantité d'inhibiteurs anodiques peut favoriser la corrosion par piqûres [51].

❖ Selon leur mécanisme réactionnel

1. Inhibition par passivation

En général, ce sont les inhibiteurs minéraux qui agissent par passivation. Ils induisent la passivation spontanée du métal en intensifiant la couche d'oxyde naturellement présente à la surface du métal. Ils se concentrent dans les pores de la couche 16 d'oxyde/hydroxyde qui est plus ou moins protectrice et qui se crée de manière naturelle à la surface du métal. L'ion chromate est un des inhibiteurs de passivation les plus efficaces, cependant, sa nature cancérigène et sa grande toxicité diminuent considérablement son usage.

On distingue deux types d'inhibiteurs passivant :

- a- Les ions oxydants tels que CrO_4^{2-} capables de passeriver l'acier sans oxygène,
- b- Les ions non oxydants (MoO_4^{2-} , WO_4^{2-} , PO_4^{3-} , $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$) qui exigent la présence d'oxygène et déplacent la réaction cathodique de réduction de celui-ci en favorisant son adsorption à la surface du métal [58,55].

2. Inhibition par adsorption

Deux types de liaisons, une liaison électrostatique et une liaison chimique, existent entre l'espèce adsorbée et la surface métallique. Par conséquent, nous distinguons deux formes d'adsorption : la physisorption et la chimisorption. Ces deux formes d'adsorption

dépendent de la nature et de la charge du métal, de la structure chimique du composé organique ainsi que du type d'électrolyte [59].

3. Inhibition par précipitation

Les inhibiteurs agissant par précipitation provoquent la formation d'un film superficiel constitué de sels minéraux ou de complexes organiques peu solubles formés lors de la précipitation des produits de réaction cathodique tout en bloquant la dissolution anodique. Il s'agit généralement de sels d'acide faible et de base forte comme les borates, les silicates, les phosphates, les poly phosphates et les sels de zinc [60].

4. Suppression de l'agent corrosif par élimination

L'inhibition par la suppression de l'agent corrosif ne peut être mise en œuvre que dans des systèmes clos. On l'applique notamment dans les systèmes de circuits d'eau chaude fermés des centrales thermiques. L'ajout d'une petite quantité de sulfite de sodium (Na_2SO_3) ou d'hydrazine (N_2H_4) à l'eau déjà dégazée et dé ionisée élimine les derniers résidus d'oxygène et supprime ainsi la corrosion [61].

❖ Selon leur domaine d'application

- 1- Inhibiteurs pour les environnements aqueux** : traitement des eaux (eaux sanitaires, eaux de processus industriels, eaux de chaudières) ;
- 2- inhibiteurs pour milieux acides** : le secteur pétrolier, forage, extraction, raffinage, stockage et transport ; la sauvegarde temporaire des métaux, que ce soit lors du décapage à l'acide, du nettoyage des équipements ou de la mise en stock à l'atmosphère ;
- 3- Inhibiteurs pour environnements organiques** : présents dans les lubrifiants de moteur et l'essence, ces liquides renferment des résidus d'eau et des ions qui peuvent entraîner une corrosion.
- 4- Inhibiteurs pour les peintures** : dans le domaine de la peinture sur métaux, ces inhibiteurs sont des additifs garantissant la protection anticorrosion des métaux [62].

5. L'inhibition par substances naturelles

Les inhibiteurs de corrosion, constitués de produits chimiques organiques, ont vu le jour dans le secteur pétrolier durant les années 1950. Toutefois, comme mentionné

précédemment, bon nombre de ces inhibiteurs présentent une toxicité et engendrent d'importants dangers pour l'environnement [63, 64].

Ainsi, leur emploi a été restreint par plusieurs organismes de protection de l'environnement en raison de leur danger, comme le met en évidence le rapport de NACE International [65]. Ces désavantages ont poussé les chercheurs à se tourner vers des substances naturelles capables également d'attribuer des caractéristiques anticorrosion aux métaux et alliages [66].

Depuis toujours, les plantes sont perçues comme des ressources pour la fabrication de médicaments. Leur utilisation récente a ouvert la voie à un autre champ d'application : la prévention de la corrosion [5].

Outre leurs propriétés écologiques et acceptables, une multitude d'extraits botaniques sont des sources économiques, aisément accessibles et renouvelables [63].

Historiquement, les plantes ont toujours été considérées comme des sources pour la production de médicaments. L'usage récent de ces derniers a tracé la voie vers un autre domaine d'application : la prévention de la corrosion [5].

En plus de leurs caractéristiques écologiques et acceptables, un grand nombre d'extraits botaniques représentent des ressources économiques facilement accessibles et renouvelables [63].

À ce jour, plus de 4000 publications ont abordé l'utilisation d'extraits naturels provenant de diverses parties végétales (tiges, feuilles et graines) en tant qu'agents anticorrosion pour les métaux et leurs alliages dans divers environnements corrosifs [67]. Toutefois, au sein de la même espèce, on peut observer des compositions variées en raison de facteurs divers tels que : l'emplacement géographique, les conditions météorologiques, le moment de la récolte et la partie de la plante exploitée [68].

Le tableau ci-après (tableau 1-3) compile diverses recherches concernant l'impact anticorrosion des inhibiteurs écologiques.

Tableau 1-3 : Des études sur l'effet anticorrosion des inhibiteurs verts [55].

Source	Milieux	Métal	Méthode	EI(%)	Réf
Tabernaemontana Divaricat	1M HCl	Acier au carbone	Gravimétrie, PPD, SIE, MEB, EDX	95% à 500 ppm	69
Siparuna guianensis	0.1M HCl	Acier au carbone	SIE, PPD, SR	Feuilles : 79% à 50mg/L Tiges : 86% à 50mg/L	70
Argania spinosa	1M HCl	Acier ordinaire	Gravimétrie, SIE, PPD	97.3% à 5g/L	71
Acalypha torte	1M HCl	Acier ordinaire	Gravimétrie, SIE, PPD	91% à 1000ppm	72
Geissospermum	1M HCl	Acier au carbone	SIE, PPD, MEB	92% à 100mg/L	73
Tagetes erecta	0.5 H ₂ SO ₄	Acier ordinaire	Gravimétrie, SIE, PPD	98.19% à 1g/L	74
Ruta chalepensi	2M H ₂ SO ₄	Acier ordinaire	Gravimétrie, HE, PPD, SIE, MEB	99.86% à 0.16(m/v)	75
Rosemary	2M H ₃ PO ₄	Acier au carbone	Gravimétrie, SIE, PPD	73% à 10g/L	76

L'analyse bibliographique (Tableau (1-3)) nous a conduit à la conclusion que les extraits végétaux constituent des alternatives plus avantageuses pour substituer les produits organiques synthétiques et autres molécules inorganiques onéreuses et toxiques [55].

➤ Intérêt et développement des inhibiteurs d'origine naturelle

Les inhibiteurs d'origine naturelle sont des molécules produites par des organismes vivants (plantes, micro-organismes, animaux) capables de moduler

ou bloquer l'activité d'enzymes, de récepteurs ou de voies métaboliques spécifiques. Leur intérêt est croissant dans les domaines pharmaceutique, agroalimentaire et cosmétique en raison de leur diversité chimique et de leur potentiel thérapeutique [77], [78].

1. Intérêt des inhibiteurs naturels

1. Diversité chimique et biologiquement active

Les composés naturels présentent une grande variété de structures chimiques (alcaloïdes, flavonoïdes, polyphénols, terpénoïdes, peptides), ce qui leur permet d'agir sur de nombreuses cibles biologiques [77]. Cette diversité chimique est difficile à reproduire par synthèse chimique, ce qui fait des inhibiteurs naturels une source précieuse pour la découverte de nouveaux médicaments [78].

2. Sélectivité et sécurité relative

Beaucoup d'inhibiteurs naturels ont une sélectivité élevée pour leurs cibles, réduisant les effets secondaires par rapport aux inhibiteurs synthétiques. Ils sont souvent mieux tolérés par l'organisme, ce qui les rend intéressants pour les traitements prolongés [81].

3. Applications thérapeutiques variées

•**Médicaments** : anticancéreux, anti-inflammatoires, antiviraux, antidiabétiques [77].

•**Alimentation et nutraceutiques** : certains polyphénols ou peptides inhibiteurs d'enzymes digestives aident à contrôler le métabolisme des glucides et lipides [80].

•**Agriculture et biopesticides** : certains inhibiteurs naturels limitent la croissance de pathogènes ou d'insectes nuisibles [84].

2. Développement des inhibiteurs naturels

Le développement des inhibiteurs d'origine naturelle suit plusieurs étapes combinant biologie, chimie et pharmacologie [78].

1. Identification et isolement

Les substances actives sont extraites à partir de plantes, champignons ou bactéries. Des techniques comme la chromatographie et la spectrométrie de masse permettent d'isoler et d'identifier les composés bioactifs [79].

2. Évaluation de l'activité biologique

Des tests enzymatiques in vitro déterminent le type d'inhibition (compétitive, non compétitive, irréversible). Les études cellulaires et animales permettent d'évaluer l'efficacité et la toxicité [78].

3. Optimisation chimique et formulation

Certaines molécules naturelles sont modifiées pour améliorer leur stabilité, biodisponibilité et efficacité. Par exemple, les dérivés semi-synthétiques de la pénicilline ont élargi le spectre antibiotique [79].

4. Production et durabilité

Les inhibiteurs naturels peuvent être produits par extraction, culture cellulaire, fermentation microbienne ou synthèse semi-artificielle. La durabilité et la disponibilité sont des facteurs clés pour le développement commercial [80].

3. Défis et perspectives

1. Variabilité naturelle

Les concentrations et l'activité des composés varient selon l'origine géographique, la saison ou les conditions de culture [77].

2. Complexité structurale

Certaines molécules sont difficiles à synthétiser ou à modifier sans perdre leur activité biologique [78].

3. Opportunités futures

La biotechnologie, la génomique et la chimie combinatoire permettent de découvrir et optimiser de nouveaux inhibiteurs naturels. L'utilisation combinée de plusieurs inhibiteurs naturels ouvre la voie à des stratégies thérapeutiques multi-cibles [83].

Aperçu des substances naturelles utilisées comme inhibiteurs

Les inhibiteurs d'origine naturelle modulent l'activité enzymatique ou cellulaire. Ils sont produits par les plantes, microorganismes et animaux, et possèdent des propriétés bioactives variées [77].

II.3.Aperçu des substances naturelles utilisées comme inhibiteurs

Les inhibiteurs naturels constituent une catégorie incontournable de composés qui ont la capacité d'ajuster l'activité enzymatique ou cellulaire. Ces matières, générées par des êtres vivants tels que les plantes, les microorganismes et certains animaux, présentent une diversité de propriétés bioactives. L'étude et le développement de ces éléments ont éveillé un intérêt grandissant pour la découverte de nouveaux médicaments, le combat contre les maladies infectieuses et la maîtrise de certaines affections métaboliques.

1. Les sources principales

1. Plantes médicinales

Les plantes contiennent des polyphénols, alcaloïdes, flavonoïdes, terpénoïdes et saponines capables d'inhiber des enzymes spécifiques [85].

- La quercétine inhibe plusieurs enzymes liées à l'inflammation et au stress oxydatif [82].
- Les tanins inhibent des protéases bactériennes, réduisant la virulence [80].

2. Microorganismes

- La pénicilline inhibe la synthèse de la paroi bactérienne [79].
- Certains inhibiteurs de protéase sont utilisés dans le traitement du VIH [78].

3. Animaux

Les venins contiennent des peptides inhibiteurs d'enzymes ou de récepteurs, notamment impliqués dans la coagulation [84].

2. Classes de composés naturels inhibiteurs

1. Inhibiteurs enzymatiques

Ils bloquent l'activité catalytique des enzymes. Les alcaloïdes, flavonoïdes et polyphénols agissent souvent comme inhibiteurs compétitifs ou non compétitifs [77] [86].

2. Inhibiteurs de récepteurs

La curcumine, issue du curcuma, module la signalisation cellulaire en inhibant certaines kinases [81].

3. Inhibiteurs de transporteurs

La caféine peut influencer certains transporteurs liés à l'adénosine, modifiant la neurotransmission [81].

3. Avantages des inhibiteurs naturels

- Sélectivité et diversité chimique [77].
- Moins de toxicité que certains inhibiteurs synthétiques [81].
- Large potentiel thérapeutique (anti-inflammatoire, anticancéreux, antiviraux, etc.) [77] [81].

4. Limites et défis

- Variabilité naturelle des composés [77].
- Biodisponibilité limitée de certaines molécules [81].
- Difficulté d'extraction et de production à grande échelle [78].

Chapitre III

Présentation du matériau végétal les feuilles d'olivier (*olea europaea* L)

III.1.Généralités sur l'olivier et ses produits

Le fruit de l'olivier est l'olive. L'olivier est un arbre à la tige sinueuse et noueuse, apte à se développer sur des terrains escarpés et pierreux. Il commence à produire tous les deux ans à partir de l'âge de quatre ans. Il peut grandir jusqu'à 10 mètres et vivre plusieurs siècles [87].

La cueillette des olives commence fin septembre pour les variétés précoces et se poursuit jusqu'à fin février pour les variétés tardives. On distingue au moins trois méthodes de récolte : la cueillette manuelle, l'utilisation d'un bâton pour secouer l'olivier et faire tomber les olives sur des filets disposés au sol, ou encore la collecte des fruits qui sont tombés au sol [88].

On trouve une multitude de variétés :

Les olives noires et vertes ne sont pas forcément de variétés distinctes, elles représentent plutôt diverses étapes de maturité du fruit.

L'olive, initialement verte, devient violette avant de se transformer en noire à maturité. Plus elle est mature, plus elle est remplie d'huile [87].

III.1.1.Historique

L'olivier (*olea europea* L), un arbre symbolique, possède une origine très reculée. Sa culture, qui remonte à l'Antiquité la plus ancienne en Grèce et plus précisément sur l'île de Crète, n'a été attestée qu'à partir de 3 500 avant J.-C. Elle figure dans l'histoire et les mythes

Comme un emblème de puissance, de paix durable, de foi et de fécondité [87]. Dans la tradition arabo-musulmane, l'olivier figure parmi les plantes mentionnées dans le Coran.

III.1.2.Caractéristiques de l'olivier

L'olivier est un arbre polymorphe de dimensions intermédiaires. Avec un tronc noueux et un bois robuste et dense, ce qui lui donne une apparence très ramifiée, il peut monter jusqu'à quinze ou vingt mètres de hauteur et vivre pendant de nombreuses années. Il est capable de s'adapter à des conditions environnementales extrêmes, mais nécessite une forte intensité lumineuse et un sol bien aéré.



Fig.III.1 : Arbre de l'olivier.

III.1.3.Morphologie et Description botanique

L'olivier (*oleaeuropea* L) est une version domestiquée de l'oléastre appartenant à la famille des Oléacées. Il s'agit d'un arbre de taille modeste (8-15m), au bois solide, avec une écorce fissurée et teintée de gris [89]. Ses feuilles demeurent sur l'arbre et sont en forme de lance, tandis que ses petites fleurs blanches se rassemblent en grappes verticales. Son fruit, qui est de couleur verte et prend une forme ovoïde, devient noir à maturité et mesure entre 1 et 2,5 cm de long. Figure III.1 un noyau solide. Le mésocarpe contient une grande quantité d'huile [90].

Tableau.III.1 : Répartition botanique de l'espace *oleaeuropea* [91].

Règne	Plantae
Embranchement	Magnoliophyta
Sous Embranchement	Magnoliophytira
Classe	Magnoliopsida
Sous classe	dialypétales
Ordre	lamiales
Famille	oleaceate
Genre	olea

III.1.4. Propriétés nutritionnelles

L'olive est riche en calcium et en vitamine A. Cependant, l'huile d'olive est un stimulant pour le foie et elle est recommandée en cas de troubles digestifs [91].

Tableau.III.2. Composition du fruit de l'olivier [91].

Constitutions partie anatomique	Eau (%)	Lipids (%)	Parotids (%)	Glucides (%)	Cendres (%)
Pulpe (épicarpe +Mésocarpe)	24,2	56,40	6,8	9,9	2,66
Coque du noyau (endocarpe)	4,2	5,25	15,6	70,3	4,16
Amande	6,2	12,26	13,8	65,6	2,6

III.1.5.Les principales variétés d'olivier en Algérie

Il est particulièrement ardu d'identifier les variétés d'espèces avec exactitude, en raison de la présence de sous-espèces.

Les recherches de CHAUX, mentionnées par TALANTIKITE [91], détaillent les principales variétés agricoles en Algérie. On identifie deux principales catégories.

- ❖ Les types d'oliviers pour la production d'huile : CHAMLAL, AZERADJ, LIMELI et BOUCHOUK.
- ❖ Les types destinés à la consommation : SIGOISE et autres variétés introduites.

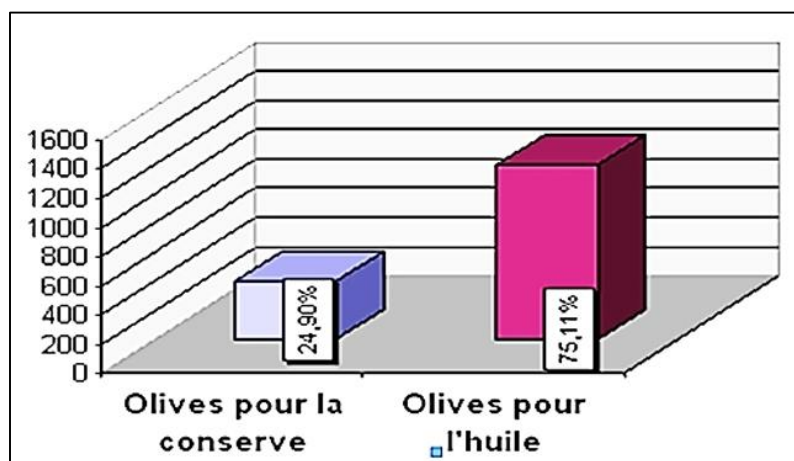


Fig.III.2 : Répartition de la production d'olives par destination [91].

III.2 Les feuilles d'olivier (FO)

L'industrie de l'olive produit une quantité importante de feuilles d'olivier lors de la récolte, et certaines d'entre elles peuvent être ramassées avec les olives. Ces sous-produits sont généralement éliminés dans les vergers d'oliviers ainsi que dans les moulins à huile. Ils sont massivement produits dans les pays méditerranéens et ne devraient pas être vus comme des déchets encombrants, mais plutôt comme une ressource précieuse à exploiter. En effet, on leur attribue des propriétés bénéfiques pour la santé humaine grâce à leur teneur en composés phénoliques, notamment l'oleuropéine. Ces composés sont réputés avoir des capacités antioxydantes, anticancéreuses et antimicrobiennes qui leur confèrent une grande importance. Il est essentiel de valoriser ces résidus [91,90].

III.2.1. Définition

Les feuilles d'olivier, biomasse générée en abondance dans les pays méditerranéens, ne devraient pas être perçues comme un déchet envahissant, mais plutôt comme une ressource précieuse à exploiter. Beaucoup d'efforts ont été déployés pour tenter d'exploiter ce

Sous produit, dans le but d'augmenter la rentabilité de l'industrie oléicole [91].

III.2.2. Historiquement

Les feuilles d'olivier étaient entièrement destinées à l'alimentation des animaux. Cependant, ils sont également employés en phytothérapie traditionnelle pour soigner des maladies telles que le paludisme et l'hypertension. Dans cette application, on utilise les feuilles d'olivier pour préparer une infusion. Dans le contexte de la phytothérapie contemporaine, des suppléments alimentaires dérivés des feuilles d'olivier ont fait leur apparition sur le marché. Ces articles se présentent sous forme de feuilles séchées entières ou en poudres, d'extraits, de gélules ou de doses liquides à boire (voir Figure 5).

Les producteurs mettent en avant les bienfaits de leurs produits pour la santé humaine [91].

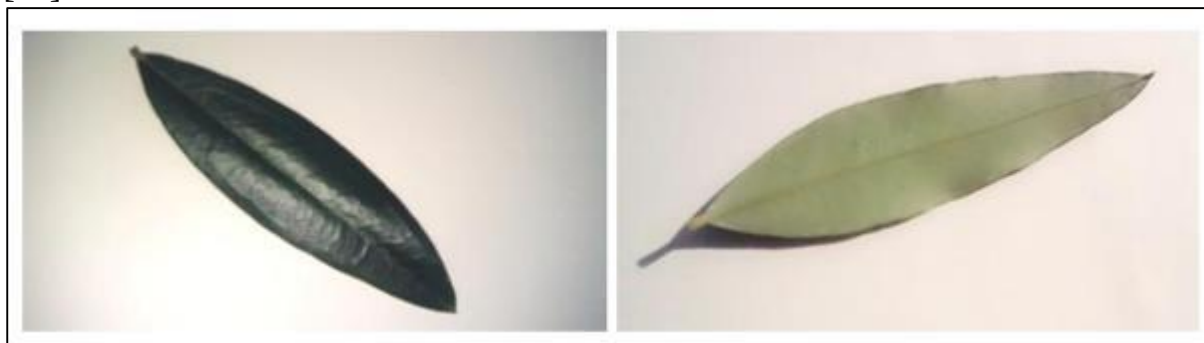


Fig .III.3: Feuilles d'olivier.



Fig.III.4 : Utilisation des FO pour la consommation humaine [91].

À l'heure actuelle, avec les avancées technologiques et l'approfondissement des connaissances, l'utilisation des feuilles d'olivier s'est élargie et diversifiée. On utilise les feuilles d'olivier pour extraire des composés recherchés tels que le mannitol, les stérols, les alcools gras, les composés phénoliques, principalement l'oleuropéine, les flavonoïdes et les composés triterpéniques. Mis à part les propriétés de protection contre les radiations et de lutte contre le vieillissement, caractéristiques des feuilles d'olivier, elles sont destinées à des applications dans l'industrie cosmétique, comme la fabrication de savons et de crèmes [91].

III.2.3.Descriptions des feuilles d'olives

Les feuilles d'olivier ont une forme ovale étirée et sont persistantes. Elles sont soutenues par un court pétiole qui se rétrécit à la base et présente une mucorine au sommet. Ses bords sont réfléchis sur une longueur. Mesurant de 4 à 10 cm de longueur et de 1 à 3 cm de largeur. La face inférieure présente une pubescence de longueurs variées avec des nervures d'un ton argenté, tandis que la face supérieure arbore un vert sombre brillant et lisse.

Sans odeur, amer et acerbe [91].

Noms communs : feuille d'olivier, extrait de feuille d'olivier.

Nom botanique : *Olea europaea folium*, famille des oléacées.

Nom anglais : olive leaf. Partie utilisée : feuilles.

Habitat et origine : arbre à feuilles persistantes originaire du bassin méditerranéen, cultivé sous les climats chauds.

III.2.4. Composition chimique des FO

Tableau.III.4. composition chimique des feuilles d'olivier fraîches [92 ,93] .

Composition en %	Boudhrioua et al, 2009. [8].	Erbay et Icier ,2009. [9].	Martin-Gracia et al. 2006. [10].	Gracia-Gomez et al. 2003. [11].	Fegeros et al 1995. [12].
Eau	46.2-49.7 a	49.8 a	41.4 a	Nd	44.0 a
Protéines	5.0-7.6 a	5.4 a	7.0 b	Nd	Nd
Lipides	1.0-1.3 a	6.5 a	3.2 b	6.2 b	Nd
Minéraux	2.8-4.4 a	3.6 a	16.2 b	26.6 b	9.2 b
Carbohydrates	37.1-42.5 a	27.5 a	Nd	Nd	Nd
Fibre brutes	nd	7.0 a	Nd	Nd	18.0 b
Cellulose	nd	Nd	Nd	19.3 b	11.4 b
Hémicellulose	nd	Nd	Nd	25.4 b	13.3 b
Lignine	nd	Nd	Nd	30.4 b	14.2 b
PolyphénolsTotaux	1.3-2.3 b	Nd	2.5 b	Nd	Nd
Tannins soluble	Nd	Nd	Nd	Nd	0.3 b
Tannins condensés	Nd	Nd	0.8 b	Nd	1.0 b

Avec :

A : Valeur exprimée par rapport à la masse des FO,

B : Valeur exprimée par rapport à la masse des FO sèche,

ND : Valeur non déterminée.

□ Les compositions bioactifs:

La composition des feuilles d'olivier en substances bioactives varie en fonction de leur provenance. Conditions météorologiques, la phase de séchage, les conditions temporelles et les différentes sortes de solvants d'extraction ainsi que leurs modalités de stockage [91,93].

Tableau.III.5. Composition des FO frais en acides aminés (indiquée en g/Kg d'azote total) [94].

Acides amines	Concentration(g/kg)
Acide aspartique	27 ,5
Acide glutamique	35 ,1
Serine	44,5
Glycine	79,6
Histidine	25,4
Arginine	162,0
Threonine	46 ,8
Alanine	73,8
Proline	84,2
Tyrosine	32,3
Valine	74,8
Methionine	5,3
Cysteine	1,6
Isoleucine	58,8
Leucine	104
Phenylalanine	51,8
Lysine	19,1
Acides aminés essentiels	547
Acides aminés non essentiels	379
Acides aminés totaux (sans tryptophane)	926

III.2.5. Propriétés des feuilles d'olivier

Les FO sont disposées en opposé, ovales étirées, soutenues par un petit pétiole, elles sont coriaces et entières, repliées sur les bords. D'un vert sombre brillant sur le dessus et d'un vert plus clair argenté avec une nervure médiane proéminente sur l'envers. Le feuillage est perpétuel, donc constamment vert, cependant cela ne signifie pas que ses

feuilles sont éternelles. Elles ont une durée de vie moyenne de trois ans avant de jaunir et de tomber, surtout durant l'été. Lors d'une sécheresse, les feuilles peuvent se dessécher jusqu'à 60%, réduire considérablement la photosynthèse et fermer les stomates qui facilitent les échanges gazeux afin de minimiser les pertes en eau par évapotranspiration. Cela permet à l'arbre de survivre au détriment de la production de fleurs et de fruits [91].

III.2.6.utilisations traditionnelles des feuilles d'olivier

Depuis au moins 3 500 ans avant notre époque, l'olivier est cultivé pour ses fruits et l'huile qui en est extraite. Le terme scientifique pour l'arbre, *Olea*, dérive d'un mot signifiant « huile » dans la langue grecque antique. À cette période, les feuilles sont utilisées pour désinfecter les blessures cutanées. Les Anciens leur conféraient des qualités antiseptiques et la capacité de lutter contre divers types d'infections. Au cours du XIXe siècle, elles étaient utilisées pour lutter contre le paludisme.

Ces usages ont été quelque peu délaissés pendant une période en raison de la présence omniprésente des antibiotiques.

Toutefois, depuis quelques années, on peut trouver des compléments à base de feuilles d'olivier sur le marché. Les producteurs de ces articles font l'éloge de leurs bienfaits pour le système immunitaire et contre les infections virales, bactériennes, fongiques et à levure [95].

III.2.7.Intérêt des FO pour la santé

Les FO renferment des flavonoïdes (antioxydants) qui contribuent à neutraliser les radicaux libres, et ont un rôle crucial dans la sauvegarde de la paroi artérielle. On retrouve les flavonoïdes sous différentes structures dans nos fruits et légumes, qui sont naturellement présents dans notre régime alimentaire.

Par ailleurs, les FO jouent un rôle préventif contre l'artériosclérose et les affections coronariennes. Grâce à leurs propriétés, elles réduisent le taux de mauvais cholestérol (LDL) tout en augmentant celui du bon cholestérol (HDL). Cela en fait un complément précieux au traitement du diabète non insulino-dépendant [96,97].

III.3.L'extraction

III.3.1.Définition d'extraction

L'extraction est une méthode de séparation utilisée en ingénierie chimique. Cette méthode fait appel à une extraction sélective basée sur des propriétés chimiques ou physiques pour isoler un ou plusieurs composants d'un mélange. On peut distinguer l'extraction solide liquide de l'extraction liquide-liquide [98].

III.3.2.l'extraction solide-liquide

L'extraction solide-liquide est une procédure de transfert de substance entre une phase renfermant le matériau à extraire « solide » et un solvant d'extraction « liquide ». L'objectif de ce processus est d'isoler et de séparer un ou plusieurs composants incorporés dans un solide au sein d'un solvant [98].

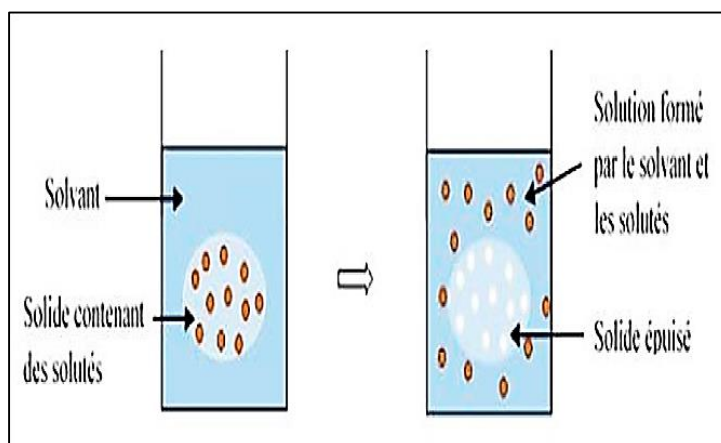


Fig .III.5: extraction solide-liquide [99].

III.3.3.l'extraction liquide-liquide

L'extraction liquide-liquide est un processus essentiel de transfert de matière entre deux phases liquides qui ne se mélangent pas. Elle implique l'isolement d'une ou plusieurs molécules d'un environnement liquide en contact avec un solvant dans lequel les solutés se dissolvent. On appelle « extrait » le solvant qui contient les solutés, tandis que la solution ayant perdu la plupart de ces mêmes composants est connue sous le nom de « raffinat ». On recourt souvent à cette procédure pour distinguer dans un mélange liquide des composants ayant des volatilités faibles ou très proches, ou qui produisent des azéotropes [100].

III.3.4.Mécanisme de l'extraction solide-liquide

Le solvant, également appelé liquide d'extraction, dissout un ou plusieurs éléments cristallisés ou liquides, connus sous le nom de solutés, pour produire une solution ou un extrait qui contient à la fois le solvant et le soluté. Par conséquent, le solide épuisé est désigné comme résidu inerte ou insoluble et contient très peu ou aucun soluté.

En thermodynamique, un corps solide est considéré comme un mélange homogène à l'équilibre, ce qui signifie qu'il ne change pas en l'absence de perturbations extérieures. Dans le processus d'extraction solide/liquide, l'introduction d'énergie thermique et mécanique génère un déséquilibre. Les molécules actives contenues dans la plante (soluté) commencent à diffuser vers l'extérieur en raison du gradient de concentration en soluté entre la solution proche de la phase solide (plus concentrée) et la phase liquide. Le processus se termine lorsque les concentrations des deux côtés atteignent l'égalité. Toutefois, si la phase liquide est constamment renouvelée, la diffusion continue jusqu'à l'épuisement de la phase solide [101].

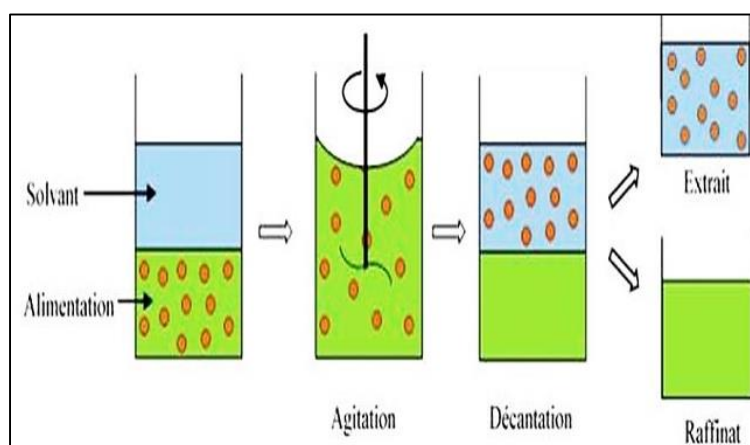


Fig.III.6 : extraction liquide-liquide [99].

III.3.3. Transfert de matière et cinétique d'extraction

Le transfert de masse a lieu dès que la phase solide entre en contact avec la phase d'extraction. Un ou plusieurs éléments présents dans un solide se déplacent graduellement vers la phase liquide [99]. Le taux d'extraction est la quantité de soluté par unité de temps ou la fraction de solides par unité de temps, et il est déterminé par quatre processus successifs [102] :

- l'infiltration du solvant dans la phase solide (a).
- la capacité de dissolution du soluté dans le solvant (b).

- le mouvement du soluté dissous à travers le solvant vers l'extérieur de la phase solide (c).
- le transport du soluté par diffusion et convection vers le centre de la phase liquide (d).

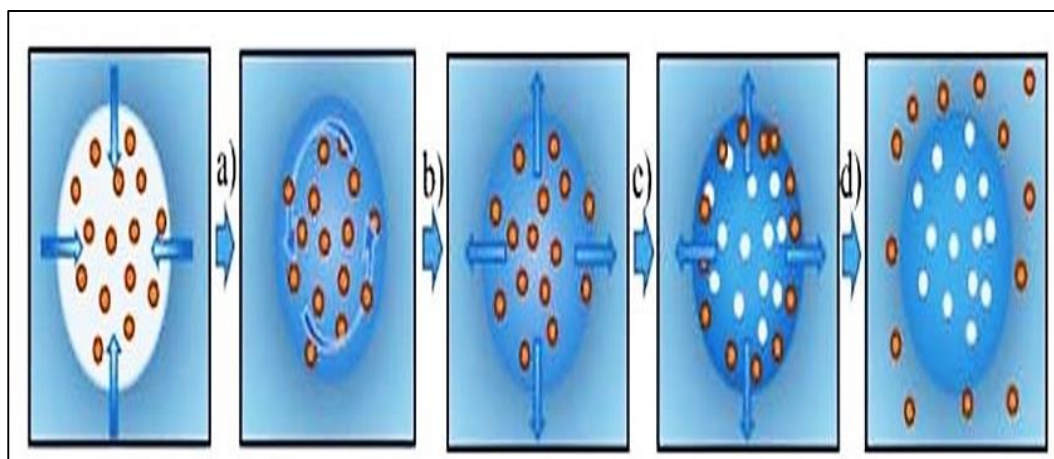


Fig.III.7 : Diagramme explicatif des phases de transfert de soluté [99].

La durée de l'extraction solide-liquide est dictée par l'étape la plus lente qui détermine la vitesse de l'opération. Il s'agit généralement de la phase de diffusion interne au sein de la matrice végétale.

III.3.6.Facteurs influençant l'extraction solide-liquide

L'extraction par solvant peut être influencée par plusieurs facteurs :

A) Nature et état du solide et du soluté

Des particules compactes de différentes tailles (dans le cas d'un minéral), des particules fines précipitées lors d'une réaction chimique, ou des fragments de consistance et de dimension variées pour les matières premières d'origine végétale (graines, racines, feuilles).

Ces substances contiennent un soluté qui peut être un solide ou un liquide, stable ou non face à la chaleur ou à l'atmosphère, réparti de manière plus ou moins uniforme avec des concentrations variables dans le solide.

Plus la substance est divisée en petites particules, plus la surface d'interaction (ou interface) augmente et plus la distance moyenne parcourue par le soluté se réduit [103].

B) Nature du solvant

Le solvant doit être sélectif, avoir une capacité de dissolution importante, une température d'ébullition relativement basse, une viscosité faible et idéalement, ne pas être toxique, inflammable ou explosif. Un solvant approprié, à la fois sélectif et volatil, offre des solutions chargées en substance désirée tout en minimisant les processus d'évaporation et de purification (raffinage).

Il est conseillé d'opter pour un solvant de faible viscosité et de densité réduite afin de favoriser la diffusion du solvant, le mélange et la séparation physique. On utilise principalement l'eau, les alcools (méthanol, éthanol), les hydrocarbures (hexane) et les solvants halogénés comme solvants [103].

C) Température

En général, un accroissement de la température favorise l'augmentation de la solubilité et de la diffusivité du soluté tout en réduisant la viscosité de la solution. La température de fonctionnement est restreinte en raison des dangers liés à l'extraction de composés nocifs, à la dégradation thermique du soluté et à la sûreté de l'équipement (risque d'incendie) [104].

D) Degré d'agitation

Le brassage mécanique des particules dans le solvant, qui favorise leur suspension et l'uniformité de l'environnement, a toujours un impact positif sur le processus. Pour l'extraction aqueuse, le mouvement aide à minimiser la résistance au passage des solutés à l'interface solide-liquide (couche limite) et à accroître le coefficient de transfert [105].

E) La durée d'extraction

La quantité de composés extraits est fonction de la durée pendant laquelle le soluté reste dans le solvant (temps requis pour que le solvant pénètre à l'intérieur des vacuoles, dissolution du composé, etc.). Si l'intention est de récupérer toutes les substances chimiques contenues dans le matériel végétal, l'extraction doit être orientée vers des durées prolongées. Si l'on considère le rendement tout en prenant en compte la consommation d'énergie, la durée d'extraction représente un optimum à définir [104].

III.3.7. Méthode d'extraction

Plusieurs techniques d'extraction solide-liquide à grande valeur ajoutée sont disponibles. Ces techniques peuvent être traditionnelles (employées depuis un certain temps) ou récentes (créées plus récemment).

A) Extraction à reflux

C'est la méthode la plus facile et la plus anciennement employée. La méthode implique la plongée de la matière première végétale dans un récipient lors d'une extraction en laboratoire, ou dans un alambic industriel rempli d'eau positionné sur une source de chaleur. On fait ensuite bouillir le tout. Cela entraînera l'évaporation de certaines substances chimiques en raison de la hausse de la température. Ces composés chimiques sont alors transportés dans le fluide réfrigérant. Un flux constant d'eau froide traverse le réfrigérant. En touchant les parois, les gaz se refroidissent et se condensent en gouttelettes sur les parois du réfrigérant qui finissent par retomber dans le récipient de réaction (figure III.8) [103].

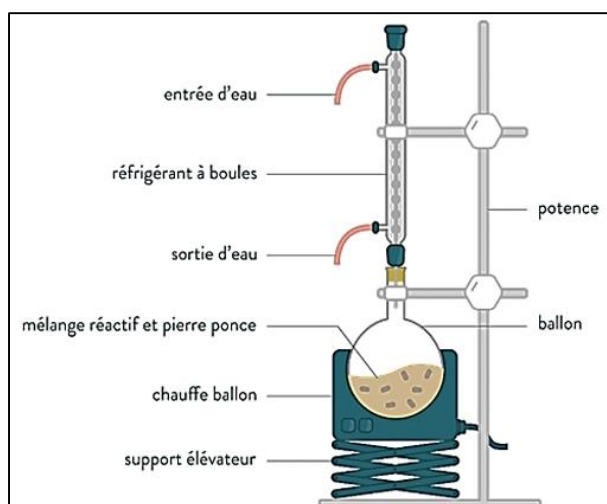


Fig.III.8 : Schéma du montage de l'extraction à reflux [88] .

B) Extraction par entraînement à la vapeur d'eau

Dans cette méthode d'extraction, la matière végétale est exposée à un flux de vapeur sans qu'une macération préalable soit nécessaire. Les vapeurs chargées en composés volatils sont condensées et ensuite décantées (voir figure III.9). La vapeur est introduite à la base de l'alambic, au sein du laboratoire. Elle est produite dans un premier ballon et conduite à la verticale, entraînant l'huile essentielle présente dans le matériel végétal. Cette technique présente l'avantage de prévenir un contact prolongé entre le matériau végétal et l'eau bouillante, évitant ainsi la création de certains artefacts [106].

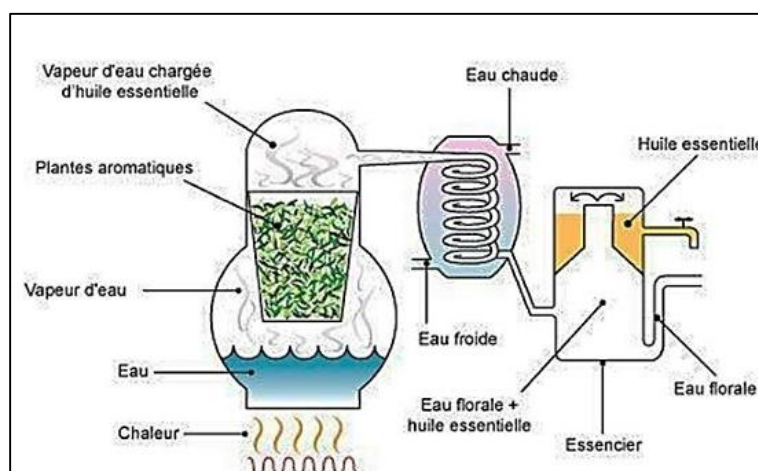


Fig.III.9 : Schéma du montage de l'extraction par entraînement à la vapeur d'eau [103].

C) Infusion

Cela implique de verser de l'eau en ébullition sur la matière végétale (ou de plonger la matière végétale dans un contenant rempli d'eau bouillante) au moment exact où l'eau commence à bouillir. On recouvre le contenant et on le laisse infuser pendant la durée requise. La durée d'infusion varie en fonction du type de plante. C'est par l'infusion que sont traitées les plantes médicinales les plus couramment utilisées : Camomille, Menthe, Thé, Tilleul, verveine, etc.

D) Décoction

Ce processus de préparation consiste à faire bouillir les plantes, généralement dans de l'eau, mais parfois aussi dans de l'alcool. Elle est principalement adaptée aux écorces, racines, tiges et fruits. On laisse mijoter pendant une durée qui varie en fonction des espèces. Pour maximiser l'extraction des principes actifs, il est essentiel de fragmenter

les plantes en plusieurs segments avant d'effectuer l'infusion. La distinction entre décoction et infusion se fait sur la base de la température à laquelle les composants sont tirés d'une matrice naturelle (feuille, fleur, écorce...).

E) Extraction par du CO₂ supercritique

La méthode repose sur la capacité des composants à se dissoudre dans le dioxyde de carbone à l'état supercritique. Cette caractéristique du dioxyde de carbone permet son extraction dans le domaine liquide (supercritique) et sa séparation dans le domaine gazeux. Le dioxyde de carbone est transformé en liquide par compression et refroidissement à la pression d'extraction sélectionnée. Il est ensuite introduit dans l'extracteur qui contient le matériau végétal, puis le liquide se dilate pour se transformer en gaz, qui est dirigé vers un séparateur où il sera divisé en extrait et solvant (figure III.10).

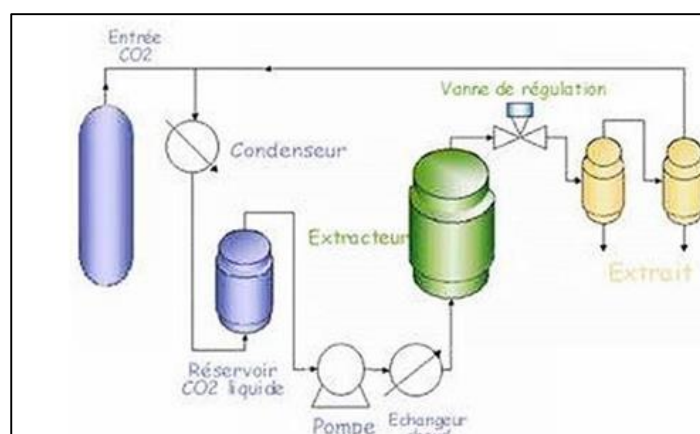


Fig.III.10 : Schéma du montage de l'extraction par du CO₂ supercritique.

Le bénéfice de cette technique réside dans la capacité à supprimer et à réutiliser le solvant grâce à une simple décompression. Par ailleurs, les températures d'extraction sont faibles pour le dioxyde de carbone et non nuisibles aux composants les plus délicats [107].

E) Extraction assistée par micro-onde

Cette méthode d'extraction a été élaborée au fil des dernières décennies pour des objectifs analytiques, comme le montre la (figure I-18). Cette méthode implique

L'exposition de matière végétale hachée à des micro-ondes en présence d'un solvant qui absorbe intensément les micro-ondes [108]

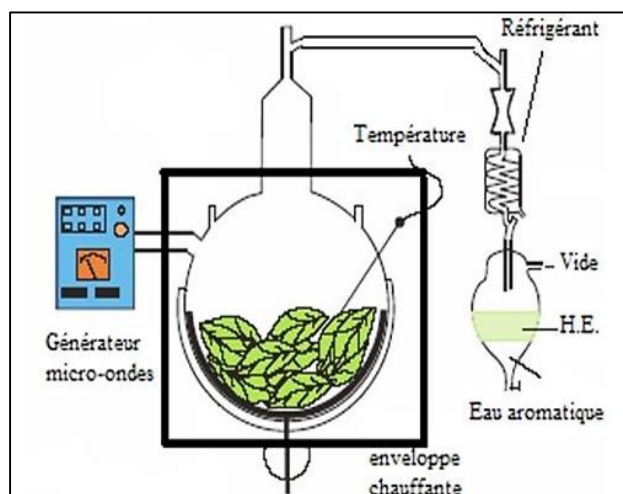


Fig.III.11 : Schéma du montage de l'extraction assistée par micro-onde [109].

Pour l'extraction de composés polaires ou en utilisant un solvant qui n'absorbe pas les micro-ondes. Pour l'extraction de composés apolaires, l'ensemble est chauffé sans jamais atteindre l'ébullition durant de courtes périodes entrecoupées par des étapes de refroidissement.

L'atout majeur de cette méthode réside dans la diminution significative du temps de distillation et l'obtention d'un rendement élevé d'extraits.

Chapitre IV

Matériels et méthodes

IV.1. Introduction

Les processus de corrosion sont plus complexes et nécessitent le recours à des méthodes expérimentales pour évaluer le taux de corrosion et mesurer l'effet de l'inhibiteur employé [1].

Cette section vise à exposer les méthodes expérimentales, botaniques, quantiques et spectroscopiques employées dans le contexte de cette recherche.

Une explication des matériaux, de l'électrolyte, des assemblages réalisés, des méthodes utilisées, des environnements d'étude et des conditions requises pour mener à bien l'analyse de l'effet inhibiteur permet initialement d'établir une procédure expérimentale garantissant la répétabilité des résultats.

IV.2. Matériel et procédures expérimentales

IV.2.1. Matériaux utilisés

IV.2.1.1. Composition chimique du matériau utilisée

Le matériau utilisé dans notre étude est l'acier au carbone (C-1020) qui est utilisée pour le transport de brut au niveau de complexe de RA1K de Skikda, on a obtenu la composition chimique de notre échantillon par un instrument OX FORD X-MET 7000 qui se résume dans le tableau suivant :

Tableau IV.1 : Composition chimique de l'acier (C-1020).

Elément	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Nb	Mo
Teneur %	<0.00	0.03	0.01	0.49	98.13	<0.00	<0.00	0.00	<0.00



Fig.IV.1 : Oxford instruments X-MET 7000.

ÉLÉMENT	%	+/-	LIMITE
Ti	<0.00	0.054	
V	0.03	0.024	
Cr	0.01	0.021	0.00 - 0.20
Mn	0.49	0.062	0.30 - 0.60
Fe	98.13	0.108	98.00 - 99.80
Ni	<0.00	0.046	0.00 - 0.30
Cu	<0.00	0.015	
Nb	0.00	0.006	
Mo	<0.00	0.007	0.00 - 0.05

Fig.IV.2 : résultats d'analyse de la composition chimique de l'échantillon donné par OXFORD X-MET 7000.

IV.3.1.2. Caractéristique mécanique

Tableau IV.2 : Propriété mécanique de l'acier (C-1020).

Résistance à la traction, ultime	394,72 MPa
Module d'élasticité (typique pour l'acier)	200 GPa
Allongement à la rupture (en 50 mm)	36,5 %

IV.3. Les milieux corrosifs

IV.3 .2. Préparation de la solution corrosive (NaCl 3%)

La solution corrosive est une solution à 3% obtenue en dissolvant 30 g de NaCl sous forme de cristaux dans un litre d'eau distillée, puis en la secouant pour obtenir une solution uniforme.

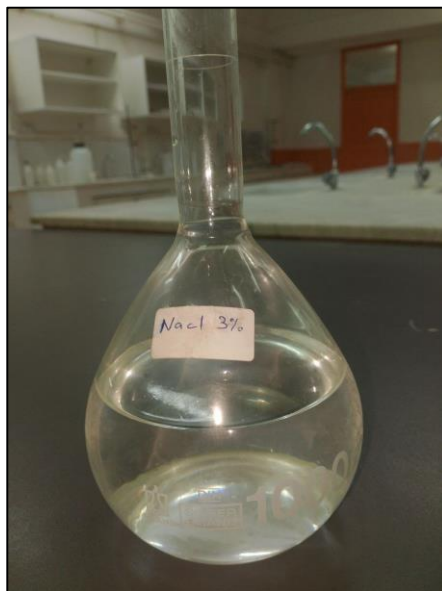


Fig.IV.3 : Élaboration de la solution corrosive à 3% de NaCl.

IV.3.3. Préparation de la solution corrosive 3 H₂SO₄ 1M

La solution corrosive 3 correspond à une solution d'acide sulfurique H₂SO₄ 1M, réalisée par dilution de l'acide concentré commercial à 98% avec de l'eau distillée.

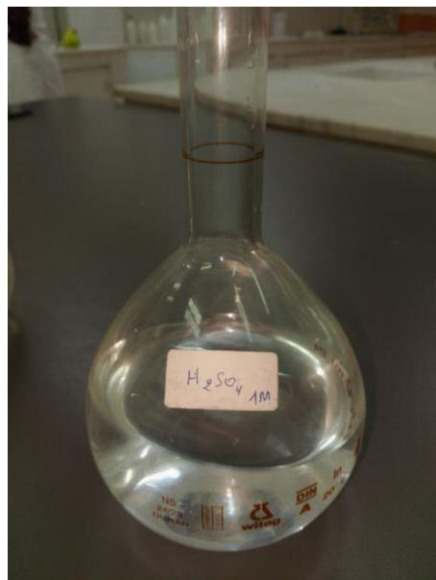


Fig.IV.4 : préparation de la solution corrosive H₂SO₄ 1M.

IV.4. Élaboration de l'extrait de feuilles d'olivier (EFO)

IV.4.1 Échantillonnage

Nous avons effectué le prélèvement des FO dans la région l'est de Skikda, précisément la commune de ouled attia.

IV.4.2. Élaboration de la poudre à partir des FO

Nous avons observé une procédure qui implique le séchage d'une quantité de FO d'un kilogramme dans un lieu sec et sombre pendant un mois, du 06/12/2025 au 06/01/2026. Par la suite, nous avons effectué le broyage à l'aide d'un moulin électrique. Cette étape consiste à moudre les FO jusqu'à obtenir une fine poudre.

1ère étape :

Fig.IV.5 : Les feuilles avant et après séchage.

2ème étapes :

Fig.IV.6 : Broyage des feuilles séchées.

IV.5. Test phytochimique

Dans la première approche, plus traditionnelle, il s'agit de procéder à un tri des principales familles chimiques présentes dans la plante analysée (feuille et noyaux d'olive) et de réaliser des tests biologiques initiaux sur les extraits bruts. Effectivement, ces extraits naturels renferment de multiples groupes d'Ge composés organiques naturels (tels que les flavonoïdes, les alcaloïdes, les tannins...).

Facilement accessibles, renouvelables et capables de fournir des caractéristiques anticorrosives pour divers alliages métalliques en fonction. Dans cette section, nous visons à identifier différentes familles de composés présents dans la plante (FO et NO) en utilisant la méthode la plus simple : le « Test phytochimique ».

IV.5.1. Préparation de l'échantillon

Dans ce segment, nous nous sommes concentrés sur la section aérienne de la plante (feuilles). Les parties aériennes sont mises à sécher à température ambiante (environ 30 à 35°C) pendant une durée de deux semaines, par la suite, elles sont broyées dans un mortier avant d'être tamisées puis finement réduites en poudre à l'aide d'un moulin.

Les extraits de la plante, préparés par infusion dans l'eau distillée, ont été soumis à des tests phytochimiques.

IV.5.2. Infusion

Un volume de 150mL d'eau distillée bouillante a été versé sur 25 g de poudre de feuilles d'olivier (FO). Le mélange a été maintenu en infusion pendant 15 minutes, puis filtré sur papier filtre pour récupérer l'extrait aqueux.

IV.5.3. Réaction de caractérisation

L'analyse phytochimique est essentielle pour détecter la présence des groupes appartenant à une certaine famille chimique dans un médicament spécifique.

Cependant, ce dépistage phytochimique ne donne pas d'informations sur le type de molécules chimiques. Bien sûr, les tests de caractérisation phytochimique comportent certaines imprécisions, étant donné qu'ils se basent en partie sur l'analyse qualitative.

L'idée repose soit sur la création de complexes insolubles grâce aux réactions de précipitation, soit sur l'élaboration de complexes colorés par le biais des réactions de coloration (conjugaison ou instauration dans la molécule). Les résultats sont classés selon [1]:

- Extrêmement positive +++.
- Réaction plutôt favorable ++.
- Réaction suspecte +.
- Réaction défavorable –.

IV.5.4. Synthèse qualitative

✓ Les flavonoïdes

Les flavonoïdes, pigments presque omniprésents dans le règne végétal, forment une vaste famille de composés fréquemment présents dans les plantes.

Une série de tests de caractérisation destinés à identifier différentes sortes de flavonoïdes.

Nous avons administré 5 ml de l'extrait (FO) accompagné de quelques gouttes d'HCl concentré, en présence de trois ou quatre tournures de magnésium. On constate un changement de couleur, passant par un rouge (flavonones), un rouge pur (flavonols) et un rouge violacé (flavanones et flavanols) [108].

✓ Les alcaloïdes

L'existence d'alcaloïdes est confirmée par la précipitation de sels et mise en évidence à l'aide du réactif de Mayer et Wagner [109].

a) - Réactif de Mayer

Le Réactif de Mayer se compose de deux solutions :

Solution A : Dissoudre 1,355g de chlorure de mercure dans 20 ml d'eau distillée.

Solution B : Dissoudre 5g d'iodure de potassium dans 20 ml d'eau distillée.

On combine les deux solutions et on complète jusqu'à 100 ml avec de l'eau distillée.

b) - Réactif de Wagner

Il s'agit d'un mélange contenant 1,27g d'iode et 2 g d'iodure de potassium dissolu dans 75 ml d'eau distillée. On dose ce mélange jusqu'à atteindre 100 ml de la solution.



Figure.IV.18 : Réactif de Mayer et Wagner.

✓ **Anthraquinones libres**

Extrait chloroformique

Prendre 1g de poudre de la plante, incorporer 10 ml de chloroforme et chauffer délicatement au bain-marie pendant 3 minutes. Filtrer puis ajouter de l'eau jusqu'à atteindre 10 ml si besoin. Incorporez 1ml d'extrait chloroformique, puis ajoutez 1ml de NH_4OH dilué et agitez [95].

Le changement de couleur de la phase aqueuse vers le jaune, le rouge ou le violet signale la présence de quinones libres.

✓ **Les tanins [95]**

On ajoute quelques gouttes de FeCl_3 2% à 2ml d'extrait pour déterminer la présence de tanins. L'émergence d'une couleur bleu-noir ou vert-noir signale respectivement la présence de tannoïdes ou de vrais tanins.

✓ **Les saponines [96]**

10 ml de l'extrait aqueux ont été déversés dans un tube à essai, le tube a été secoué pendant 15 secondes, puis laissé tranquille pendant 15 minutes. La hauteur de la mousse a ensuite été évaluée. L'évaluation de la présence des saponines se fait de la manière suivante :

Absence de mousse indique un résultat négatif.

Mousse de moins de 1 cm = résultat faiblement positif.

Mousse de 1 à 2 cm = résultat positif.

Mousse supérieure à 2 cm = test très positif.

✓ **Les glycosides [97]**

Nous avons placé 1 ml d'extrait dans un tube à essai, suivi de l'ajout de 5 ml d'acide acétique contenant des traces de FeCl_3 et 5 ml d'acide sulfurique aussi contenant des traces de FeCl_3 .



Fig.IV.8 : Test phytochimique FO.

IV.6. L'extraction

IV.6.1. Matériels utilisées

- ❖ Balance électronique.
- ❖ Erlenmeyer.
- ❖ Agitateur électronique.
- ❖ Filtration sous vide:
 - Fiole à vide.
 - Entonnoir Buchner.
 - Papier filtre humide.
 - Joint conique.
 - Pompe à vide.
- ❖ Ampoule à décanté.
- ❖ Dispositif évaporateur rotatif (rota vapeur) :

- 2ballon (de solution et de récupération du solvant).
- Réfrigérant.
- Plaque chauffant.
- Elévateur.
- ❖ Eprouvette graduée.
- ❖ Entonnoirs.

IV.6. 2. Produits utilisées

- ❖ Pour les FO.
 - Poudre des feuilles d'olivier.
 - L'éthanol.
 - L'eau distillée.

IV.6. 3. Mode opératoire

□ L'extraction des feuilles d'olivier:

1ère étape : extraction solide-liquide (macération).

Dans cette phase, nous avons essayé d'isoler les composés phénoliques d'une quantité de 100g de poudres végétales en les mélangeant avec 420 ml d'éthanol et 180 ml d'eau distillée, puis en remuant le mélange pendant 24 heures.

Éthanol été choisi de manière à solubilisé le maximum des composés.



Fig.IV.9:Agitation du mélange pendant 24 h.**2ème étape :** filtration Buchner (sous vide).

Nous avons effectué une filtration du macérât à l'aide d'un dispositif de filtration sous vide afin de distinguer la phase solide (la poudre) de la phase liquide (éthanol + extrait des FO).

**Fig.IV.10 :** Montage de filtration Buchner (sous vide).**3ème étape :** évaporation du solvant d'extraction.

On met la solution obtenue suite à la filtration dans le ballon 1, puis on fait tourner le mètre. On actionne le robinet d'eau froide connecté au réfrigérant et on élève la température du bain d'eau à 70°C tout en maintenant une rotation de 250 tours par minute. On constate la fin de la distillation lorsque l'écoulement dans le ballon récepteur 2 s'arrête.

Après la distillation, on arrête l'eau du réfrigérant et on récupère le ballon d'évaporation.



Fig. IV. 11 : Montage de l'évaporateur rotatif.

4ème étape : récupération de l'extrait.

On prend l'échantillon de l'évaporateur rotatif et on le met dans l'étuve à 70°C pour son séchage.



Fig.IV.14 : récupération de l'extrait.

IV.7. Évaluation du rendement de l'extrait

Le calcul du rendement d'une extraction se fait en divisant la masse de l'extrait par la masse de la matière végétale utilisée. La formule suivante est utilisée pour calculer le rendement en pourcentage :

$$R(\%) = \frac{m_{\text{extrait}}}{m_{\text{matière première}}} \cdot 100$$

R : rendement de l'extraction en %.
 m extrait : masse d'extrait en (g).
 m matière première : masse de la matière végétale en (g).

$$R(\%) = \frac{8,745}{100} \times 100 \rightarrow R(\%) = 8,745$$

IV.8. L'élaboration des différentes concentrations à partir de l'extrait brute

Les concentrations employées de l'extrait (FO) pour l'inhibition ont varié entre 0.1 et 0.4g/l. Ces concentrations ont été établies suite à l'analyse de la solubilité de l'extrait dans des milieux corrosifs (H₂SO₄ 1M, NaCl 3%).

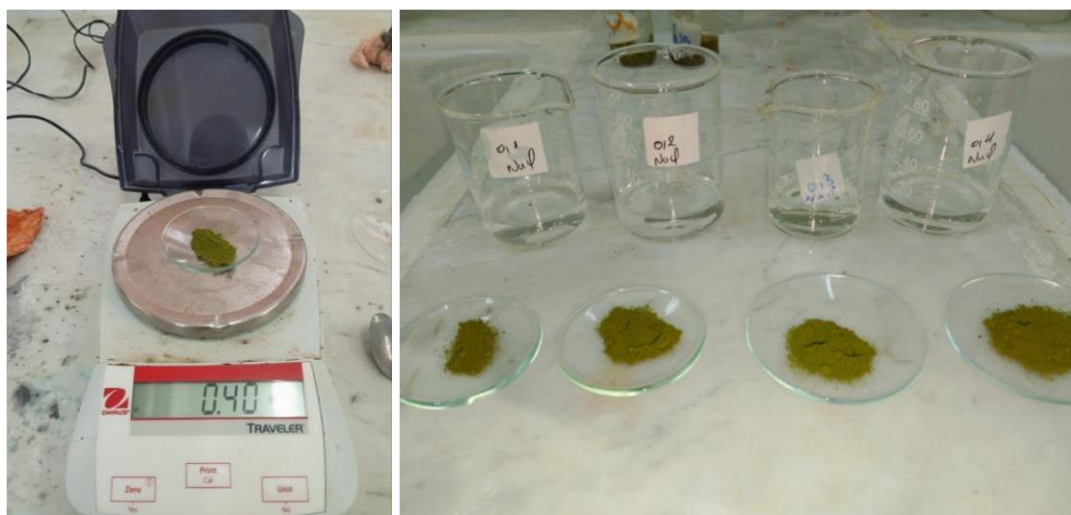


Fig.IV.15 : preparation de l'électrolyte.

IV.9. méthode gravimétrie [93]

Cette approche a l'avantage d'être facile à mettre en œuvre et de ne pas exiger un équipement complexe. Elle requiert juste une balance extrêmement précise avec une marge d'erreur minimale de 10⁻⁴. Cependant, elle n'autorise pas l'exploration des mécanismes impliqués dans la corrosion. Le principe de son fonctionnement se base sur l'évaluation de la diminution de masse (Δm) d'un échantillon métallique de surface (S), lors de son immersion dans une solution corrosive pendant une durée spécifique (tim).



Fig.IV.16 : méthode de perte de masse.

La vitesse de corrosion déterminée par l'équation suivant :

$$V_{corr} = \frac{\Delta m}{S \cdot t}$$

Sachant que $\Delta m = m_i - m_f$.

m_i : la masse de l'échantillon avant l'essai (mg).

m_f : la masse de l'échantillon après l'essai (mg).

V_{corr} : la vitesse de corrosion (mg/cm².h).

S : la surface exposée en cm².

T : temps d'immersion dans la solution (h). L'efficacité inhibitrice E (%) d'un composé étudié est calculée, en utilise la relation suivante (Cf. Annexe 6).

$$E (\%) = [(V_{corr} - V_{inh}) / V_{corr}] \cdot 100$$

V_{corr} : la vitesse de corrosion de l'acier sans inhibiteur.

V_{inh} : la vitesse de corrosion de l'acier avec inhibiteur.

IV.10. Dispositif expérimental de corrosion

Avant d'entreprendre toute action, les échantillons sont soumis à un polissage avec du papier de verre, puis une mesure de leurs dimensions, à savoir l'épaisseur et le diamètre, est effectuée à l'aide d'un pied à coulisse. Par la suite, un dégraissage à l'aide d'acide chlorhydrique 37%, d'acétone, suivi d'un lavage à l'eau distillée et d'un séchage avec un séchoir électrique est réalisé.

Dès que la préparation de la surface est terminée, l'échantillon est pesé et placé sans délai dans l'électrolyte. On a modulé la température de ce dernier entre 30°C et 80°C en utilisant un bain-marie.

Les éléments sont nettoyés, séchés et finalement pesés. Le dispositif employé pour les mesures gravimétriques est illustré dans la figure ci-après.



Fig.IV.17 : Effet de la température sur la corrosion.

IV.1.1. Techniques spectroscopiques

Les méthodes spectroscopiques constituent des techniques physiques pour caractériser et quantifier. On peut définir la spectroscopie moléculaire comme l'analyse de l'interaction entre les ondes électromagnétiques et la matière sur une gamme définie de longueurs d'onde. L'absorption de radiation électromagnétique par une molécule entraîne:

- ❖ Cela correspond à une transition électronique si elle concerne l'ultraviolet ou la lumière visible. Ceci constitue le fondement de la spectroscopie d'absorption UVvisible.

Cette méthode spectroscopique est associée à une gamme de longueurs d'onde :

- ❖ L'ultraviolet-visible couvre la plage de 10 à 700 nm.

IV.11.1. La spectroscopie ultra-violette

L'absorption UV-Visible spectroscopique mesure la diminution de la lumière qui traverse un milieu afin de déterminer les concentrations des substances absorbant.

L'analyse quantitative basée sur le spectre UV-Visible fait généralement appel à la loi de Beer-Lambert, une règle additive qui s'applique tant aux diverses molécules présentes en solution qu'aux différentes formes d'une même molécule. Cette loi est applicable aux solutions diluées.

Dans notre recherche, nous employons cette méthode pour évaluer l'absorbance d'une solution (EFO) pour une longueur d'onde spécifique ou un éventail de longueurs d'ondes sélectionné.

Nous avons employé un spectrophotomètre UV-Visible [94].

❖ Préparation d'échantillon pour analyse UV-Visible

1. Choix du solvant :

- Utiliser un solvant transparent dans l'UV (éthanol).
- Vérifier que le solvant n'absorbe pas dans la zone d'analyse.

2. Préparation de la solution :

Dans ce travail, une série de solutions a été préparée en dissolvant différentes quantités de l'extrait de feuilles d'olivier dans l'éthanol afin d'obtenir plusieurs concentrations. Les solutions ont été soigneusement homogénéisées pour assurer une bonne dissolution de l'extrait. Avant les mesures, une cuve remplie d'éthanol pur a été utilisée comme solution de référence (blanc) pour étalonner le spectrophotomètre UV-Visible. Ensuite, les solutions contenant l'extrait ont été introduites successivement dans la cuve, et leurs spectres d'absorbance ont été enregistrés dans le domaine spectral approprié.

5. Préparation du blanc :

- Remplir une cuve avec le solvant pur.
- Sert à calibrer l'appareil (zéro).

6. Remplissage de la cuve :

- Utiliser des cuves en quartz (obligatoire pour UV).
- Remplir sans bulles et essuyer les parois avec un papier non pelucheux.

7. Mesure :

- Placer la cuve dans le spectrophotomètre.
- Balayer la gamme de longueurs d'onde souhaitée (ex : 200–400 nm)

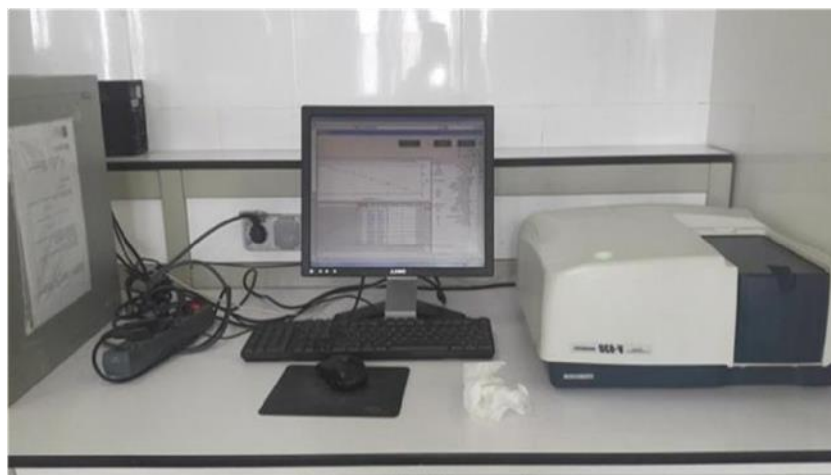


Fig.IV.18 : Montage spectrophotometer UV.

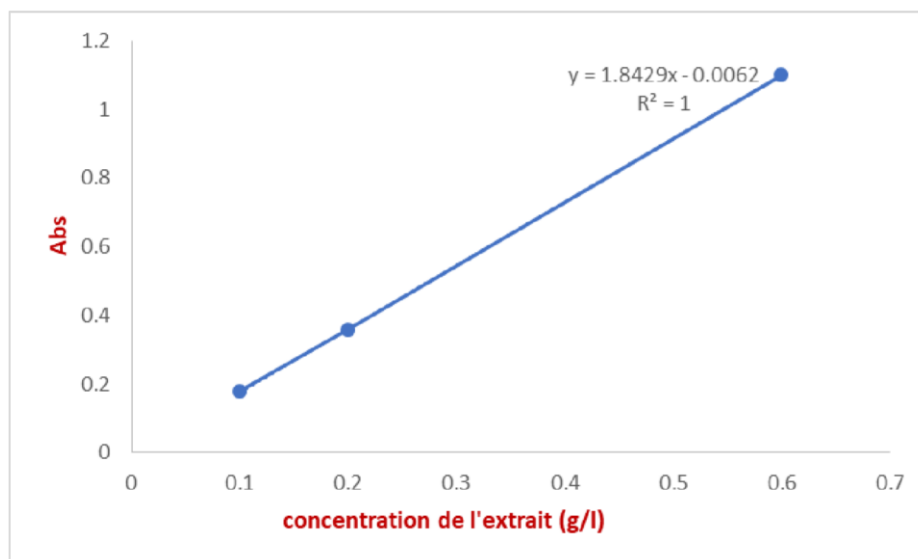


Fig.IV.19 : la concertation de l'extrait en fonction de l'absorbance.

- ❖ Étant donné les résultats prometteurs obtenus lors des tests antérieurs, une nouvelle recherche a été lancée dans le but d'étendre l'applicabilité de l'inhibiteur tiré des feuilles d'olivier. L'approche récente a intégré l'inhibiteur dans une résine polyester insaturée afin de développer un revêtement anti-rouille

protecteur. Le but de cette formulation est de renforcer la résistance à la corrosion du métal en conjuguant l'effet de barrière du revêtement avec les caractéristiques inhibitrices de l'extrait naturel.

Protocol pour la préparation et l'évaluation d'un revêtement anticorrosion

- **Préparation du revêtement**

Afin d'évaluer l'efficacité de l'extrait de feuilles d'olivier en tant qu'agent anticorrosion intégré dans un revêtement polymère, on a fait appel à une résine polyester insaturée comme matrice.

Quatre béchers ont été mis en place, avec chacun une contenance de 20mL de résine polyester insaturée. Pour chaque bécher, on a incorporé 0,15mL de peroxyde de méthyléthylcétone (MEKP), servant de catalyseur, tout en agitant.

De plus, trois mélanges inhibiteurs ont été élaborés en dissolvant 0,1 g, 0,3 g et 0,5 g de poudre d'extrait de feuilles d'olivier dans 10mL d'éthanol. Chaque solution a par la suite été intégrée dans un bécher contenant le mélange résine-durcisseur. Les mélanges ont subi une agitation d'environ 10 minutes jusqu'à obtenir une dispersion de l'inhibiteur aussi uniforme que possible au sein de la matrice polymérique.

Un quatrième récipient, qui ne contient que la résine et le durcisseur, a été gardé comme référence (sans inhibiteur).

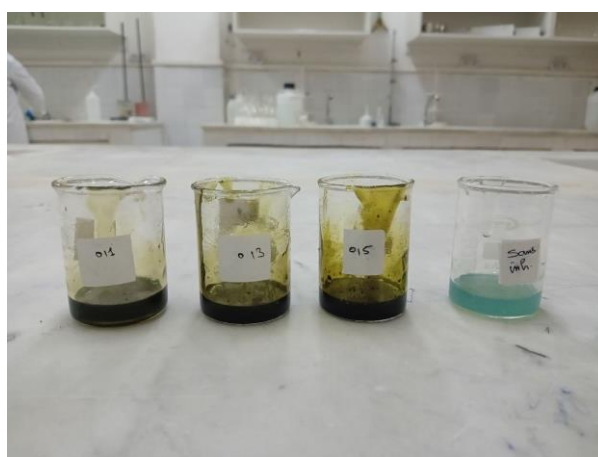


Fig.IV.20 : Préparation du revêtement.

Application du revêtement sur les échantillons d'acier

Les divers revêtements confectionnés ont été étalés sur la surface des échantillons d'acier ayant subi un nettoyage et un dégraissage préalables.

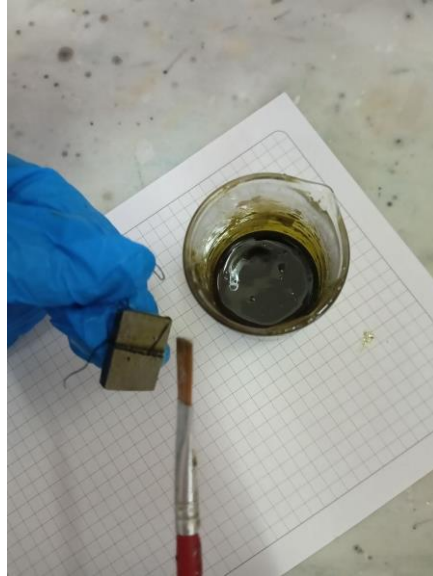


Fig.IV.21 : Application du revêtement.

On a ensuite permis aux échantillons revêtus de sécher à température ambiante pendant autour d'une semaine. Même si le revêtement n'a pas complètement durci à cause des contraintes de temps, les échantillons ont été employés pour des tests de corrosion.

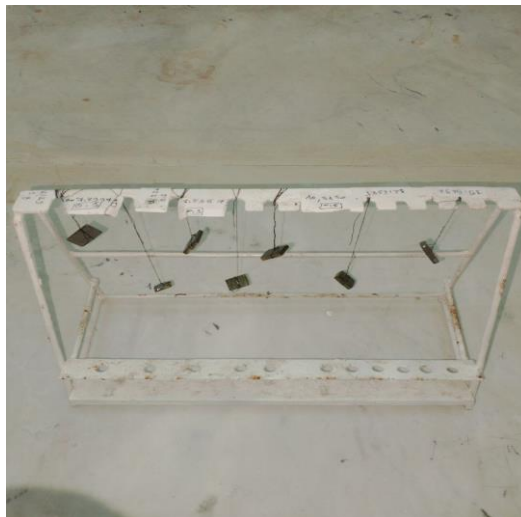


Fig.IV.22 : Séchage à température ambiante.

- **Essai de corrosion**

Une fois séchés, les échantillons ont été pesés avec une balance analytique pour identifier leur masse de départ.

- Les échantillons ont par la suite été plongés dans une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) préparée à l'avance. On a estimé la réduction de masse en enlevant les échantillons après des périodes de trempage de 1, 3, 5, 7 et 9 heures.



Fig.IV.23 : Immersion des échantillons dans les solutions préparées.

- Suite à chaque période d'exposition, on a retiré les échantillons de la solution corrosive, on les a rincés, séchés puis pesés dans le but d'évaluer leur masse résiduelle. L'évolution de la masse observée a permis d'apprécier l'efficacité d'inhibition du revêtement incorporant l'extrait de feuilles d'olivier et de comparer les différentes concentrations analysées.

Chapitre V

Résultats et discussion

L'objectif de ce chapitre est de présenter les résultats du test phytochimique, spectroscopique ainsi que l'étude portant sur l'inhibition de l'acier au carbone (C-1020) en solution d'acide sulfurique H_2SO_4 1M, chlorure de sodium NaCl à 3%, par l'extrait des feuilles d'olive, en utilisant la méthode gravimétrique dans la plage de température $[30^{\circ}C - 60^{\circ}C - 80^{\circ}C]$.

V.1. Résultats du test phytochimique

L'analyse initiale de la composition phytochimique de la partie aérienne traitée et choisie pour cette étude a permis de révéler la présence de plusieurs groupes illustrés dans les figures et tableaux ci-après :

V.1.1. Résultats des feuilles d'olive

❖ Flavonoïdes



Fig.V.1 : Mise en évidence des flavonoïdes.

La Figure.V.1. illustre la présence de flavonoïdes par l'émergence d'une teinte rouge.

❖ Alcaloïdes

❖ Test de Mayer



Fig.V.2 : Mise en évidence des alcaloïdes par le test de Mayer.

❖ Test de Wagner



Fig.V.3 : Mise en évidence des alcaloïdes par le test de wagner.

Les Figures.V.2 etV.3 illustrent la présence d'alcaloïdes grâce aux deux tests de Mayer et Wagner, qui produisent respectivement un précipité blanc (test Mayer) et un précipité brun (test Wagner).

❖ Anthraquinones libres



Fig.V.4 : Mise en évidence des Anthraquinones libres.

Selon la figure V.4 nous observons une teinte jaune dans la phase aqueuse qui signale la présence de quinones libres.

❖ Les tanins



Fig.V.5 : Mise en évidence des tanins.

La figure V.5 illustre la présence de tanins grâce à l'apparition d'une teinte vert-noir résultant de la réaction de l'extrait des FO avec le réactif du chlorure ferrique, donnant ainsi une couleur noire.

❖ les saponines

Fig.V.6 : Mise en évidence des saponines.

La Figure V.6 illustre de manière frappante l'apparition du moussage avec une hauteur qui dépasse 1 cm, ce qui atteste d'une présence significative des saponines dans les FO.

❖ les glycosides

Fig.V.7 : Mise en évidence des glycosides.

Selon la Figure.V.7 on observe une seule phase, ce qui signifie que l'extrait des FO ne renferme pas de glycosides.

Le Tableau V.1 : résume les résultats obtenus grâce à la phytochimie effectuée sur les FO.

Composées organiques	Extrait de feuille d'olive
Les flavonoids	+
Les alcaloïdes	+
Anthraquinones libres	+
les tanins	++
les saponines	++
Les glycosides	+

L'analyse phytochimique de l'extrait des FO révèle la présence et l'abondance significative de composés organiques azotés et parfois oxygénés. Ces composés sont généralement des hétérocycles aromatiques comme les tanins, les saponosides et l'alcaloïde.

V.2. Calcule du rendement de l'extraction

$$R(\%) = \frac{m_{\text{extrait}}}{m_{\text{matière première}}} \cdot 100$$

V.3. Résultats obtenus par la méthode gravimétrie

V.3. 1. Résultats du milieu corrosif NaCL 3%

Le calcul de la vitesse de corrosion et de l'efficacité inhibitrice de l'acier se fait à partir des mesures de perte de masse obtenues lors de chaque essai. Les échantillons sont plongés dans une solution saline à 3%, avec ou sans ajout de différentes concentrations d'inhibiteur (extrait provenant des feuilles d'olive). Ces concentrations fluctuent entre 0,1g/l et 0,4g/l selon les temps d'immersion (1h, 3h, 5h, 7h, 9h). L'efficacité est déterminée après une exposition à la température ambiante.

a) Influence de la concentration

Tableau.V.2 : les paramètres de corrosion mesurent par gravimétrie de l'acier au carbone (C-1020) dans NaCl 3% pendant 1h en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur.

Concentration (g/l)	mi(g)	mf(g)	$\Delta m(g)$	Vcor(g/cm ² .h)	E (%)
0	12,4749	12,4703	0,0046	0,2373E-03	-
0,1	12,8763	12,8728	0,0035	0,1674E-03	29,4489
0,2	8,0616	8,0591	0,0025	0,1548E-03	34,7446
0,3	8,8048	8,8033	0,0015	6,38E-05	73,1083
0,4	12,689	12,6881	0,0009	4,34E-05	81,718

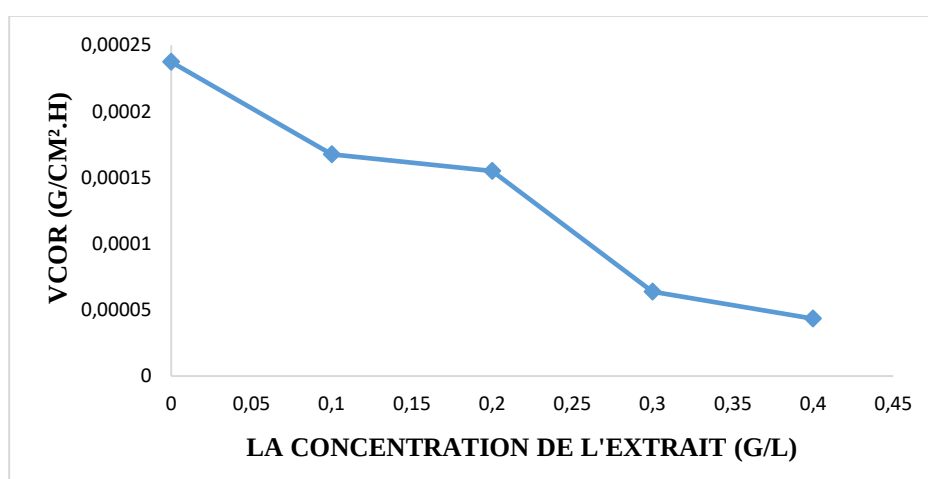


Fig.V.8 : L'évolution de la vitesse de corrosion de l'acier(C-1020) en fonction de la concentration de l'extrait des feuilles d'olive en milieu NaCl 3%, à la température ambiante.

❖ Discussion

L'analyse présentée dans la figure V.8 indique que le taux de corrosion décroît à mesure que la concentration de l'extrait des FO augmente, jusqu'à atteindre un niveau optimal fixé à 0.4g/l, avec un taux approximatif de 0.00005g/cm².h pour une durée d'immersion de 9 heures. Cela signifie que l'extrait de FO possède d'excellentes propriétés anticorrosives pour l'acier dans un environnement NaCl 3%, ce qui justifie pourquoi l'extrait s'adsorbe beaucoup plus facilement, et une large quantité se fixe sur la surface de l'acier, empêchant ainsi sa dissolution.

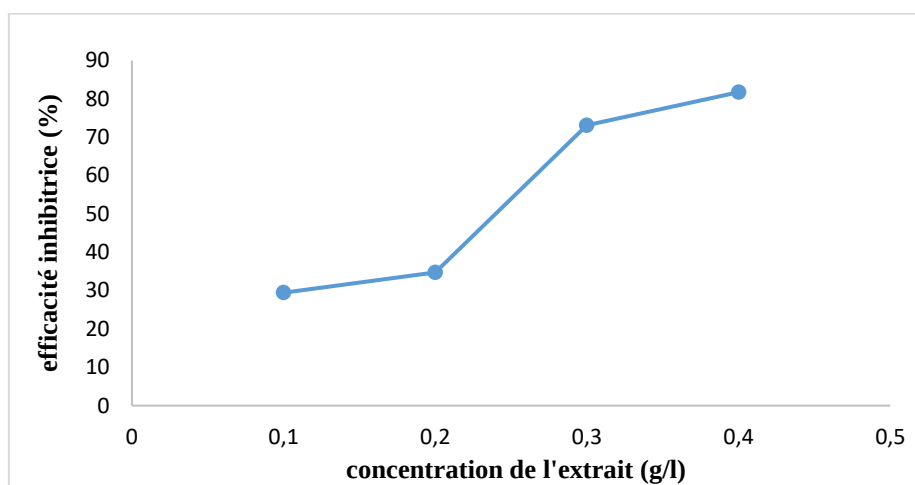


Fig.V.9 : L'évolution de l'efficacité inhibitrice de l'acier (C-1020) en fonction de la concentration de l'extrait des feuilles d'olive en milieu NaCl 3%, à la température ambiante.

❖ Discussion

Les données du tableau V.2, on constate que l'efficacité inhibitrice s'accroît proportionnellement à la concentration de l'extrait de FO dans le NaCl à 3%. Nous observons que l'efficacité d'inhibition optimale atteint 81,71 % pour une concentration de 0,4 g/l.

Tableau.V.3 : les paramètres de corrosion mesurent par gravimétrie de l'acier au carbone (C-1020) dans NaCl 3% pendant 3h en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur.

Concentration (g/l)	mi (g)	mf (g)	$\Delta m(g)$	Vcor (g/cm ² .h)	E (%)
0	12,4749	12,4504	0,0245	0,4214E-03	-
0,1	12,8763	12,8649	0,0114	0,1818E-03	56,8533
0,2	8,0616	8,0582	0,0034	7,0219E-05	83,3367
0,3	8,8048	8,8023	0,0025	3,55E-05	91,5849
0,4	12,689	12,6871	0,0019	3,05E-05	92,7534

Tableau.V.4 : les paramètres de corrosion mesurent par gravimétrie de l'acier au carbone (C-1020) dans NaCl 3% pendant 5h en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur.

Concentration (g/l)	mi(g)	mf(g)	$\Delta m(g)$	Vcor (g/cm ² .h)	E (%)
0	12,4749	12,4452	0,0297	0,3065E-03	-
0,1	12,8763	12,8546	0,0217	0,2076E-03	32,2497
0,2	8,0616	8,058	0,0036	4,4609E-05	85,4455
0,3	8,8048	8,8021	0,0027	2,2978E-05	92,5029
0,4	12,689	12,6866	0,0024	2,1108E-05	93,1131

Tableau.V.5 : les paramètres de corrosion mesurent par gravimétrie de l'acier au carbone (C-1020) dans NaCl 3% pendant 7h en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur.

Concentration (g/l)	mi(g)	mf(g)	$\Delta m(g)$	$V_{cor}(g/cm^2.h)$	E (%)
0	12,4749	12,4329	0,042	0,3096E-03	-
0,1	12,8763	12,8532	0,0231	0,1578E-03	49,0019
0,2	8,0616	8,0577	0,0039	3,4519E-05	88,8504
0,3	8,8048	8,8015	0,0033	2,0061E-05	93,5203
0,4	12,689	12,6861	0,0029	1,9975E-05	93,5481

Tableau.V.6 : les paramètres de corrosion mesurent par gravimétrie de l'acier au carbone (C-1020) dans NaCl 3% pendant 9h en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur.

Concentration (g/l)	mi(g)	mf(g)	$\Delta m(g)$	$V_{cor}(g/cm^2.h)$	E (%)
0	12,4749	12,4297	0,0452	0,2591E-03	-
0,1	12,8763	12,8523	0,024	0,1275E-03	50,764
0,2	8,0616	8,0573	0,0043	2,9602E-05	88,5768
0,3	8,8048	8,8012	0,0036	1,7021E-05	93,4317
0,4	12,689	12,6855	0,0035	1,6381E-05	93,6787

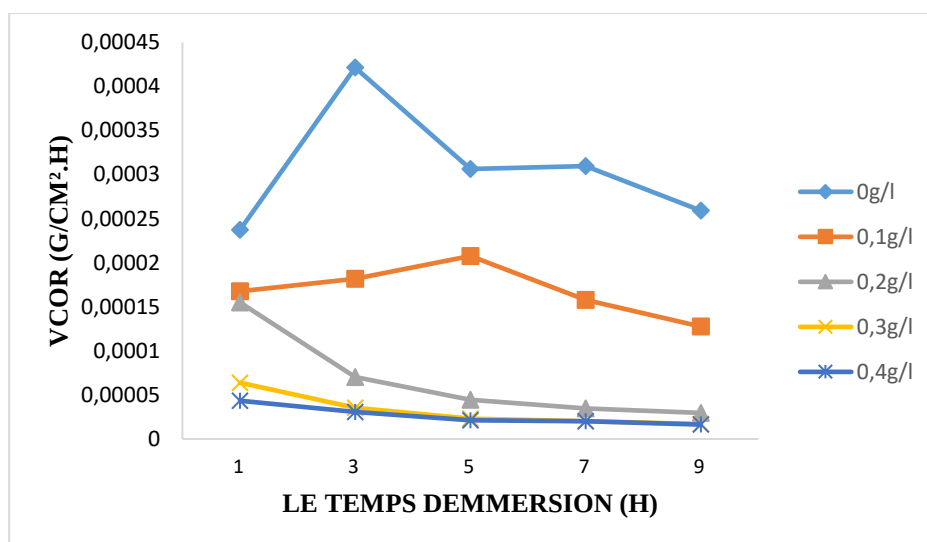


Fig.V.10 : L'évolution de la vitesse de corrosion de l'acier (C-1020) à différente concentration d'extrait des feuilles d'olive en fonction du temps d'immersion en milieu NaCl 3% à la température ambiante.

❖ Discussion

Le graphique illustre que l'extrait de feuilles d'olivier diminue considérablement la vitesse de corrosion de l'acier C-1020 dans une solution à 3% de NaCl. La vitesse de corrosion se réduit graduellement avec la hausse de la concentration de l'extrait, la protection optimale étant atteinte à 0,4 g/L. On attribue cette efficacité à la création d'une pellicule protectrice adsorbée sur la surface de l'acier, qui réduit son interaction avec l'environnement corrosif. En outre, cette barrière protectrice demeure constante au fil du temps, attestant de l'efficacité de l'extrait de feuilles d'olivier en tant que préventif vert contre la corrosion.

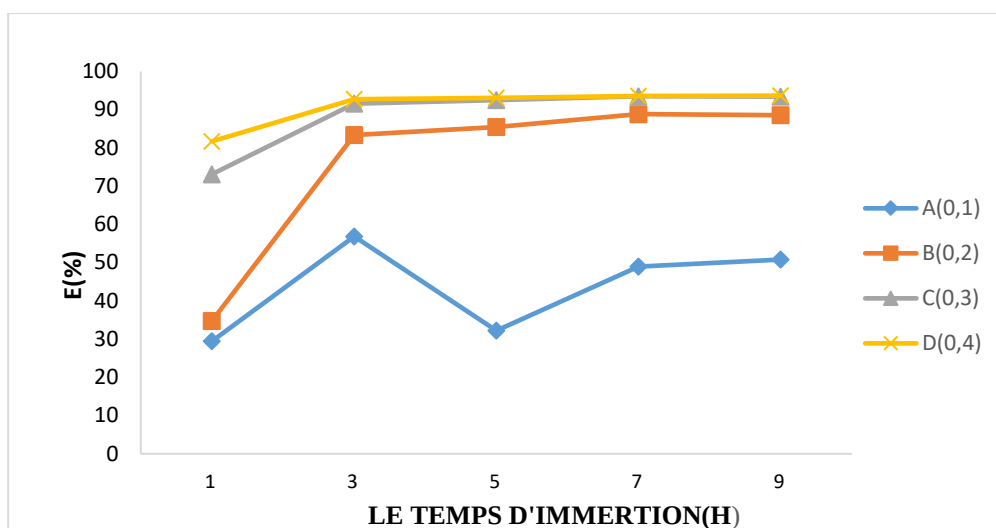


Fig.V.11 : L'évolution de l'efficacité inhibitrice de l'acier (C-1020) à différentes concentrations d'extrait des feuilles d'olive en fonction du temps d'immersion en milieu NaCl 3% à la température ambiante.

❖ Discussion

L'illustration démontre que la capacité inhibitrice de l'extrait de feuilles d'olivier s'intensifie en fonction de la concentration et de la durée d'immersion. Des performances optimales sont observées avec des concentrations élevées (0,3g/l et 0,4 g/L), se rapprochant d'une efficacité de 90 à 92 %, dû à la création d'un film de protection durable sur l'acier. De ce fait, l'extrait de feuilles d'olivier se révèle être un inhibiteur écologique efficace de la corrosion de l'acier (C-1020) dans une solution de NaCl à 3 %.

c) Effet de la température du milieu

Tableau.V.7 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans NaCl 3% en absence et en présence d'extrait des FO. $t_{im} = 30\text{min}$ à $T = 30^\circ\text{C}$.

concentration(g/l)	$m_i(g)$	$M_f(g)$	$\Delta m(g)$	V_{cor} (g/cm ² .h)	E (%)
0	15,7277	15,7238	0,0039	0,8477E-03	-
0,1	15,7217	15,7214	0,0003	6,52E-05	92,3077
0,2	12,4038	12,4014	0,0024	0,6719E-03	20,7349
0,3	12,5465	12,5416	0,0049	0,6313E-03	25,5184
0,4	8,7881	8,7873	0,0008	0,3408E-03	59,7876

Tableau.V.8 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans NaCl 3% en absence et en présence d'extrait des FO. $t = 30 \text{ min}$ à $T = 60^\circ\text{C}$.

concentration (g/l)	mi (g)	mf (g)	$\Delta m(g)$	Vcor (g/cm ² .h)	E (%)
0	15,7178	15,7169	0,0009	0,3460E-03	-
0,1	12,3974	12,3964	0,001	0,2799E-03	19,0978
0,2	12,3985	12,3979	0,0006	0,1473E-03	57,4206
0,3	8,7842	8,7834	0,0008	0,1260E-03	63,5756
0,4	10,4674	10,467	0,0004	9,63E-05	72,1724

Tableau.V.9 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans NaCl 3% en absence et en présence d'extrait des FO. $t = 30 \text{ min}$ à $T = 80^\circ\text{C}$.

concentration (g/l)	mi (g)	mf (g)	$\Delta m(g)$	Vcor (g/cm ² .h)	E (%)
0	15,7149	15,7131	0,0018	0,1635E-02	-
0.1	10,4412	10,4348	0,0064	0,1241E-02	24,0815
0.2	12,3846	12,3824	0,0022	0,6159E-03	62,3352
0.3	12,7707	12,769	0,0017	0,5544E-03	66,0928
0.4	15,694	15,6922	0,0018	0,3912E-03	76,0756

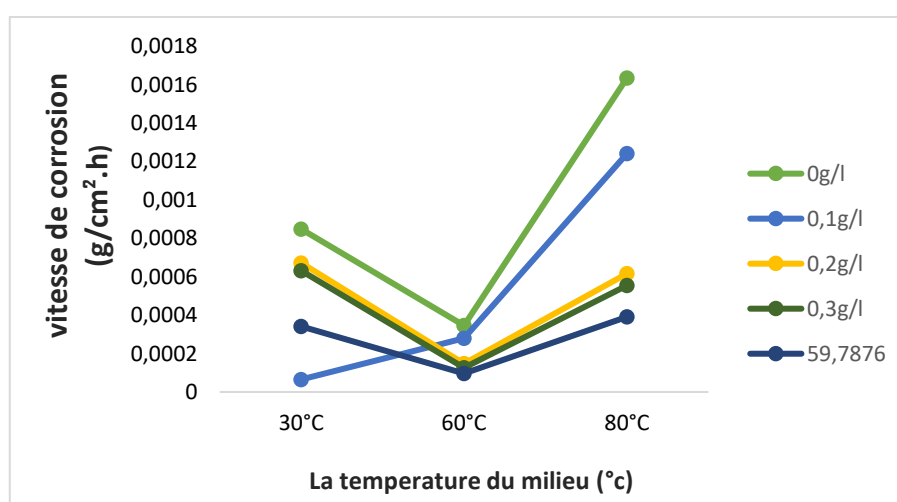


Fig.V.12 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion de l'acier dans NaCl 3% en absence et en présence des différentes concentrations de l'extrait des FO pour $t_{im} = 30 \text{ min}$.

❖ Discussion

Le graphique indique que la hausse de température accélère la corrosion de l'acier, tandis que l'extrait de feuilles d'olivier diminue efficacement le taux de corrosion. Sa performance

S'améliore avec la concentration et demeure haute même à une température de 80°C , grâce à la création d'une couche de protection durable à la surface du métal.

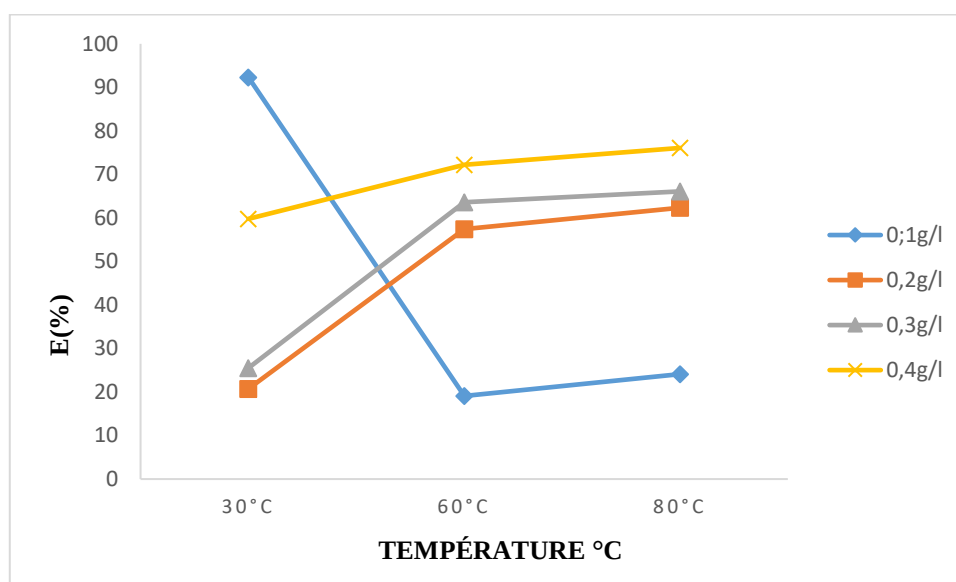


Fig.V.13 : Effet de la température sur l'efficacité inhibitrice de l'acier dans NaCl 3% en absence et en présence des différentes concentrations de l'extrait des FO pour $t_{im} = 30 \text{ min}$.

❖ Discussion

Les conclusions indiquent que l'activité inhibitrice de l'extrait de feuilles d'olivier varie en fonction de la température et de la concentration. L'efficacité à une concentration faible (0,1 g/L) diminue nettement avec l'augmentation de la température, ce qui suggère la prééminence de la physisorption, moins stable face à la chaleur. Cependant, à des concentrations supérieures (0,2–0,4 g/L), l'efficacité d'inhibition croît avec la température, atteignant un pic de 76,07 % à 80°C pour 0,4 g/L. Ce comportement

implique un processus de chimisorption ou d'adsorption combinée, menant à l'établissement d'une couche de protection plus stable et davantage résistante à la corrosion. Donc, l'extrait de feuilles d'olivier démontre une efficacité inhibitrice maximale en fortes concentrations et à haute température.

- **Influence de la température pour un temps d'immersion (1h) dans le milieu NaCl 3%.**

Tableau.V.10. Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans NaCl 3% en absence et en présence d'extrait des FO $t_{im} = 1h$ à $T=30^{\circ}C$.

concentration (g/l)	mi (g)	mf (g)	$\Delta m(g)$	Vcor (g/cm ² .h)	E (%)
0	15,7277	15,7233	0,0044	0,4781E-03	-
0,1	15,7217	15,7191	0,0026	0,2825E-03	40,909
0,2	12,4038	12,4006	0,0032	0,2635E-03	44,894
0,3	12,5465	12,5395	0,007	0,258E-03	46,0463
0,4	8,7881	8,7864	0,0017	0,1753E-03	63,3261

Tableau.V.11 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans NaCl 3% en absence et en présence d'extrait des FO $t_{im} = 1h$ à $T=60^{\circ}C$.

concentration (g/l)	mi (g)	mf(g)	$\Delta m(g)$	Vcor (g/cm ² .h)	E (%)
0	15,7178	15,716	0,0018	0,4284E-03	-
0,1	12,3974	12,3957	0,0017	0,1859E-03	56,6036
0,2	12,3985	12,3975	0,001	0,1399E-03	67,3258
0,3	8,7842	8,783	0,0012	0,1792E-03	58,1563
0,4	10,4674	10,4661	0,0013	0,1400E-03	67,3200

Tableau.V.12 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans NaCl 3% en absence et en présence d'extrait des FO $t_{im} = 1h$ à $T = 80^{\circ}C$.

concentration (g/l)	m_i (g)	m_f (g)	Δm (g)	V_{cor} (g/cm ² .h)	E (%)
0	15,7149	15,7102	0,0047	0,1118E-02	-
0,1	10,4412	10,4329	0,0083	0,9987E-03	48,1516
0,2	12,3846	12,3802	0,0044	0,5403E-03	51,7016
0,3	12,7707	12,7677	0,003	0,4892E-03	56,2649
0,4	15,694	15,691	0,003	0,3260E-03	70,8550

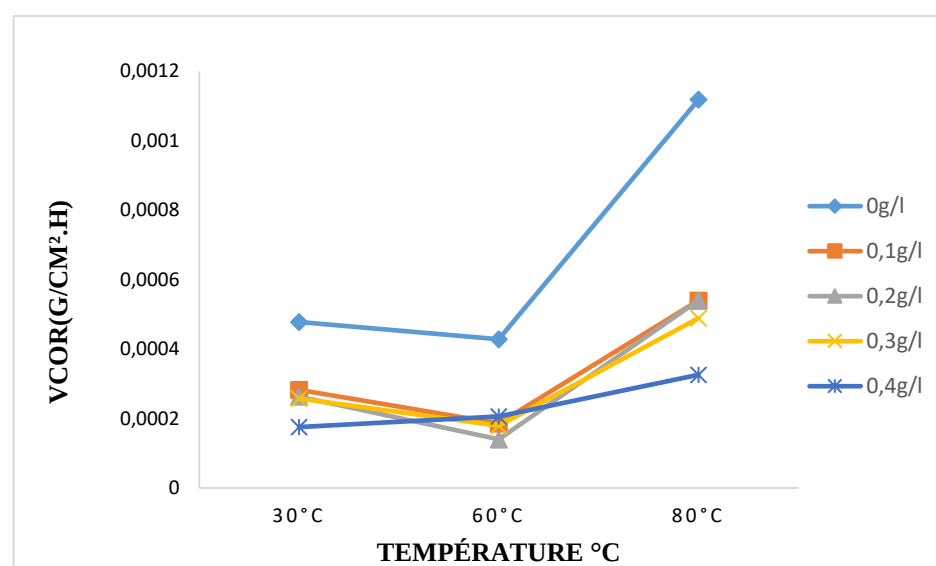


Fig.V.14 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion de l'acier dans NaCl 3% en absence et en présence de l'extrait des FO pour $t_{im} = 1h$.

❖ Discussion

Les observations démontrent un accroissement de la vitesse de corrosion de l'acier C1020 en fonction de la température, alors que l'incorporation de l'extrait de feuilles d'olivier diminue de manière notable la corrosion à toutes les concentrations examinées. Bien qu'il y ait une légère diminution de l'efficacité inhibitrice à haute température, une concentration de 0,4 g/L a offert la meilleure protection, prouvant l'efficacité de l'inhibiteur même sous des conditions de chaleur extrême.

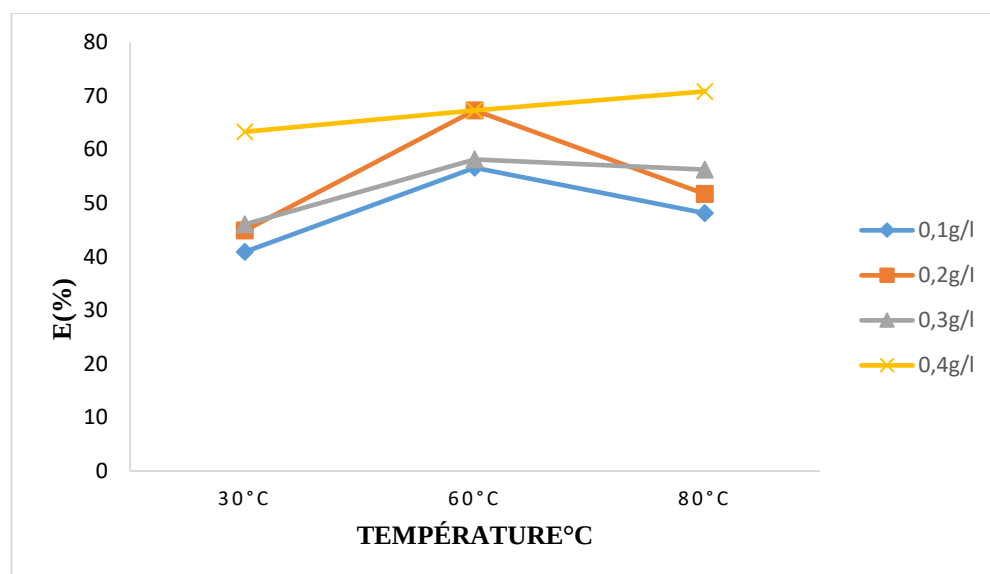


Fig.V.15 : Effet de la température sur l'efficacité inhibitrice de l'acier dans NaCl 3% en absence et en présence des différentes concentrations de l'extrait des FO pour $t_{im} = 1h$.

❖ Discussion

Généralement, l'efficacité d'inhibition augmente en fonction de la concentration de l'inhibiteur. Entre 30 et 60 °C, on note une amélioration de la protection, alors qu'à 80 °C, une baisse est observée pour les concentrations faibles. Toutefois, l'efficacité optimale à toutes les températures analysées est conservée par la concentration de 0,4 g/L, signalant l'établissement d'une couche protectrice robuste et efficace.

- **Influence de la température pour un temps d'immersion (3h) dans le milieu NaCl 3%**

Tableau.V.13 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans NaCl 3% en absence et en présence d'extrait des FO **tim= 3h à T=30°C.**

concentration (g/l)	mi (g)	mf(g)	$\Delta m(g)$	Vcor (g/cm ² .h)	E (%)
0	15,7277	15,7223	0,0054	0,1038E-02	-
0,1	15,7217	15,7181	0,0036	0,3912E-03	62,3144
0,2	12,4038	12,4014	0,0024	0,3359E-03	67,6390
0,3	12,5465	12,5392	0,0073	0,6335E-03	38,9709
0,4	8,7881	8,7859	0,0022	0,4687E-03	54,8534

Tableau.V.14 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans NaCl 3% en absence et en présence d'extrait des FO **tim= 3h à T=60°C.**

concentration (g/l)	mi (g)	mf(g)	$\Delta m(g)$	Vcor (g/cm ² .h)	E (%)
0	15,7178	15,7131	0,0047	0,5107E-03	-
0,1	12,3974	12,395	0,0024	0,2608E-03	48,9361
0,2	12,3985	12,3966	0,0019	0,2659E-03	47,9294
0,3	8,7842	8,7823	0,0019	0,1649E-03	67,7152
0,4	10,4674	10,4639	0,0035	0,2757E-03	46,0200

Tableau.V.15 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans NaCl 3% en absence et en présence d'extrait des FO $t_{im}=3h$ à $T=80^{\circ}C$.

concentration (g/l)	m_i (g)	m_f (g)	Δm (g)	V_{cor} (g/cm ² .h)	E (%)
0	15,7149	15,7026	0,0123	0,1708E-02	-
0,1	10,4412	10,4315	0,0097	0,1054E-02	38,2794
0,2	12,3846	12,3789	0,0057	0,7979E-03	53,2835
0,3	12,7707	12,7668	0,0039	0,3384E-03	80,1818
0,4	15,694	15,6902	0,0038	0,3249E-03	80,9743

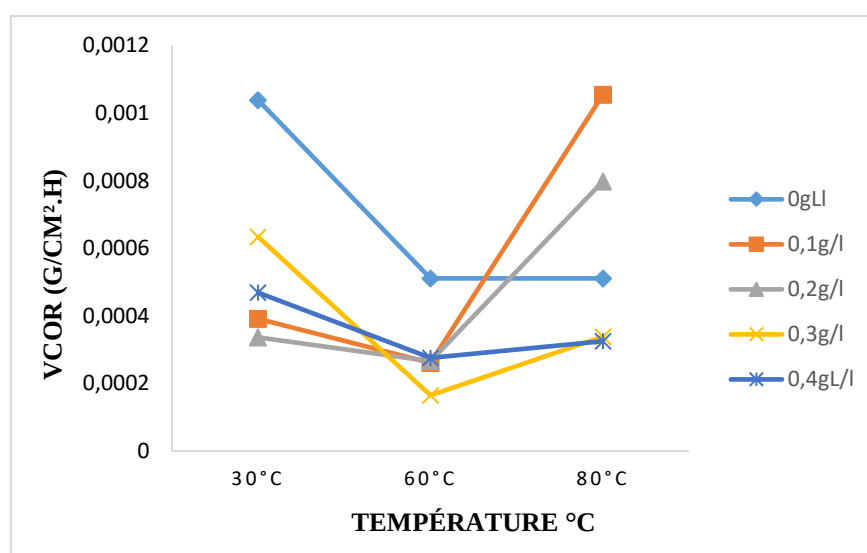


Fig.V.16 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion de l'acier dans NaCl 3% en absence et en présence des différentes concentrations de l'extrait des FO pour $t_{im}=3h$.

❖ Discussion

Les graphiques indiquent que l'extrait FO diminue considérablement le taux de corrosion de l'acier dans une solution à 3% de NaCl, surtout à 40 et 60°C, où son efficacité est manifeste pour l'ensemble des concentrations. À 80 °C, les faibles concentrations (0,1 et 0,2 g/L) entraînent une hausse notable de la corrosion, diminuant ainsi fortement leur efficacité. En revanche, les concentrations supérieures (0,3 et 0,4 g/L) demeurent plus constantes et assurent une protection supérieure. Ceci signifie que

l'efficacité de l'inhibiteur est liée à sa concentration et qu'elle se réduit à des températures élevées lorsque la concentration est basse.

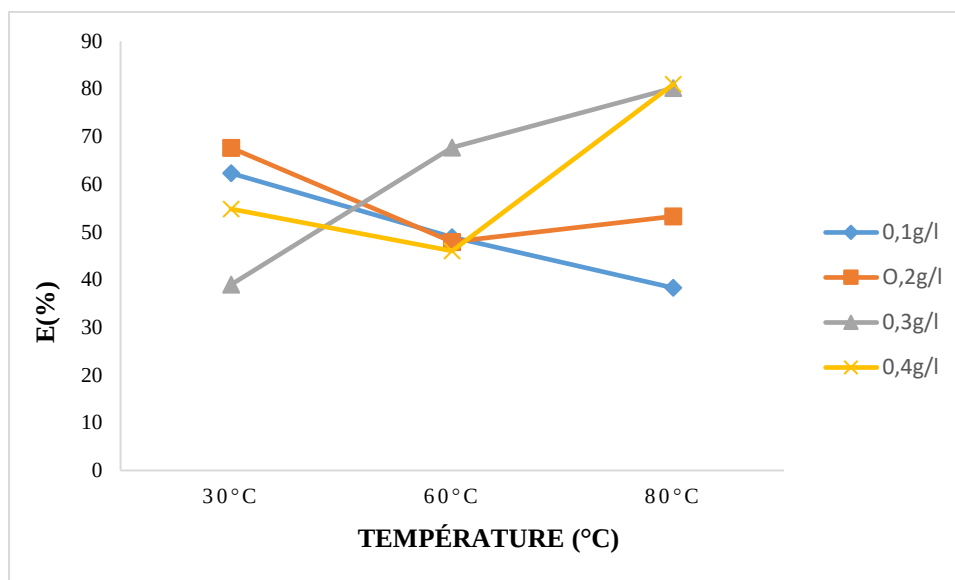


Fig.V.17 : Effet de la température sur l'efficacité inhibitrice de l'acier dans NaCl 3% en absence et en présence des différentes concentrations de l'extrait des FO pour $t_{im}=3h$.

❖ Discussion

Les graphiques indiquent que l'efficacité de l'inhibition varie en fonction à la fois de la température et de la concentration. Habituellement, à des concentrations faibles, celle-ci décroît avec la hausse de la température, signalant une adsorption physique instable peu durable. Cependant, à des niveaux de concentration plus élevés, l'efficacité s'accroît et atteint son optimum à 80 °C, indiquant une adsorption chimique plus stable. Généralement, les performances optimales de l'inhibiteur sont atteintes à de fortes concentrations et à une température élevée.

V.3.2. Résultat du milieu corrosif H₂SO₄ 1M

Le taux de corrosion et l'efficacité de l'inhibition de l'acier sont déterminés à partir des relevés de perte de masse pour chaque essai. Les échantillons sont plongés dans une solution H₂SO₄ 1M, avec ou sans ajout de diverses concentrations d'inhibiteur (provenant des feuilles d'olive). Ces concentrations varient de 0,1 à 0,4g/l en fonction de différents temps d'immersion (1h, 3h, 5h, 7h, 9h). La rapidité est l'efficacité évaluée après une période d'exposition à la température ambiante.

a) Influence de la concentration

Tableau.V.16 : Les valeurs de la vitesse de corrosion mesurés par gravimétrie de l'acier (C-1020) dans H₂SO₄ 1M pendant 1h en absence et en présence des différentes concentrations de l'inhibiteur à la température ambiante.

Concentration(g/l)	mi(g)	mf(g)	$\Delta m(g)$	Vcor(g/cm ² .h)	E (%)
0	11,5104	11,5013	0,0091	6.3194E-04	-
0,1	15,7417	15,7402	0,0015	7.8843E-05	87,5236
0,2	12,4175	12,4115	0,006	3.7082E-04	41,3203
0,3	10,9063	10,9007	0,0056	3.4125E-04	45,9996
0,4	12,8425	12,8406	0,0019	8.3998E-05	86,7079

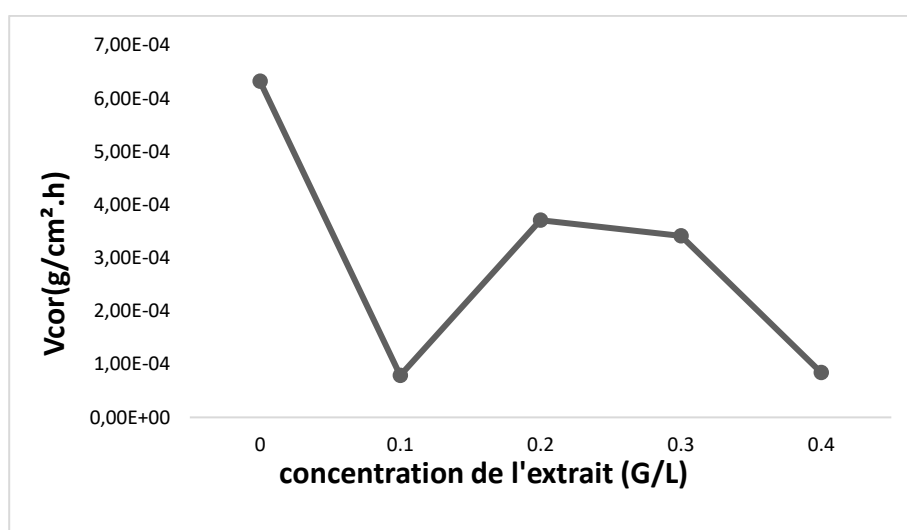


Figure.V.18 : L'évolution de la vitesse de corrosion de l'acier (C-1020) en fonction de la concentration de l'extrait des feuilles d'olive en milieu H_2SO_4 1M, à la température ambiante.

❖ Discussion

Le graphique indique que la corrosion de l'acier C-1020 est rapide sans inhibiteur en raison de l'influence du milieu acide, tandis que l'intégration d'extrait de feuilles d'olivier à une concentration de 0,1 g/L provoque une réduction significative du taux de corrosion. Ceci atteste de son efficacité pour protéger l'acier contre la corrosion.

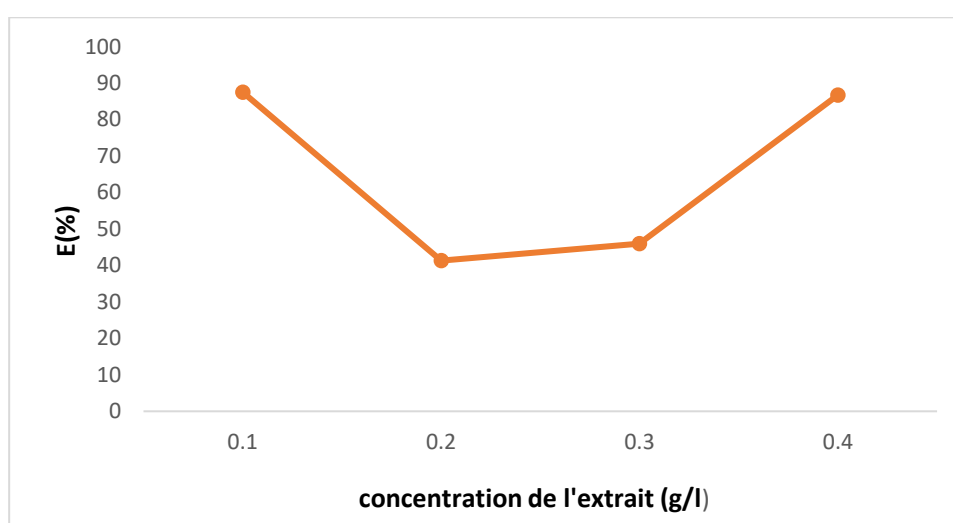


Fig.V.19 : L'évolution de l'efficacité inhibitrice de l'acier (C-1020) en fonction de la concentration de l'extrait des feuilles d'olive en milieu H_2SO_4 1M, à la température ambiante.

❖ Discussion

Les données indiquent que l'efficacité d'inhibition fluctue de façon non linéaire en fonction de la concentration. Elle décroît à des concentrations intermédiaires puis remonte à haute concentration. Ce comportement révèle que l'efficacité de l'inhibiteur est liée à sa manière d'adsorber sur la surface de l'acier, avec la création d'une couche protectrice plus stable à des concentrations élevées.

b) Influence de temps d'immersion

L'impact de la durée d'immersion sur la rapidité de corrosion et l'efficacité inhibitrice, avec ou sans extrait des FO, est déterminé à partir des données de perte de masse avant et après une période d'immersion dans un environnement donné.

▪ Influence de temps d'immersion (3h) dans le milieu H₂SO₄ 1M

Tableau.V.17 : Les paramètres de corrosion mesurés par gravimétrie de l'acier (C-1020) dans H₂SO₄ 1M pendant 3h en absence et en présence des différentes concentrations de l'inhibiteur a La température ambiante.

Concentration(g/l)	Mi(g)	Mf(g)	$\Delta m(g)$	Vcor(g/cm ² .h)	E (%)
0	11,5104	11,4305	0,0799	1.8495E-03	-
0,1	15,7417	15,7361	0,0056	9.8116E-05	94,6949
0,2	12,4175	12,4115	0,006	1.2360E-04	93,1873
0,3	10,9063	10,8916	0,0147	2.9854E-04	83,8583
0,4	12,8425	12,8392	0,0033	9.2398E-05	95,0041

Tableau.V.18 : Les paramètres de corrosion mesurés par gravimétrie de l'acier (C-1020) dans H₂SO₄ 1M pendant 5h en absence et en présence des différentes concentrations de l'inhibiteur a La température ambiante.

Concentration(g/l)	mi(g)	mf(g)	$\Delta m(g)$	Vcor(g/cm ² .h)	E (%)
0	11,5104	11,2659	0,2445	3.3958E-03	-
0,1	15,7417	15,7325	0,0092	9.6714E-05	94,6949
0,2	12,4175	12,408	0,0095	1.1742E-04	93,6512
0,3	10,9063	10,8823	0,024	2.9245E-04	84,1876
0,4	12,8425	12,8375	0,005	8.3998E-05	95,4583

Tableau.V.19 : Les paramètres de corrosion mesurés par gravimétrie de l'acier (C-1020) dans H₂SO₄ 1M pendant 7h en absence et en présence des différentes concentrations de l'inhibiteur a La température ambiant.

Concentration(g/l)	mi(g)	mf(g)	$\Delta m(g)$	Vcor(g/cm ² .h)	E (%)
0	11,5104	11,0019	0,5085	5.0446E-03	-
0,1	15,7417	15,7286	0,0131	9.8366E-05	99,8606
0,2	12,4175	12,4051	0,0124	1.0948E-04	97,8297
0,3	10,9063	10,8733	0,033	2.8722E-04	94,3063
0,4	12,8425	12,8339	0,0086	1.0319E-04	97,9544

Tableau.V.20 : Les paramètres de corrosion mesurés par gravimétrie de l'acier(C-1020) dans H₂SO₄ 1M pendant 9h en absence et en présence des différentes concentrations de l'inhibiteur a La température ambiant.

Concentration(g/l)	mi(g)	mf(g)	$\Delta m(g)$	Vcor(g/cm ² .h)	E (%)
0	11,5104	10,9428	0,5676	4.3796E-03	-
0,1	15,7417	15,724	0,0177	1.0337E-04	97,6397
0,2	12,4175	12,4018	0,0157	1.0781E-04	97,5383
0,3	10,9063	10,8602	0,0461	3.1208E-04	92,8742
0,4	12,8425	12,8322	0,0103	9.6131E-05	97,805

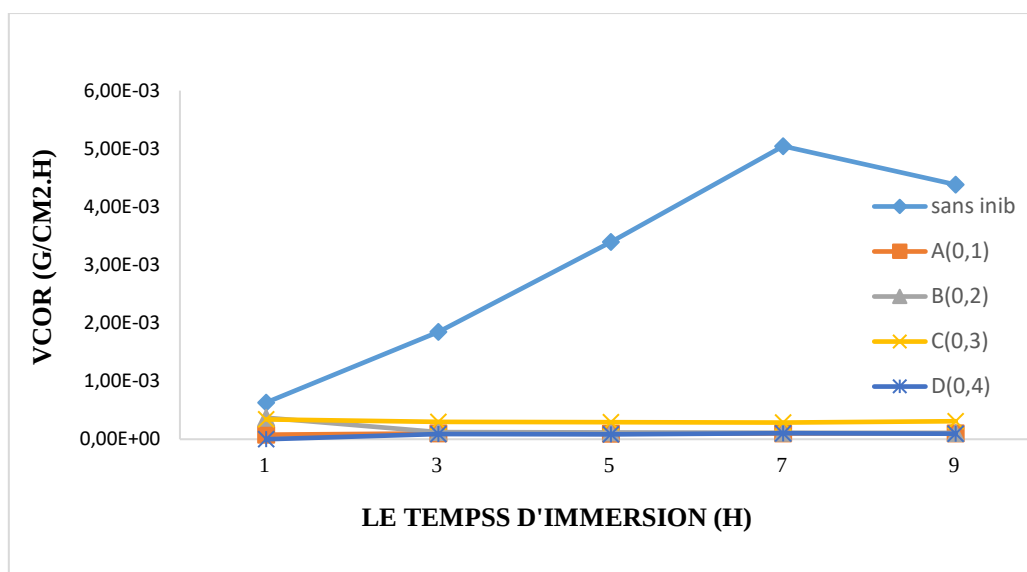


Fig.V.20 : L'évolution de la vitesse de corrosion de l'acier (C-1020) à différente concentration d'extrait des feuilles d'olive en fonction du temps d'immersion en milieu H₂SO₄ 1M, à la température ambiante.

❖ Discussion

Le diagramme indique que la progression de la corrosion de l'acier C1020 s'intensifie avec la durée d'exposition, en l'absence d'inhibiteur. L'extrait de feuilles d'olivier réduit considérablement la vitesse de corrosion. L'efficacité de la protection progresse avec la hausse de la concentration, la performance optimale étant atteinte à 0,4 g/L.

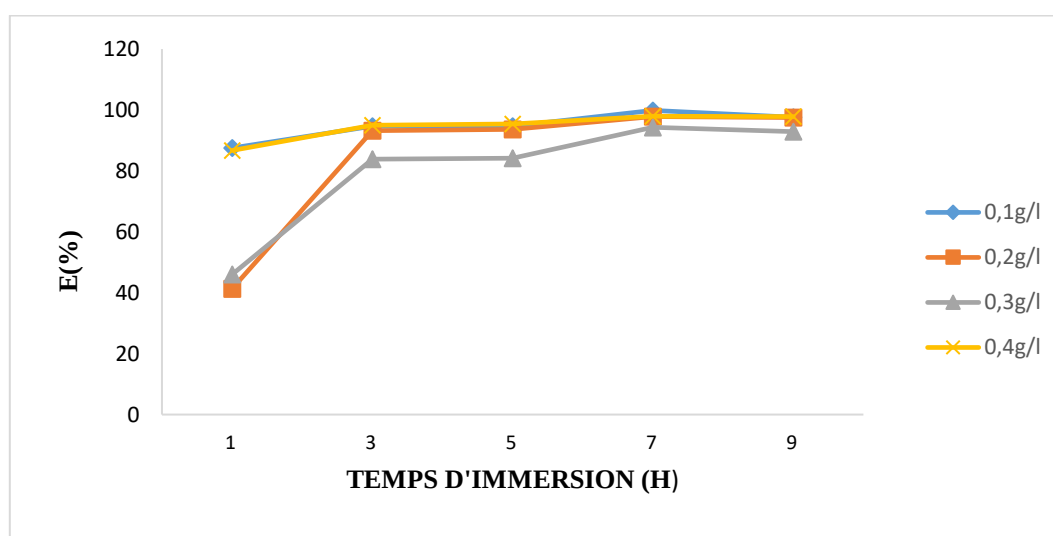


Fig.V.21 : L'évolution de l'efficacité inhibitrice de l'acier (C-1020) à différentes concentrations de l'extrait des feuilles d'olive en fonction du temps d'immersion dans le milieu H₂SO₄ 1M, à la température ambiante.

❖ Discussion

Les données indiquent que l'efficacité de la protection anticorrosion s'accroît avec la durée d'immersion et atteint des sommets supérieurs à 90 % pour l'ensemble des concentrations analysées. Cet enrichissement est dû à l'absorption progressive des éléments actifs présents dans l'extrait de feuilles d'olivier sur la surface de l'acier, qui mène à l'établissement d'une barrière protectrice stable. La concentration optimale de 0,4 g/L a donné les meilleurs résultats, atteste du potentiel de cet extrait en tant qu'agent inhibiteur de corrosion naturel performant.

c) Effet de la température du milieu

▪ Vitesse de corrosion de l'acier

Nous avons réalisé des essais de diminution de masse sur l'acier (C-1020) dans du H₂SO₄ 1M, sans et avec l'ajout de diverses concentrations de l'inhibiteur (0.1, 0.2, 0.3, 0.4g/l), à diverses températures (30°C, 60°C, 80°C), et avec des durées d'immersion différentes (30 min, 1 h, 3 h). La figure 9 illustre les taux de corrosion de l'extrait des FO en relation avec la température après 30 minutes d'immersion :

Tableau.V.21 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence d'extrait des FO $t_{im}=30min$ à $T=30^{\circ}C$.

Concentration(g/l)	$m_i(g)$	$m_f(g)$	$\Delta m(g)$	V_{cor} (g/cm ² .h)	E (%)
0	12,6796	12,6439	0,0357	0,8378E-02	-
0,1	10,8599	10,8408	0,0191	0,6053E-02	27,7467
0,2	8,0563	8,0537	0,0026	0,8536E-03	89,8118
0,3	8,8005	8,7978	0,0027	0,6211E-03	92,5867
0,4	12,8339	12,8315	0,0024	0,5902E-03	92,955

Tableau.V.22 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence d'extrait des FO tim= 30min à T=60°C.

Concentration(g/l)	mi(g)	mf(g)	$\Delta m(g)$	Vcor (g/cm ² .h)	E (%)
0	12,5375	12,4133	0,1242	0,3808E-02	-
0,1	10,7222	10,6173	0,1049	0,2870E-02	24,6486
0,2	8,0459	8,0407	0,0052	0,1707E-02	55,1766
0,3	12,8034	12,7937	0,0097	0,2133E-02	43,9963
0,4	12,8187	12,8156	0,0031	0,10111E-02	73,4535

Tableau.V.23 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence d'extrait des FO tim= 30min à T=80°C.

Concentration(g/l)	mi(g)	mf(g)	$\Delta m(g)$	Vcor (g/cm ² .h)	E (%)
0	12,2802	12,1934	0,0868	0,02308	-
0,1	8,7807	8,74	0,0407	0,01290	44,1072
0,2	12,1138	12,0521	0,0617	0,01740	24,6069
0,3	8,7181	8,698	0,0201	0,8564E-02	62,8924
0,4	8,0164	8,0014	0,015	0,4892E-02	78,8020

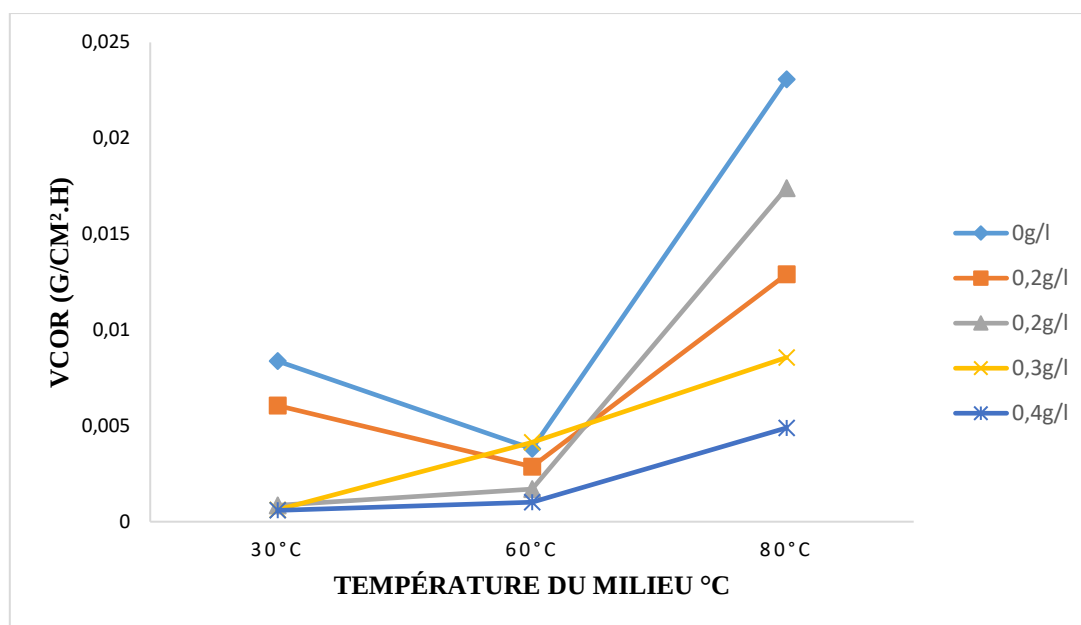


Fig.V.22 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion de l'acier dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence des différentes concentrations de l'extrait des FO pour $t_{im} = 30\text{min}$.

❖ Discussion

Les graphiques indiquent que l'accroissement de la température accroît le taux de corrosion de l'acier dans l'acide sulfurique. Toutefois, l'incorporation de l'extrait végétal (FO) atténue la corrosion, et plus la teneur en extrait est importante, plus la cadence de corrosion s'amenuise. De ce fait, l'extrait sert d'inhibiteur de corrosion performant, particulièrement à des températures élevées.

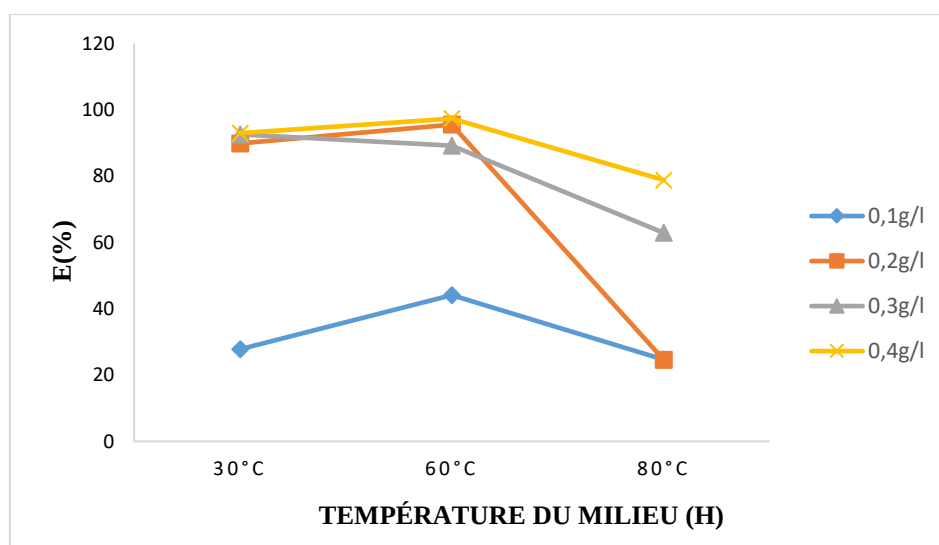


Fig.V.23 : Effet de la température sur l'efficacité de l'inhibiteur de l'extrait dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence des différentes concentrations de l'extrait des FO pour

Tim = 30min.

❖ Discussion

L'étude des graphes indique l'impact de la température sur l'efficacité de l'inhibiteur de corrosion à diverses concentrations. Les graphiques montrent un rendement assez haut dès 30°C, suivi d'une hausse marginale ou d'une stagnation à 60°C. Toutefois, à 80°C, l'efficacité subit une baisse notable, particulièrement pour la concentration de 0,2 g/l qui diminue considérablement, alors que les autres concentrations montrent également une déclinaison, mais de façon inégale. Cela suggère que les hautes températures tendent à nuire à l'efficacité de l'inhibiteur, avec une réaction qui varie en fonction de la concentration employée.

Tableau.V.24 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence d'extrait des FO

Tim = 1h à T=30°C.

Concentration(g/l)	mi(g)	mf(g)	$\Delta m(g)$	Vcor (g/cm ² .h)	E (%)
0	12,6796	12,6373	0,0423	0,6486E-02	-
0,1	10,8599	10,8255	0,0344	0,4139E-02	36,1778
0,2	8,0563	8,0523	0,004	0,6566E-03	89,8762
0,3	8,8005	8,7964	0,0041	0,8734E-03	86,5329
0,4	12,8339	12,8295	0,0044	0,7175E-03	88,9368

Tableau.V.25 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de L'acier dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence d'extrait des FO

Tim = 1h à T=60°C.

Concentration(g/)	mi(g)	mf(g)	$\Delta m(g)$	Vcor (g/cm ² .h)	E (%)
0	12,5375	12,3857	0,1518	0,0335	-
0,1	10,7222	10,4857	0,2365	0,02540	24,3338
0,2	8,0459	8,0367	0,0092	0,1510E-02	95,5014
0,3	12,8034	12,7926	0,0108	0,2300E-02	93,1463
0,4	12,8187	12,8125	0,0062	0,1011E-02	96,9882

£

Tableau.V.26 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence d'extrait des FO

Tim = 1h à T=80°C.

Concentration(g/l)	mi(g)	mf(g)	$\Delta m(g)$	Vcor (g/cm ² .h)	E (%)
0	12,2802	12,1426	0,1376	0,01829	-
0,1	8,7807	8,7286	0,0521	0,9811E-02	46,3666
0,2	12,1138	12,0287	0,0851	0,9360E-02	48,834
0,3	8,7181	8,6872	0,0309	0,6583E-02	64,0146
0,4	8,0164	8,0002	0,0162	0,2641E-02	85,5582

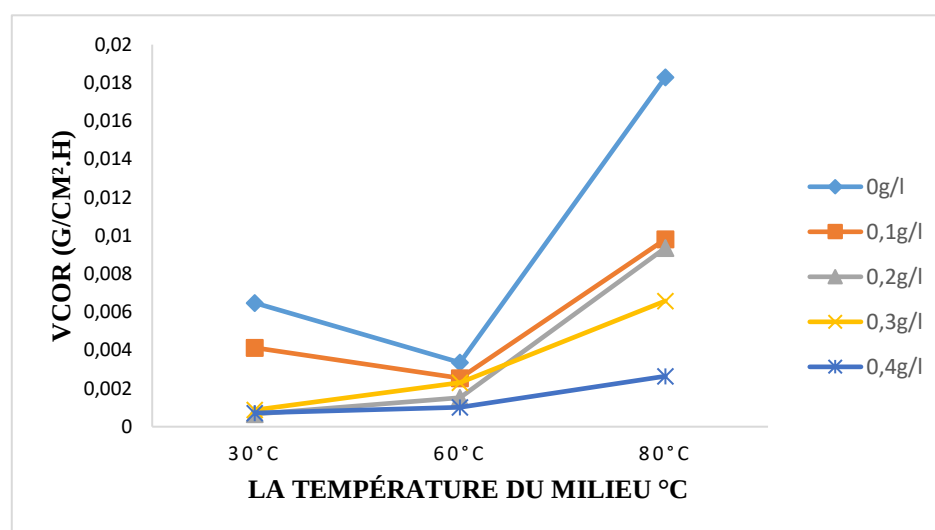


Fig.V.24 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion de l'acier dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence des différentes concentrations de l'extrait des FO pour Tim= 1h.

❖ Discussion

Les observations indiquent que la corrosion s'accélère avec l'augmentation de la température, culminant aux alentours de 60°C. Cependant, l'ajout de l'inhibiteur provoque une réduction notable de cette vitesse. De plus, l'efficacité d'inhibition s'améliore avec une concentration plus élevée, les concentrations élevées offrant une protection supérieure grâce à la création d'une couche de protection plus stable sur la surface de l'acier.

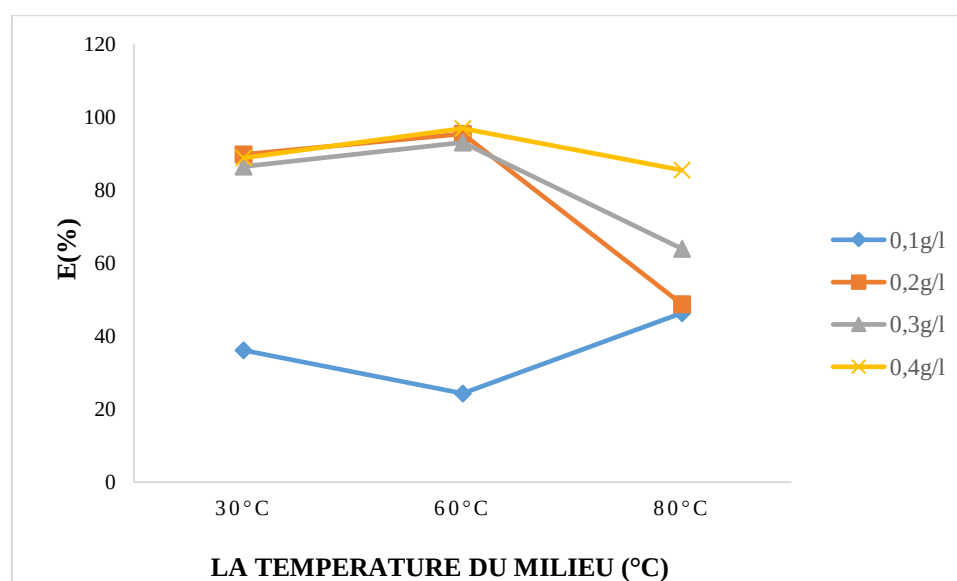


Fig.V.25 : Effet de la température sur l'efficacité de l'inhibiteur de l'extrait dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence des différentes concentrations de l'extrait des FO pour

$T_{im} = 1h.$

❖ Discussion

Les courbes illustrent l'impact de la température ambiante sur le taux d'efficacité de l'inhibition de la corrosion en pourcentage (E%) pour divers échantillons d'acier déployés dans une solution de H₂SO₄ 1M, qu'un extrait particulier (FO) soit présent ou non, et ce, pour plusieurs dosages (0,18, 0,2, 0,3, 0,48 g/L). L'étude indique que l'efficacité s'accroît à 60 degrés Celsius pour toutes les concentrations, puis chute à 80 degrés Celsius. Cela suggère que la température idéale pour provoquer la plus grande efficacité d'inhibition est approximativement de 60 degrés Celsius, et que la montée en température par la suite a un impact préjudiciable sur le pouvoir d'inhibition de l'extrait contre la corrosion.

Il est aussi manifeste que l'efficacité est liée à la concentration de l'extrait, s'accroissant avec l'amplification de la concentration jusqu'à atteindre un certain niveau.

Tableau.V.27 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence d'extrait des FO $t_{im} = 3h$ à $T = 30^{\circ}C$.

Concentration(g/l)	$m_i(g)$	$m_f(g)$	$\Delta m(g)$	V_{cor} (g/cm ² .h)	E (%)
0	12,6796	12,5469	0,1327	0,01764	-
0,1	10,8599	10,724	0,1359	0,01103	37,4250
0,2	8,0563	8,0463	0,01	0,2444E-02	86,1469
0,3	8,8005	8,7896	0,0109	0,1628E-02	90,7701
0,4	12,8339	12,8205	0,0134	0,1467E-02	91,6825

Tableau.V.28 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence d'extrait des FOTim = 3h à T=60°C.

Concentration(g/l)	mi(g)	mf(g)	$\Delta m(g)$	Vcor (g/cm ² .h)	E (%)
0	12,5375	12,2241	0,3134	0,04805	-
0,1	10,7222	10,4229	0,2993	0,02646	44,9320
0,2	8,0459	8,0191	0,0268	0,4399E-02	83,3750
0,3	12,8034	12,7876	0,0158	0,3366E-02	92,9953
0,4	12,8187	12,8052	0,0135	0,2201E-02	95,4185

Tableau.V.29 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de l'acier dans H₂SO₄ 1M en absence et en présence d'extrait des FOTim = 3h à T=80°C.

Concentration(g/l)	mi(g)	mf(g)	$\Delta m(g)$	Vcor (g/cm ² .h)	E (%)
0	12,2802	12,1227	0,1575	0,01654	-
0,1	8,7807	8,7286	0,0521	0,8256E-02	50,0842
0,2	12,1138	12,0287	0,0851	0,7037E-02	57,4523
0,3	8,7181	8,6872	0,0309	0,2642E-02	62,4545
0,4	8,0164	8,0002	0,0162	0,7666E-03	70,9881

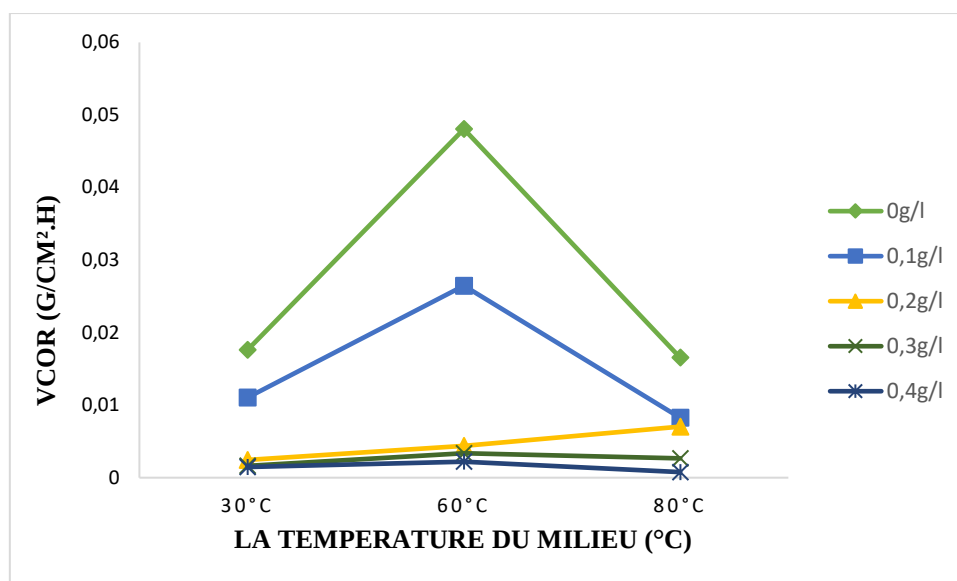


Fig.V.26 : Effet de la température sur la vitesse de corrosion de l'acier dans H2SO4 1M en absence et en présence des différentes concentrations de l'extrait des FO pour $T_{im} = 3h$.

❖ Discussion

En l'absence d'inhibiteur, la corrosion s'accélère avec la hausse de température, tandis que sa présence provoque une réduction significative de celle-ci. Par ailleurs, l'efficacité de l'inhibiteur est améliorée par une concentration accrue, ce qui diminue la vitesse de corrosion à des niveaux pratiquement négligeables, avec peu d'impact de la température à des concentrations élevées.

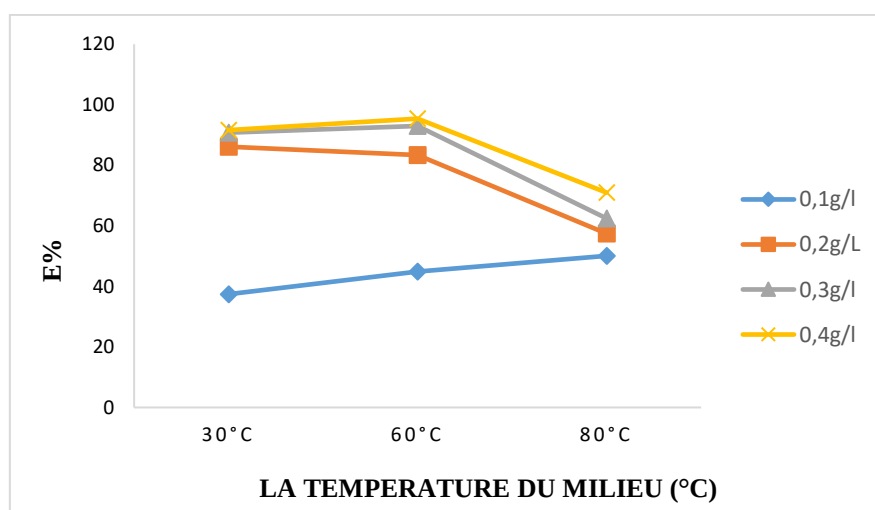


Fig.V.27 : Effet de la température sur l'efficacité de l'inhibiteur de l'extrait dans H2SO4 1M en absence et en présence des différentes concentrations de l'extrait des FO pour

$t_{im} = 3h$.

❖ Discussion

Ces graphes illustrent l'impact de la température (30°C, 60°C, 80°C) sur le pouvoir inhibiteur à diverses concentrations de l'inhibiteur (0,1 à 0,4 g/L) :

Pour toutes les concentrations, l'efficacité de l'inhibition est forte à 30°C et 60°C, avec des pics notés aux alentours de 60°C.

On constate une baisse significative de l'efficacité à 80°C pour toutes les concentrations, ce qui indique que la performance de l'inhibiteur est affectée négativement par la température élevée.

Quand la quantité de l'inhibiteur croît (de 0,1 à 0,4 g/L), l'efficacité d'inhibition s'améliore à toutes les températures.

La concentration de 0,4 g/L est la plus efficace, tandis que celle de 0,1 g/L est la moins efficace.

V.3.3. Le milieu protecteur : Résine polyester

La vitesse de corrosion et l'efficacité de protection de l'acier ont été déterminées à partir des mesures de perte de masse pour chaque essai. Les échantillons ont été immergés dans une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4), en présence et en absence de l'inhibiteur, et revêtus de résine polyester à différentes concentrations : 0,1 g/L, 0,3 g/L et 0,5 g/L. Les essais ont été réalisés pour différents temps d'immersion : 1 h, 3 h, 5 h, 7 h et 9 h, afin d'étudier l'influence de la concentration de la résine polyester et du temps d'immersion sur la résistance à la corrosion de l'acier. La vitesse et l'efficacité de protection ont été évaluées après un temps d'immersion à la température ambiante.

a) Influence de la concentration

Tableau.V.30 : Les valeurs de la vitesse de corrosion de l'acier (C-1020) dans H_2SO_4 1 M pendant 1h, en absence et en présence de différentes concentrations du revêtement anticorrosion préparé, à la température ambiante.

Concentration (g/l)	m0	Mf	Δm	Vcorr(g/cm ² .h)	E(%)
sans inh	15,6489	15,6445	0,0044	0,1399E-02	-
0,1	11,6949	11,691	0,0039	0,5826E-03	58,3738
0,3	8,6685	8,6657	0,0028	0,2515E-03	82,0292
0,5	12,7095	12,7076	0,0019	0,1104E-03	92,1084

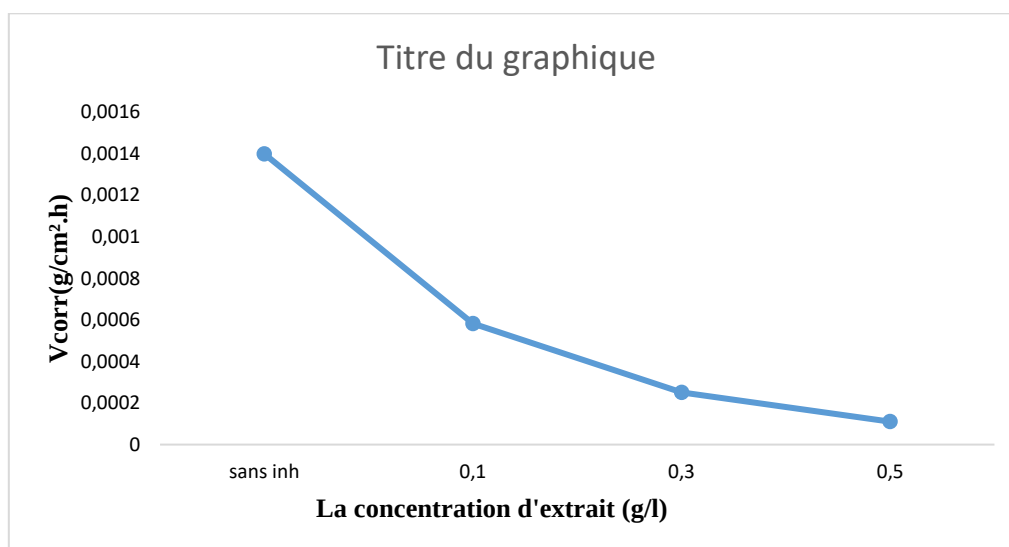


Fig.V.28 : L'évolution de la vitesse de corrosion de l'acier (C-1020) en fonction de la concentration du revêtement anticorrosion préparé, en milieu H₂SO₄ 1M, à la température ambiante.

❖ Discussion

Le graphique indique qu'une hausse de la concentration de l'extrait provoque une baisse du Vcorr, ce qui signifie que l'extrait exerce une action inhibitrice efficace dont l'intensité se renforce en fonction de la concentration, diminuant de ce fait le taux mesuré (comme la corrosion ou la réaction).

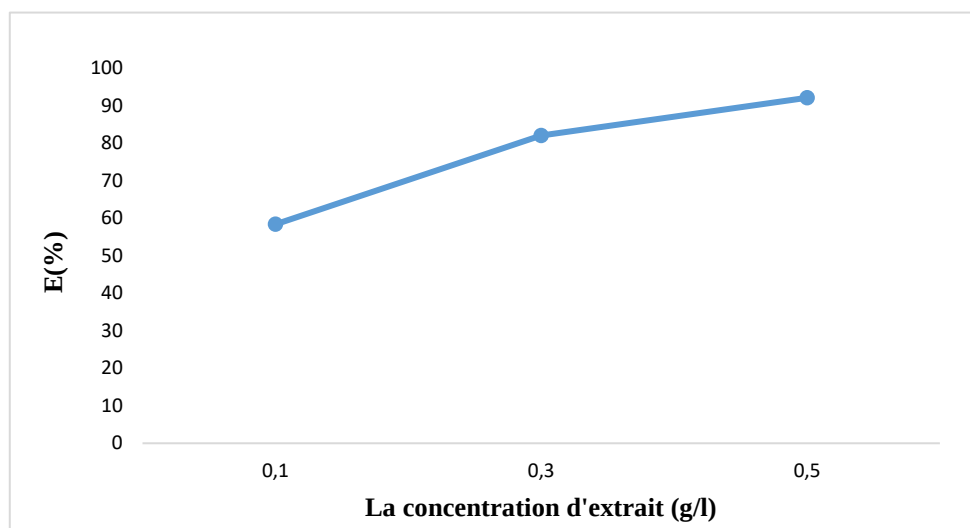


Fig.V.29 : L'évolution de l'efficacité inhibitrice de l'acier (C-1020) en fonction de la concentration du revêtement anticorrosion préparé, en milieu H_2SO_4 1M, à la température ambiante.

❖ Discussion

Le diagramme illustre que plus la concentration de l'extrait est forte, plus l'efficacité (E%) augmente, cependant, cette amélioration se stabilise à des concentrations plus élevées, suggérant une tendance vers le phénomène de saturation.

b)- influence de temps d'immersion

L'influence de la durée d'immersion sur la vitesse de corrosion et l'efficacité protectrice de la résine polyester est évaluée à partir des mesures de perte de masse des échantillons d'acier avant et après un temps d'immersion dans le milieu corrosif.

Tableau.V.31 : Les valeurs de la vitesse de corrosion de l'acier (C-1020) dans H_2SO_4 1 M pendant 3h, en absence et en présence de différentes concentrations du revêtement anticorrosion préparé, à la température ambiante.

Concentration (g/l)	m0	Mf	Δm	Vcorr(g/cm ² .h)	E(%)
Sans inh	15,6489	15,6401	0,0088	0,9331E-03	-
0,1	11,6949	11,6876	0,0073	0,36356E-03	61,0421
0,3	8,6685	8,6653	0,0032	9,5822E-05	89,7309
0,5	12,7095	12,7025	0,007	0,1356E-03	85,4628

Tableau .V.32 : Les valeurs de la vitesse de corrosion de l'acier (C-1020) dans H₂SO₄ 1 M pendant 5 h, en absence et en présence de différentes concentrations du revêtement anticorrosion préparé, à la température ambiante.

Concentration (g/l)	m0	mf	Δm	Vcorr(g/cm ² .h)	E(%)
Sans inh	15,6489	15,6186	0,0303	0,1927E-02	-
0,1	11,6949	11,6659	0,029	0,8664E-03	55,0520
0,3	8,6685	8,6318	0,0367	0,6593E-03	65,7953
0,5	12,7095	12,682	0,0275	0,3197E-03	83,4135

Tableau .V.33 : Les valeurs de la vitesse de corrosion de l'acier (C-1020) dans H₂SO₄ 1 M pendant 7h, en absence et en présence de différentes concentrations du revêtement anticorrosion préparé, à la température ambiante.

Concentration (g/l)	m0	mf	Δm	Vcorr(g/cm ² .h)	E(%)
Sans inh	15,6489	15,6043	0,0446	0,2972 ^E -02	-
0,1	11,6949	11,6441	0,0508	0,1084 ^E -02	63,5246
0,3	8,6685	8,6212	0,0473	0,6070 ^E -03	79,5777
0,5	12,7095	12,6715	0,038	0,3155 ^E -03	89,3823

Tableau .V.34 : Les valeurs de la vitesse de corrosion de l'acier (C-1020) dans H_2SO_4 1 M pendant 9h, en absence et en présence de différentes concentrations du revêtement anticorrosion préparé, à la température ambiante.

Concentration (g/l)	m0	Mf	Δm	Vcor(g/cm ² .h)	E(%)
Sans inh	15,6489	15,5925	0,0564	0,2923E-02	-
0,1	11,6949	11,6334	0,0615	0,1020E-02	65,0805
0,3	8,6685	8,6123	0,0562	0,5609E-03	80,8117
0,5	12,7095	12,6643	0,0452	0,2919E-03	90,0129

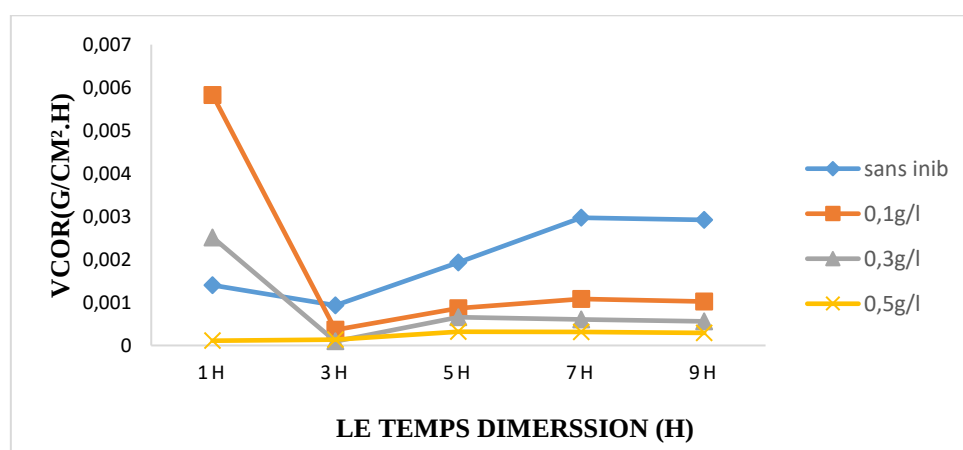


Fig.V.30 : L'évolution de la vitesse de corrosion de l'acier (C-1020) à différentes concentrations du revêtement anticorrosion contenant l'extrait des feuilles d'olivier, en fonction du temps d'immersion dans un milieu H_2SO_4 1M.

❖ Discussion

Dans un milieu acide, la corrosion de l'acier est réduite en présence de la résine comparativement à l'échantillon non protégé. Par ailleurs, accroître la concentration en résine de 0,1 à 0,5 g/L améliore son pouvoir inhibiteur et diminue davantage la corrosion. Un taux de 0,5 g/L témoigne de la performance optimale, indiquant que la résine génère une barrière protectrice efficace qui entrave la corrosion du milieu acide sur la surface de l'acier.

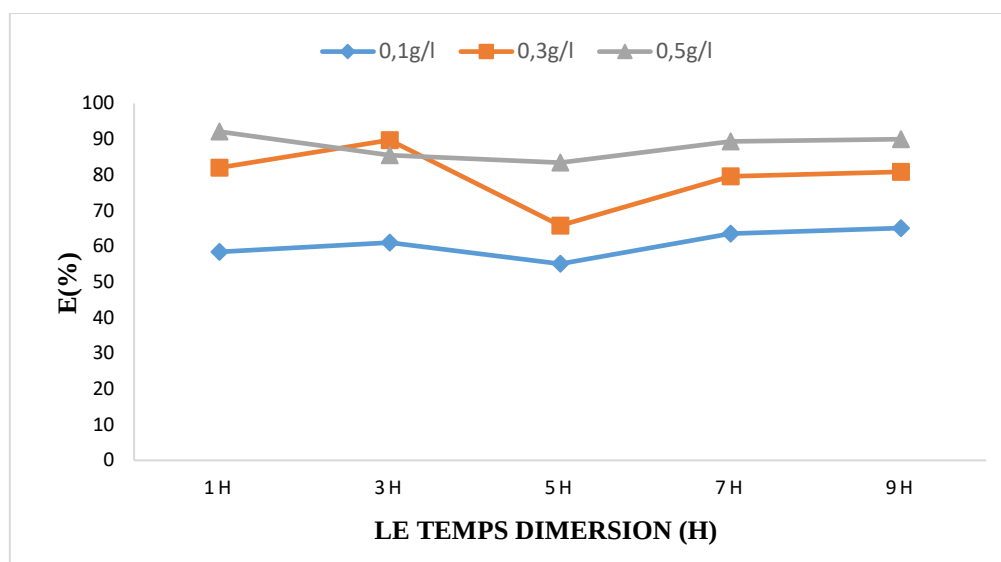


Fig.V.31 : L'évolution de l'acier (C-1020) à différentes concentrations du revêtement anticorrosion contenant l'extrait des feuilles d'olivier, en fonction du temps d'immersion dans un milieu H_2SO_4 1M.

❖ Discussion

Les observations indiquent que l'efficacité d'inhibition de la résine s'accroît proportionnellement à la concentration. Une concentration de 0,5 g/L montre une efficacité et une stabilité optimales tout au long de la durée d'immersion (>85 %), signifiant l'établissement d'un revêtement protecteur performant sur la surface de l'acier. La concentration de 0,3 g/L démontre une bonne efficacité avec une diminution temporaire à 5 heures, tandis que 0,1 g/L produit les valeurs les plus basses.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Cette recherche se focalise sur l'examen de la protection anticorrosion de l'acier par le biais d'une infusion de feuilles d'olivier en environnement d'acide sulfurique et de chlorure de sodium, et sur l'analyse de la fonction de la résine époxy dans la sauvegarde de l'acier contre la corrosion. L'approche de la recherche s'est focalisée sur l'évaluation de l'efficacité de l'extrait naturel, en scrutant l'impact de sa concentration sur le taux de corrosion à l'aide de la technique de pesée.

Les données recueillies ont démontré que l'extrait de feuilles d'olivier a une puissance inhibitrice appréciable contre la corrosion de l'acier en milieu acide sulfurique, surtout aux concentrations de 0,1 mol/L et 0,4 mol/L. En ces cas, il a aidé à minimiser le niveau de corrosion en créant une barrière protectrice sur le métal qui entrave son interaction avec l'environnement acide. Les conclusions ont aussi démontré que l'environnement contenant du chlorure de sodium a montré la plus grande efficacité d'inhibition à la concentration de 0,4 mol/L, Ce qui suggère que l'efficacité de l'inhibiteur est déterminée par le type et la concentration de l'environnement, et que cette concentration crée des conditions favorables pour l'adsorption des molécules de l'extrait sur la surface de l'acier et l'établissement d'un film protecteur plus durable et performant.

L'impact de la température sur l'efficacité de l'inhibition a aussi été examiné dans la fourchette de températures de 30 °C à 80 °C. Les observations ont indiqué que l'extrait de feuilles d'olivier conserve sa capacité d'inhibition tant que la température ne dépasse pas 60 °C, participons de ce fait à la diminution efficace de la corrosion de l'acier. Cependant, on a noté une réduction graduelle de l'efficacité de l'inhibition lorsque la température excède 60 °C.

Cela est dû à la détérioration de la stabilité de la couche adsorbée sur l'acier ou à la diminution de la capacité des particules de l'extrait à se fixer sur la surface métallique à des températures élevées, ce qui entraîne une intensification du processus de corrosion et une baisse de l'efficacité de l'inhibiteur.

Les observations ont indiqué que le revêtement produit à partir d'un inhibiteur à base de résine polyester insaturée offre de solides caractéristiques de protection contre la corrosion. Il génère une couche isolante adhésive sur la surface de l'acier qui restreint

l'interaction avec l'environnement corrosif, contribuant ainsi à diminuer le niveau de corrosion et à renforcer la durabilité de l'acier dans les environnements étudiés. Ces conclusions mettent en exergue la nécessité d'utiliser ce revêtement comme une barrière de protection qui peut améliorer la défense de l'acier et étendre sa longévité en service.

Généralement, les résultats montrent que l'extrait de feuilles d'olivier est un inhibiteur écologique performant, et que son usage conjointement avec des couches de protection constitue une alternative prometteuse pour diminuer la corrosion et substituer certains inhibiteurs classiques aux retombées environnementales indésirables. Pour avancer dans cette démarche de recherche, l'approche suivante est suggérée :

- Description de la couche de protection constituée à la surface de l'acier à l'aide de méthodes d'examen de surface comme la diffraction des rayons X (DRX).
- Analyse de l'impact de diverses concentrations d'extrait de feuilles d'olivier sur l'efficacité de l'inhibition.
- Examiner la durabilité de l'extrait de feuilles d'olivier dans le temps et son influence sur la résistance à la corrosion.

ملخص

باستخدام مستخلص طبيعي تم تحضيره من أوراق C1020 هذا العمل مخصص لدراسة تثبيط تآكل الفولاذ في المرحلة الأولى، تم إجراء دراسة فيتوكيميائية لتحديد المركبات الثانوية الرئيسية الموجودة في الزيتون أما بالنسبة للخطوة الثانية، فقد تم تقييم فعالية هذا المستخلص كمثبط للتآكل في وسطين تأكليين، وهما المستخلص باستخدام الطريقة الجاذبية القائمة على قياس (NaCl) ومحلول كلوريد الصوديوم (H_2SO_4) حمض الكبريتيك فقدان الكتلة

أظهرت النتائج أن سرعة التآكل تنخفض مع زيادة تركيز المستخلص، مما يشير إلى فعاليته في حماية الفولاذ من أعلى فعالية للتثبيط تم تسجيلها عند تركيز 0.4 جرام/لتر، حيث بلغت 99.8606% في وسط حمض. التآكل بلغت فعالية التثبيط عند تركيز 0.1 جرام/لتر في وسط الكبريتيك و97.9544% في وسط كلوريد الصوديوم حمض الكبريتيك 93.6787%.

تمت دراسة تأثير درجة الحرارة على سلوك التآكل أيضًا، وأظهرت النتائج أن زيادة درجة الحرارة تؤدي إلى أكدت البيانات الحرارية أيضًا. زيادة سرعة التآكل وتؤثر على استقرار الطبقة الواقية المتكونة على سطح الفولاذ أن جزيئات مستخلص أوراق الزيتون تلتصق بسطح المعدن، مما يساهم في تكوين طبقة حماية فعالة تقلل من شدة التآكل

تؤكد النتائج التي تم الحصول عليها أن مستخلص أوراق الزيتون هو مثبط طبيعي فعال وصديق للبيئة، وأنه يمكن استخدامه لحماية فولاذ من التآكل في البيئات المدروس

الكلمات المفتاحية: التآكل، فولاذ، مثبط طبيعي، أوراق الزيتون، مستخلص نباتي، حمض الكبريتيك، كلوريد الصوديوم.

Résumé

Ce travail est dédié à l'étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier C1020 en utilisant un extrait naturel préparé à partir de feuilles d'olivier. Dans la première phase, une étude phytochimique a été réalisée pour identifier les principaux composés secondaires présents dans l'extrait. Quant à la deuxième étape, l'efficacité de cet extrait en tant qu'inhibiteur de corrosion a été évaluée dans deux milieux corrosifs, à savoir l'acide sulfurique (H_2SO_4) et la solution de chlorure de sodium (NaCl), en utilisant la méthode gravimétrique basée sur la mesure de la perte de masse. Les résultats ont montré que la vitesse de corrosion diminue avec l'augmentation de la concentration de l'extrait, ce qui indique son efficacité à protéger l'acier de la corrosion. La plus haute efficacité d'inhibition a été enregistrée à la concentration de 0,4 g/L, atteignant 99,8606 % dans un milieu d'acide sulfurique et 97,9544 % dans un milieu de chlorure de sodium. L'efficacité d'inhibition à la concentration de 0,1 g/L dans un milieu d'acide sulfurique a atteint 93,6787 %.

L'effet de la température sur le comportement de la corrosion a également été étudié, et les résultats ont montré qu'une augmentation de la température entraîne une augmentation de la vitesse de corrosion et affecte la stabilité de la couche protectrice formée à la surface de l'acier. Les données thermiques ont également confirmé que les particules de l'extrait de feuilles d'olivier s'adsorbent sur la surface du métal, contribuant ainsi à la formation d'une couche de protection efficace qui réduit l'intensité de la corrosion.

Les résultats obtenus confirment que l'extrait de feuilles d'olivier est un inhibiteur naturel efficace et respectueux de l'environnement, et qu'il peut être utilisé pour protéger l'acier C1020 de la corrosion dans les milieux étudiés.

Mots-clés : corrosion, acier C1020, inhibiteur naturel, feuilles d'olivier, extrait végétal, acide sulfurique, chlorure de sodium, méthode gravimétrique.

Abstract

This work is dedicated to the study of the corrosion inhibition of C1020 steel using a natural extract prepared from olive leaves. In the first phase, a phytochemical study was conducted to identify the main secondary compounds present in the extract. As for the second step, the effectiveness of this extract as a corrosion inhibitor was evaluated in two corrosive environments, namely sulfuric acid (H_2SO_4) and sodium chloride (NaCl) solution, using the gravimetric method based on the measurement of mass loss. The results showed that the corrosion rate decreases with the increase in the concentration of the extract, indicating its effectiveness in protecting steel from corrosion. The highest inhibition efficiency was recorded at a concentration of 0.4 g/L, reaching 99.8606% in a sulfuric acid medium and 97.9544% in a sodium chloride medium. The inhibition efficiency at a concentration of 0.1 g/L in a sulfuric acid medium reached 93.6787%.

The effect of temperature on the corrosion behavior was also studied, and the results showed that an increase in temperature leads to an increase in the corrosion rate and affects the stability of the protective layer formed on the surface of the steel. Thermal data also confirmed that the particles of olive leaf extract adsorb onto the metal surface, thereby contributing to the formation of an effective protective layer that reduces the intensity of corrosion.

The results obtained confirm that olive leaf extract is an effective and environmentally friendly natural inhibitor, and that it can be used to protect C1020 steel from corrosion in the studied environments.

Keywords: corrosion, C1020 steel, natural inhibitor, olive leaves, plant extract, sulfuric acid, sodium chloride, gravimetric method.

Référence bibliographique

Référence

- [1] National Corrosion Service, NPL, A Short introduction to corrosion and its control, corrosion in the metals and its prevention, 2003.
- [2] P. Panel, J. Zarras et D. Stenger-Smith, « Corrosion processes and strategies for prevention: an introduction », in Handbook of Smart Coatings for Materials Protection, Woodhead Publishing, 2014.
- [3] T. Yessad et K. Kernou, « Utilisation de l'extrait de la verveine citronnelle comme inhibiteur de corrosion de l'acier X42 dans le milieu HCl 0,5 M », Mémoire de master, Université de Béjaïa, 2021.
- [4] B. Mezhoud, « Synthèse des inhibiteurs contre la corrosion des aciers », Thèse de Magister, Université de Constantine, 2011.
- [5] I. Zerzour, « Étude de l'effet inhibiteur de corrosion des extraits des plantes *Lactuca virosa* L. et *Verbascum thapsus* L. sur l'acier X60 dans un milieu acide H₂SO₄ 2M », Mémoire de master, Université de Larbi Ben M'hidi, 2020.
- [6] I. Khalfaoui, « Étude de l'efficacité d'inhibiteurs de corrosion organique en milieu HCl », Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2019.
- [7] M.Taier,Dj.Slimane ben Ali, « Élaboration et construction dans les milieux corrosifs HCl, NaCl, H₂SO₄, les condensats de la vapeur LS d'un inhibiteur à base des feuilles d'olive pour le tenu en corrosion des aciers de construction type A106 Grade B », Mémoire de master, Université 20 Aout 1955 Skikda,2019.
- [8] L. N. Bouguerra et Y. Mokhneche, « Evaluation de l'efficacité d'un inhibiteur de corrosion "MEDACHAUD" vis-à-vis de la corrosion de l'aluminium », Mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2020.
- [9] D. Landolt, Corrosion et chimie de surface des métaux, Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1993.
- [10] H. El Bakouri, « Étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier doux au carbone en milieu acide orthophosphorique par un antibiotique organique », Mémoire DESA, Université Mohammed Ier, Oujda.
- [11] J. Barralis et G. Maeder, Précis de Métallurgie : Propriétés et Normalisation, 5e éd., Nathan, 1990.

- [12] C. Defontaine, « Mécanismes de corrosion, systèmes de protection et vieillissement accéléré », 2011.
- [13] D. Landolt, Corrosion et chimie de surface des métaux, PPUR, 2008.
- [14] H. El Bakouri, op. cit.
- [15] H. Mamache, « Étude du problème de corrosion au niveau des installations de surface », Mémoire d'ingénieur, IAP, 2017.
- [16] N. Le Bozec, « Réaction de réduction de l'oxygène sur les aciers inoxydables en eau de mer naturelle », Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 2000.
- [17] O. Belahssen, Mémoire de magister, Université de Annaba, 2008.
- [18] Commission exploitation, Corrosion et inhibition des puits et collectes, Technip, Paris, 1981.
- [19] S. J. Ketcham et I. S. Shaffer, « Exfoliation corrosion of aluminum alloys », ASTM STP 516, 1972.
- [20] J. J. Lamoureux, Précis de corrosion, Masson, 1994.
- [21] J. Leconte, « Tuyauterie : protection contre la corrosion », Techniques de l'ingénieur, 1981.
- [22] Dariva Galio, 2014.
- [23] E. Nouicer, « Comportement électrochimique et propriétés mécaniques de l'alliage Ti6Al14V », Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2009.
- [24] R. Mehibil, Université de Skikda.
- [25] ENSPM, Corrosion des métaux, IFP Formation Industrie, 2005.
- [26] R. D. Kane et S. Srinivasan, « Experience survey on corrosion monitoring and mitigation techniques », CLI International, Houston.
- [27] A. Aggoune Fateh, Mémoire de magister.
- [28] F. Khouhi, « Étude de l'efficacité de deux inhibiteurs de corrosion », Université de Boumerdès, 2007/2008.
- [29] G. Béranger et H. Mazille, « Corrosion des métaux et alliages », Paris, 2002.
- [30] A. Zaabar, « Utilisation de l'extrait d'ortie », Université de Béjaïa, 2010.
- [21] J. Leconte, « Tuyauterie : protection contre la corrosion », Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie Mécanique, Art. A830, 1981.

- [22] G. Dariva et A. Galio, « Inhibiteurs de corrosion – principes, mécanismes et applications », 2014.
- [23] E. Nouicer, « Comportement électrochimique et propriétés mécaniques de l'alliage de titane Ti6Al14V : effet des traitements de surface », thèse de doctorat, Univ. Constantine, Algérie, 2009.
- [24] R. Mehibil, « Étude de l'efficacité inhibitrice de quelques nouveaux inhibiteurs dits non polluants sur la corrosion de deux types d'alliages d'aluminium », Thèse, Univ. Skikda, Algérie.
- [25] Corrosion des Métaux, ENSPM Formation Industrie–IFP, France, 2005.
- [26] R. D. Kane et S. Srinivasan, « Enquête d'expérience sur les techniques de surveillance et de mitigation de la corrosion pour la production de puits doux », CLI International Inc., Houston, TX, États-Unis.
- [27] F. Aggoune, « Évaluation de l'endommagement des tubes dans leurs conditions d'exploitation », mémoire de magistère.
- [28] F. Khouhi, « Étude de l'efficacité de deux inhibiteurs de corrosion dans les milieux multiphasiques (eau, huile et gaz), » mémoire de magistère, Univ. M'Hamed Bougara, Boumerdès, Algérie, 2008.
- [29] G. Béranger et H. Mazille, « Corrosion des Métaux et Alliages : Mécanismes et Phénomènes ». Paris, France, 2002.
- [30] A. Zaabar, « Utilisation de l'extrait de la plante d'ortie (*Urtica dioica* L.) comme inhibiteur de corrosion de l'acier dans les milieux HCl 0,5 M et NaCl 3 % », mémoire de magistère, Univ. Béjaïa, Algérie, 2010.
- [31] A. Oualiken et A. M. Meftah, « Effet inhibiteur de l'extrait de feuilles d'oliviers sauvages sur la corrosion de l'acier doux : modélisation par les plans d'expériences », thèse d'ingénierie, École Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, 2021.
- [32] F. Milcard, « Étude de l'effet des alcaloïdes sur la corrosion de l'acier C38 en milieu acide chlorhydrique 1 M », thèse de doctorat, Univ. des Antilles et de la Guyane, France, 2013.
- [33] P. Parey, *Illustrierte Flora von Mitteleuropa : Pteridophyta, Spermatophyta*, 1987, pp. 1122–1124.

- [34] N. Abekhti et A. Bendahir, « La Corrosion dans les Installations Pétrolières de Surface : Causes, Effets et Remèdes », mémoire de master, Univ. Adrar, Algérie, 2019.
- [35] Thèse de Magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, Ouargla, Algérie, 2008, p. 116.
- [36] C. Laraba et B. Dendani, « Étude du phénomène de corrosion sur les ballons de topping », présentation PowerPoint, avril 2017.
- [37] C. Kangnivi, « Moyens de lutte contre la corrosion », EPAC/GME5, pp. 2–8.
- [38] K. Gharbi, « Étude de corrosion et protection des équipements de production du gaz brut à Hassi R'mel », mémoire de maîtrise, Univ. Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2015.
- [39] N. Abekhti et A. Bendahir, « La Corrosion dans les Installations Pétrolières de Surface : Causes, Effets et Remèdes », mémoire de master, Univ. Adrar, Algérie, 2019.
- [40] M. Henriquez Gonzalez, « Étude d'un traitement multifonctionnel vert pour la protection contre la corrosion de l'acier au carbone API 5L-X65 en milieu CO₂ », thèse de doctorat, Univ. Toulouse, France, 2011.
- [41] H. Hamani, « Synthèse, caractérisation et étude du pouvoir inhibiteur de nouvelles molécules base de Schiff », thèse de doctorat, Univ. Sétif 1, Algérie, 2015.
- [42] P. Bommersbach, « Évolution des propriétés d'un film inhibiteur de corrosion sous l'influence de la température et des conditions hydrodynamiques : caractérisation par techniques électrochimiques », thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2005.
- [43] R. Mehibel, « Étude de l'efficacité inhibitrice de quelques nouveaux inhibiteurs dits non polluants sur la corrosion de deux types d'alliages d'aluminium », mémoire de magistère, Univ. Skikda, Algérie, 2008.
- [44] S. Ouchenane, « Influence des inhibiteurs sur la corrosion de l'acier A37 dans différents milieux et leurs effets biocides sur E. coli », Thèse, Univ. Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2013.
- [45] C. Fiaud, C. Lemaitre, et N. Pebere, « Inhibiteur de corrosion », dans Corrosion et Anticorrosion (Pratique Industrielle), G. Béranger et H. Mazille, Éd. Paris, France : Hermès Science Publications, 2002.

- [46] NACE, Glossaire des termes de corrosion. Houston, TX, États-Unis: National Association of Corrosion Engineers, 1965.
- [47] K. Rahmouni, thèse de doctorat, Univ. Pierre et Marie Curie (Paris VI), France, déc. 2005.
- [48] M. Faustin, « Étude de l'effet des alcaloïdes sur la corrosion de l'acier C38 en milieu acide chlorhydrique 1 M : application à *Aspidosperma album* et *Geissospermum laeve* », thèse de doctorat, Univ. des Antilles et de la Guyane, France, 2013.
- [49] M. Boulkroune, « Inhibition de la corrosion du zinc en milieu acide », thèse de doctorat, Univ. Constantine 1, Algérie, 2014.
- [50] M. Benarioua, « Étude de l'inhibition de la corrosion d'un acier doux en milieu acide par l'emploi d'inhibiteurs à base de plantes », thèse de doctorat, Univ. Batna 2, Algérie, 2019.
- [51] K. Abderrahim, « Étude du pouvoir filmant et de l'efficacité inhibitrice de l'Ascotec-FU et de la tétrathiafulvalène sur la corrosion du cuivre en milieu salin aqueux », thèse de doctorat, Univ. Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2017.
- [52] W. Boukhedena, « Étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier en milieu acide par des composés de type dithioacétal de cétène », thèse de doctorat, Univ. Constantine 1, Algérie, 2018.
- [53] A. Khenadeki, « Étude théorique et expérimentale de l'effet d'inhibition de la corrosion d'un acier au carbone par les dérivés de base de Schiff en milieu acide chlorhydrique », thèse de magistère, Univ. Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2013.
- [54] A. Aliouali, « Étude du comportement à la corrosion de l'aluminium dans différents milieux », thèse de magistère, Univ. Batna 2, Algérie, 2017.
- [55] A. Oulabbas, « Effets des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers ordinaires dans deux milieux acides », thèse de doctorat, Univ. Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2019.
- [56] E. Schaschl, « Méthodes d'évaluation et de test des inhibiteurs de corrosion », dans *Inhibiteurs de corrosion*, C. C. Nathan, Éd.
- [57] C. C. Nathan, *Inhibiteurs de corrosion*. Houston, TX, États-Unis: National Association of Corrosion Engineers, 1973, pp. 28–41.

- [58] B. Mezhoud, « Synthèse des inhibiteurs contre la corrosion des aciers », thèse de magistère, Univ. Mentouri Constantine, Algérie, 2011.
- [59] F. Constantin, « Étude de l'efficacité d'inhibiteurs de corrosion utilisés dans les liquides de refroidissement », thèse de doctorat, Univ. de Pitești, Roumanie, 2012.
- [60] S. Saadoune, « Synthèse et caractérisation d'inhibiteurs bifonctionnels : application à la corrosion des aciers de construction », thèse de magistère, Univ. Ferhat Abbas, Sétif, Algérie, 2010
- [61] M. Benariou, « Inhibition de la corrosion d'un acier ordinaire par les chromates et les molybdates », mémoire de magistère, Univ. Hadj Lakhdar Batna, Algérie, 2013.
- [62] L. Ghilani, « Tenue à la corrosion d'un dépôt de chrome électrolytique sur un substrat en acier XC45 », thèse de magistère, Univ. Batna, Algérie, 2008.
- [63] S. Marzorati, L. Verotta, et S. P. Trasatti, « Inhibiteurs de corrosion verts provenant de sources naturelles et de déchets de biomasse », *Molécules*, vol. 23, no 1, pp. 1–24, 2018.
- [64] O. S. Shehata, L. A. Korshed, et A. Attia, « Inhibiteurs de corrosion verts : passé, présent et futur », dans *Corrosion Inhibitors : Principles and Recent Applications*, M. Aliofkhazraei, Éd. IntechOpen, 2017.
- [65] S. Leelavathi, « Étude expérimentale et théorique des plantes à base de flavonoïdes, tiges et feuilles de *Dodonaea viscosa*, *Mundulea sericea* et *Cassia alata* sur la corrosion de l'acier doux en milieu acide », thèse de doctorat, Avinashilingam Deemed University for Women, Coimbatore, Inde, 2014.
- [66] M. Benarioua, « Étude de l'inhibition de la corrosion d'un acier doux en milieu acide par l'emploi d'inhibiteurs à base de plantes », thèse de doctorat, Univ. Batna 2, Mostefa Ben Boulaïd, Algérie, 2019.
- [67] P. Raja et M. Sethuraman, « Produits naturels comme inhibiteurs de corrosion pour les métaux dans des milieux corrosifs », *Materials Letters*, vol. 62, pp. 113–116, 2008.
- [68] S. Khoudali, D. Ben Messaoud, A. Essaqui, M. Zertoubi, M. Azzi, et M. Benaissa, « Étude de l'activité antioxydante et de l'action anticorrosion de l'extrait méthanolique des feuilles du palmier nain (*Chamaerops humilis* L.) du Maroc », *Journal of Materials and Environmental Science*, vol. 4, no 3, pp. 1–12, 2014.

- [69] K. Rose, B. Kim, K. Rajagopal, S. Arumugam, et K. Devarayan, « Protection de surface de l'acier en milieu acide par l'extrait de *Tabernaemontana divaricata* : Preuves physico-chimiques de l'adsorption de l'inhibiteur », *Journal of Molecular Liquids*, vol. 214, pp. 1–6, 2016.
- [70] A. Lecante, F. Robert, M. Lebrini, et C. Roos, « Effet inhibiteur des extraits de *Siparuna guianensis* sur la corrosion de l'acier à faible teneur en carbone dans les milieux acides », *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 6, no 11, pp. 1–16, 2011.
- [71] A. Elmouwahidi, Z. Zapata-Benabith, F. Carrasco-Marín, et C. Moreno-Castilla, « Charbons activés par activation à la KOH des coques de graines d'argan (*Argania spinosa*) comme électrodes de supercondensateurs », *Bioresource Technology*, vol. 111, pp. 185–190, 2012.
- [72] P. M. Krishnegowda, T. V. Venkatesha, P. K. M. Krishnegowda, et A. S. Shivayogiraju, « Extrait de feuille d'*Acalypha torta* comme inhibiteur de corrosion écologique pour l'acier doux dans une solution d'acide chlorhydrique », *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 52, no 2, pp. 722–728, 2013.
- [73] M. Faustin, A. Maciuk, P. Salvin, C. Roos, et M. Lebrini, « Inhibition de la corrosion de l'acier C38 par l'extrait d'alcaloïdes de *Geissospermum laeve* dans une solution d'acide chlorhydrique à 1 M : Études électrochimiques et phytochimiques », *Corrosion Science*, vol. 92, pp. 287–300, 2015.
- [74] P. Mourya, S. Banerjee, et M. M. Singh, « Inhibition de la corrosion de l'acier doux dans une solution acide par l'extrait de *Tagetes erecta* (fleur de souci) en tant qu'inhibiteur vert », *Corrosion Science*, vol. 85, pp. 352–363, 2014.
- [75] A. M. Al-Turkustani, S. T. Arab, et L. S. S. Al-Qarni, « L'utilisation de *Ruta chalepensis* comme inhibiteur de corrosion pour la corrosion de l'acier dans une solution d'acide sulfurique à 2 M », *Oriental Journal of Chemistry*, vol. 26, no 2, pp. 437–454, 2010.
- [76] M. Bendahou, M. Benabdellah, et B. Hammouti, « Une étude de l'huile de romarin comme inhibiteur de corrosion écologique pour l'acier dans une solution de 2 M H_3PO_4 », *Pigment & Resin Technologie*, vol. 35, no 2, pp. 95–100, 2006.

- [77] F. Alam, H. Khan, S. A. Shah, W. Ahmad, et N. Ali, « Inhibiteurs enzymatiques d'origine naturelle avec activité antidiabétique : Une revue », *Phytotherapy Research*, vol. 33, no 9, pp. 2345–2365, 2019.
- [78] T.-C. Yan, J. Cao, et L.-H. Ye, « Progrès récents dans la découverte d'inhibiteurs enzymatiques à partir de produits naturels en utilisant le criblage de bio activité », *Journal of Separation Science*, vol. 45, no 6, pp. 1012–1028, 2022.
- [79] M. Hassan, S. Ahmad, et R. Khan, « Inhibiteurs de la tyrosinase présents naturellement dans les plantes », *Molécules*, vol. 28, no 5, Art. no 2112, 2023.
- [80] A. Monografías, « Les polyphénols végétaux comme inhibiteurs des hydrolases : Implications pour la nutrition et la thérapie », *Karger*, vol. 30, no 5, pp. 453–468, 2024.
- [81] J. Smith et K. Lee, « Plantes nutritionnelles et médicinales comme sources potentielles d'inhibiteurs enzymatiques pour les aliments fonctionnels bioactifs : Une revue mise à jour », *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024.
- [82] « La quercétine et les flavonoïdes comme inhibiteurs enzymatiques naturels », *Frontiers in Nutrition*, 2025.
- [83] Contributeurs de Wikipédia, « Défensine végétale », *Wikipédia*, 2025.
- [84] Contributeurs de Wikipédia, « Amentoflavone », *Wikipédia*, 2025.
- [85] Université d'Oran, « Approche chimique et computationnelle promouvant les composés bioactifs à partir de produits naturels à des fins thérapeutiques », thèse de doctorat, Univ. d'Oran, Algérie, 2022.
- [86] Université Beni-Suef, « Produits naturels comme inhibiteurs enzymatiques pour la Gproduction d'agents biologiquement actifs », thèse de doctorat, Université de Fayoum, Égypte, 2021.
- [87] F. Blin, S. G. Leary, G. B. Deacon, P. C. Junk, et M. Forsyth, « Études de corrosio », *Corrosion Science*, vol. 48, p. 419, 2006.
- [88] D. Landolt, *Corrosion et Chimie de Surface des Métaux*. Lausanne, Suisse : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1997.
- [89] F. Blin, P. Kontsoukos, P. Klepetsianis, et M. Forsyth, « Études du comportement de la corrosion », *Electrochimica Acta*, vol. 52, pp. 6212–6220, 2007.

- [90] S. Lallas, V. Athanasiades, O. Gortzi, M. Bounitsi, I. Giovanoudis, J. Tsaknis, et F. Bogaitzis, « Enrichissement des olives de table avec des polyphénols extraits des feuilles d'olivier », *Food Chemistry*, vol. 88, 2011.
- [91] J. Bruneton, *Pharmacognosie, Phytochimie, Plantes Médicinales*, 4e éd. Paris, France, 2009, pp. 717–719.
- [92] S. Cherif et N. Rahal, « Un essai clinique d'un extrait titré d'Olea dans le traitement de l'hypertension artérielle essentielle », *Journal de Pharmacie de Belgique*, pp. 69–71, 1996.
- [93] Civantos, « Valorisation des sous-produits de l'olivier », *Réunion du Comité Technique de la FAO*, pp. 143–145, 1983.
- [94] F. Aouidu, « Étude et valorisation des feuilles d'olivier (*Olea europaea*) dans l'industrie agroalimentaire », thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées et de Technologie, 2012.
- [95] K. Fegeros, G. Zervas, F. Apsokardos, J. Vastardis, et E. Apostolaki, « Évaluation nutritive des feuilles d'olivier traitées à l'ammoniac pour les brebis laitières », *Small Ruminant Research*, vol. 17, pp. 9–15, 1995.
- [96] V. Micol, N. Caturla, L. Pérez-Fons, V. Más, V. Pérez, et A. Estepa, « L'extrait de feuille d'olivier présente une activité antivirale contre le rhabdovirus de la septicémie virale hémorragique (VHSV) », *Antiviral Research*, pp. 129–136, 2005.
- [97] C. Aydogan, « Études de phytothérapie sur les extraits de feuilles d'olivier », *Phytotherapy Research*, vol. 9, pp. 1239–1242, 2008.
- [98] A. I. Martin-Garcia et E. Molina-Alcaide, « Effet de différentes procédures de séchage sur la valeur nutritive des feuilles d'olivier (*Olea europaea* var. *europaea*) pour les ruminants », *Animal Feed Science and Technology*, vol. 142, pp. 317–329, 2008.
- [99] R. L. Hortense, « Modélisation de l'extraction des solutés hydrosolubles de *Salvia coccinea* (Lamiaceae) », Mémoire de Master, Univ.d'Antananarivo, Madagascar, 2018.
- [100] N. Herzi, « Extraction et purification de substances naturelles : comparaison de l'extraction au CO₂ supercritique et des techniques conventionnelles », thèse de doctorat, Univ. Toulouse, France, 2013.

- [101] B. Adjouati et A. Ziane, « L'inhibition de la corrosion de l'acier par les extraits aqueux de feuilles d'olivier », mémoire de master, École Nationale Polytechnique, Algérie, 2020, p. 36.
- [102] L. Galvan d'Alessandro, « Éco-procédés pour la récupération sélective d'antioxydants à partir d'Aronia melanocarpa et de ses coproduits », thèse de doctorat, Univ. Lille 1, France, 2013.
- [103] B. Abd-El-Nabey, A. Abdel-Gaber, et al., « 26e Conférence sur la Technologie de Traitement de l'Eau », Alexandrie, Égypte, 7–9 juin 2008.
- [104] J. Bruneton, Pharmacognosie, Phytochimie, Plantes Médicinales, 4e éd. Paris, France : Tec & Doc/Lavoisier, 2009.
- [105] A. Bouaine, « Étude de l'activité antifongique des huiles essentielles extraites de deux plantes aromatiques et médicinales : Lentisque et Myrte », mémoire de master, Univ. Sidi Mohammed Ben Abdellah, Fès, Maroc, 2016.
- [106] M. Boukhelfa, « Étude de l'activité antioxydante des huiles essentielles et de la pédologie d'Haloxylon scoparium Pomel de la région de Naâma », mémoire de master, Univ. Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2013.
- [107] A. Cendres, « Procédé novateur d'extraction de jus de fruits par micro-ondes : viabilité de fabrication et qualité nutritionnelle des jus », thèse de doctorat, Uni. d'avignon, France, 2010.
- [108] C.-I. Wright, L. Van-Buren, C.-I. Kroner, et M.-M.-G. Koning, « Les médicaments à base de plantes comme diurétiques », Journal of Ethnopharmacology, vol. 114, pp. 1–31, 2007.
- [109] K. Ghedira, « L'olivier », Journal de la Phytothérapie, vol. 6, pp. 83–89, 2008.
- [100] N. Herzi, « Extraction et purification de substances naturelles : comparaison de l'extraction au CO₂ supercritique et des techniques conventionnelles », thèse de doctorat, Univ. Toulouse, France, 2013.
- [101] B. Adjouati et A. Ziane, « L'inhibition de la corrosion de l'acier par les extraits aqueux de feuilles d'olivier », mémoire de master, École Nationale Polytechnique, Algérie, 2020, p. 36.

- [102] L. Galvan d'Alessandro, « Éco-procédés pour la récupération sélective d'antioxydants à partir d'Aronia melanocarpa et de ses coproduits », thèse de doctorat, Univ. Lille 1, France, 2013.
- [103] B. Abd-El-Nabey, A. Abdel-Gaber, et al., « 26e Conférence sur la Technologie de Traitement de l'Eau », Alexandrie, Égypte, 7–9 juin 2008.
- [104] J. Bruneton, Pharmacognosie, Phytochimie, Plantes Médicinales, 4e éd. Paris, France : Tec & Doc/Lavoisier, 2009.
- [105] A. Bouaine, « Étude de l'activité antifongique des huiles essentielles extraites de deux plantes aromatiques et médicinales : Lentisque et Myrte », mémoire de master, Univ. Sidi Mohammed Ben Abdellah, Fès, Maroc, 2016.
- [106] M. Boukhelfa, « Étude de l'activité antioxydante des huiles essentielles et de la pédologie d'Haloxylon scoparium Pomel de la région de Naâma », mémoire de master, Univ. Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2013.
- [107] A. Cendres, « Procédé novateur d'extraction de jus de fruits par micro-ondes : viabilité de fabrication et qualité nutritionnelle des jus », thèse de doctorat, Univ d'avignon, France, 2010.
- [108] C.-I. Wright, L. Van-Buren, C.-I. Kroner, et M.-M.-G. Koning, « Les médicaments à base de plantes comme diurétiques », Journal of Ethnopharmacology, vol. 114, pp. 1–31, 2007.
- [109] K. Ghedira, « L'olivier », Journal de la Phytothérapie, vol. 6, pp. 83–89, 2008.