



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أكللي محمد أولحاج - البويرة
Université Akli Mohand OULHADJ - Bouira



كلية العلوم التطبيقية

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie des Procédés
Laboratoire de Génie des Procédés

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

En GÉNIE DES PROCÉDÉS

Spécialité Génie Chimique

Par

CHIKH Chaima

ZAIR Fatma

Intitulée :

**Étude du potentiel des extraits végétaux pour la protection
anticorrosion de l'acier**

Soutenue le 27/06/2026

devant le Jury composé de :

HAMMACHE Fadila	MCA	Université de Bouira	Présidente
MANSOURI Lynda	MAA	Université de Bouira	Examinatrice
ZAABAR Aida	Pr	Université de Bouira	Encadrante
AIT BOUABDALLAH Imane	Dr	Université de Bouira	Co-Encadrante

Année Universitaire 2025/2026



Faculté SNV Université Bouira



CERTIFICAT D'ANALYSE

NOM DU DOCUMENT

Mémoire CHIKH Chaima et ZAIR Fatma.pdf

SOU MIS PAR

Département Génie des Procédés FSSA Enseignant

TYPE D'ANALYSE

Usage universitaire

DATE DE SOUMISSION

2026-06-21

ÉTUDIANT CONCERNÉ

CHIKH Chaima et ZAIR Fatma

14.8 %

TAUX GLOBAL DE SIMILARITÉ

● Similarité Forte (14.8%) ● Texte Original (85.2)

SOURCES IDENTIFIÉES

Internet

Base Detectia

Dépôt Institutionnel

228

196

32

0

CITATIONS & RÉFÉRENCES

NONE%

Juridique (Lois)

0.0%

Religieux (Textes sacrés)

0%

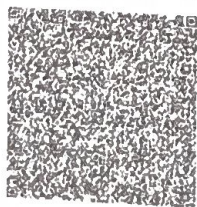
Autres

0.0%

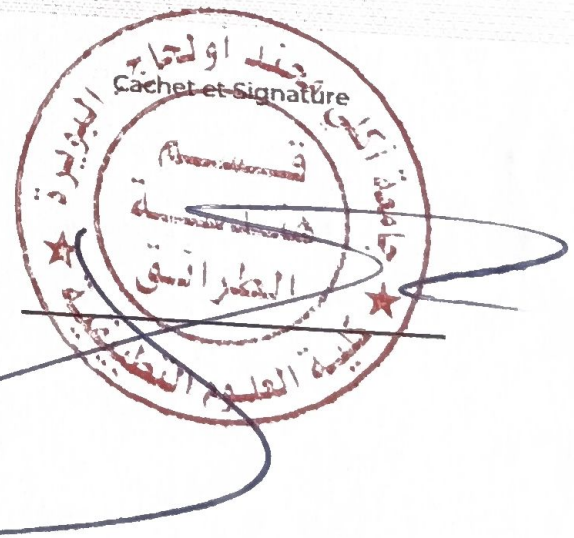
AVIS LÉGAL

Ce document est un rapport technique généré automatiquement par la plateforme Detectia. Il ne constitue pas à lui seul une preuve de plagiat. L'interprétation des résultats incombe aux instances académiques compétentes, conformément à l'arrêté N° 1082 du 27 Décembre 2020 fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat.

Signature Numérique



NEF: 4jryeh-346052





نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة).....
الصفة: طالب (ة)

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 4 14 58 06 39... والصادرة بتاريخ: 2025/03/17

المسجل(ة) // بكلية العلوم التطبيقية قسم هندسة الطرائق

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها: Etude du potentiel des extraits végétaux pour

la protection anticorrosion de l'acier

تحت إشراف الأستاذ(ة): Zaabar Aida

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة
انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 21/06/2024

توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

14,8 %

النسبة:





نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira
Tasclawit Akli Mohand Oulhadj - Tibirett

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محمد أولحاج - البويرة

نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة)..... السيد(ة).....
الصفة: طالب(ة)

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 407087552 والصادرة بتاريخ 2023/09/24

المسجل(ة) / بكلية العلوم التطبيقية قسم هندسة الطرائق

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها: Étude de potentiel des extraits végétaux

Pour la protection anticorrosion de l'acier

تحت إشراف الأستاذ(ة): Zaabar Aïda

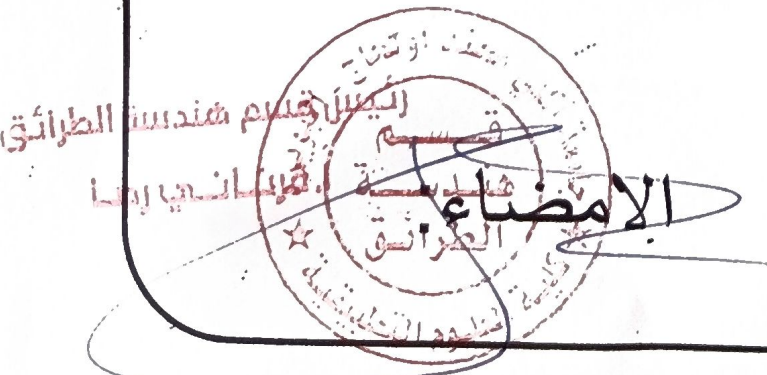
أصـحـ بـشـرـفـي انـي ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة في
انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 21/06/2026

توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

النسبة: 14,80%







Remerciements



Avant tout, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné la santé, la patience, le courage et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à Mesdames ZAABAR Aida et AIT BOUABDALAH Imane pour la qualité de leur encadrement, leur disponibilité constante, leur soutien bienveillant ainsi que la confiance qu'elles nous ont accordée tout au long de la réalisation de ce mémoire. Leurs conseils précieux, leur patience et leurs encouragements ont été pour nous d'un grand apport et nous ont permis d'avancer avec assurance, même face aux difficultés rencontrées.

Nous adressons également nos sincères remerciements à Mesdames HAMMACHE Fadila et MANSOURI Lynda pour l'honneur qu'elles nous ont fait en acceptant d'évaluer et d'examiner ce travail. Leur présence au sein du jury constitue pour nous une marque d'estime et de considération dont nous leur sommes profondément reconnaissantes.

Nos remerciements s'adressent aussi à l'ensemble du personnel du laboratoire de Génie des Procédés pour son accueil chaleureux, son aide précieuse, sa disponibilité et ses orientations durant toute la période de notre stage.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude à l'ensemble de nos enseignants, qui nous ont accompagnées tout au long de notre parcours universitaire. Par la qualité de leur enseignement, leurs orientations avisées et leur engagement, ils ont contribué de manière significative à notre formation, à notre enrichissement scientifique et à notre progression académique.

Enfin, nous exprimons toute notre reconnaissance à nos familles, et plus particulièrement à nos parents, pour leur amour, leur soutien inconditionnel, leur confiance et leurs encouragements permanents. Leur présence à nos côtés a été une source précieuse de force, de courage et de motivation tout au long de notre parcours.

Que toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce modeste travail trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.





Dédicaces



Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, qui ont toujours été ma source de force, de courage et de motivation. À mon père, pour ses précieux conseils, son soutien constant et ses encouragements tout au long de mon parcours. À ma mère, pour sa tendresse, sa patience, son amour inconditionnel et son affection inestimable. Que Dieu les protège, leur accorde santé et bonheur, et les comble de Ses bienfaits.

À mes sœurs, pour leur présence, leur soutien moral et leurs encouragements, qui m'ont aidée à surmonter les difficultés rencontrées.

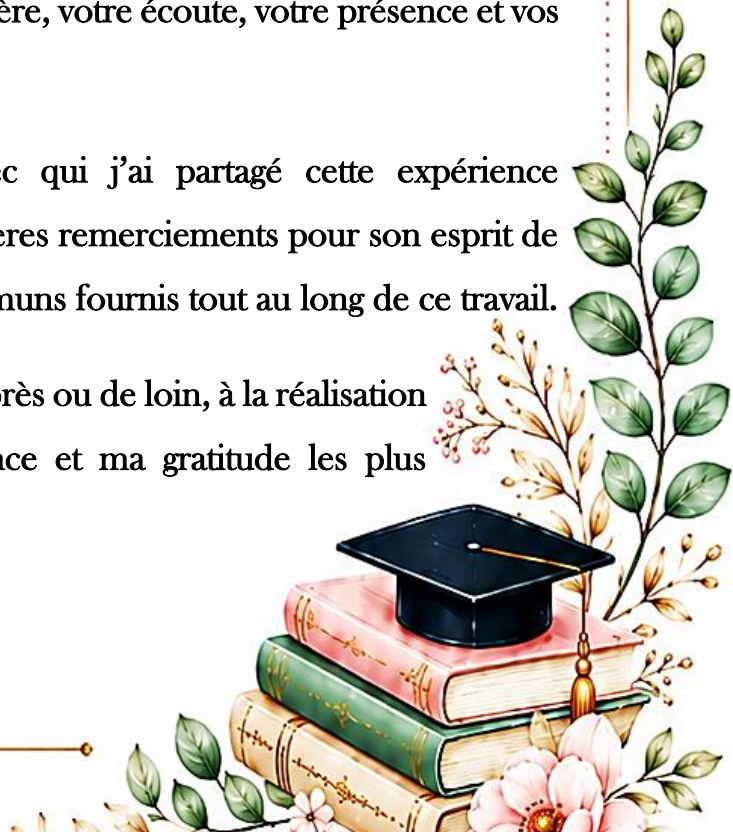
À toute ma famille, à mes proches et à tous ceux qui m'ont toujours témoigné leur confiance, leur affection et leur soutien, j'exprime ma profonde gratitude.

À mes ami(e)s, qui ont partagé avec moi les moments de joie ainsi que les périodes les plus difficiles, merci pour votre amitié sincère, votre écoute, votre présence et vos encouragements.

Enfin, à mon binôme, ZAIR Fatma, avec qui j'ai partagé cette expérience académique enrichissante, j'adresse mes sincères remerciements pour son esprit de collaboration, son entraide et les efforts communs fournis tout au long de ce travail.

À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire, j'exprime ma reconnaissance et ma gratitude les plus sincères.

Chaima





Dédicaces



Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, dont l'amour, le dévouement et les nombreux sacrifices ont constitué une source permanente de motivation, de force et de courage tout au long de mon parcours universitaire. À mon père, pour son soutien constant, ses précieux conseils et sa confiance inébranlable. À ma mère, pour sa tendresse, sa patience, ses prières et son affection sans limite. Que Dieu les protège, les récompense pour tout ce qu'ils ont fait pour moi et les comble de Ses bienfaits.

À mon frère et à mes sœurs, pour leur affection, leur soutien moral, leurs encouragements constants et leur présence à mes côtés tout au long de mon parcours. Merci pour votre aide, votre confiance et votre amour, qui m'ont permis d'avancer avec détermination et sérénité.

À mes ami(e)s, merci pour votre amitié sincère, votre écoute, vos encouragements et tous les moments partagés, qui ont rendu ce parcours plus agréable et plus enrichissant.

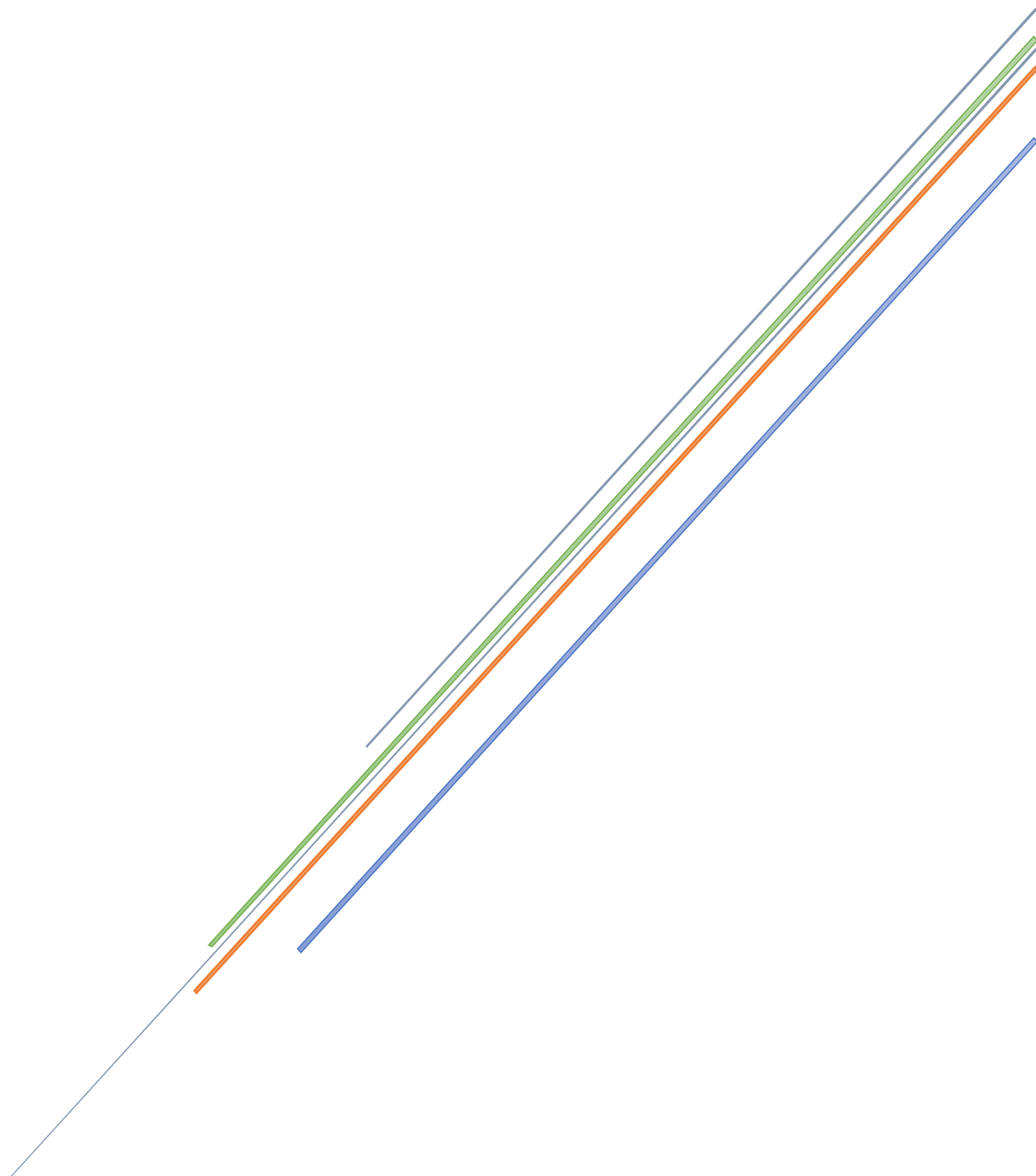
Enfin, à ma binôme, CHIKH Chaima, j'adresse mes remerciements les plus chaleureux pour son esprit de coopération, son engagement, sa patience et les efforts que nous avons fournis ensemble afin de mener à bien ce travail.

À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce mémoire, j'exprime ma reconnaissance et ma gratitude les plus sincères.

Fatma



TABLE DES MATIERES



INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Généralités sur la corrosion des métaux	5
I.1.1 Définition.....	5
I.1.2 Types de corrosion.....	6
I.1.2.1 Corrosion uniforme	6
I.1.2.2 Corrosion par piqûres	7
I.1.2.3 Corrosion galvanique	8
I.1.2.4 Corrosion par crevasse	9
I.1.2.5 Corrosion intergranulaire	11
I.1.2.6 Corrosion par érosion	11
I.1.2.7 Fissuration par corrosion sous contrainte	13
I.1.3 Mécanismes électrochimique de la corrosion.....	14
I.2 Méthode de Prévention de la corrosion.....	15
I.2.1 Les revêtements protecteurs	17
I.2.2 La protection cathodique	18
I.2.3 Les inhibiteurs de corrosion	19
I.2.4 Les inhibiteurs de corrosion verts.....	20
I.2.4.1 Définition	20
I.2.4.2 Mécanisme d'action	21
a) Adsorption physique	21
b) Chimisorption	21
c) Adsorption filmogène	21
I.2.5 Extraits végétaux comme inhibiteurs de corrosion.....	22
I.2.5.1 Généralités et intérêt des extraits végétaux	22
I.2.5.2 Composition phytochimique et rôle des principes actifs	23

a) Les polyphénols et flavonoïdes	23
b) Les tanins	23
c) Les alcaloïdes	23
d) Les terpènes et leurs dérivés	23
I.2.5.3 Mécanismes d'adsorption sur la surface métallique	24
I.2.5.4 Synthèse des études récentes	25
I.3 Conclusion	26
I.4 Références Bibliographiques	27

CHAPITRE II : TECHNIQUES D'ETUDE & CONDITIONS EXPERIMENTALES

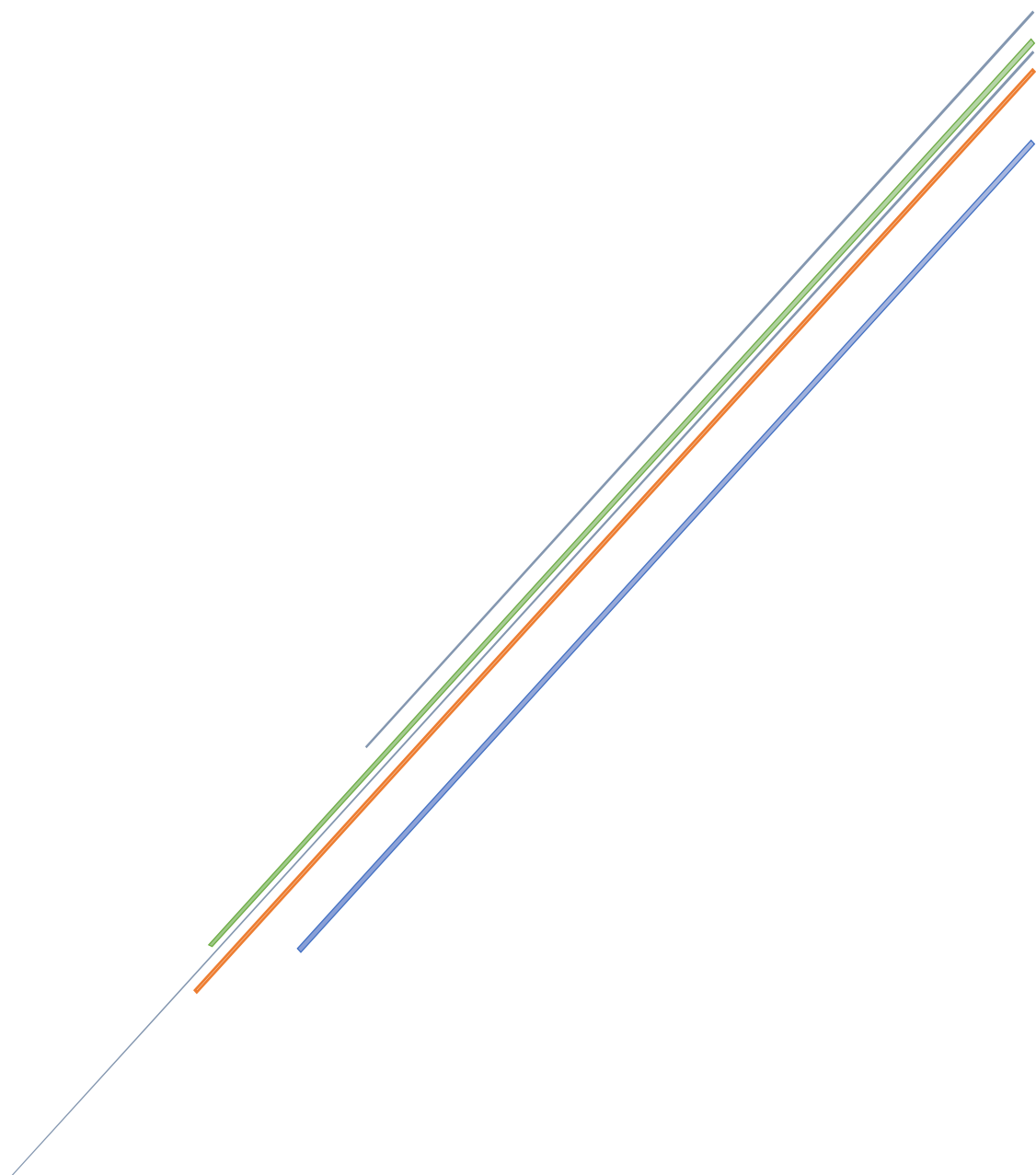
II.1 Démarche générale de l'étude expérimentale	32
II.2 Matière végétale utilisée	32
II.2.1 <i>Cleome arabica</i> L.	32
II.2.2 <i>Cistus albidus</i> L. et <i>Cistus libanotis</i> L.	34
II.3 Préparation de la matière végétale	36
II.4 Méthodes d'extraction	36
II.4.1 Extraction à reflux dans l'eau	36
II.4.2 Extraction assistée par ultrasons dans l'éthanol	38
II.5 Préparation des milieux corrosifs	39
II.6 Préparation des plaques métalliques	40
II.7 Essais gravimétriques de corrosion	41
II.8 Conclusion	43
II.9 Références Bibliographiques	44

CHAPITRE III : RESULTATS & DISCUSSION

III.1 Évaluation de l'efficacité inhibitrice des extraits végétaux en milieu acide HCl 1 M	48
III.1.1 Effet des extraits aqueux	48

III.1.1.1 <i>Cleome arabica</i> L. (CAr-Aq)	48
III.1.1.2 <i>Cistus albidus</i> L. (CAI-Aq)	50
III.1.1.3 <i>Cistus Libanitus</i> L. (CLi-Aq).....	51
III.1.2 Effet des extraits éthanoliques	53
III.1.2.1 <i>Cleome arabica</i> L. (CAr-EtOH).....	53
III.1.2.2 <i>Cistus albidus</i> L. (CAI- EtOH)	54
III.1.2.3 <i>Cistus Libanitus</i> L. (CLi-EtOH)	55
III.2 Évaluation de l'efficacité inhibitrice des extraits végétaux en milieu neutre NaCl 3%	57
III.2.1 Effet des extraits aqueux.....	57
III.2.1.1 <i>Cleome arabica</i> L. (CAr-Aq)	57
III.2.1.2 <i>Cistus albidus</i> L. (CAI-Aq)	60
III.2.1.3 <i>Cistus Libanitus</i> L. (CLi-Aq).....	62
III.2.2 Effet des extraits éthanoliques	64
III.2.2.1 <i>Cleome arabica</i> L. (CAr-EtOH).....	64
III.2.2.2 <i>Cistus albidus</i> L. (CAI- EtOH)	65
III.2.2.3 <i>Cistus Libanitus</i> L. (CLi-EtOH)	67
III.3. Étude comparative de l'efficacité inhibitrice des extraits végétaux.....	68
III.3.1. Comparaison entre les trois espèces végétales.....	68
III.3.2. Comparaison entre les extraits aqueux et éthanoliques	69
III.3.3. Influence du milieu corrosif sur l'efficacité inhibitrice	70
III.4. Isothermes d'adsorption	71
III.5. Discussion générale du mécanisme d'inhibition	77
III.6. Conclusion.....	81
III.7. Références bibliographiques	81
CONCLUSION GENERALE.....	87

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX



LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I.1 : Photos de matériaux soumis aux phénomènes de corrosion	5
Figure I.2 : Corrosion généralisée.....	7
Figure I.3 : Schéma illustratif du mécanisme de corrosion par piqures sur l'acier inoxydable 304	8
Figure I.4 : Corrosion galvanique	9
Figure I.5 : Corrosion par crevasse	10
Figure I.6 : Corrosion intergranulaire	11
Figure I.7 : Fissuration par corrosion sous contrainte.....	12
Figure I.8 : Schéma de la corrosion électrochimique.....	13
Figure I.9 : Méthodes de prévention de la corrosion	15
Figure I.10 : Application d'un revêtement protecteur.....	16
Figure I.11 : La protection cathodique.....	17
Figure I.12 : Les inhibiteurs de corrosion	18
Figure I.13 : Origine biosourcée et principales caractéristiques des inhibiteurs verts.....	19
Figure I.14 : Principaux mécanismes d'action des inhibiteurs de corrosion verts à la surface métallique	20
Figure I.15 : Principaux mécanismes d'action des inhibiteurs de corrosion verts à la surface métallique	22
Figure I.16 : Composition phytochimique des extraits végétaux et rôle des principaux principes actifs dans l'inhibition de la corrosion	24

CHAPITRE II : TECHNIQUES D'ETUDE & CONDITIONS EXPERIMENTALES

Figure II.1 : Caractères morphologiques de <i>Cleome arabica</i> L. : (a) plante entière, (b) feuilles, (c) fleur, (d) fruit	34
Figure II.2 : Exemples de cistes utilisés comme matières végétales : (a) <i>Cistus albidus</i> L., caractérisé par son feuillage clair et sa floraison, (b) <i>Cistus libanotis</i> L., espèce méditerranéenne aromatique à feuillage persistant.....	35
Figure II.3 : Dispositif expérimental d'extraction à reflux	37

Figure II.4 : Dispositif expérimental utilisé pour l'extraction assistée par ultrasons dans l'éthanol	38
--	----

CHAPITRE III : RESULTATS & DISCUSSION

Figure III.1 : Évolution de la vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction du temps en présence de CAR-Aq.....	49
Figure III.2 : Évolution de la vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction du temps en présence de CAL-Aq.....	51
Figure III.3 : Évolution de la vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction du temps en présence de CLi-Aq	52
Figure III.4 : Évolution de la vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction du temps en présence de CAR-EtOH	54
Figure III.5 : Évolution de la vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction du temps en présence de CAL-EtOH.....	55
Figure III.6 : Variation de (V_{corr}) dans HCl 1M en absence et en présence de CAL-EtOH..	56
Figure III.7 : Évolution de la perte de masse surfacique (W) en fonction du temps en présence de CAR-Aq	58
Figure III.8 : Efficacité inhibitrice de CAR-Aq en milieu NaCl 3 % après 6 et 13 jours d'immersion	59
Figure III.9 : Efficacité inhibitrice de CAR-Aq en milieu NaCl 3 % après 6 et 13 jours d'immersion	60
Figure III.10 : Évolution de (W) en milieu NaCl 3 % en présence de l'extrait CLi-Aq	63
Figure III.11 : Évolution de (W) en milieu NaCl 3 % en présence de l'extrait CAR-EtOH	64
Figure III.12 : Évolution de (W) en milieu NaCl 3 % en présence de l'extrait CAL-EtOH	66
Figure III.13 : Évolution de (W) en milieu NaCl 3 % en présence de l'extrait CLi-EtOH.....	67
Figure III.14 : Isothermes d'adsorption selon le modèle de Langmuir de l'acier dans HCl 1 M en présence des extraits aqueux de : (a) CAR-Aq, (b) CAL-Aq et (c) CLi-Aq.....	73
Figure III.15 : Isothermes d'adsorption selon le modèle de Langmuir de l'acier dans HCl 1 M en présence des extraits éthanoliques de : (a) CAR-EtOH, (b) CAL-EtOH et (c) CLi-EtOH.....	74
Figure III.16 : Isothermes d'adsorption selon le modèle de Langmuir de l'acier dans NaCl 3 % en présence des extraits aqueux de : (a) CAR-Aq, (b) CAL-Aq et (c) CLi-Aq.....	75
Figure III.17 : Isothermes d'adsorption selon le modèle de Langmuir de l'acier dans NaCl 3 % en présence des extraits éthanoliques de : (a) CAR-EtOH, (b) CAL-EtOH et (c) CLi-EtOH.....	76
Figure III.18 : Mécanisme proposé d'inhibition de la corrosion de l'acier par les extraits végétaux, inspiré du mécanisme réactionnel des inhibiteurs organiques sur les surfaces de fer	80

LISTE DES TABLEAUX

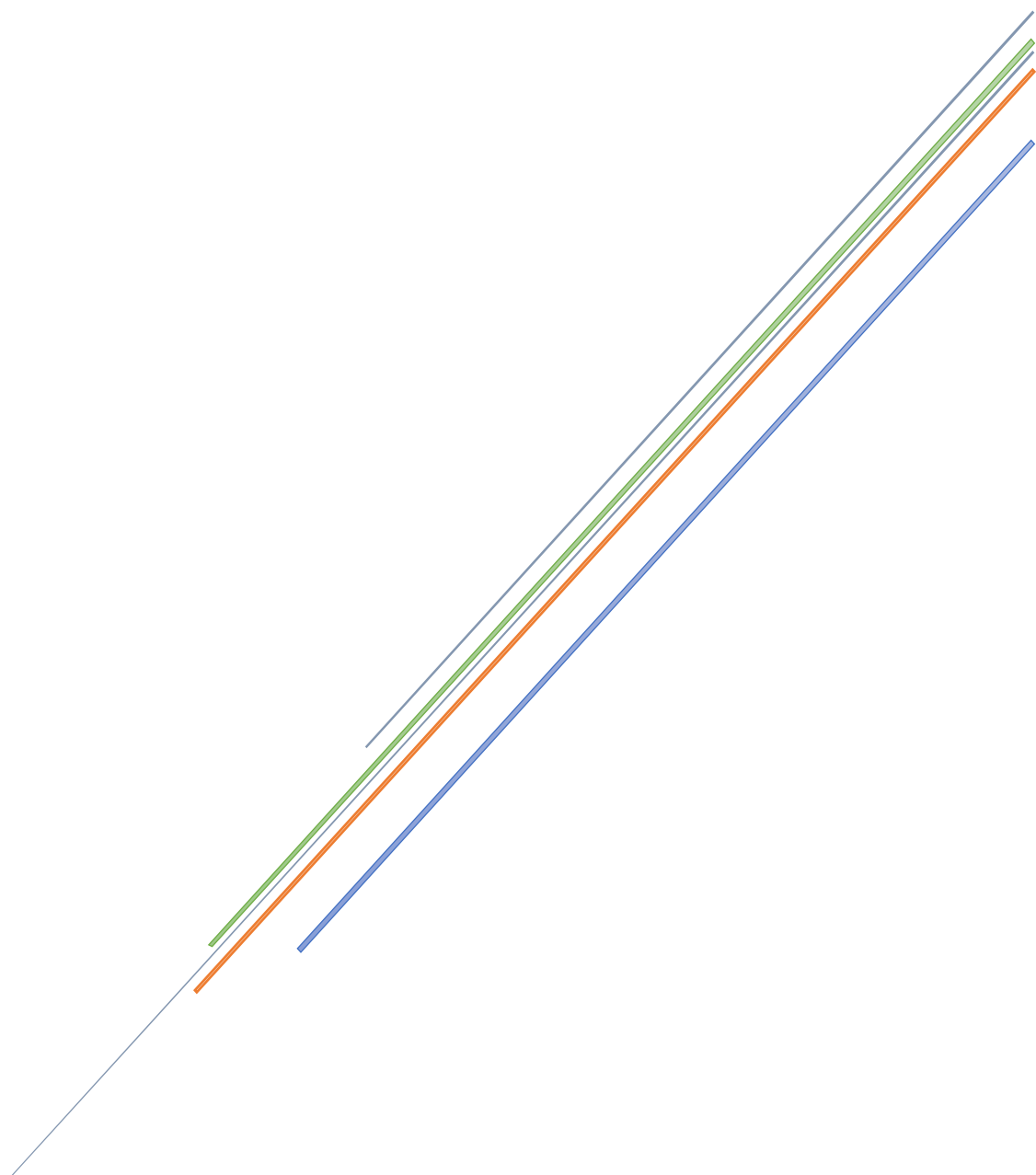
CHAPITRE II : TECHNIQUES D'ETUDE & CONDITIONS EXPERIMENTALES

Tableau II.1 : Classification systématique de <i>Cleome arabica</i> L.....	33
Tableau II.2 : Espèces de cistes utilisées comme matières végétales.....	35
Tableau II.3 : Analyse typique de l'acier utilisé.....	40
Tableau II.4 : Classification des niveaux de corrosion selon la vitesse de corrosion	42

CHAPITRE III : RESULTATS & DISCUSSION

Tableau III.1 : Efficacité inhibitrice en fonction de la concentration de CAI-Aq après 13 jours d'immersion dans le milieu NaCl 3 %	61
Tableau III.2 : Efficacité inhibitrice de CLi-Aq après 13 jours d'immersion en milieu NaCl 3 %	62
Tableau III.3 : Coefficients de corrélation (R^2) obtenus selon le modèle de Temkin pour les extraits étudiés en milieux HCl 1 M et NaCl 3 %	74
Tableau III.4 : Coefficients de corrélation (R^2) obtenus selon le modèle de Frumkin pour les extraits étudiés en milieux HCl 1 M et NaCl 3 %	75

LISTE DES ABREVIATIONS ET NOTATIONS



LISTE DES ABREVIATIONS

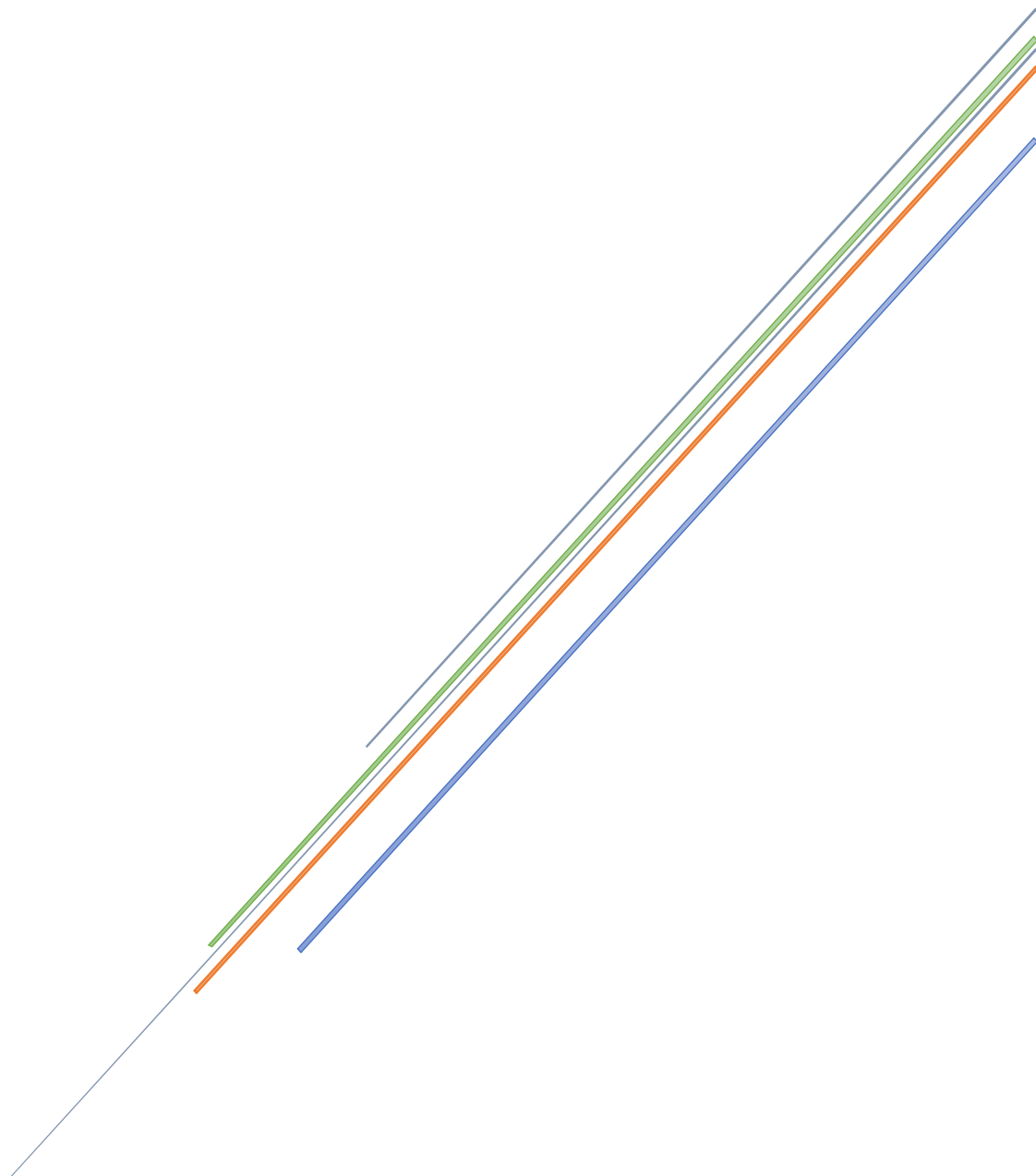
Abréviation	Signification
AISI	American Iron and Steel Institute ; mentionné dans AISI 1045.
API	American Petroleum Institute ; mentionné dans API 5L X42.
Aq	Aqueux ; extrait obtenu par extraction à reflux dans l'eau.
EtOH	Éthanol / éthanolique ; extrait obtenu par extraction assistée par ultrasons dans l'éthanol.
C<i>Ar</i>	<i>Cleome arabica</i> L.
C<i>Al</i>	<i>Cistus albidus</i> L.
C<i>Li</i>	<i>Cistus libanotis</i> L.
C<i>Ar</i>-Aq	Extrait aqueux de <i>Cleome arabica</i> L.
C<i>Ar</i>-EtOH	Extrait éthanolique de <i>Cleome arabica</i> L.
C<i>Al</i>-Aq	Extrait aqueux de <i>Cistus albidus</i> L.
C<i>Al</i>-EtOH	Extrait éthanolique de <i>Cistus albidus</i> L.
C<i>Li</i>-Aq	Extrait aqueux de <i>Cistus libanotis</i> L.
C<i>Li</i>-EtOH	Extrait éthanolique de <i>Cistus libanotis</i> L.
FCS	Fissuration par corrosion sous contrainte.
FTIR	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier.
GC-MS	Chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse.
HCl	Acide chlorhydrique.
HPLC	Chromatographie liquide à haute performance.
H₂SO₄	Acide sulfurique.
ISO	Organisation internationale de normalisation.
L.	Linné ; abréviation utilisée dans les noms botaniques.
M	Molarité ; concentration molaire, mol.L ⁻¹ .
MEB	Microscopie électronique à balayage.
NaCl	Chlorure de sodium.
PC	Protection cathodique.
pH	Potentiel hydrogène.
RMN	Résonance magnétique nucléaire.

LISTE DES NOTATIONS

Notation	Signification	Unité / remarque
Δm	Perte de masse de la plaque métallique.	mg ou g
m_0	Masse initiale de la plaque avant immersion.	mg ou g
m	Masse finale de la plaque après immersion.	mg ou g
V_{corr}	Vitesse de corrosion de l'acier.	mg.cm ⁻² .h ⁻² ou mm.an ⁻¹
V_{corr}^i	Vitesse de corrosion en présence de l'extrait végétal.	mg.cm ⁻² .h ⁻¹ ou mm.an ⁻¹
S	Surface totale exposée de la plaque métallique.	cm ²
t	Temps d'immersion ou d'exposition.	h ou jour
D	Densité du métal.	g.cm ⁻³
87,6	Facteur de conversion utilisé dans le calcul de V_{corr} en mm/an.	—
$\eta(\%)$	Efficacité inhibitrice.	%
W	Perte de poids ou perte de masse du témoin, sans inhibiteur.	mg ou g
W_i	Perte de masse en présence de l'extrait végétal.	mg ou g
θ	Taux de recouvrement de la surface métallique ; $\theta = \eta(\%)/100$.	Sans unité
C	Concentration de l'inhibiteur utilisée dans les isothermes d'adsorption.	g.L ⁻¹
K	Constante d'équilibre d'adsorption dans les modèles de Langmuir, Temkin et Frumkin.	Selon le modèle
a	Paramètre d'interaction utilisé dans les modèles de Temkin et de Frumkin.	Sans unité

Notation	Signification	Unité / remarque
R^2	Coefficient de corrélation utilisé pour évaluer l'ajustement des modèles d'adsorption.	Sans unité
M	Métal générique dans les équations générales de corrosion.	Symbole
M^{n+}	Ion métallique formé lors de la dissolution anodique.	Symbole
n	Nombre d'électrons échangés dans une réaction électrochimique.	Sans unité
e^-	Électron libéré ou consommé dans les réactions d'oxydoréduction.	Symbole
Inh	Molécule inhibitrice.	Symbole
ads	Indice indiquant une espèce adsorbée à la surface métallique.	Indice
sol	Indice indiquant une espèce en solution.	Indice
Org_{sol}	Molécule organique inhibitrice en solution.	Symbole
Org_{ads}	Molécule organique inhibitrice adsorbée à la surface métallique.	Symbole
H_2O_{sol}	Molécules d'eau en solution	Symbole
H_2O_{ads}	Molécules d'eau adsorbées	Symbole
x	Nombre de molécules d'eau déplacées par une molécule inhibitrice.	Sans unité
π	Électrons pi des cycles aromatiques impliqués dans l'adsorption.	Symbole

INTRODUCTION GENERALE



La corrosion des matériaux métalliques représente un défi important dans de nombreux secteurs industriels. Elle provoque une altération progressive des équipements, réduit leur durée de vie et entraîne des coûts élevés de maintenance, de réparation et de remplacement [1,2]. Ce phénomène résulte d'interactions physico-chimiques et électrochimiques entre le métal et son environnement. Il devient particulièrement marqué en milieux acides ou chlorurés, où les ions H^+ favorisent la dissolution du métal, tandis que les ions Cl^- peuvent provoquer des attaques localisées, notamment par piqûres [1,3]. La protection des métaux constitue donc un enjeu essentiel pour améliorer la durabilité des installations et limiter les pertes économiques et environnementales.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour ralentir ou prévenir la corrosion. Parmi les plus courantes, on peut citer l'application de revêtements protecteurs, la protection cathodique, la protection anodique, l'emploi d'alliages plus résistants, les traitements de surface, ainsi que le contrôle du milieu corrosif par modification du pH, réduction de l'oxygène dissous ou limitation des espèces agressives [1–3]. Ces techniques présentent une efficacité reconnue, mais elles peuvent aussi nécessiter des équipements spécifiques, une mise en œuvre coûteuse ou une maintenance régulière. Dans ce contexte, l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion constitue une approche particulièrement intéressante. Elle se distingue par sa simplicité d'application, son efficacité à faible concentration et sa capacité à agir directement à l'interface métal/solution, en formant une barrière protectrice sur les sites actifs de la surface métallique [4,5].

Cependant, certains inhibiteurs synthétiques peuvent présenter des limites liées à leur toxicité, leur coût ou leur impact environnemental. Pour cette raison, les inhibiteurs dits « verts », notamment ceux issus d'extraits végétaux, suscitent aujourd'hui un intérêt croissant. Ces extraits constituent une source naturelle de molécules bioactives telles que les polyphénols, les flavonoïdes, les tanins et certains alcaloïdes. Ces composés peuvent interagir avec la surface métallique grâce à leurs groupements fonctionnels contenant des hétéroatomes comme O, N ou S, ainsi qu'aux électrons π des cycles aromatiques [5,6]. Leur adsorption permet la formation d'un film protecteur capable de réduire le contact direct entre l'acier et les espèces corrosives présentes dans le milieu.

Dans ce contexte, le présent travail porte sur l'étude du pouvoir inhibiteur d'extraits végétaux préparés à partir de *Cleome arabica* L., *Cistus albidus* L. et *Cistus libanotis* L. Ces plantes ont

été choisies en raison de leur disponibilité locale et de leur richesse potentielle en composés naturels d'intérêt.

Deux méthodes d'extraction ont été adoptées dans ce travail : l'extraction aqueuse à reflux et l'extraction éthanolique assistée par ultrasons. L'extraction à reflux dans l'eau présente l'avantage d'être simple, économique et plus respectueuse de l'environnement. Elle permet principalement de récupérer les composés polaires et hydrosolubles, tels que certains polyphénols, tanins, flavonoïdes, saponines et acides organiques, qui peuvent participer à l'adsorption sur la surface métallique [7]. En parallèle, l'extraction assistée par ultrasons dans l'éthanol a été retenue comme méthode complémentaire, car les ultrasons favorisent la rupture des parois cellulaires végétales par cavitation acoustique, ce qui améliore la libération des molécules bioactives dans le solvant [8]. L'éthanol, de son côté, permet d'extraire une gamme plus variée de composés organiques, notamment des molécules de polarité intermédiaire comme certains flavonoïdes, terpènes, alcaloïdes et composés phénoliques. Ainsi, l'association de ces deux approches permet de comparer des extraits aqueux riches en molécules polaires et des extraits éthanoliques contenant des composés plus diversifiés, afin de déterminer lesquels assurent la meilleure protection de l'acier contre la corrosion.

Les essais de corrosion ont été réalisés dans deux milieux représentatifs : HCl 1 M et NaCl 3 %. Le premier simule un environnement acide fortement agressif, souvent rencontré lors du décapage acide, du nettoyage industriel ou du traitement des surfaces métalliques [1,9]. Le second reproduit un milieu salin chloruré proche des conditions marines, où les ions chlorure peuvent déstabiliser la couche protectrice et favoriser la corrosion localisée [1]. Cette comparaison permet d'évaluer le comportement des extraits végétaux face à deux mécanismes différents : la dissolution rapide de l'acier en milieu acide et l'attaque induite par les chlorures en milieu salin.

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer la capacité de ces extraits végétaux à réduire la corrosion de l'acier, d'identifier les conditions favorables à leur action inhibitrice et de mieux comprendre le mécanisme de protection mis en jeu. Cette étude s'inscrit également dans une démarche de valorisation de ressources naturelles accessibles, avec l'ambition de contribuer au développement de solutions anticorrosion plus simples, plus durables et plus respectueuses de l'environnement.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

- Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique consacrée à la corrosion des métaux, à ses principales formes, à ses mécanismes ainsi qu'aux différentes méthodes de protection, avec une attention particulière portée aux inhibiteurs verts d'origine végétale.
- Le deuxième chapitre décrit les techniques d'étude et les conditions expérimentales adoptées, notamment la préparation des extraits aqueux et éthanoliques, la présentation des plantes étudiées ainsi que les essais réalisés en milieux HCl 1 M et NaCl 3 %.
- Le troisième chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats obtenus. Il permet de comparer l'effet de la nature de la plante, du solvant d'extraction, de la concentration de l'extrait et du milieu corrosif sur l'efficacité inhibitrice, avant de proposer une interprétation fondée sur l'adsorption des molécules bioactives à la surface de l'acier.

Enfin, ce mémoire se termine par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus et propose quelques perspectives pour la poursuite de ce travail.

Les références bibliographiques utilisées sont présentées à la fin de chaque chapitre.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

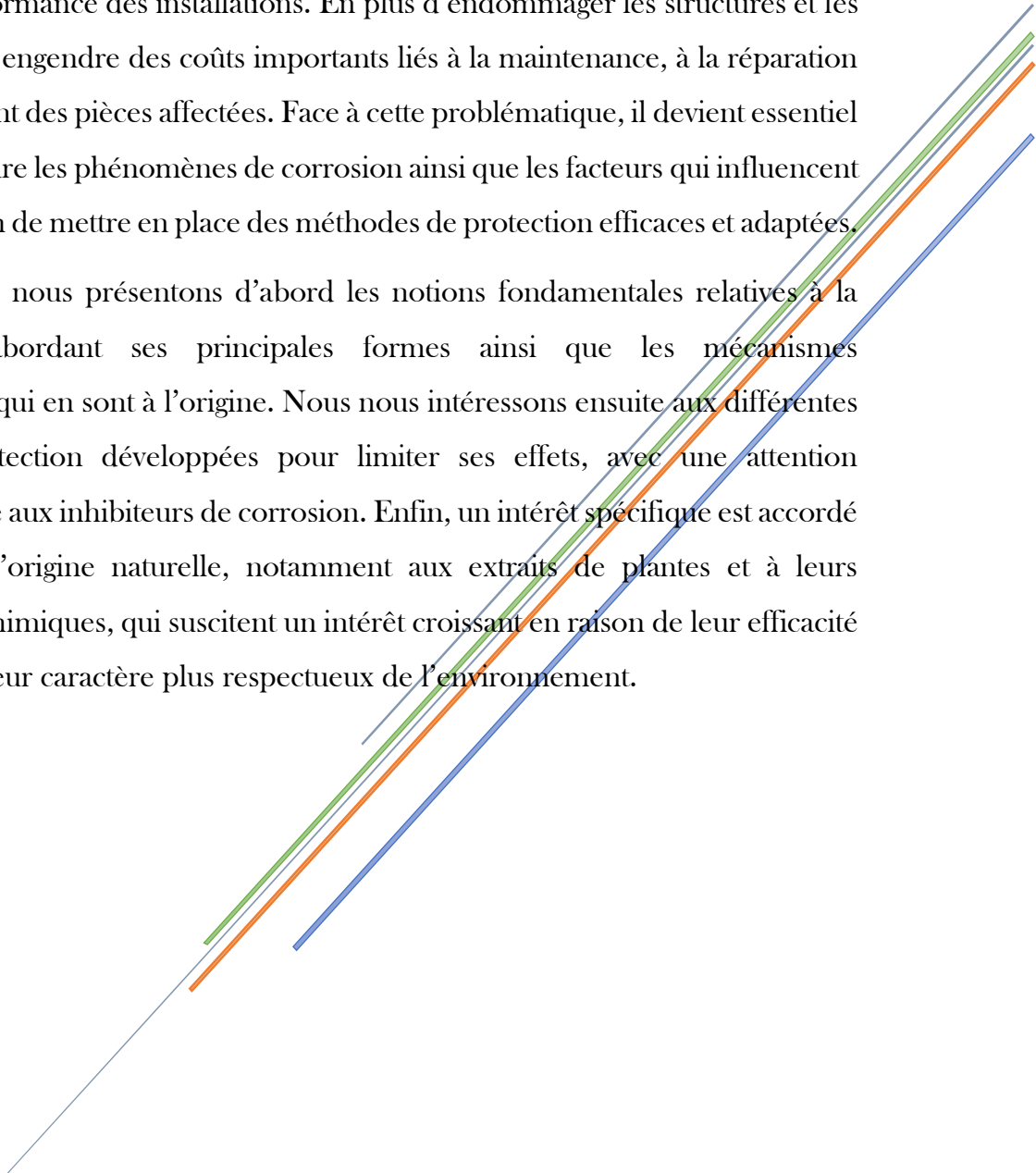
- [1] Revie, R. W., & Uhlig, H. H. (2008). Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering. 4th Edition. Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9780470277270>.
- [2] Koch, G. H., Varney, J., Thompson, N., Moghissi, O., Gould, M., & Payer, J. (2016). International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study. NACE International.
- [3] Roberge, P. R. (2008). Corrosion Engineering: Principles and Practice. McGraw-Hill Professional. ISBN : 0071640878, 9780071640879.
- [4] Raja, P. B., & Sethuraman, M. G. (2007). Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media — A review. *Materials Letters*, 62(1), 113–116.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.04.079>.
- [5] Miralrio, A., & Vázquez, A. E. (2020). Plant extracts as green corrosion inhibitors for different metal surfaces and corrosive media: a review. *Processes*, 8(8), 942.
<https://doi.org/10.3390/pr8080942>.
- [6] Verma, C., Ebenso, E. E., & Quraishi, M. (2017). Ionic liquids as green and sustainable corrosion inhibitors for metals and alloys: An overview. *Journal of Molecular Liquids*, 233, 403–414. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.02.111>.
- [7] Zhang, M., Zhao, J., Dai, X., & Li, X. (2023). Extraction and analysis of chemical compositions of natural products and plants. *Separations*, 10(12), 598.
<https://doi.org/10.3390/separations10120598>.
- [8] Yusoff, I. M., Taher, Z. M., Rahmat, Z., & Chua, L. S. (2022). A review of ultrasound-assisted extraction for plant bioactive compounds: Phenolics, flavonoids, thymols, saponins and proteins. *Food Research International*, 157, 111268.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111268>.
- [9] Bentiss, F., Lagrenée, M., & Traisnel, M. (2000). 2,5-Bis(n-Pyridyl)-1,3,4-Oxadiazoles as corrosion inhibitors for mild steel in acidic media. *CORROSION*, 56(7), 733–742.
<https://doi.org/10.5006/1.3280577>.

CHAPITRE I

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

La corrosion des matériaux métalliques représente aujourd'hui un enjeu majeur dans de nombreux secteurs industriels, car elle compromet progressivement la durabilité, la sécurité et la performance des installations. En plus d'endommager les structures et les équipements, elle engendre des coûts importants liés à la maintenance, à la réparation et au remplacement des pièces affectées. Face à cette problématique, il devient essentiel de bien comprendre les phénomènes de corrosion ainsi que les facteurs qui influencent leur évolution, afin de mettre en place des méthodes de protection efficaces et adaptées.

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord les notions fondamentales relatives à la corrosion, en abordant ses principales formes ainsi que les mécanismes électrochimiques qui en sont à l'origine. Nous nous intéressons ensuite aux différentes solutions de protection développées pour limiter ses effets, avec une attention particulière portée aux inhibiteurs de corrosion. Enfin, un intérêt spécifique est accordé aux inhibiteurs d'origine naturelle, notamment aux extraits de plantes et à leurs composés phytochimiques, qui suscitent un intérêt croissant en raison de leur efficacité potentielle et de leur caractère plus respectueux de l'environnement.



I.1 Généralités sur la corrosion des métaux

I.1.1 Définition

La corrosion représente l'une des principales causes de dégradation des matériaux métalliques. Elle résulte d'interactions physico-chimiques entre le métal et son environnement, entraînant une altération progressive de ses propriétés mécaniques et fonctionnelles, et engendrant des conséquences économiques considérables ainsi que des risques non négligeables pour la sécurité des installations [1].

D'un point de vue thermodynamique, et selon la conception de Mars G. Fontana, ce phénomène traduit la tendance naturelle des métaux à retourner vers leur état d'énergie le plus bas, c'est-à-dire leur forme oxydée stable. La grande majorité des processus corrosifs repose sur des mécanismes électrochimiques faisant intervenir des réactions d'oxydoréduction, dont la cinétique est fortement influencée par les conditions du milieu environnant [2,3]. En particulier, une élévation de la température amplifie l'activité des espèces réactives et accélère significativement la vitesse de dégradation du métal [4].

La figure I.1 illustre concrètement les effets de la corrosion à travers deux exemples représentatifs.

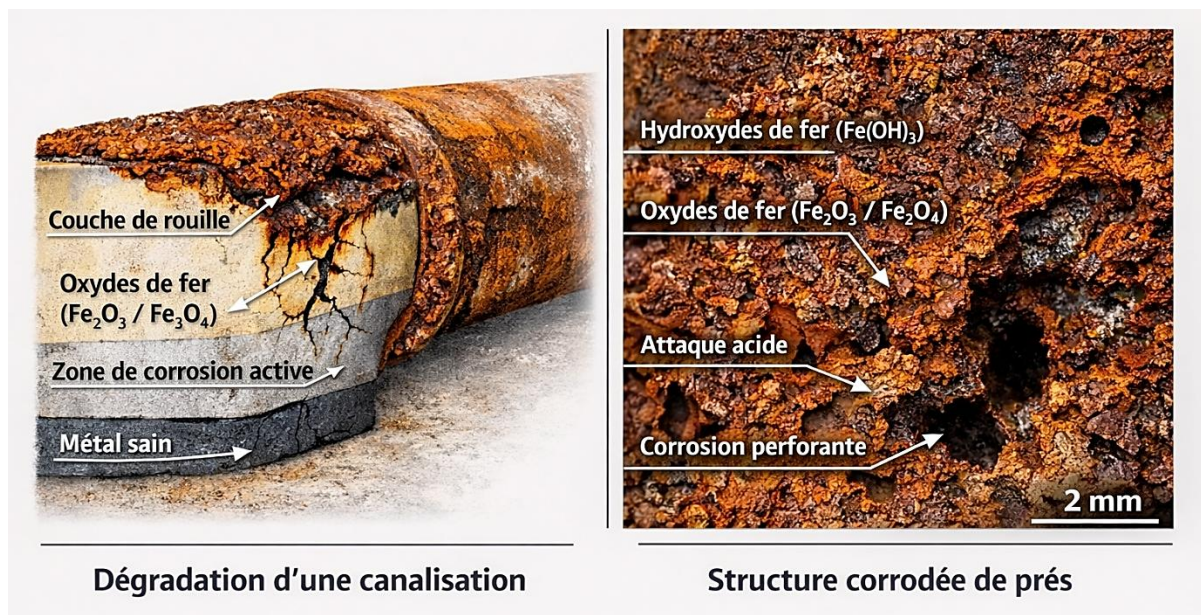


Figure I.1 : Photos de matériaux soumis aux phénomènes de corrosion.

La première image montre une canalisation métallique fortement dégradée, recouverte d'une épaisse couche de rouille brun-orangé. La corrosion apparaît particulièrement développée sur

la surface exposée du tube, notamment au niveau de la zone de raccordement, où l'on distingue une couche de rouille, des oxydes de fer (Fe_2O_3 / Fe_3O_4), une zone de corrosion active ainsi qu'une partie de métal encore sain.

La seconde image présente un gros plan d'une structure métallique en phase avancée de corrosion. On y observe une texture très hétérogène, marquée par la présence d'hydroxydes de fer $\text{Fe}(\text{OH})_3$, d'oxydes de fer Fe_2O_3 et Fe_3O_4 , ainsi que des zones d'attaque acide et de corrosion perforante. Cette image met en évidence le caractère profond, irrégulier et destructeur du processus corrosif.

Ces deux illustrations soulignent la gravité de la corrosion et la nécessité de mettre en œuvre des stratégies de prévention et de protection adaptées afin de préserver l'intégrité des structures métalliques.

I.1.2 Types de corrosion

La corrosion se manifeste sous diverses formes selon la nature du milieu agressif, les propriétés du matériau exposé et les conditions opérationnelles en jeu. On distingue ainsi plusieurs catégories, dont les principales sont présentées ci-après [5].

I.1.2.1 Corrosion uniforme

La corrosion uniforme, également appelée corrosion généralisée, constitue la forme la plus courante de dégradation métallique. Elle se caractérise par une attaque chimique ou électrochimique répartie de manière homogène sur l'ensemble de la surface exposée, entraînant une réduction progressive et régulière de l'épaisseur du matériau. Ce type de corrosion est généralement favorisé par une exposition continue à des milieux agressifs tels que l'humidité, l'air atmosphérique ou certains agents chimiques.

La figure I.2 illustre un exemple typique de corrosion généralisée observée sur des engrenages métalliques soumis à une dégradation avancée. L'ensemble des surfaces visibles apparaît recouvert de produits de corrosion brun-orangé, indiquant que l'attaque ne se limite pas à des zones ponctuelles mais s'étend de manière diffuse à tout le matériau exposé. Les dents des engrenages montrent une altération notable de leur morphologie de surface, avec la présence d'écaillages, d'irrégularités prononcées et d'un aspect friable, signes d'une dégradation progressive du métal et d'une perte de matière. L'homogénéité relative de l'atteinte sur

l'ensemble des éléments observés permet ainsi de qualifier cette dégradation de corrosion uniforme ou généralisée, probablement favorisée par une exposition durable à l'humidité et à l'oxygène atmosphérique.

Bien que prévisible et détectable, la corrosion uniforme peut, à terme, compromettre totalement le fonctionnement des pièces mécaniques et réduire leur durée de vie de manière significative.



Figure I.2 : Corrosion généralisée.

I.1.2.2 Corrosion par piqûres

La corrosion par piqûres est une attaque localisée qui se traduit par la formation de cavités profondes à la surface métallique, souvent invisibles à l'œil nu. Elle est principalement déclenchée par la présence d'agents agressifs, en particulier les ions chlorure (Cl^-), qui constituent l'un des facteurs les plus favorables à son développement.

Comme le montre la figure I.3, ce phénomène repose sur un mécanisme électrochimique impliquant deux zones fonctionnellement différentes à la surface du métal.

- Dans la zone cathodique, située sur les parties voisines restées passives, l'oxygène dissous est réduit en ions hydroxyde (OH^-) par consommation des électrons issus de la zone anodique.
- Dans la zone anodique, la dégradation locale du film passif sous l'effet des ions chlorure entraîne la mise à nu du substrat métallique et sa dissolution sous forme d'ions métalliques (Fe^{2+} , Fe^{3+}), accompagnée de la formation de dépôts d'hydroxydes ferreux ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) et ferriques ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) en surface.

À l'intérieur de la piqûre, la dissolution du métal s'accompagne d'une hydrolyse des ions métalliques, ce qui provoque une acidification locale du milieu. Parallèlement, les ions chlorure migrent et se concentrent dans la cavité afin de maintenir l'électroneutralité. La combinaison d'un pH plus faible, d'une forte teneur en chlorures et d'un appauvrissement en oxygène crée alors un environnement particulièrement agressif, favorable à une propagation autocatalytique de la piqûre en profondeur. Ce mode de corrosion est donc particulièrement critique, car il peut compromettre l'intégrité des structures métalliques sans altération visible importante en surface.

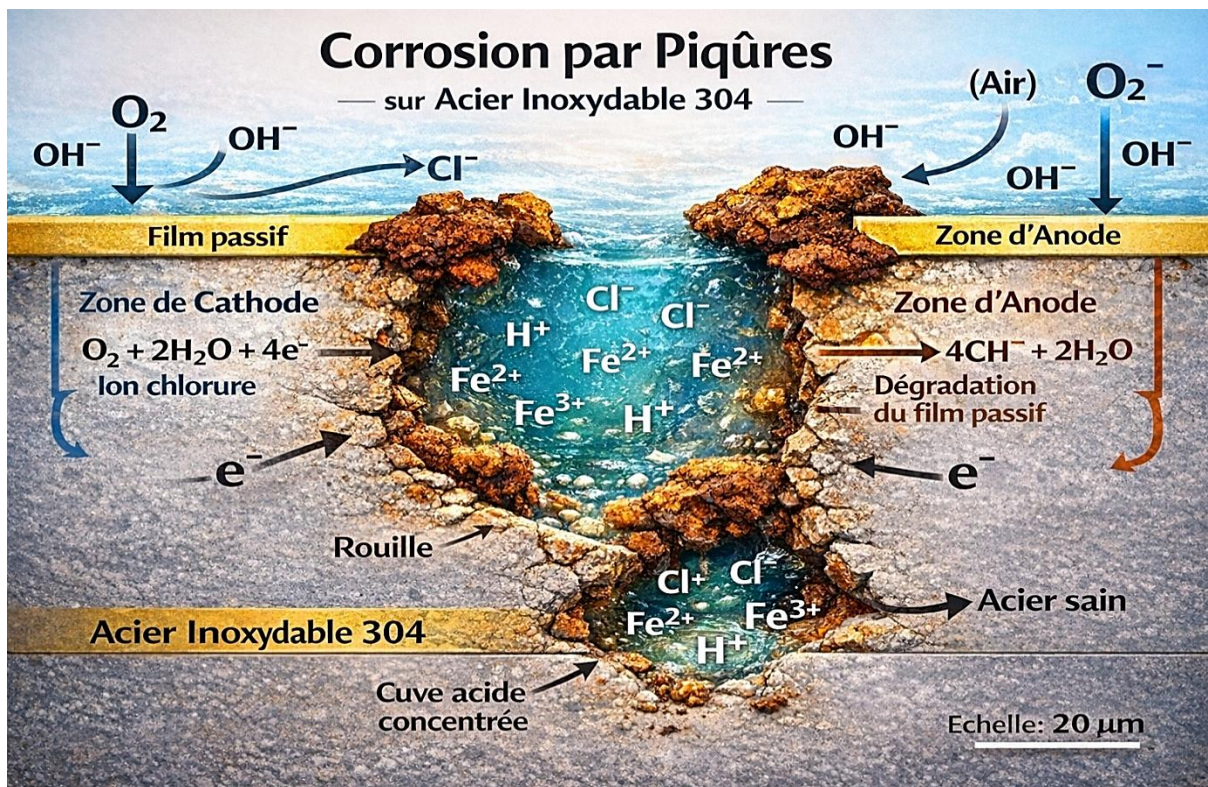


Figure I.3 : Schéma illustratif du mécanisme de corrosion par piqûres sur l'acier inoxydable 304.

I.1.2.3 Corrosion galvanique

Lorsque deux métaux de nature différente sont en contact en présence d'un électrolyte conducteur tel que l'eau salée, ils forment un couple électrochimique susceptible de provoquer une corrosion galvanique. Dans ce phénomène, le métal le moins noble devient l'anode et se corrode progressivement, tandis que le métal le plus noble joue le rôle de cathode et reste protégé de la corrosion.

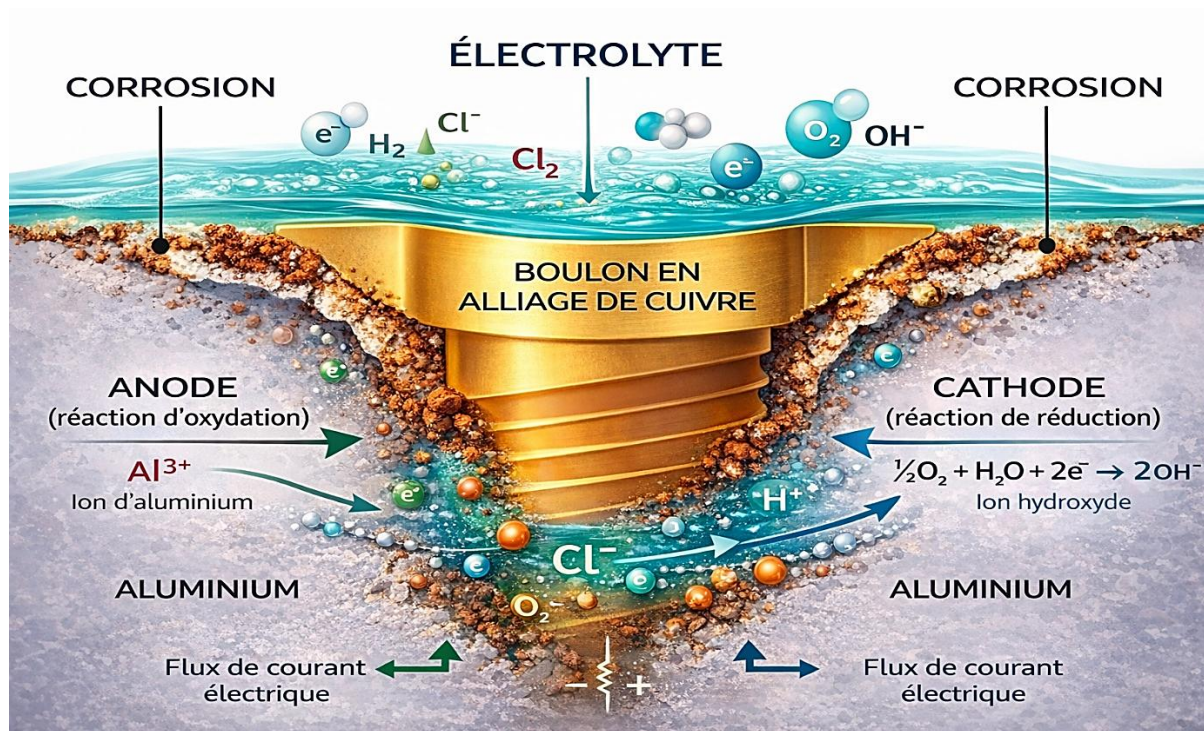


Figure I.4 : Corrosion galvanique.

La figure I.4 présente un cas typique de corrosion galvanique mettant en contact un boulon en alliage de cuivre avec deux éléments en aluminium, en présence d'un milieu électrolytique. Dans cette configuration, l'aluminium, plus actif électrochimiquement, se comporte comme l'anode et subit une dissolution préférentielle au voisinage du boulon. À l'inverse, l'alliage de cuivre, plus noble, constitue la cathode et participe principalement à la réaction de réduction sans être notablement altéré.

Le phénomène n'est possible qu'en raison de la continuité électrique entre les deux métaux et de la présence de l'électrolyte, qui permet la circulation des ions et la fermeture du circuit électrochimique. Il en résulte une attaque localisée de l'aluminium autour de la zone d'assemblage. Ce mode de dégradation est particulièrement critique dans les structures comportant des matériaux dissemblables, car il peut entraîner une perte rapide de matière sur le métal le moins noble et réduire la résistance mécanique de l'ensemble.

I.1.2.4 Corrosion par crevasse

La corrosion par crevasse est une forme de dégradation localisée qui se développe préférentiellement dans les zones géométriquement confinées d'une structure métallique, telles

que les interstices entre deux surfaces assemblées, les joints d'étanchéité, les zones de recouvrement ou les fissures. Dans ces espaces restreints, le renouvellement du milieu corrosif est fortement limité, ce qui favorise l'appauvrissement en oxygène et l'accumulation progressive d'ions agressifs, créant ainsi un microenvironnement particulièrement propice à l'attaque du métal. La figure I.5 illustre le mécanisme de la corrosion en crevasse. Dans une première phase, les ions chlorure (Cl^-) pénètrent dans la zone confinée et provoquent une déstabilisation locale de la couche passive protectrice recouvrant la surface métallique. La rupture de ce film passif amorce alors le processus corrosif à l'intérieur de la crevasse.

Par la suite, deux évolutions sont possibles. Dans le premier cas, le métal se repassive : la couche passive se reforme et la progression de la corrosion est stoppée. Dans le second cas, plus défavorable, la repassivation ne se produit pas et la dissolution du métal se poursuit, entraînant une corrosion du métal de base en profondeur.

Ce type de corrosion est particulièrement insidieux, car il se développe dans des zones peu accessibles à l'observation, ce qui rend sa détection difficile et peut favoriser une évolution rapide en l'absence de mesures préventives adaptées.



Figure I.5 : Corrosion par crevasse.

I.1.2.5 Corrosion intergranulaire

La corrosion intergranulaire est une forme d'attaque sélective qui se propage le long des joints de grains du métal, sans affecter le cœur des grains eux-mêmes. Elle résulte généralement de la ségrégation d'impuretés ou de la précipitation de phases secondaires aux interfaces granulaires, favorisée par la présence d'éléments chimiques agressifs tels que le chlore ou le soufre. La dissolution progressive de ces zones frontalières affaiblit considérablement la cohésion interne du matériau, pouvant conduire à une rupture prématurée même en l'absence de sollicitation mécanique importante.

La figure I.6 illustre ce phénomène à travers une micrographie obtenue par microscopie électronique à balayage (MEB), à un grossissement de 720 $\times$, avec une échelle de référence de 20 μm . On y observe un réseau sombre de fissures ou de sillons se développant préférentiellement le long des joints de grains, ce qui traduit une attaque intergranulaire du matériau. Les grains apparaissent relativement préservés dans leur cœur, tandis que leurs frontières sont nettement altérées. L'image met également en évidence une propagation de

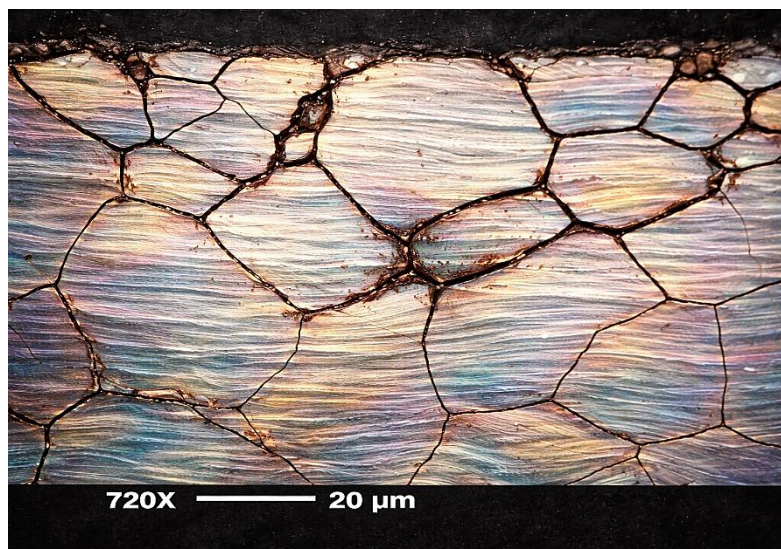


Figure I.6 : Corrosion intergranulaire.

I.1.2.6 Corrosion par érosion

La corrosion par érosion résulte de l'action combinée d'un milieu chimiquement agressif et d'un écoulement fluide à vitesse élevée. Le mouvement rapide du fluide arrache mécaniquement les couches protectrices formées en surface, exposant continuellement le métal nu à l'attaque corrosive et accélérant ainsi sa dégradation. Ce phénomène touche particulièrement les

équipements soumis à des flux intenses, tels que les canalisations, les vannes, les turbines et les pompes industrielles.

La figure I.7 illustre schématiquement deux régimes distincts de la corrosion-érosion à travers deux configurations (a) et (b).

Dans le schéma (a), correspondant à un régime dominé par l'érosion, des particules solides projetées à grande vitesse frappent la surface métallique et provoquent une dégradation essentiellement mécanique. Cette action engendre des cratères d'impact et des rainures de coupe, caractéristiques d'un enlèvement de matière localisé sous l'effet des chocs répétés et du cisaillement exercé par les particules. La perte de métal résulte ici principalement de l'action mécanique.

Dans le schéma (b), représentatif d'un régime dominé par la corrosion, la dégradation est principalement gouvernée par les réactions électrochimiques entre le milieu agressif et le métal. Le schéma met en évidence la présence d'une couche protectrice, dont l'altération ou la rupture favorise la perte de métal corrodé sous-jacent. Dans ce cas, l'action mécanique des particules subsiste, mais elle joue surtout un rôle d'initiation ou d'accélération en fragilisant la couche protectrice et en exposant le métal au milieu corrosif.

Cette comparaison met en évidence le caractère synergique de la corrosion-érosion : selon les conditions opératoires, l'érosion ou la corrosion peut prédominer, mais leur interaction accélère significativement la vitesse de dégradation du matériau.

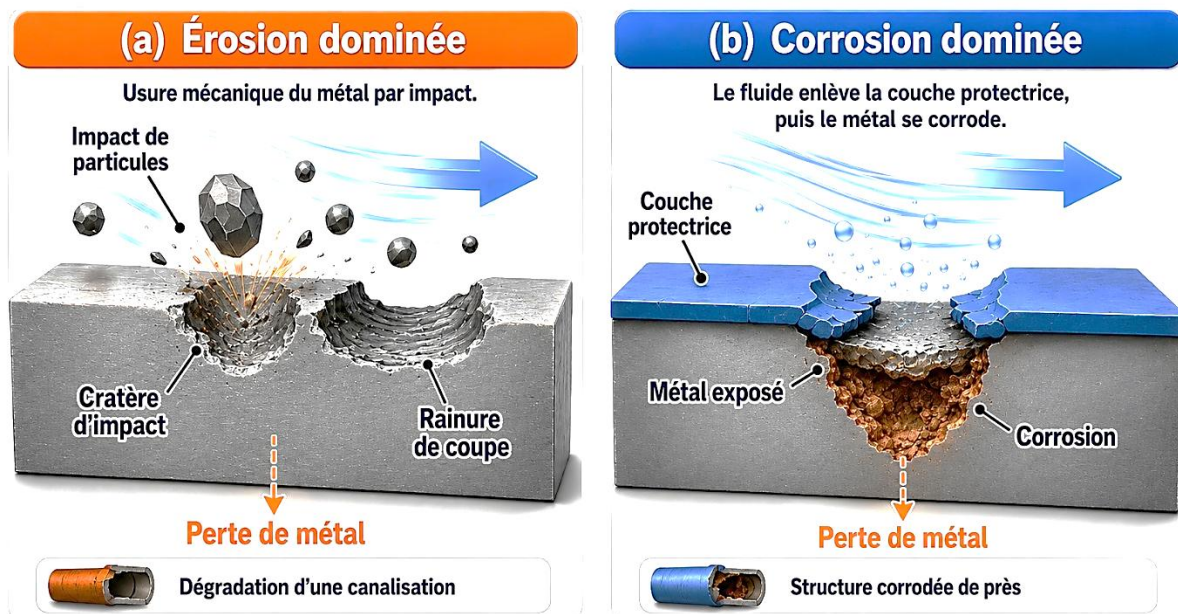


Figure I.7 : Corrosion par érosion.

I.1.2.7 Fissuration par corrosion sous contrainte

La fissuration par corrosion sous contrainte (FCS) est un mode de dégradation particulièrement dangereux qui résulte de l'action simultanée et synergique de trois facteurs : un matériau sensible, un milieu corrosif agressif et une contrainte mécanique appliquée ou résiduelle. Contrairement aux autres formes de corrosion, ce phénomène peut provoquer une rupture soudaine et catastrophique d'une pièce métallique apparemment en bon état, sans signe préalable de dégradation visible. Il est notamment favorisé par des températures élevées, une accumulation de chlorures dans le milieu environnant ou des sollicitations mécaniques de traction importantes.

La figure I.8 illustre ce phénomène à travers une coupe transversale en microscopie d'un crayon combustible nucléaire, avec une échelle de référence de 220 μm . Plusieurs éléments caractéristiques y sont annotés.

La gaine constitue l'enveloppe métallique entourant le combustible et subit, en service, d'importantes sollicitations thermiques, mécaniques et chimiques. Le combustible présente une fissure de contrainte thermique, indiquée comme un chemin préférentiel pour la migration des produits de fission. La figure met également en évidence une fissure de corrosion sous contrainte se développant dans la gaine, en relation avec l'état de contrainte imposé par l'interaction gaine-combustible.

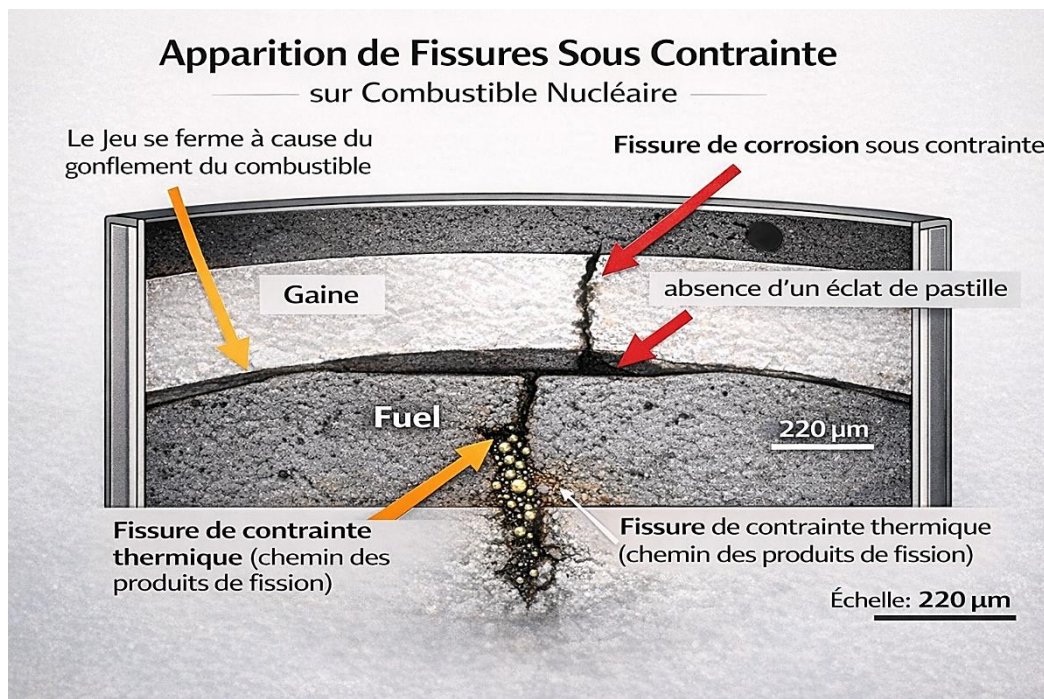


Figure I.8 : Fissuration par corrosion sous contrainte.

On observe en outre que le jeu entre la gaine et le combustible se referme sous l'effet du gonflement du combustible, ce qui accroît les contraintes locales exercées sur la gaine. L'annotation signalant l'absence d'un éclat de pastille suggère par ailleurs que la fissuration observée de la gaine n'est pas nécessairement associée à un détachement local visible d'un fragment de combustible à cet endroit.

Cette image met ainsi en évidence la complexité du mécanisme de fissuration par corrosion sous contrainte, résultant de l'interaction entre les sollicitations thermiques, mécaniques et chimiques, dans un contexte particulièrement sévère pour l'intégrité de la gaine.

I.1.3 Mécanismes électrochimique de la corrosion

La corrosion électrochimique se déclenche en milieu aqueux dès lors qu'une différence de potentiel s'établit entre deux zones distinctes de la surface métallique en contact avec un électrolyte. Ce déséquilibre électrique génère un circuit galvanique spontané au sein duquel deux réactions complémentaires se déroulent simultanément [6] :

- **A l'anode (site anodique)** : le métal subit une oxydation et se dissout dans l'électrolyte sous forme d'ions métalliques chargés positivement, libérant ainsi des électrons :



- **A la cathode (site cathodique)** : les électrons libérés par l'anode sont consommés par des réactions de réduction faisant intervenir les espèces présentes dans l'électrolyte, principalement les cations hydrogène et les molécules d'oxygène dissous :



La figure I.9 illustre schématiquement le mécanisme électrochimique de la corrosion et met en évidence les deux voies de transport de charges assurant le fonctionnement de la pile corrosive.

La conduction électronique s'effectue dans le métal : les électrons (e^{-}) produits au site anodique, où se produit la dissolution du métal, migrent à travers le matériau vers le site cathodique. Ce flux électronique est représenté sur le schéma par la flèche supérieure associée au flux de courant.

La conduction ionique s'effectue dans l'électrolyte : les espèces ioniques présentes dans le milieu assurent le transport des charges entre les zones anodique et cathodique, fermant ainsi le

circuit électrochimique. Les espèces réactives indiquées sur la figure, telles que O_2 , H^+ , H_2 , H_2O et OH^- , participent aux réactions d'interface selon la nature du milieu.

Au niveau du site anodique, le métal s'oxyde et libère des ions métalliques M^{n+} dans l'électrolyte, ce qui se traduit par une perte progressive de matière. Au site cathodique, des réactions de réduction consomment les électrons transférés à travers le métal.

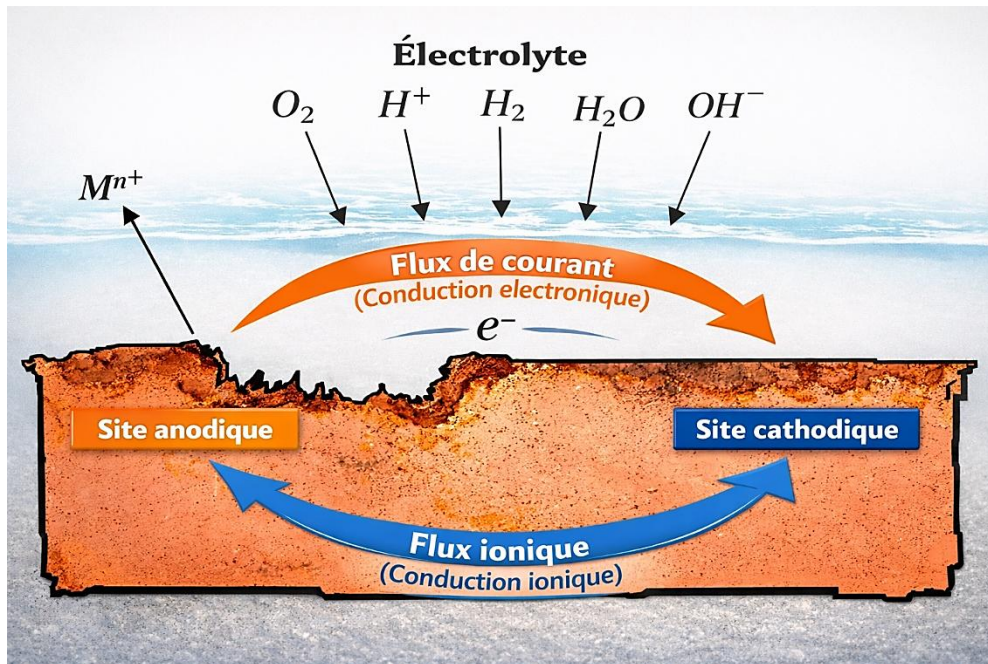


Figure I.9 : Schéma de la corrosion électrochimique.

I.2 Méthode de Prévention de la corrosion

Face à l'ampleur des dégâts causés par la corrosion sur les structures et équipements métalliques, le développement de stratégies de protection efficaces s'avère indispensable. Plusieurs approches ont été mises au point au fil des années, allant du traitement de surface à la modification du milieu corrosif. Comme le montre la figure I.10, les principales méthodes de prévention de la corrosion s'articulent autour de cinq techniques complémentaires [6].

La **peinture** constitue une barrière physique entre le métal et son environnement. En formant un revêtement protecteur à la surface, elle limite l'accès de l'eau et de l'oxygène au métal et freine ainsi l'initiation des réactions corrosives.

La **galvanisation** consiste à recouvrir le métal d'une couche de zinc formant une protection contre la corrosion. Ce revêtement joue un rôle de barrière protectrice et, dans le cas de l'acier, le zinc peut également contribuer à une protection sacrificielle.

La **protection cathodique** repose sur le principe consistant à rendre la structure métallique cathodique au sein d'un système électrochimique, de façon à limiter sa dissolution. Elle est illustrée ici par l'utilisation d'une **anode sacrificielle** en zinc ou en magnésium, qui se corrode préférentiellement à la place du métal à protéger.

L'**électroplacage** consiste à déposer, par courant électrique, une couche de métal protecteur sur la surface d'un matériau. Dans l'exemple présenté, un dépôt d'argent est réalisé sur une pièce métallique immergée dans une solution adaptée, améliorant à la fois la résistance à la corrosion et l'aspect de surface.

L'**anodisation**, appliquée principalement à l'aluminium, est un procédé électrochimique conduisant à la formation d'une couche d'oxyde protectrice à la surface du métal. Cette couche améliore sa résistance vis-à-vis des agressions du milieu extérieur.

L'ensemble de ces méthodes montre que la prévention de la corrosion repose soit sur l'isolement du métal vis-à-vis de l'environnement, soit sur une modification contrôlée de son comportement électrochimique.



Figure I.10 : Méthodes de prévention de la corrosion.

Dans le cadre de cette étude, trois de ces approches ont été sélectionnées pour leur pertinence scientifique, économique et environnementale : les revêtements protecteurs (peinture), la

protection cathodique et les inhibiteurs de corrosion verts. Ces trois méthodes couvrent ensemble un spectre de protection complet, alliant protection physique, électrochimique et chimique, répondant aux enjeux industriels et environnementaux actuels.

I.2.1 Les revêtements protecteurs

Les revêtements anticorrosion constituent l'une des solutions les plus répandues et les plus accessibles pour préserver l'intégrité des structures métalliques. Leur principe repose sur la création d'une barrière physique entre le métal et son environnement agressif, empêchant ainsi tout contact direct avec l'humidité, l'oxygène, les agents chimiques ou les contaminants extérieurs [7]. Ces systèmes présentent plusieurs avantages pratiques : ils sont généralement peu coûteux, faciles à appliquer et adaptables à une grande variété de supports et de conditions d'utilisation. Leur application contribue à prolonger la durée de vie des équipements, à réduire les risques de fuites et à maintenir l'intégrité structurelle des infrastructures [8]. Cependant, leur efficacité reste conditionnée à l'intégrité du film déposé : tout défaut, fissure ou zone de délaminage peut constituer un point d'amorçage de la corrosion, parfois plus actif que sur un métal non revêtu. C'est pourquoi leur entretien régulier est indispensable pour garantir une protection durable [9].



Figure I.11 : Application d'un revêtement protecteur.

La figure associée illustre l'application industrielle d'un revêtement protecteur par projection sur une canalisation métallique de grande dimension. La canalisation, de géométrie cylindrique,

constitue le substrat à recouvrir. Un opérateur équipé d'une combinaison de protection intégrale et d'un masque respiratoire applique le produit au moyen d'un pistolet de pulvérisation. Le jet projeté, visible sous forme d'un nuage de fines gouttelettes, met en évidence une technique permettant de répartir le revêtement de manière homogène sur la surface extérieure. La coloration jaune déjà présente sur la canalisation témoigne de l'avancement de l'application et suggère la formation progressive d'une couche protectrice continue destinée à isoler le métal du milieu extérieur.

1.2.2 La protection cathodique

La protection cathodique (PC) est une technique électrochimique qui s'appuie sur un principe fondamental : en abaissant suffisamment le potentiel électrochimique d'un métal jusqu'à une valeur d'immunité, il est possible de bloquer les réactions d'oxydation responsables de sa dégradation [10].

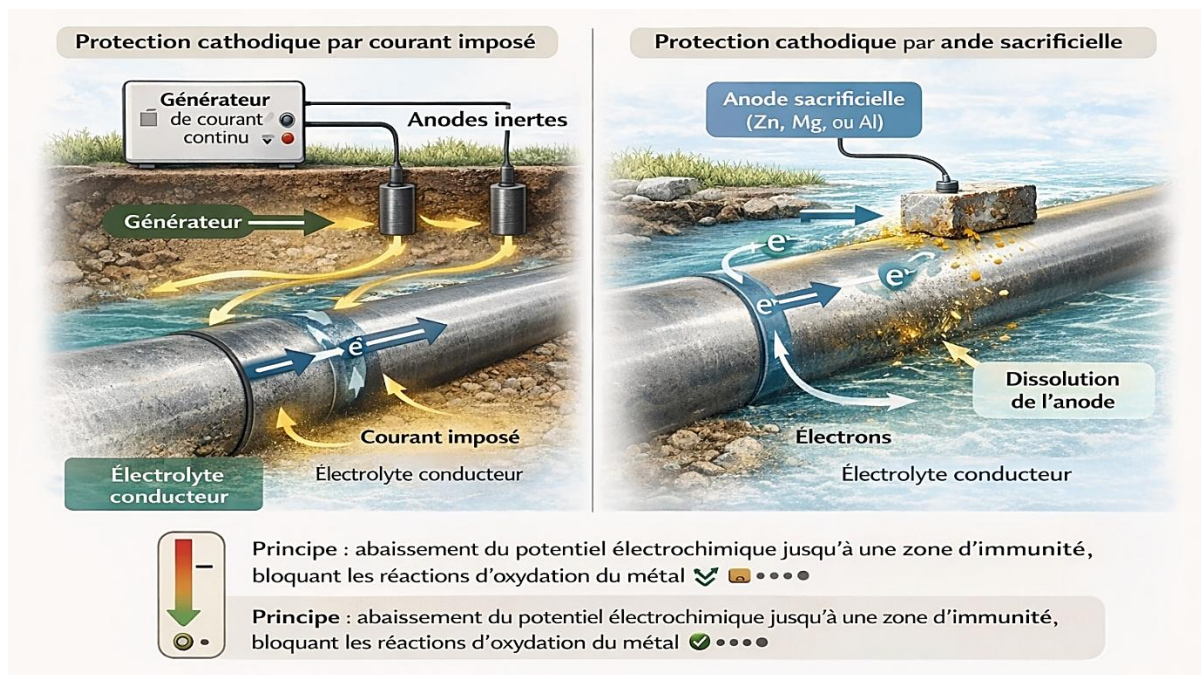


Figure I.12 : La protection cathodique.

Cette méthode bénéficie de plus d'un siècle d'application industrielle et s'est imposée comme une référence internationale en matière de protection anticorrosion. Elle est particulièrement adaptée aux structures en contact avec des milieux fortement conducteurs, tels que les sols, les eaux marines ou les environnements en béton armé. On distingue deux variantes principales [11,12] :

- La protection cathodique par courant imposé : un générateur externe fournit un courant continu qui polarise cathodiquement la structure à protéger.
- La protection cathodique par anode sacrificielle : repose sur un couplage galvanique naturel entre le métal à protéger et un métal plus actif.

I.2.3 Les inhibiteurs de corrosion

Les inhibiteurs de corrosion constituent une approche chimique complémentaire aux méthodes de protection physique et électrochimique. Introduite en faibles quantités dans le milieu agressif, ils permettent de réduire, voire bloquer, les réactions électrochimiques responsables de la dégradation du métal, sans altérer significativement la nature du milieu traité [13-15].

D'un point de vue moléculaire, ces molécules se caractérisent par la présence de cycles aromatiques ou hétérocycliques, ainsi que de groupements fonctionnels riches en hétéroatomes tels que l'azote (N), l'oxygène (O), le soufre (S) et le phosphore (P). Ces atomes, porteurs de doublets électroniques libres, jouent un rôle central dans le mécanisme d'adsorption à la surface métallique, conduisant à la formation de films protecteurs qui isolent efficacement le métal de son environnement corrosif [16].

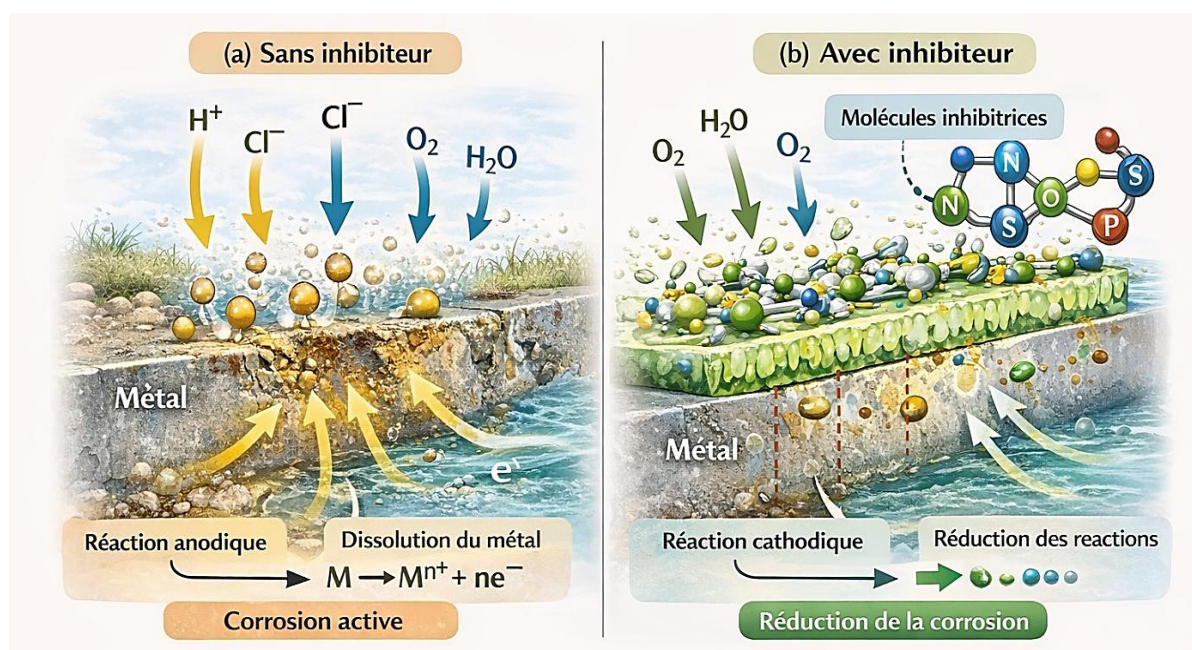


Figure I.13 : Les inhibiteurs de corrosion.

Grâce à leurs efficacités, leur facilité d'application et leur rentabilité économique, les inhibiteurs de corrosion sont aujourd'hui largement utilisés dans divers secteurs industriels, permettant de

réduire les taux de corrosion, de préserver les surfaces métalliques et de prolonger la durée de vie des installations de production [17].

I.2.4 Les inhibiteurs de corrosion verts

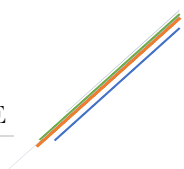
I.2.4.1 Définition

Face aux risques toxicologiques et environnementaux associés aux inhibiteurs conventionnels de synthèse, les inhibiteurs de corrosion verts apparaissent comme une alternative plus écologique et durable. Selon la définition normative de l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), un inhibiteur de corrosion désigne toute substance chimique qui, introduite à faible concentration dans un milieu corrosif, ralentit les processus de dégradation sans modifier sensiblement la composition de ce milieu [18,19].

Selon leur origine chimique, les inhibiteurs de corrosion se répartissent en trois familles : les composés organiques, les composés inorganiques et les inhibiteurs dits verts, issus de sources naturelles ou biosourcées [10]. Parmi ces derniers, les extraits végétaux occupent une position de premier plan grâce à leurs caractéristiques intrinsèquement favorables : absence de toxicité, dégradabilité naturelle, faible coût de production et accessibilité des matières premières issues de ressources renouvelables [17,18].



Figure I.14 : Origine biosourcée et principales caractéristiques des inhibiteurs verts.



I.2.4.2 Mécanisme d'action

L'interaction entre les molécules inhibitrices et la surface métallique peut se produire selon trois mécanismes distincts [19] :

a) Adsorption physique

Ce mécanisme repose sur l'établissement de liaisons faibles de type van der Waals entre les molécules inhibitrices et la surface du métal. En raison de la faible énergie mise en jeu, ce processus est réversible, peu exothermique et cinétiquement lent. Le film formé à l'interface métal-solution présente une stabilité structurelle limitée. Néanmoins, dans le cas des inhibiteurs organiques, l'adsorption physique constitue l'étape initiatrice indispensable qui précède et conditionne l'adsorption chimique [20].

b) Chimisorption

La chimisorption implique la formation de liaisons covalentes de coordination entre les hétéroatomes des molécules inhibitrices (N, O, S, P) et les orbitales vacantes des atomes métalliques en surface. Ces interactions, plus énergétiques et plus stables que celles de l'adsorption physique, confèrent au film adsorbé une résistance et une durabilité remarquables. Les électrons cédés par les hétéroatomes exercent une double fonction protectrice : ils interagissent avec les ions oxygène en solution et exercent une répulsion électrostatique vis-à-vis des cations agressifs, limitant leur accès à la surface. Ce mécanisme constitue l'étape déterminante dans l'efficacité inhibitrice globale [19,21].

c) Adsorption filmogène

Selon la nature du film protecteur formé, on distingue trois sous-types [22] :

- Inhibiteurs à film d'oxyde : oxydent localement la surface métallique au contact des molécules actives, formant une couche passivante imperméable.
- Inhibiteurs à film d'adsorption : se fixent directement à la surface et modifient ses propriétés de surface pour inhiber les réactions corrosives.
- Inhibiteurs à film de précipitation : forment, par complexation avec les ions métalliques dissous, un précipité insoluble qui se dépose sur la surface et la protège mécaniquement.

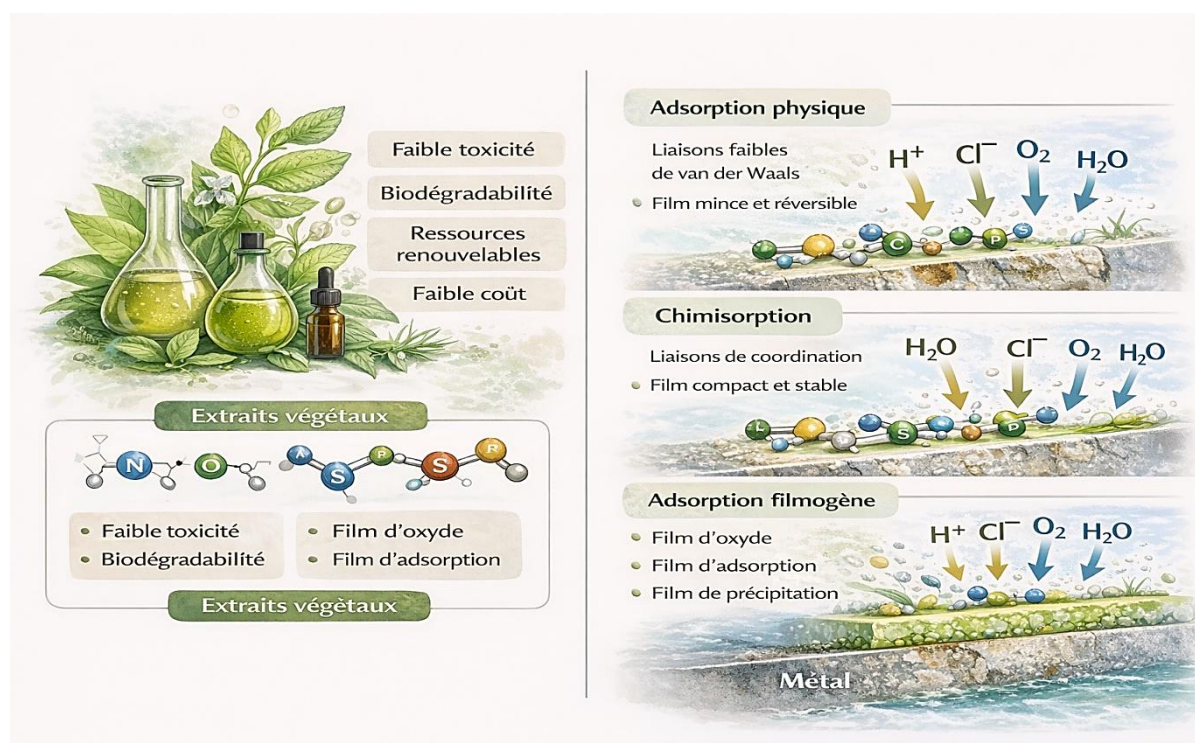


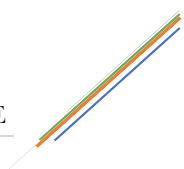
Figure I.15 : Principaux mécanismes d'action des inhibiteurs de corrosion verts à la surface métallique.

I.2.5 Extraits végétaux comme inhibiteurs de corrosion

I.2.5.1 Généralités et intérêt des extraits végétaux

Parmi les inhibiteurs verts, les extraits d'origine végétale occupent une place importante dans la recherche anticorrosion. Obtenus à partir de différentes parties des plantes, telles que les feuilles, les écorces, les racines, les graines, les fruits ou les fleurs, ils renferment de nombreux composés phytochimiques bioactifs capables de s'adsorber sur les surfaces métalliques. Leur intérêt réside dans leur biodégradabilité, leur faible toxicité, leur coût généralement réduit, la disponibilité des ressources naturelles et leur conformité aux principes de la chimie verte [23].

D'un point de vue phytochimique, les familles de molécules les plus impliquées dans les mécanismes d'inhibition comprennent les polyphénols, les flavonoïdes, les tanins, les alcaloïdes, les terpènes et leurs dérivés oxygénés, ainsi que diverses classes de composés hétérocycliques. Ces molécules se caractérisent par la présence d'hétéroatomes (N, O, S), de systèmes π conjugués et de groupements fonctionnels capables d'interagir fortement avec la surface métallique [24].



I.2.5.2 Composition phytochimique et rôle des principes actifs

La richesse des extraits végétaux réside dans la diversité et la complémentarité de leurs constituants. Plusieurs catégories de composés actifs ont été identifiées comme particulièrement efficaces dans la protection des métaux.

a) Les polyphénols et flavonoïdes

Les polyphénols constituent l'une des familles les plus étudiées en inhibition de corrosion. Leur structure aromatique conjuguée et leurs multiples groupements hydroxyle -OH leur confèrent une forte capacité de coordination avec les ions ferreux ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$) à la surface du métal, facilitant la formation de complexes chélatés stables qui réduisent l'accès des espèces agressives au substrat métallique. Les flavonoïdes, sous-groupe des polyphénols, agissent selon un mécanisme analogue : leurs cycles aromatiques condensés offrent une grande surface de contact avec le métal, permettant une adsorption planaire efficace qui maximise le recouvrement de la surface [25,26].

b) Les tanins

Les tanins, par leur nature macromoléculaire et leur richesse en groupements phénoliques, présentent une affinité remarquable pour les surfaces oxydées. Ils sont capables de précipiter les ions métalliques dissous et de former une couche protectrice peu perméable, agissant simultanément comme inhibiteurs de type filmogène et passivant [27].

c) Les alcaloïdes

Les alcaloïdes sont des composés azotés hétérocycliques dont les atomes d'azote, porteurs de doublets libres, établissent des liaisons de coordination directes avec les atomes métalliques de surface. Leur géométrie moléculaire planaire favorise une orientation parallèle à la surface qui maximise l'interaction électronique avec les orbitales d de la surface métallique [28].

d) Les terpènes et leurs dérivés

Les terpènes et terpénoïdes constituent une importante famille de composés naturels utilisés comme inhibiteurs verts de corrosion, leurs groupes fonctionnels oxygénés (alcools, cétones, aldéhydes, esters) et leurs doubles liaisons favorisant une adsorption efficace sur les surfaces métalliques et la formation de films barrières protecteurs, souvent en synergie avec d'autres constituants des extraits végétaux, ce qui améliore significativement l'efficacité inhibitrice, comme le montrent des études récentes sur des huiles essentielles riches en monoterpènes et sesquiterpènes appliquées à l'acier doux et au cuivre en milieu acide [29–31].



Figure I.16 : Composition phytochimique des extraits végétaux et rôle des principaux principes actifs dans l'inhibition de la corrosion.

I.2.5.3 Adsorption des extraits végétaux sur la surface métallique

L'interaction entre les molécules phytochimiques et la surface du métal repose principalement sur un processus d'adsorption dont la nature — physique, chimique ou mixte — est déterminante pour l'efficacité et la durabilité de la protection.

La plupart des études expérimentales récentes montrent que l'adsorption des extraits végétaux sur les surfaces métalliques suit l'isotherme de Langmuir, ce qui traduit la formation d'une monocouche protectrice homogène à la surface, avec des sites d'adsorption équivalents et indépendants. Ce comportement implique qu'au-delà d'une certaine concentration en inhibiteur, la surface est totalement recouverte et l'efficacité inhibitrice atteint son maximum [23,32-35].

Les paramètres thermodynamiques dérivés de l'isotherme de Langmuir (via la loi de Van't Hoff) déterminent précisément la nature de l'adsorption des extraits végétaux : des valeurs ΔG_{ads}^0 supérieures à -20 kJ/mol (typiquement -10 à -20 kJ/mol) indiquent une physisorption électrostatique réversible par forces de Van der Waals ; entre -20 et -40 kJ/mol, une adsorption mixte combine physisorption et chimisorption faible (coordination hétéroatomes-métal) ; enfin, des valeurs inférieures à -40 kJ/mol révèlent une chimisorption dominante via liaisons

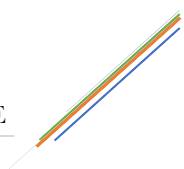
covalentes fortes et transfert de charge entre les fonctions N,O et S des phytochimiques et les orbitales d du métal [36-38].

Les mesures électrochimiques, notamment la polarisation potentiodynamique, permettent de déterminer le type d'inhibiteur : anodique (bloque la dissolution métallique) ; cathodique (bloque la réduction d'hydrogène ou d'oxygène) ; mixte (action équilibrée sur les deux branches). La majorité des extraits végétaux se comportent comme inhibiteurs mixtes, réduisant simultanément la dissolution anodique du métal ($Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2 e^{-}$) et les réactions cathodiques de réduction des protons ($2 H^{+} + 2 e^{-} \rightarrow H_2$) [28,39].

I.2.5.4 Synthèse des études récentes

Les travaux publiés ces dernières années attestent du dynamisme de ce domaine de recherche et de la diversité des systèmes étudiés. Le tableau ci-dessous présente une synthèse représentative illustrant la large gamme de substrats métalliques, de milieux corrosifs et d'efficacités obtenues.

Extrait végétal	Métal/Alliage	Milieu	Efficacité (%)	Référence
Chamaerops humilis (déchets de fruits)	Acier au carbone	HCl 1 M	93	[18]
Dimocarpus longan (feuilles)	Cuivre	H ₂ SO ₄	98	[23]
Musanga cecropioides (feuilles)	Acier doux	Eau de mer	95,1	[24]
Carthamus tinctorius (Safflower)	Acier au carbone	HCl 0,5 M	89,6	[29]
Cuminum cyminum L. (huile essentielle)	Acier doux	HCl 0,5 M	98,76	[30]
Aloysia triphylla (feuilles)	Acier API 5L X42	HCl 0,5 M	94	[40]
Urtica dioica L.	Acier X38	H ₂ SO ₄ 0,5 M	90	[41]
	Acier doux	HCl 0,5 M	97	[42]
Bidens aurea	Acier X42	HCl 0,5 M	94	[43]
Cistus monspeliensis L. (feuilles)	Acier doux	HCl 1 M	88	[44]
Cistus monspeliensis L. (fleurs)			81	
Cistus monspeliensis L. (tiges)			70	
Spermacoe hispida (feuilles)	Acier doux	HCl 2 M	87,99	[45]
Trifolium repens	Acier au carbone	NaCl 3,5%	98	[46]



Ces résultats confirment que les extraits végétaux peuvent atteindre des efficacités inhibitrices très élevées, comparables, voire supérieures, à celles des inhibiteurs de synthèse, tout en présentant des avantages environnementaux et économiques indéniables.

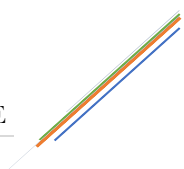
Il convient enfin de souligner que la performance d'un extrait végétal est étroitement conditionnée par plusieurs paramètres : l'origine botanique et géographique de la plante, les conditions de culture, la partie végétale utilisée, le solvant d'extraction (eau, éthanol, méthanol, hexane, etc.) et la méthode d'extraction employée. Ces facteurs influencent directement la composition phytochimique de l'extrait et, par conséquent, ses propriétés inhibitrices. C'est pourquoi la caractérisation chimique approfondie des extraits (par GC-MS, HPLC ou RMN) est une étape préalable indispensable à toute étude rigoureuse de leurs propriétés anticorrosion.

I.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts fondamentaux liés à la corrosion des matériaux métalliques, en mettant en évidence la diversité de ses formes et la complexité des mécanismes électrochimiques qui la régissent. Il apparaît que la corrosion résulte d'interactions multiples entre le matériau, le milieu environnant et les conditions de service, ce qui impose une approche globale pour limiter ses effets.

Les différentes méthodes de protection examinées, qu'elles soient physiques, électrochimiques ou chimiques, offrent des réponses complémentaires à cette problématique. Parmi elles, l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion issus de ressources naturelles se distingue par sa capacité à concilier efficacité, coût maîtrisé et exigences environnementales. Les extraits végétaux et leurs principaux constituants ont montré un fort potentiel pour réduire les vitesses de corrosion dans divers systèmes métalliques et milieux agressifs.

Les éléments bibliographiques réunis dans ce chapitre constituent ainsi le cadre théorique sur lequel s'appuiera la suite de ce travail. Ils guideront la sélection des extraits étudiés, l'interprétation des résultats électrochimiques et la discussion des mécanismes d'adsorption mis en jeu dans la protection des métaux par des inhibiteurs verts.



I.4 Références Bibliographiques

- [1] Schweitzer, P.A., Fundamentals of Corrosion: Mechanisms, Causes, and Preventative Methods. CRC Press, Boca Raton (2010).
- [2] El Ibrahim, B., Guo, L., Azole-based compounds as corrosion inhibitors for metallic materials. In: Kuznetsov, A. (Ed.), Azoles – Synthesis, Properties, Applications and Perspectives. IntechOpen, London (2020).
- [3] Marinescu, M., Recent advances in the use of benzimidazoles as corrosion inhibitors. BMC Chem. 13 (2019) 136.
- [4] Ibrahim, B. E., Nardeli, J. V., Guo, L. An overview of corrosion. In ACS symposium series (2021) 1–19. <https://doi.org/10.1021/bk-2021-1403.ch001>.
- [5] Verma, C., Ebenso, E. E., & Quraishi, M. Corrosion inhibitors for ferrous and non-ferrous metals and alloys in ionic sodium chloride solutions: A review. Journal of Molecular Liquids 248 (2017) 927–942. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.10.094>.
- [6] Bijapur, K., Molahalli, V., Shetty, A., Toghan, A., De Padova, P., Hegde, G., Recent trends and progress in corrosion inhibitors and electrochemical evaluation. Applied Science 13(18) (2023) 10107. <https://doi.org/10.3390/app131810107>.
- [7] Wang, Y.F., Chen, L., On the mechanism of action and application development of corrosion inhibitors. Techno-Economic Guide 28(1) (2020) 128–129.
- [8] Tamura, H., The role of rusts in corrosion and corrosion protection of iron and steel. Corrosion Science 50(7) (2008) 1872–1883. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.03.008>.
- [9] Mohammed, N. J., Yusop, M. R., Othman, N. K. Green and nano-based strategies for controlling mild steel corrosion in acidic media: a systematic review. Npj Materials Degradation, 10(1) (2026) 16. <https://doi.org/10.1038/s41529-025-00726-z>
- [10] Guo, Z., Xiao, Z., Chen, H., Zhou, X., Wang, P., Luo, J., Gao, Y., Shang, H., Review of cathodic protection technology for steel rebars in concrete structures in marine environments. Applied Science 14(19) (2024) 9062. <https://doi.org/10.3390/app14199062>.
- [11] Li, M., Liu, F., Mou, F., Guo, Z., Wang, W., Zeng, Y., Sim, L. B., Chen, B. Corrosion inhibitor for mild steel in mixed HCL and H2SO4 medium: A study of 1,10-

- Phenanthroline derivatives. ACS Omega, 10(23) (2025) 24628–24641. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c01412>.
- [12] Hou, J., Zhang, Q., Corrosion behavior of high potential Mg–Mn sacrificial anode. Special Casting & Nonferrous Alloys 11(1) (2012) 126–131.
- [13] Pardo, A., Merino, M.C., Coy, A.E., Viejo, F., Arrabal, R., Feliu, S. Jr., Influence of microstructure and composition on the corrosion behaviour of Mg/Al alloys in chloride media. Electrochimica Acta 53(27) (2008) 7890–7902.
- [14] Sastri, V.S., Green Corrosion Inhibitors: Theory and Practice. Wiley, Hoboken (2011).
- [15] Sastri, V.S., Corrosion Inhibitors: Principles and Applications. Wiley, New York (1998).
- [16] Km, S., Praveen, B., Devendra, B.K., A review on corrosion inhibitors: Types, mechanisms, electrochemical analysis, corrosion rate and efficiency of corrosion inhibitors on mild steel in an acidic environment. Results in Surface and Interfaces 16 (2024) 100258. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100258>.
- [17] Barboza, G.K.P., de Oliveira, M.C.C., Neves, M.A., Echevarria, A., Justicia brandegeana as a green corrosion inhibitor for carbon steel in sulfuric acid. Green Chemistry Letters and Reviews 17(1) (2024). <https://doi.org/10.1080/17518253.2024.2320254>.
- [18] Eddahhaoui, F., Najem, A., Elhawary, M., Boudalia, M., Campos, O.S., Tabyaoui, M., Garcia, A.J., Bellaouchou, A., Amin, H.M., Experimental and computational aspects of green corrosion inhibition for low carbon steel in HCl environment using extract of *Chamaerops humilis* fruit waste. Journal of Alloys and Compounds 977 (2023) 173307. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.173307>.
- [19] Wang, Q., Wang, R., Zhang, Q., Zhao, C., Zhou, X., Zheng, H., Zhang, R., Sun, Y., Yan, Z., Application of biomass corrosion inhibitors in metal corrosion control: A review. Molecules 28(6) (2023) 2832. <https://doi.org/10.3390/molecules28062832>.
- [20] Akinbulumo, O.A., Odejebi, O.J., Odekanle, E.L., Thermodynamics and adsorption study of the corrosion inhibition of mild steel by *Euphorbia heterophylla* L. extract in 1.5 M HCl. Results in Materials 5 (2020) 100074. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2020.100074>.
- [21] Wei, H., Heidarsheenas, B., Zhou, L., Hussain, G., Li, Q., Ostrikov, K., Green inhibitors for steel corrosion in acidic environment: State of the art. Materials Today Sustainability 10 (2020) 100044.

- [22] Lin, B., Tang, J., Wang, Y., Wang, H., Zuo, Y., Study on synergistic corrosion inhibition effect between calcium lignosulfonate (CLS) and inorganic inhibitors on Q235 carbon steel in alkaline environment with Cl^- . *Molecules* 25(18) (2020) 4200. <https://doi.org/10.3390/molecules25184200>.
- [23] Holla, B.R., Mahesh, R., Manjunath, H.R., Anjanapura, V.R., Plant extracts as green corrosion inhibitors for different kinds of steel: A review. *Heliyon* 10(14) (2024) e33748. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33748>.
- [24] Okuma, S., Eco-friendly corrosion inhibition of mild steel in marine environments using *Musanga cecropioides* leaf extract: Gravimetric, adsorption isotherm, and RSM optimization studies. *Jordanian Journal of Engineering and Chemical Industries (JJECI)* (2025) 201–213. <https://doi.org/10.48103/jjeci8182025>.
- [25] Gabsi, M., Ferkous, H., Delimi, A., Boublia, A., Boulechfar, C., Kahlouche, A., Darwish, A.S., Lemaoui, T., Benguerba, Y., The curious case of polyphenols as green corrosion inhibitors: A review on their extraction, design, and applications. *Environmental Science and Pollution Research* 30(21) (2023) 59081–59105. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26753-4>.
- [26] Furtado, L. B., Da Silva, R. C. G., De Oliveira, W. F., Guimarães, M. J. O., Leoni, G. B., Chrisman, E. C. a. N., De Carvalho, L. J., Brasil, S. L. D. C., & Da Cunha Ponciano Gomes, J. A. (2025). Phenolic compounds as eco-friendly corrosion inhibitor obtained by optimized extraction from residual broccoli leaves. *Results in Chemistry*, 17, 102562. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102562>.
- [27] Cao, L., *Dimocarpus longan* Lour. leaf extract as a green corrosion inhibitor for copper in sulfuric acid solution. *International Journal of Electrochemical Science* 17 (2022) 220743. <https://doi.org/10.20964/2022.07.43>
- [28] Solanki, A.S., Sharma, A., Sharma, S., Thakur, A., Sharma, S.K., Mechanistic investigation of mild steel corrosion inhibition by *Codiaeum variegatum* extract: Weight loss, EIS, and DFT perspectives. *RSC Advances* 15(30) (2025) 24202–24222. <https://doi.org/10.1039/d5ra03125g>.
- [29] Yousif, Q.A., Malhotra, S.S., Bedair, M.A., Ansari, A., Hadi, A.K., Safflower plant extract as a sustainable corrosion inhibitor for carbon steel in acidic media: a combined electrochemical and computational study. *RSC Advances* 15(26) (2025) 21006–21025. <https://doi.org/10.1039/d5ra03333k>.

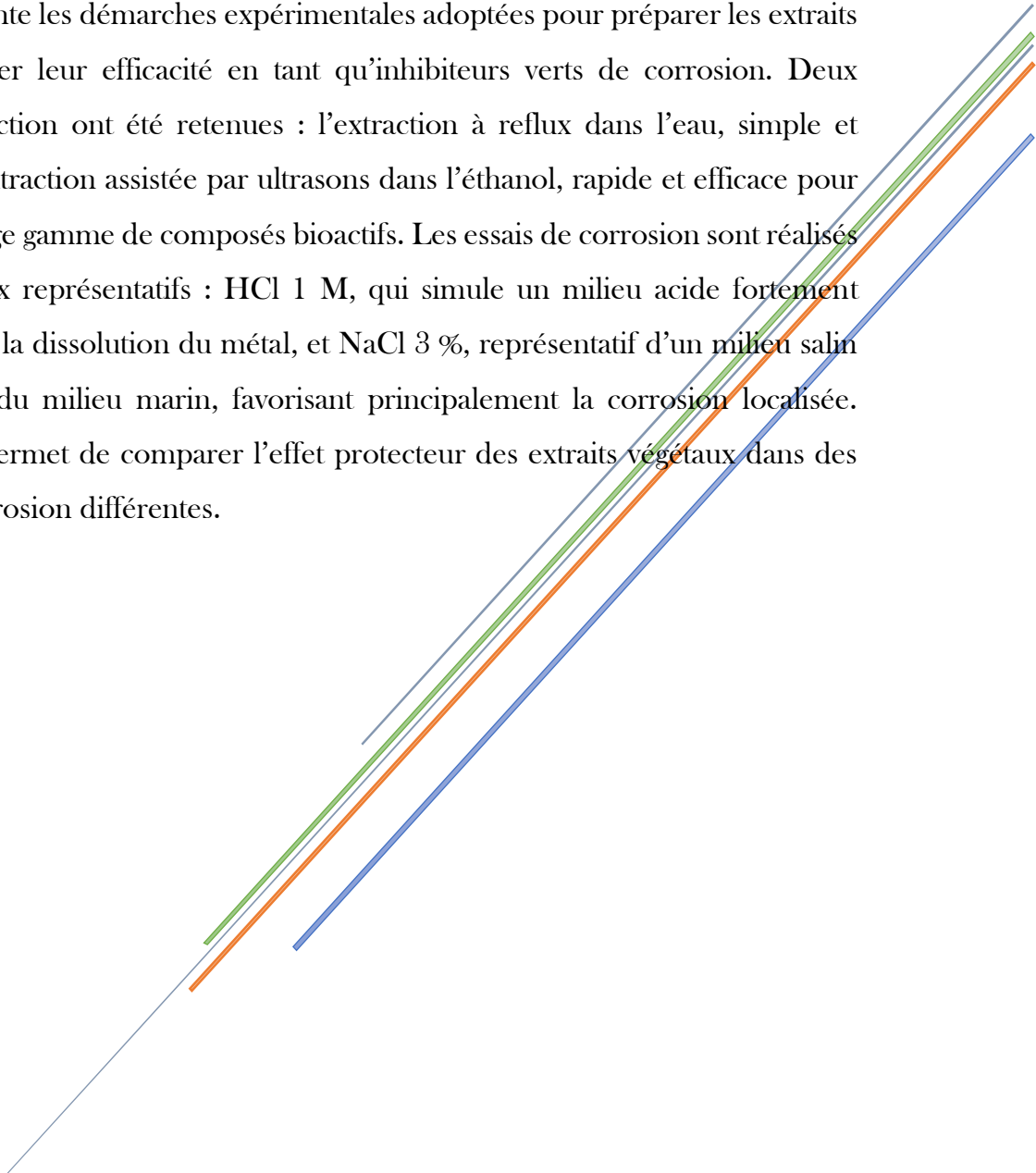
- [30] Rizi, A., Sedik, A., Acidi, A., Rachedi, K.O., Ferkous, H., Berredjem, M., Delimi, A., Abdenouni, A., Alam, M., Ernst, B., Benguerba, Y., Sustainable and green corrosion inhibition of mild steel: Insights from electrochemical and computational approaches. *ACS Omega* 8(49) (2023) 47224–47238. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c06548>.
- [31] Samal, P.P., Singh, C.P., Krishnamurty, S., Expounding lemonal terpenoids as corrosion inhibitors for copper using DFT-based calculations. *Applied Surface Science* 614 (2022) 156066. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.156066>.
- [32] Hidalgo, J., Hidalgo, L., Aguiar, C.D.S., Madroñero, D.B.G., Galambos, I., Vilasó-Cadre, J.E., Reyes-Domínguez, I.A., Brânzanic, A.M.V., Ignat, N., Turdean, G.L., Study of *Caesalpinia spinosa* extracts as green corrosion inhibitor for mild steel. *Langmuir* 41(14) (2025) 9406–9421. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5c00224>.
- [33] Rajkumar, R., Kavitha, C., Pringlin, S., Adsorption isotherm, thermodynamic and electrochemical studies of *Lawsonia inermis* leaf extract as a sustainable corrosion inhibitor of mild steel in acid medium. *Corrosion Science and Technology* 24(3) (2025) 107–117. <https://doi.org/10.14773/cst.2025.24.3.107>.
- [34] Adejo, S. O., Uzah, T., & Akuhwa, J. (2024). Adsorption isotherm modeling in corrosion inhibition studies. In *IntechOpen eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1005211>.
- [35] Aldahiri, R. H., Hussein, M. A., Al-Bukhari, S. M. A., Alamry, K. A., Khan, A., & Aslam, R. Synergistic effect of *Canarium strictum* leaves extract and KI on the corrosion protection of mild steel in 15% HCl solution. *Scientific Reports* 15(1) (2025) 3576. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87482-x>.
- [36] Iraqi, O., Saber, I., El-Alouani, M., Doumane, G., Taboz, Y., Habsaoui, A., Comparative analysis of corrosion inhibition efficiency of *Silybum marianum* L. parts on mild steel in 1 M HCl solution. *Scientific African* 31 (2026) e03200. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2026.e03200>.
- [37] Kumar, N., Anunay, P., Kumar, S., Meena, L.K., Singh, D., An overview on emerging green organic corrosion inhibitors: Sustainable solution for oil and gas industrial applications. *RSC Advances* 16(5) (2026) 3909–3948. <https://doi.org/10.1039/d5ra08166a>.
- [38] Andoko, A., Diharjo, K., Arsyad, H., R, S.M., Effectiveness of corrosion protection for 6061 aluminum with orchid leaf extract inhibitor in 1 M HCl solution. *Arabian Journal of Chemistry* (2026) 1–11. https://doi.org/10.25259/ajc_1007_2025.

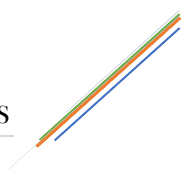
- [39] Thacker, H., Ram, V., Green corrosion inhibitors derived from plant extracts and drugs for mild steel in acid media: A review. *Results in Surface and Interfaces* 18 (2024) 100364. <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2024.100364>.
- [40] Djermoune, A., Maizia, R., Zahzouh, M., Khelfaoui, Y., Aloysia triphylla plant extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for API 5L X42 steel in hydrochloric acid medium: A combined experimental and DFT study. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 709 (2025) 136068. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.136068>.
- [41] Maizia, R., Zaabar, A., Djermoune, A., Amoura, D., Martemianov, S., Thomas, A., Alrashdi, A.A., Makhloufi, L., Lgaz, H., Dib, A., Chafiq, M., Ko, Y.G., Experimental assessment and molecular-level exploration of the mechanism of action of nettle (*Urtica dioica* L.) plant extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for X38 mild steel in sulfuric acidic medium. *Arabian Journal of Chemistry* 16(8) (2023) 104988. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104988>.
- [42] Zaabar, A., Aitout, R., Makhloufi, L., Belhamel, K., Saidani, B., Inhibition of acid corrosion of mild steel by aqueous nettle extracts. *Pigment & Resin Technology* 43(3) (2014) 127–138. <https://doi.org/10.1108/prt-11-2012-0078>.
- [43] Maizia, R., Djermoune, A., Amoura, D., Zaabar, A., Thomas, A., Dib, A., Martemianov, S., *Bidens aurea* Aiton plant extract as a green and sustainable corrosion inhibitor for carbon steel X42 in hydrochloric acidic medium: Experimental and computational studies. *Materials Chemistry and Physics* 339 (2025) 130740. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.130740>.
- [44] Mechbal, N., Bouhrim, M., Bnouham, M., Hammouti, B., Karzazi, Y., Kaya, S., Serdaroğlu, G., Anticorrosive and antioxidant effect of the aqueous extract of the leaves, flowers, and stems of *Cistus monspeliensis* L.: Experimental and computational study. *Journal of Molecular Liquids* 331 (2021) 115771. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115771>.
- [45] Durgadevi, S., Rose, A.L., Green corrosion inhibitory efficiency of isolated flavonoid from *Spermacoce hispida* leaves on mild steel in acid medium. *Oriental Journal of Chemistry* 39(2) (2023) 463–469. <https://doi.org/10.13005/ojc/390227>.
- [46] Houda, S.N.E., Amel, B., Malika, F., *Trifolium repens* extracts as a green corrosion inhibitor for carbon steel in a 3.5% NaCl solution. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 165 (2024) 105771. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105771>.

CHAPITRE II

TECHNIQUES D'ETUDE & CONDITIONS EXPERIMENTALES

Ce chapitre présente les démarches expérimentales adoptées pour préparer les extraits végétaux et évaluer leur efficacité en tant qu'inhibiteurs verts de corrosion. Deux méthodes d'extraction ont été retenues : l'extraction à reflux dans l'eau, simple et écologique, et l'extraction assistée par ultrasons dans l'éthanol, rapide et efficace pour récupérer une large gamme de composés bioactifs. Les essais de corrosion sont réalisés dans deux milieux représentatifs : HCl 1 M, qui simule un milieu acide fortement agressif favorisant la dissolution du métal, et NaCl 3 %, représentatif d'un milieu salin chloruré proche du milieu marin, favorisant principalement la corrosion localisée. Cette approche permet de comparer l'effet protecteur des extraits végétaux dans des conditions de corrosion différentes.





II.1 Démarche générale de l'étude expérimentale

La corrosion des matériaux métalliques est un phénomène complexe, influencé par la nature du métal, la composition du milieu corrosif et les conditions expérimentales. Dans ce contexte, les extraits végétaux représentent une alternative prometteuse aux inhibiteurs synthétiques, grâce à leur richesse en composés bioactifs et à leur caractère plus respectueux de l'environnement [1,2].

Ces extraits contiennent notamment des polyphénols, flavonoïdes, tanins et alcaloïdes, capables de s'adsorber sur la surface métallique grâce à leurs groupements fonctionnels et à la présence d'hétéroatomes tels que l'oxygène, l'azote ou le soufre. Cette adsorption favorise la formation d'un film protecteur qui limite le contact entre le métal et les espèces corrosives [1,3].

La démarche expérimentale repose sur deux méthodes d'extraction. L'extraction à reflux dans l'eau permet d'obtenir une fraction hydrosoluble riche en composés polaires, tandis que l'extraction assistée par ultrasons dans l'éthanol favorise, grâce au phénomène de cavitation, la libération rapide d'une fraction organique plus variée [4,5].

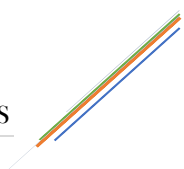
Les essais de corrosion sont réalisés dans deux milieux distincts : HCl 1 M, représentatif d'un milieu acide fortement agressif, et NaCl 3 %, qui simule un environnement salin chloruré proche des conditions marines. Cette comparaison permet d'évaluer l'efficacité protectrice des extraits végétaux face à des mécanismes de corrosion différents.

II.2 Matière végétale utilisée

Les espèces végétales retenues dans cette étude ont été sélectionnées en fonction de leur disponibilité locale, de leur adaptation aux conditions climatiques régionales et de leur intérêt phytochimique. Leur utilisation s'inscrit dans une démarche visant à valoriser des ressources naturelles accessibles pour la préparation d'extraits destinés aux essais d'inhibition de la corrosion.

II.2.1 *Cleome arabica* L.

Cleome arabica L. est une plante herbacée spontanée, adaptée aux régions arides et semi-arides. Elle se distingue par des tiges dressées et ramifiées, des feuilles alternes généralement trifoliées, ainsi que par de petites fleurs regroupées en inflorescences. Ses fleurs présentent quatre pétales inégaux, de couleur jaunâtre à pourpre foncé, et ses fruits sont des capsules allongées et



déhiscentes renfermant des graines velues. Cette espèce, autrefois rapprochée des Capparaceae, est actuellement classée dans la famille des Cleomaceae [6]. Afin de mieux situer cette espèce sur le plan botanique, sa classification systématique est présentée dans le tableau II.1.

Tableau II.1 : Classification systématique de *Cleome arabica* L.

Catégorie	Classification
Règne	Plantae
Embranchement	Spermaphytes
Sous-embranchement	Angiospermes
Classe	Dicotylédones
Ordre	Brassicales
Famille	Cleomaceae
Genre	<i>Cleome</i>
Espèce	<i>Cleome arabica</i> L.

En Algérie, *Cleome arabica* L. est fréquemment observée dans les zones sahariennes et présahariennes, notamment dans la région du Hodna et autour de Bou-Saâda, dans la wilaya de M'sila. Cette répartition traduit sa bonne adaptation aux milieux secs et renforce l'intérêt de sa valorisation comme ressource végétale locale [7].

L'intérêt de *Cleome arabica* L. dans cette étude repose sur sa richesse rapportée en composés naturels, notamment les composés phénoliques et flavonoïdiques. Des travaux récents ont montré que son extrait peut être valorisé comme inhibiteur vert de corrosion de l'acier au carbone en milieu acide, grâce à l'adsorption de ses constituants actifs sur la surface métallique [8,9].

Afin d'illustrer les principaux caractères morphologiques de *Cleome arabica* L., la figure II.1 présente les différentes parties de la plante, notamment les rameaux, les feuilles, les fleurs et les fruits.

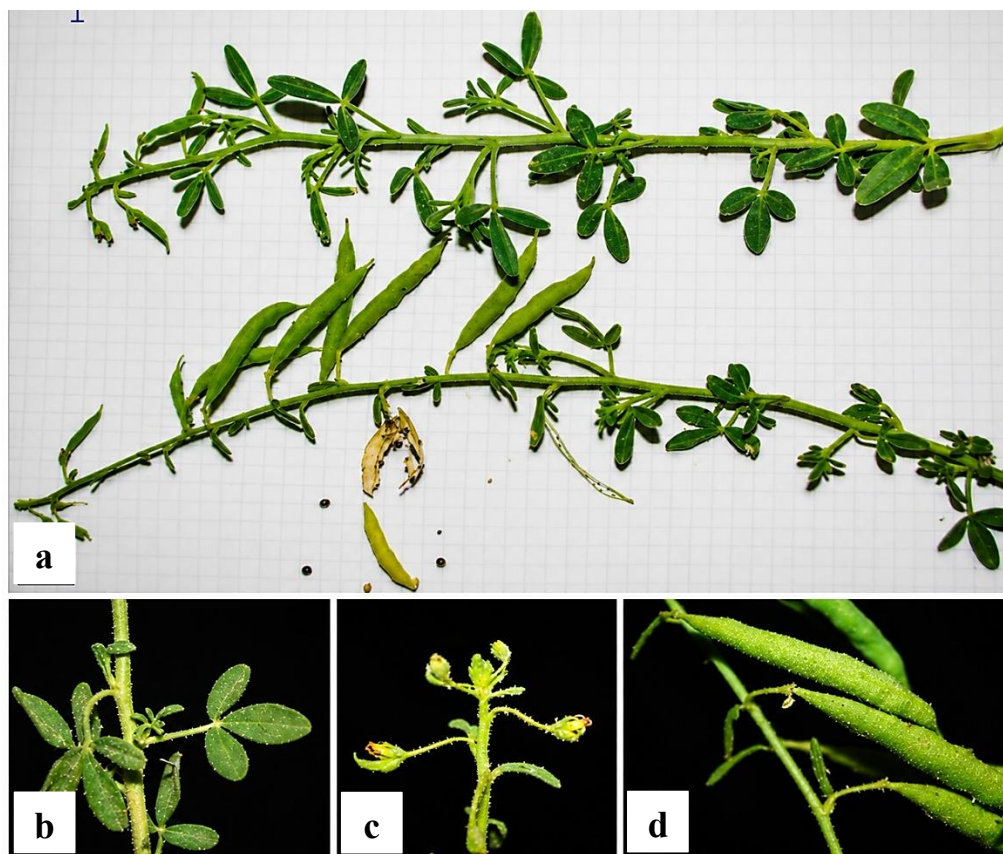


Figure II.1 : Caractères morphologiques de *Cleome arabica* L. : (a) plante entière, (b) feuilles, (c) fleur, (d) fruit.

II.2.2 *Cistus albidus* L. et *Cistus libanotis* L.

Les espèces du genre *Cistus* appartiennent à la famille des Cistaceae et font partie de la flore caractéristique du bassin méditerranéen. Elles se développent spontanément dans des milieux secs, rocaillieux et fortement exposés au soleil. Cette adaptation aux conditions difficiles est souvent associée à la production de métabolites secondaires, notamment des composés phénoliques, des flavonoïdes, des tanins et des substances aromatiques [10,11].

Cistus albidus L., appelé aussi ciste cotonneux, se distingue par son feuillage clair et duveteux ainsi que par sa floraison rose caractéristique. Cette espèce est reconnue pour sa richesse en composés antioxydants, en particulier les polyphénols et les flavonoïdes, ce qui justifie son intérêt pour la préparation d'extraits naturels à potentiel protecteur [10].

Cistus libanotis L. est une espèce méditerranéenne aromatique à feuillage persistant. Les études phytochimiques réalisées sur cette plante ont mis en évidence la présence de flavonoïdes et d'autres constituants organiques dans ses extraits. Cette composition en fait une matière

végétale intéressante pour l'obtention d'extraits naturels susceptibles de contribuer à la protection des surfaces métalliques [12].

La figure II.2 présente des exemples de *Cistus albidus* L. et de *Cistus libanotis* L. Elle permet de visualiser leur aspect général, leur feuillage et leur floraison, éléments utiles pour l'identification botanique des matières végétales utilisées. Le tableau II.2 résume ensuite les principales caractéristiques des deux espèces étudiées, notamment leur famille botanique et leur intérêt expérimental.

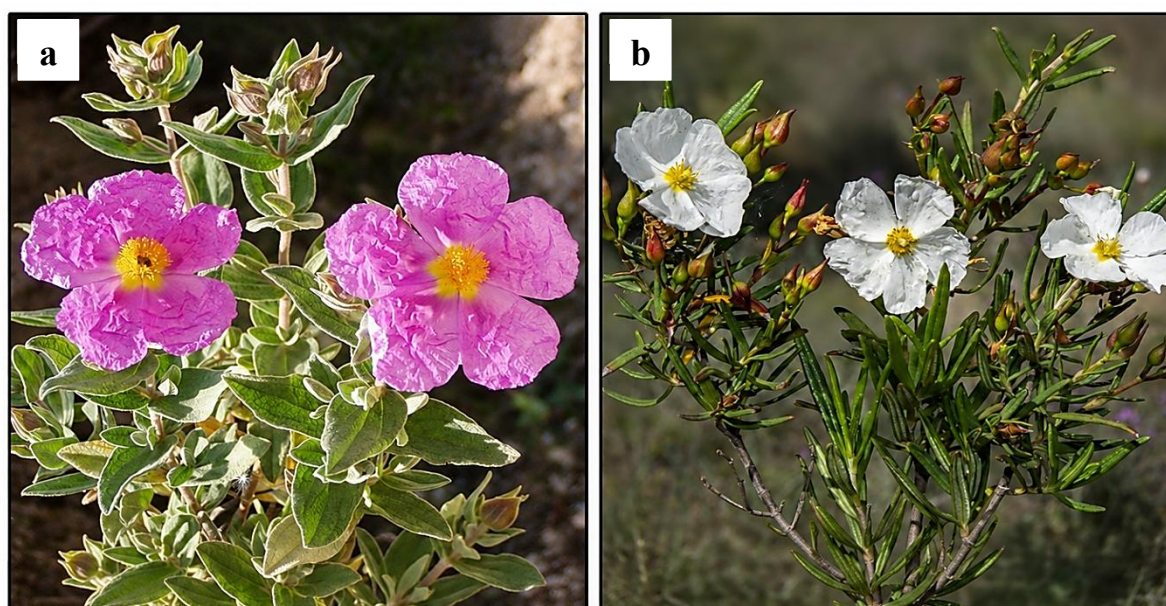
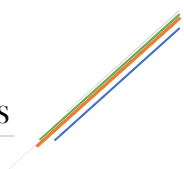


Figure II.2 : Exemples de cistes utilisés comme matières végétales : **(a)** *Cistus albidus* L., caractérisé par son feuillage clair et sa floraison rose ; **(b)** *Cistus libanotis* L., espèce méditerranéenne aromatique à feuillage persistant.

Tableau II.2 : Espèces de cistes utilisées comme matières végétales.

Plante	Famille	Intérêt expérimental
<i>Cistus albidus</i> L.	Cistaceae	Espèce méditerranéenne riche en composés phénoliques, flavonoïdes et molécules antioxydantes
<i>Cistus libanotis</i> L.		Espèce aromatique contenant des flavonoïdes et des constituants organiques d'intérêt pour les extraits naturels



II.3 Préparation de la matière végétale

Avant l'extraction, les plantes ont été préparées avec soin afin d'obtenir une matière végétale homogène. Cette étape conditionne la qualité des extraits, car la présence d'impuretés, d'humidité résiduelle ou de particules hétérogènes peut influencer la récupération des composés bioactifs et, par conséquent, l'évaluation de leur activité inhibitrice [13,14].

Les échantillons végétaux ont d'abord été triés manuellement afin d'éliminer les fragments étrangers, les parties abîmées, les poussières et les impuretés visibles. Ils ont ensuite été lavés à l'eau du robinet, puis rincés à l'eau distillée afin de limiter l'introduction d'ions ou de particules susceptibles d'interférer avec les essais de corrosion.

Après lavage, les plantes ont été séchées dans une étuve à 45 °C pendant 24 h. Ce séchage modéré permet de réduire l'humidité tout en limitant l'altération des composés thermosensibles. La matière végétale séchée a ensuite été broyée jusqu'à l'obtention d'une poudre homogène. Cette réduction de taille augmente la surface de contact avec le solvant et favorise le transfert des molécules d'intérêt lors de l'extraction [15].

Les poudres obtenues ont finalement été conservées dans des flacons hermétiques étiquetés, à l'abri de l'humidité et de la lumière, jusqu'à leur utilisation.

II.4 Méthodes d'extraction

Deux méthodes d'extraction ont été retenues dans cette étude : l'extraction à reflux dans l'eau et l'extraction assistée par ultrasons dans l'éthanol. Ce choix permet d'obtenir des extraits de nature différente, car la composition chimique d'un extrait végétal dépend fortement du solvant, de la température, du temps de contact et de la technique d'extraction appliquée à la matière végétale [16–18].

II.4.1 Extraction à reflux dans l'eau

L'extraction à reflux dans l'eau est une méthode conventionnelle simple, économique et respectueuse de l'environnement. Elle repose sur le chauffage du mélange plante-solvant, tout en assurant la condensation continue des vapeurs grâce au réfrigérant. Ce système permet de maintenir le volume du solvant presque constant et de favoriser le transfert des composés hydrosolubles vers la phase aqueuse.

Dans ce travail, l'eau distillée a été utilisée comme solvant d'extraction en raison de son caractère non toxique, économique et respectueux de l'environnement. Elle permet principalement d'extraire les molécules polaires présentes dans les plantes, telles que les polyphénols hydrosolubles, les tanins, certains flavonoïdes, les sucres, les saponines et les acides organiques [16,17]. L'intérêt de cette approche a également été confirmé dans des travaux portant sur l'utilisation d'extraits aqueux végétaux comme inhibiteurs verts de corrosion des aciers en milieux acides [4,19,20].

La figure II.3 présente le dispositif expérimental utilisé pour l'extraction à reflux. Il est constitué d'un chauffe-ballon, d'un ballon de 250 mL, d'un réfrigérant à eau, d'un support et d'un valet élévateur.



Figure II.3 : *Dispositif expérimental d'extraction à reflux.*

Une masse de 20 g de poudre végétale préalablement préparée est pesée avec précision à l'aide d'une balance analytique, puis introduite dans un ballon de 250 mL. Ensuite, 200 mL d'eau distillée sont ajoutés, ainsi que quelques grains de pierre ponce afin d'assurer une ébullition régulière du mélange.

Le montage à reflux est ensuite assemblé et vérifié avant le démarrage de l'extraction. Après mise en circulation de l'eau froide dans le réfrigérant, le mélange est chauffé progressivement

à l'aide d'un chauffe-ballon. L'extraction est maintenue pendant 1 h à partir du début de l'ébullition. A la fin de l'extraction, le mélange est refroidi puis filtré sous vide afin de récupérer le filtrat.

II.4.2 Extraction assistée par ultrasons dans l'éthanol

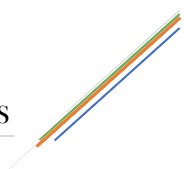
L'extraction assistée par ultrasons dans l'éthanol a été utilisée comme méthode complémentaire à l'extraction aqueuse à reflux. Elle repose sur le phénomène de cavitation acoustique, au cours duquel les ultrasons provoquent la formation puis l'implosion de microbulles dans le solvant. Ces effets mécaniques génèrent des microjets et des turbulences capables de fragiliser les parois cellulaires végétales, ce qui facilite la libération des composés bioactifs vers le solvant d'extraction [18].

L'éthanol a été choisi pour sa capacité à extraire une gamme variée de composés organiques, notamment les flavonoïdes, les alcaloïdes, les terpènes, les composés phénoliques et certaines substances aromatiques [16,18]. Ces molécules peuvent contenir des groupements fonctionnels ainsi que des hétéroatomes tels que l'oxygène, l'azote ou le soufre, favorisant leur interaction avec la surface métallique et la formation d'un film protecteur limitant la corrosion [1,2].

La figure II.4 présente le dispositif utilisé pour l'extraction assistée par ultrasons dans l'éthanol. Ce dispositif permet de maintenir les échantillons dans des conditions contrôlées, notamment en ce qui concerne la température et la durée d'extraction.



Figure II.4 : Dispositif expérimental utilisé pour l'extraction assistée par ultrasons dans l'éthanol.



Pour réaliser l'extraction, une masse totale de 20 g de poudre végétale est pesée à l'aide d'une balance analytique, puis divisée en deux aliquotes homogènes de 10 g. Chaque aliquote est introduite dans un erlenmeyer, auquel sont ajoutés 100 mL d'éthanol. Les erlenmeyers sont ensuite placés dans le bain ultrasonique, préalablement rempli d'eau de manière à assurer une bonne transmission des ondes ultrasonores.

L'appareil est réglé à une fréquence comprise entre 30 et 50 Hz, à une température contrôlée de 25 °C, pendant une durée d'une heure. Durant l'extraction, la température est surveillée afin d'éviter toute élévation excessive pouvant altérer les composés thermosensibles. Si nécessaire, le refroidissement est assuré par l'ajout d'eau froide ou de glace dans le bain. A la fin du traitement ultrasonique, les mélanges sont filtrés afin de récupérer les extraits éthanoliques.

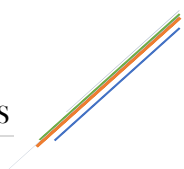
La concentration massique de chaque extrait a été déterminée par évaporation. Pour cela, 10 mL de l'extrait filtré ont été prélevés puis portés à évaporation jusqu'à élimination complète du solvant. Le résidu sec obtenu a ensuite été pesé, ce qui permet de calculer la concentration de l'extrait en g.L⁻¹ selon le rapport entre la masse du résidu et le volume évaporé [4,19].

Avant chaque essai de corrosion, les solutions d'étude ont été préparées par dilution. Un volume approprié d'extrait a été mélangé avec un volume déterminé de solution mère de HCl 2 M ou de NaCl 6 %, puis complété avec de l'eau distillée jusqu'au volume final souhaité. Cette préparation permet d'obtenir simultanément le milieu corrosif final, soit HCl 1 M ou NaCl 3 %, et la concentration désirée de l'extrait végétal.

II.5 Préparation des milieux corrosifs

Deux milieux corrosifs ont été retenus dans cette étude : une solution acide de HCl 1 M et une solution saline de NaCl 3 %. Leur choix permet d'évaluer l'efficacité des extraits végétaux dans deux environnements de corrosion différents.

La solution de HCl 1 M, dont le pH est proche de 0, représente un milieu acide fortement agressif. Dans ce milieu, les ions H⁺ favorisent la dissolution du métal, tandis que les ions Cl⁻ peuvent accentuer l'attaque de la surface métallique. Ce milieu est couramment utilisé pour tester les inhibiteurs verts en conditions acides sévères. Plusieurs travaux, notamment ceux de Gadow et Fakeeh sur l'extrait de graines d'*Eruca sativa*, de Pourmohseni et al. sur des extraits de plantes médicinales, ainsi que de Hernández-Sánchez et al. sur *Ruta graveolens*, ont utilisé HCl 1 M pour évaluer l'efficacité anticorrosion d'extraits végétaux [21–23].



La solution de NaCl 3 %, dont le pH est généralement voisin de la neutralité, autour de 6,5–7,5, correspond à un milieu chloruré aéré. Dans ce cas, les ions Cl^- favorisent la corrosion localisée et la formation de piqûres, tandis que l'oxygène dissous intervient dans la réaction cathodique de réduction de l'oxygène, contribuant ainsi à l'évolution du processus corrosif. Le choix de ce milieu est appuyé par les travaux de Zaabar et al., qui ont étudié l'extrait d'avoine comme inhibiteur naturel de corrosion de l'acier doux dans NaCl 3 % [4]. Des solutions proches, notamment NaCl 3,5 %, sont également utilisées pour simuler des environnements salins proches du milieu marin et évaluer la capacité des inhibiteurs naturels à limiter la corrosion en milieu chloruré [24,25].

II.6 Préparation des plaques métalliques

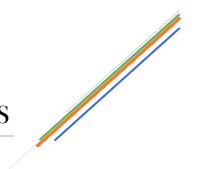
Les métaux ferreux, en particulier les aciers doux et les aciers ordinaires, sont largement utilisés dans de nombreux secteurs industriels en raison de leur disponibilité, de leur coût modéré et de leurs bonnes propriétés mécaniques. On les retrouve notamment dans le bâtiment, les équipements industriels, les emballages métalliques, les pièces usinées, les structures navales et certaines applications électroniques. Toutefois, leur sensibilité à la corrosion impose une préparation rigoureuse des surfaces avant tout essai, afin d'obtenir des résultats fiables et comparables.

Dans cette étude, les plaques métalliques utilisées sont constituées principalement de fer, avec de faibles teneurs en manganèse, silicium, aluminium et carbone. La composition chimique du matériau testé est présentée dans le tableau II.3.

Tableau II.3 : Analyse typique de l'acier utilisé.

Eléments	Fe	Mn	Al	Si	C
Teneur (%)	98	0,94	< 1	0,31	0,2

Avant immersion, chaque plaque est polie à l'aide de papier abrasif de granulométrie adaptée afin d'obtenir une surface aussi homogène que possible. Les plaques sont ensuite nettoyées pour éliminer les résidus de polissage, rincées à l'eau distillée, séchées soigneusement puis pesées à l'aide d'une balance analytique. Cette préparation permet de réduire l'influence des



irrégularités de surface sur les mesures de perte de masse et d'améliorer la fiabilité des résultats gravimétriques [26,27].

II.7 Essais gravimétriques de corrosion

L'évaluation de l'effet d'un inhibiteur sur la corrosion d'un matériau métallique peut être réalisée par différentes méthodes, notamment les techniques électrochimiques, la spectroscopie d'impédance électrochimique et les essais gravimétriques. Dans ce travail, la méthode gravimétrique, également appelée méthode de perte de masse, a été retenue en raison de sa simplicité, de son faible coût et de la facilité de sa mise en œuvre. Elle permet d'obtenir une première estimation quantitative de la corrosion et de l'efficacité inhibitrice des extraits étudiés [26–29].

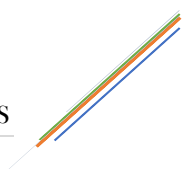
Cette méthode est largement utilisée dans les études d'inhibition de la corrosion, car elle permet de comparer directement la masse perdue par un métal en absence et en présence d'un inhibiteur. Plusieurs travaux ont ainsi utilisé la perte de masse pour déterminer la vitesse de corrosion et le rendement inhibiteur d'extraits végétaux ou de composés organiques en milieux acides [30–33] ou en milieux neutres chlorurés, notamment dans des solutions de NaCl 3 % et 3,5 % [4,25].

Dans le présent travail, les essais gravimétriques ont été réalisés à 20 °C pendant une durée d'immersion de 10 jours. Les plaques métalliques, préalablement polies, nettoyées, séchées et pesées, ont été totalement immergées dans les milieux corrosifs préparés, à savoir HCl 1 M et NaCl 3 %. Les essais ont été effectués en absence d'inhibiteur, afin d'obtenir les échantillons témoins, puis en présence de différentes concentrations d'extraits végétaux obtenus par reflux dans l'eau ou par extraction assistée par ultrasons dans l'éthanol.

Après immersion, les plaques ont été retirées des solutions, rincées soigneusement, séchées puis pesées de nouveau. La perte de masse, notée Δm , est déterminée par la différence entre la masse initiale et la masse finale de l'échantillon [27,28] :

$$\Delta m = m_0 - m \quad (\text{II.1})$$

où m_0 représente la masse initiale de la plaque avant immersion et m sa masse finale après immersion.



La vitesse de corrosion peut d'abord être exprimée sous forme surfacique, en rapportant la perte de masse à la surface exposée et au temps d'immersion [27,28,31] :

$$V_{corr} = \frac{\Delta m}{S \times t} \quad (\text{II.2})$$

où V_{corr} est la vitesse de corrosion exprimée en $\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$, Δm la perte de masse en mg, S la surface totale exposée de la plaque en cm^2 et t le temps d'immersion en heures.

Lorsque l'on souhaite exprimer la vitesse de corrosion en profondeur de pénétration annuelle, la relation suivante peut être utilisée [26,27] :

$$V_{corr} = \frac{87,6 \times \Delta m}{D \times S \times t} \quad (\text{II.3})$$

où V_{corr} est exprimée en mm/an et D la densité du métal en g/cm^3 . La constante 87,6 est un facteur de conversion des unités permettant de passer d'une perte de masse en mg à une vitesse de pénétration exprimée en mm/an . Dans le cas de l'acier étudié, une densité de $7,88 \text{ g}/\text{cm}^3$ peut être retenue, valeur couramment utilisée pour les aciers doux ou faiblement alliés.

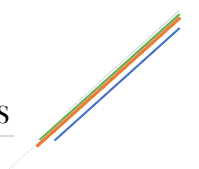
Afin d'interpréter les valeurs obtenues, les vitesses de corrosion exprimées en mm/an peuvent être classées selon différents niveaux de sévérité, comme présenté dans le tableau II.4.

Tableau II.4 : Classification des niveaux de corrosion selon la vitesse de corrosion [33].

Vitesse de corrosion, V_{corr} (mm/an)	Niveau de corrosion
$\leq 0,001$	Négligeable
0,001 – 0,005	Faible
0,005 – 0,010	Modéré
$> 0,010$	Élevé

L'efficacité inhibitrice, notée $\eta(\%)$, est calculée en comparant la vitesse de corrosion du témoin à celle obtenue en présence de l'extrait végétal [27–29] :

$$\eta(\%) = \frac{V_{corr} - V_{corr}^i}{V_{corr}} \times 100 \quad (\text{II.4})$$



où V_{corr} correspond à la vitesse de corrosion sans inhibiteur et V_{corr}^i à la vitesse de corrosion en présence de l'extrait.

Lorsque les plaques présentent des surfaces exposées comparables et une même durée d'immersion, l'efficacité inhibitrice peut également être calculée directement à partir des pertes de masse [28,30] :

$$\eta(\%) = \frac{W - W_i}{W} \times 100 \quad (\text{II.5})$$

où W représente la perte de poids de l'échantillon témoin, en absence d'inhibiteur, et W_i la perte de masse mesurée en présence de l'extrait végétal.

$$\text{Avec } W = \frac{\Delta m}{S} \quad (\text{II.6})$$

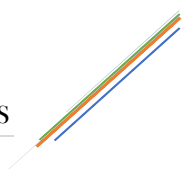
Une valeur élevée de $\eta(\%)$ indique une meilleure protection du métal. Cette protection est généralement attribuée à l'adsorption des molécules actives de l'extrait sur la surface métallique, ce qui limite le contact direct entre le métal et les espèces corrosives du milieu [30–33].

II.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté les principales étapes expérimentales nécessaires à l'étude du pouvoir inhibiteur des extraits végétaux. La préparation des plantes a permis d'obtenir une poudre homogène, utilisée ensuite pour l'extraction à reflux dans l'eau et l'extraction assistée par ultrasons dans l'éthanol. Ces deux méthodes ont été choisies afin de comparer des extraits de compositions différentes.

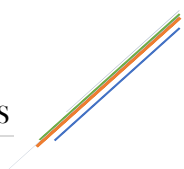
Les essais de corrosion ont été réalisés dans deux milieux représentatifs, HCl 1 M et NaCl 3 %, afin d'évaluer le comportement des plaques métalliques en conditions acides et salines. La méthode gravimétrique a été retenue comme approche simple et directe pour déterminer la perte de masse, la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice des extraits.

Les protocoles décrits dans ce chapitre constituent ainsi la base expérimentale sur laquelle reposera l'analyse des résultats obtenus dans la suite du travail.

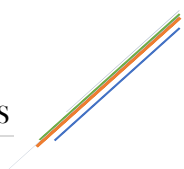


II.9 Références Bibliographiques

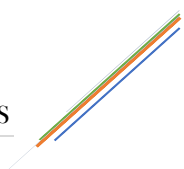
- [1] Holla, B. R., Mahesh, R., Manjunath, H., & Anjanapura, V. R. (2024). Plant extracts as green corrosion inhibitors for different kinds of steel: A review. *Heliyon*, 10(14), e33748. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33748>.
- [2] Fazal, B. R., Becker, T., Kinsella, B., & Lepkova, K. (2022). A review of plant extracts as green corrosion inhibitors for CO₂ corrosion of carbon steel. *Npj Materials Degradation*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s41529-021-00201-5>.
- [3] Alimohammadi, M., Ghaderi, M., SA, A. R., & Mahdavian, M. (2023). *Falcaria vulgaris* leaves extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid media. *Scientific Reports*, 13(1), 3737. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30571-6>.
- [4] Zaabar, A., Aitout, R., Amoura, D., Maizia, R., Abdesselam, D. A., Makhoulfi, L., & Saidani, B. (2021). Oat Extract as A Natural Corrosion Inhibitor for Mild Steel In 3% NaCl Solution. *Surface Review and Letters*, 28(10). <https://doi.org/10.1142/s0218625x21500840>.
- [5] Bunayog, M. L., Enerio, K. A. M., & Ongayo, G. D. (2025). Mild steel corrosion inhibition by aqueous and ethanolic *Gmelina arborea* leaf extracts prepared via ultrasound-assisted extraction. *Mindanao Journal of Science and Technology*, 23, 23–51.
- [6] Zayat, M. a. S. E., Ali, M. E. S., & Amar, M. H. (2020). A systematic revision of Capparaceae and Cleomaceae in Egypt: an evaluation of the generic delimitations of Capparidaceae and Cleome using ecological and genetic diversity. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 18(1), 58. <https://doi.org/10.1186/s43141-020-00069-z>.
- [7] Boublata, N. E. I., Habbachi, W., Habbachi, S., Saadane, F. Z., Benhissen, S., & Tahraoui, A. (2020). Effects of Cleome Arabica Aqueous Extracts in Wistar Rat's Behavior, Biochemistry Parameters and Acth Hormone. *Current Trends in Natural Sciences*, 9(18), 202–209. <https://doi.org/10.47068/ctns.2020.v9i18.028>.
- [8] Allagui, I., Horchani, M., Zammel, N., Jalouli, M., Elfeki, A., Kallel, C., Mansour, L., Alwasel, S., Harrath, A. H., Jannet, H. B., Allagui, M. S., & Hcini, K. (2022). Phytochemical Characterization, Antioxidant and Anti-Inflammatory Effects of Cleome arabica L. Fruits Extract against Formalin Induced Chronic Inflammation in Female Wistar Rat: Biochemical, Histological, and In Silico Studies. *Molecules*, 28(1), 26. <https://doi.org/10.3390/molecules28010026>.



- [9] Bouabdallah, I. A., Adjal, F., Zaabar, A., Benchikh, A., Guerniche, D., Ramdane-Terbouche, C. A., Piedade, A. P., Ibrahim, M. Z., Nasrallah, N., & Abdi, A. (2024). *Cleome arabica* L. extract as a novel green corrosion inhibitor for AISI 1045 carbon steel in 0.5 M HCl: insights from experimental and theoretical DFT analyses. *RSC Advances*, 14(49), 36423–36436. <https://doi.org/10.1039/d4ra06477a>.
- [10] De Baviera, D. R., Ruiz-Canales, A., & Barrajon-Catalán, E. (2023). *Cistus albidus* L.—Review of a Traditional Mediterranean Medicinal Plant with Pharmacological Potential. *Plants*, 12(16), 2988. <https://doi.org/10.3390/plants12162988>.
- [11] Zalegh, I., Akssira, M., Bourhia, M., Mellouki, F., Rhallabi, N., Salamatullah, A. M., Alkaltham, M. S., Alyahya, H. K., & Mhand, R. A. (2021). A Review on *Cistus* sp.: Phytochemical and Antimicrobial Activities. *Plants*, 10(6), 1214. <https://doi.org/10.3390/plants10061214>.
- [12] Venditti, A., Bianco, A., Bruno, M., Jemia, M. B., & Nicoletti, M. (2014). Phytochemical study of *Cistus libanotis* L. *Natural Product Research*, 29(2), 189–192. <https://doi.org/10.1080/14786419.2014.968569>.
- [13] Abubakar, A. R., & Haque, M. (2020). Preparation of medicinal plants: basic extraction and fractionation procedures for experimental purposes. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 12(1), 1–10. https://doi.org/10.4103/jpbs.jpbs_175_19.
- [14] Krakowska-Sieprawaska, A., Kielbasa, A., Rafińska, K., Ligor, M., & Buszewski, B. (2022). Modern methods of Pre-Treatment of plant material for the extraction of bioactive compounds. *Molecules*, 27(3), 730. <https://doi.org/10.3390/molecules27030730>.
- [15] Alsaud, N., & Farid, M. (2020). Insight into the Influence of Grinding on the Extraction Efficiency of Selected Bioactive Compounds from Various Plant Leaves. *Applied Sciences*, 10(18), 6362. <https://doi.org/10.3390/app10186362>.
- [16] Azmir, J., Zaidul, I., Rahman, M., Sharif, K., Mohamed, A., Sahena, F., Jahurul, M., Ghafoor, K., Norulaini, N., & Omar, A. (2013). Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review. *Journal of Food Engineering*, 117(4), 426–436. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.014>.
- [17] Zhang, M., Zhao, J., Dai, X., & Li, X. (2023). Extraction and analysis of chemical compositions of natural products and plants. *Separations*, 10(12), 598. <https://doi.org/10.3390/separations10120598>.



- [18] Yusoff, I. M., Taher, Z. M., Rahmat, Z., & Chua, L. S. (2022). A review of ultrasound-assisted extraction for plant bioactive compounds: Phenolics, flavonoids, thymols, saponins and proteins. *Food Research International*, 157, 111268. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111268>.
- [19] Zaabar, A., Aitout, R., Makhoulfi, L., Belhamel, K., & Saidani, B. (2014). Inhibition of acid corrosion of mild steel by aqueous nettle extracts. *Pigment & Resin Technology*, 43(3), 127–138. <https://doi.org/10.1108/prt-11-2012-0078>.
- [20] Maizia, R., Zaabar, A., Djermoune, A., Amoura, D., Martemianov, S., Thomas, A., Alrashdi, A. A., Makhoulfi, L., Lgaz, H., Dib, A., Chafiq, M., & Ko, Y. G. (2023). Experimental assessment and molecular-level exploration of the mechanism of action of Nettle (*Urtica dioica* L.) plant extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for X38 mild steel in sulfuric acidic medium. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(8), 104988. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104988>.
- [21] Gadow, H. S., & Fakeeh, M. (2022). Green inhibitor of carbon steel corrosion in 1 M hydrochloric acid: *Eruca sativaseed* extract (experimental and theoretical studies). *RSC Advances*, 12(15), 8953–8986. <https://doi.org/10.1039/d2ra01296k>.
- [22] Pourmohseni, M., Rashidi, A., & Karimkhani, M. (2024). Preparation of corrosion inhibitor from natural plant for mild steel immersed in an acidic environmental: experimental and theoretical study. *Scientific Reports*, 14(1), 7937. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58637-z>.
- [23] Hernández-Sánchez, S. E., Rios, J. P. F. L., Monreal-Romero, H. A., Flores-Holguin, N. R., Rodríguez-Valdez, L. M., Sánchez-Carrillo, M., Delgado, A. D., & Chacón-Nava, J. G. (2024). *Ruta graveolens* Plant Extract as a Green Corrosion Inhibitor for 304 SS in 1 M HCl: Experimental and Theoretical Studies. *Metals*, 14(11), 1267. <https://doi.org/10.3390/met14111267>.
- [24] Gadow, H. S., Motawea, M. M., & Elabbasy, H. M. (2017). Investigation of myrrh extract as a new corrosion inhibitor for α -brass in 3.5% NaCl solution polluted by 16 ppm sulfide. *RSC Advances*, 7(47), 29883–29898. <https://doi.org/10.1039/c7ra04271j>.
- [25] Ciobotaru, I., Mic, O. C., & Vaireanu, D. (2024). The use of some natural extracts as environmentally friendly carbon steel corrosion inhibitors. *Applied Sciences*, 14(24), 11528. <https://doi.org/10.3390/app142411528>.

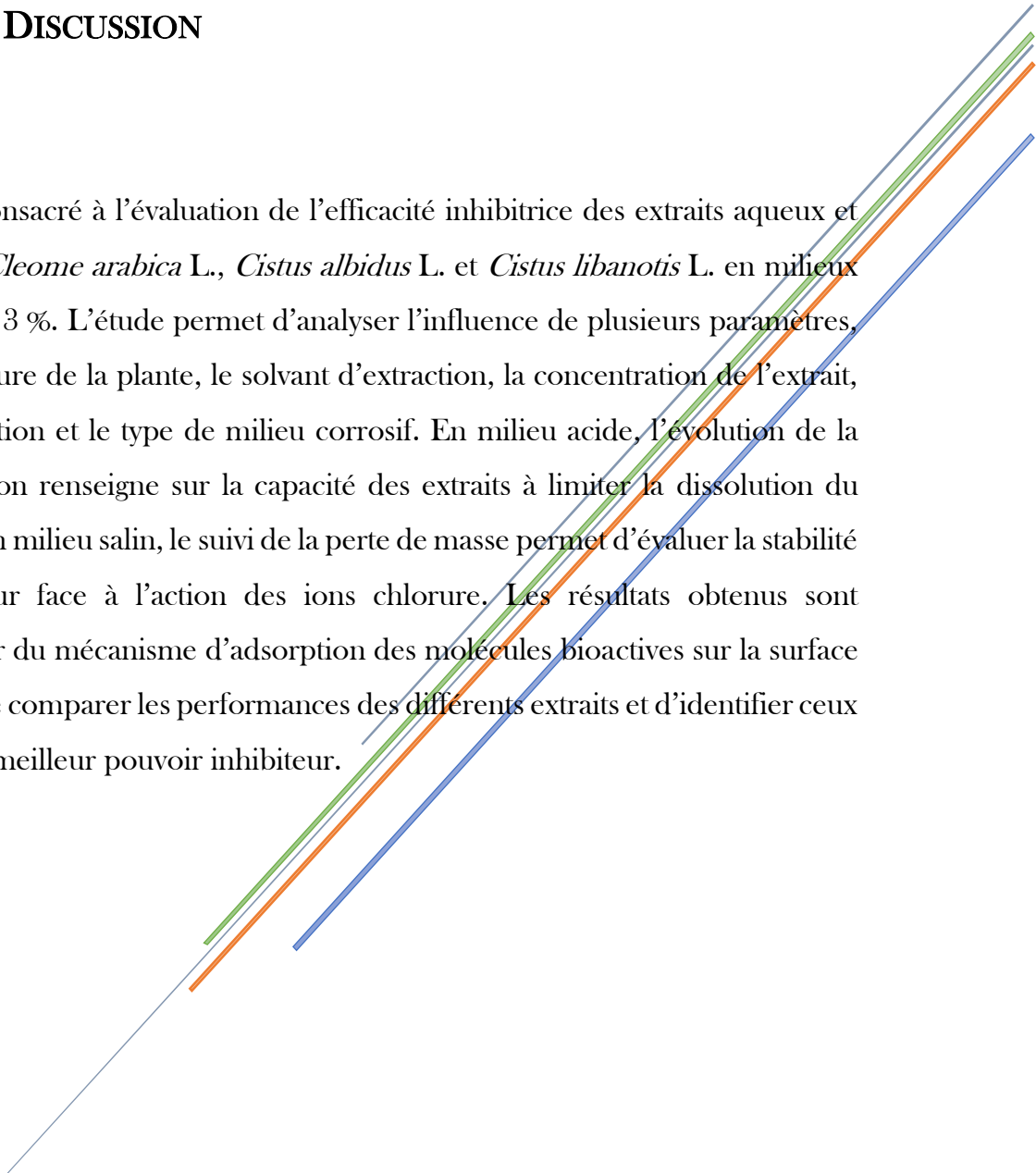


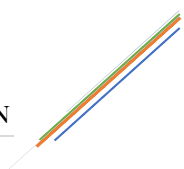
- [26] Al-Amiery, A. A., Mohamad, A. B., Kadhum, A. a. H., Shaker, L. M., Isahak, W. N. R. W., & Takriff, M. S. (2022). Experimental and theoretical study on the corrosion inhibition of mild steel by nonanedioic acid derivative in hydrochloric acid solution. *Scientific Reports*, 12(1), 4705. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08146-8>.
- [27] Mahdi, B. S., Abbass, M. K., Mohsin, M. K., Al-Azzawi, W. K., Hanoon, M. M., Al-Kaabi, M. H. H., Shaker, L. M., Al-Amiery, A. A., Isahak, W. N. R. W., Kadhum, A. a. H., & Takriff, M. S. (2022). Corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid environment using terephthaldehyde based on Schiff base: gravimetric, thermodynamic, and computational studies. *Molecules*, 27(15), 4857. <https://doi.org/10.3390/molecules27154857>.
- [28] Parajuli, D., Sharma, S., Oli, H., Bohara, D., Bhattarai, D., Tiwari, A., & Yadav, A. (2022). Comparative Study of Corrosion Inhibition Efficacy of Alkaloid Extract of *Artemisia vulgaris* and *Solanum tuberosum* in Mild Steel Samples in 1 M Sulphuric Acid. *Electrochem*, 3(3), 416–433. <https://doi.org/10.3390/electrochem3030029>.
- [29] Al-Amiery, A. A., Isahak, W. N. R. W., & Al-Azzawi, W. K. (2023). Corrosion inhibitors: natural and synthetic organic inhibitors. *Lubricants*, 11(4), 174. <https://doi.org/10.3390/lubricants11040174>.
- [30] Umoren, S., Eduok, U., Solomon, M., & Udoh, A. (2011). Corrosion inhibition by leaves and stem extracts of *Sida acuta* for mild steel in 1M H₂SO₄ solutions investigated by chemical and spectroscopic techniques. *Arabian Journal of Chemistry*, 9, S209–S224. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2011.03.008>.
- [31] Li, D., Zhang, P., Guo, X., Zhao, X., & Xu, Y. (2019). The inhibition of mild steel corrosion in 0.5 M H₂SO₄ solution by radish leaf extract. *RSC Advances*, 9(70), 40997–41009. <https://doi.org/10.1039/c9ra04218k>.
- [32] Ogunleye, O., Arinkoola, A., Eletta, O., Agbede, O., Osho, Y., Morakinyo, A., & Hamed, J. (2020). Green corrosion inhibition and adsorption characteristics of *Luffa cylindrica* leaf extract on mild steel in hydrochloric acid environment. *Heliyon*, 6(1), e03205. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03205>.
- [33] Andrade, C., & Alonso, C. (2004). Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures*, 37(9), 623–643. <https://doi.org/10.1007/bf02483292>.

CHAPITRE III

RESULTATS & DISCUSSION

Ce chapitre est consacré à l'évaluation de l'efficacité inhibitrice des extraits aqueux et éthanoliques de *Cleome arabica* L., *Cistus albidus* L. et *Cistus libanotis* L. en milieux HCl 1 M et NaCl 3 %. L'étude permet d'analyser l'influence de plusieurs paramètres, notamment la nature de la plante, le solvant d'extraction, la concentration de l'extrait, le temps d'exposition et le type de milieu corrosif. En milieu acide, l'évolution de la vitesse de corrosion renseigne sur la capacité des extraits à limiter la dissolution du métal, tandis qu'en milieu salin, le suivi de la perte de masse permet d'évaluer la stabilité du film protecteur face à l'action des ions chlorure. Les résultats obtenus sont interprétés à partir du mécanisme d'adsorption des molécules bioactives sur la surface métallique, afin de comparer les performances des différents extraits et d'identifier ceux qui présentent le meilleur pouvoir inhibiteur.





III.1 Évaluation de l'efficacité inhibitrice des extraits végétaux en milieu acide HCl 1 M

Les figures relatives aux extraits aqueux en milieu HCl 1 M mettent en évidence une réduction très nette de la vitesse de corrosion par rapport au témoin. Le témoin montre une augmentation continue de V_{corr} avec le temps, confirmant le caractère fortement agressif du milieu acide. En présence des extraits, les courbes se situent à des valeurs nettement plus faibles, ce qui indique que les espèces organiques hydrosolubles se fixent sur la surface métallique et réduisent la vitesse de dissolution du métal.

III.1.1 Effet des extraits aqueux

III.1.1.1 *Cleome arabica* L. (CAr-Aq)

La figure III.1 présente l'évolution de la vitesse de corrosion de l'acier (V_{corr}) en milieu HCl 1 M, en absence et en présence de différentes concentrations de l'extrait aqueux de *Cleome arabica* L. (CAr-Aq).

En absence d'inhibiteur, la vitesse de corrosion de l'acier augmente progressivement avec le temps d'exposition pour atteindre environ 0,015 mm/an après 8 jours d'immersion. D'après la classification d'Andrade et al. [1], cette valeur correspond à une corrosion élevée ($V_{corr} > 0,010$ mm/an). Ce comportement confirme l'agressivité du milieu acide, dans lequel la forte concentration en ions (H^+) favorise la dissolution anodique du fer.

L'ajout de l'extrait CAr-Aq réduit fortement la vitesse de corrosion pour toutes les concentrations testées. Les valeurs obtenues se situent majoritairement dans le domaine d'une corrosion négligeable à faible ($0,001 \leq V_{corr} < 0,005$ mm/an) [1]. Cette diminution indique que les composés hydrosolubles de l'extrait s'adsorbent rapidement sur la surface de l'acier. Les molécules riches en groupements oxygénés, en hétéroatomes et en liaisons (π), telles que les polyphénols et les flavonoïdes, peuvent occuper les sites actifs du métal et former un film protecteur limitant le contact direct entre le métal et la solution acide [2,3].

La diminution de (V_{corr}) dès les premiers temps d'immersion indique que la formation du film inhibiteur est rapide. En milieu acide, les molécules inhibitrices peuvent être protonées, puis entrer en compétition avec les ions (H^+) pour s'adsorber sur les sites actifs de la surface métallique [4,5]. Cette adsorption limite l'accès des espèces corrosives aux sites cathodiques et ralentit les réactions électrochimiques responsables de la corrosion, notamment la dissolution

du fer et le dégagement d'hydrogène. Le processus peut être représenté par les équilibres suivants [4–6] :



où (Inh) désigne la molécule inhibitrice et (Inh^+) sa forme protonée en milieu acide.

Ces équilibres illustrent la fixation progressive des espèces organiques sur l'acier, suivie d'une stabilisation du film adsorbé.

La faible variation de (V_{corr}) au cours du temps montre que cette couche reste suffisamment adhérente pour assurer une protection durable pendant la durée d'immersion étudiée. Ce comportement est souvent observé avec les inhibiteurs végétaux et peut être associé à une adsorption proche d'une monocouche, fréquemment décrite par le modèle de Langmuir [2,7].

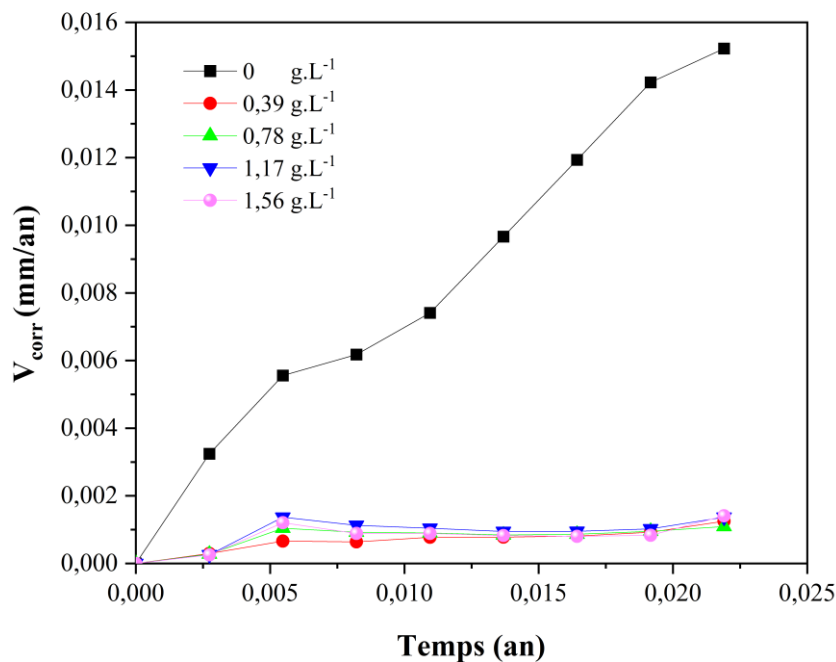


Figure III.1 : Évolution de la vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction du temps en présence de CAR-Aq.

Les courbes obtenues aux différentes concentrations présentent des valeurs relativement proches. Cela signifie que l'augmentation de la dose d'extrait n'améliore pas

proportionnellement la protection. La concentration de 0,39 g.L⁻¹ peut alors être considérée comme une concentration optimale apparente, car elle permet déjà de faire passer la corrosion d'un niveau élevé à un niveau négligeable à faible, tout en correspondant à la plus faible concentration utilisée.

Ces résultats sont en accord avec les travaux d'Ait Bouabdallah et al. [3], qui ont montré que l'extrait de *Cleome arabica* L. protège efficacement l'acier AISI 1045 en milieu HCl 0,5 M, avec une efficacité inhibitrice élevée attribuée à l'adsorption de composés phénoliques et flavonoïdes sur la surface métallique. Des comportements similaires ont également été rapportés pour d'autres extraits végétaux en milieu HCl, tels que l'extrait de henné [8], les extraits aqueux d'écorces de fruits [9] et l'extrait de *Justicia gendarussa* [10], dont l'action inhibitrice repose principalement sur la formation d'un film organique protecteur. Ainsi, l'extrait aqueux de *Cleome arabica* L. présente un pouvoir inhibiteur marqué en milieu HCl 1 M, confirmé à la fois par la diminution numérique de (V_{corr}) et par le changement de niveau de corrosion selon la classification d'Andrade et al. [1].

III.1.1.2 *Cistus albidus* L. (CAI-Aq)

La figure III.2 présente l'évolution de (V_{corr}) de l'acier en milieu HCl 1 M, en absence et en présence de différentes concentrations de l'extrait aqueux de *Cistus albidus* L. (CAI-Aq).

En présence de l'extrait CAI-Aq, les valeurs de (V_{corr}) diminuent nettement et restent dans le domaine d'une corrosion négligeable à faible. Cette différence met en évidence la capacité des constituants hydrosolubles de CAI-Aq à réduire l'attaque acide de l'acier.

L'effet de concentration n'est pas proportionnel. La concentration la plus faible, 0,243 g.L⁻¹, donne les plus faibles valeurs de (V_{corr}), proches du domaine négligeable, et peut donc être considérée comme la concentration optimale. Cette observation présente un intérêt pratique, car elle montre qu'une dose modérée d'extrait suffit à assurer une protection efficace de l'acier en milieu acide.

Au-delà de cette concentration, l'amélioration devient limitée, probablement en raison d'une saturation progressive des sites actifs ou d'une organisation moins homogène des molécules adsorbées à l'interface métal/solution [2,7]. Ce comportement s'explique par la composition complexe de l'extrait CAI-Aq, riche en composés phénoliques, tanins et flavonoïdes, dont les groupements hydroxyles, carbonyles et les systèmes aromatiques favorisent l'interaction avec

la surface de l'acier et la formation d'un film protecteur [2]. Des résultats similaires ont été rapportés pour l'extrait aqueux de *Cistus monspeliensis*, dont l'activité anticorrosive en milieu acide a été attribuée à l'adsorption de composés phénoliques à la surface du métal [11, 12].

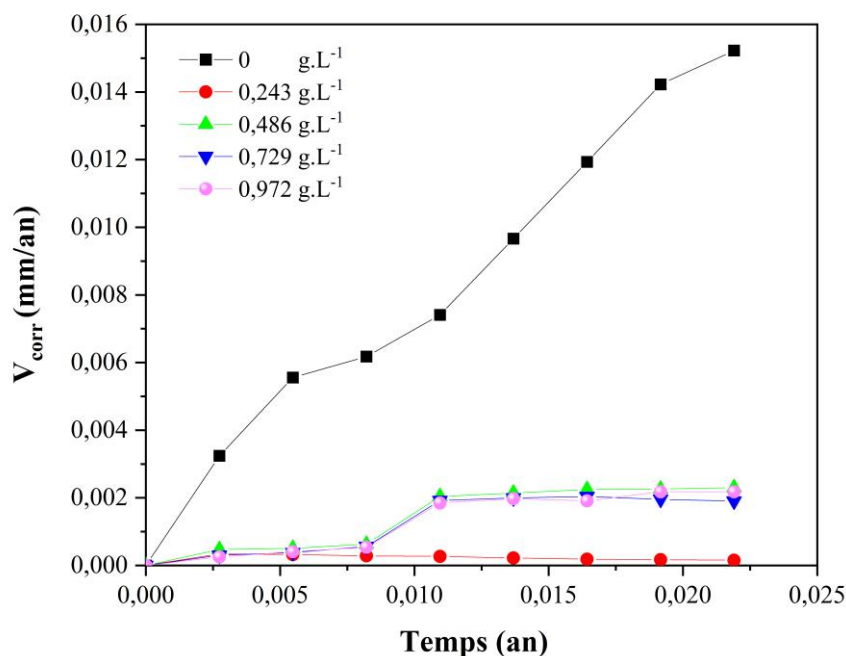


Figure III.2 : Évolution de la vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction du temps en présence de CAL-Aq.

III.1.1.3 *Cistus Libanitus* L. (CLi-Aq)

La figure III.3 montre que l'ajout de l'extrait CLi-Aq entraîne une diminution nette de la vitesse de corrosion par rapport au témoin. Les valeurs obtenues se situent généralement entre 0,002 et 0,004 mm/an, ce qui correspond à un niveau de corrosion faible [1]. Cette baisse confirme que les composés hydrosolubles présents dans l'extrait participent à la protection de l'acier contre l'attaque acide.

L'évolution des courbes montre que l'effet inhibiteur de CLi-Aq se met en place progressivement. Au début de l'immersion, (V_{corr}) augmente légèrement, puis tend à se stabiliser, voire à diminuer aux temps plus longs. Ce comportement suggère une adsorption graduelle des molécules organiques sur la surface métallique. En milieu acide, les espèces inhibitrices peuvent être protonées, puis entrer en compétition avec les ions (H^+) pour s'adsorber sur les sites actifs de l'acier [4,5]. Lorsque le film protecteur devient plus organisé,

l'accès des ions (H^+) à la surface métallique est limité, ce qui ralentit la dissolution du fer et la réaction cathodique de dégagement d'hydrogène [4–6].

La meilleure protection est obtenue avec la concentration de 1,136 g.L⁻¹, qui donne les plus faibles valeurs de (V_{corr}), notamment en fin d'immersion. Cette concentration peut donc être considérée comme la concentration optimale. Les concentrations plus faibles réduisent également la corrosion, mais leur efficacité reste légèrement inférieure, ce qui indique qu'un recouvrement satisfaisant de la surface nécessite ici une quantité plus élevée de composés actifs.

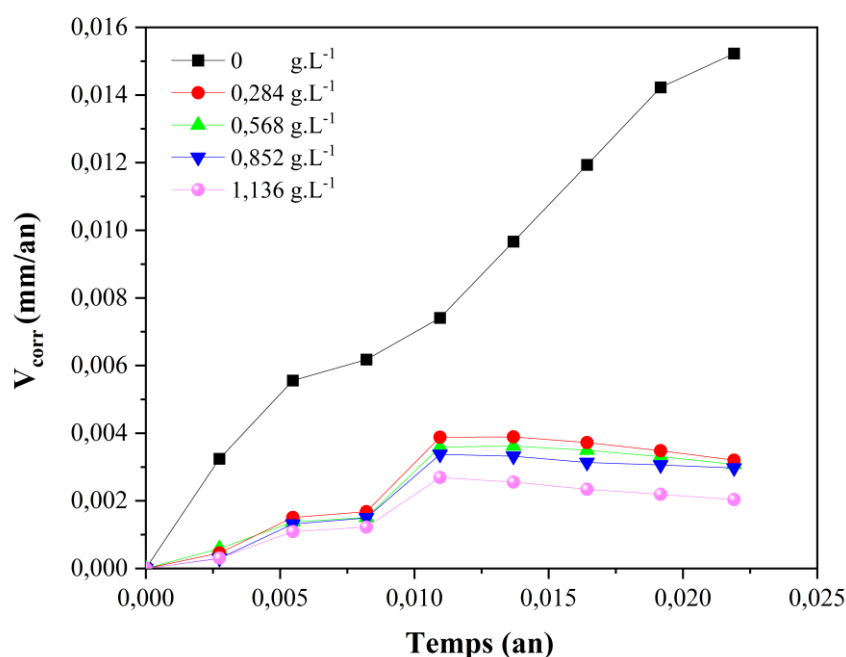
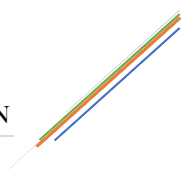


Figure III.3 : Évolution de la vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction du temps en présence de CLi-Aq.

Ainsi, l'extrait aqueux de *Cistus libanotis* L. agit comme un inhibiteur efficace en milieu HCl 1 M, puisqu'il permet de maintenir la corrosion dans le domaine faible. Toutefois, la protection nécessite une concentration plus élevée, ce qui suggère qu'une optimisation du protocole d'extraction ou de la dose utilisée pourrait améliorer davantage la stabilité du film protecteur.



III.1.2 Effet des extraits éthanoliques

Les extraits éthanoliques peuvent présenter un comportement différent de celui des extraits aqueux, car l'éthanol permet d'extraire des composés moins polaires, tels que certains flavonoïdes, terpènes et molécules à caractère partiellement hydrophobe. Ces composés peuvent contribuer à renforcer le caractère barrière du film adsorbé, en limitant la diffusion des espèces corrosives vers la surface métallique [2,12].

III.1.2.1 *Cleome arabica* L. (CAr-EtOH)

La figure III.4 présente l'évolution de (V_{corr}) de l'acier en milieu HCl 1 M en présence de différentes concentrations de l'extrait éthanolique de *Cleome arabica* L. (CAr-EtOH).

L'extrait CAr-EtOH réduit nettement la vitesse de corrosion par rapport au témoin, ce qui confirme son pouvoir protecteur en milieu acide. Cette efficacité dépend toutefois de la concentration utilisée et de l'organisation des molécules actives à l'interface métal/solution [2,12]. A la plus faible concentration, 0,39 g.L⁻¹, (V_{corr}) présente une valeur initialement plus élevée, puis diminue progressivement. Cette évolution suggère que le film protecteur ne se forme pas immédiatement de manière optimale, mais qu'il se réorganise au cours de l'immersion. Ce comportement est cohérent avec les travaux consacrés à *Cleome arabica* L. en milieu HCl, où l'inhibition a été attribuée à l'adsorption progressive de composés phénoliques et flavonoïdiques sur la surface de l'acier [3]. Des observations similaires ont été rapportées pour d'autres extraits végétaux en HCl 1 M, dont l'efficacité augmente avec la concentration et le temps nécessaire à la stabilisation du film adsorbé [13].

Aux concentrations plus élevées, (V_{corr}) reste très faible, proche du domaine de corrosion négligeable. La concentration de 1,17 g.L⁻¹ peut être retenue comme concentration optimale, car elle assure une protection stable, tandis que l'augmentation à 1,56 g.L⁻¹ n'apporte pas d'amélioration notable. Cela indique qu'un recouvrement efficace de la surface métallique est atteint à partir de cette concentration.

La bonne performance de CAr-EtOH peut être attribuée aux composés éthanol-solubles capables de former un film organique relativement hydrophobe. Cette barrière limite le contact entre l'acier et la solution acide, réduit la diffusion des espèces agressives et ralentit les réactions de corrosion.

Ainsi, l'extrait CAR-EtOH peut être considéré comme un inhibiteur efficace en HCl 1 M, grâce à la formation d'un film protecteur stable et partiellement hydrophobe.

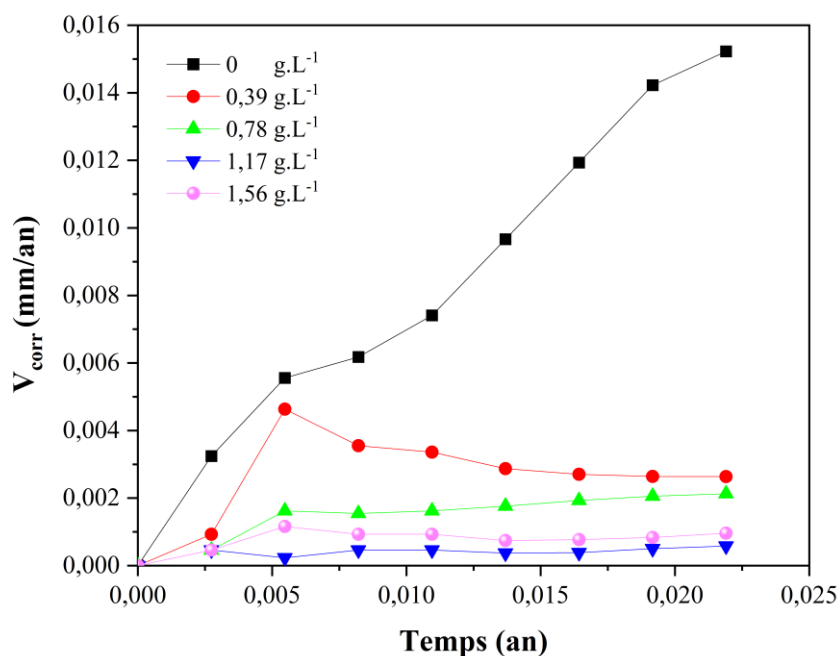


Figure III.4 : Évolution de la vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction du temps en présence de CAR-EtOH.

III.1.2.2 *Cistus albidus* L. (CAI- EtOH)

La figure III.5 illustre la variation de la vitesse de corrosion de l'acier (V_{corr}) en milieu HCl 1 M, après addition de différentes concentrations de l'extrait éthanolique de *Cistus albidus* L. (CAI-EtOH).

L'extrait CAI-EtOH montre une forte efficacité inhibitrice. Pour l'ensemble des concentrations testées, les valeurs de (V_{corr}) restent très faibles et se situent généralement dans le domaine d'une corrosion négligeable à faible [1]. Cette diminution indique que les composés éthanolsolubles de CAI-EtOH s'adsorbent efficacement sur la surface de l'acier et limitent l'attaque acide.

Les courbes obtenues sont proches les unes des autres, ce qui montre que l'augmentation de la concentration n'entraîne pas une amélioration proportionnelle de la protection. La concentration de 0,972 g.L⁻¹ présente toutefois les valeurs de (V_{corr}) les plus faibles au début

de l'immersion, tandis que les autres concentrations maintiennent également une corrosion très limitée durant l'essai. Ce comportement suggère qu'un recouvrement efficace de la surface métallique est atteint dans toute la gamme de concentrations étudiée.

La bonne performance de CAI-EtOH peut être liée à la richesse des espèces du genre *Cistus* en composés phénoliques, tanins et flavonoïdes. Ces molécules, grâce à leurs groupements hydroxyles, carbonyles et systèmes aromatiques, peuvent interagir avec les sites actifs de l'acier et stabiliser une couche adsorbée protectrice [2,11,12]. L'éthanol peut également favoriser l'extraction de composés partiellement hydrophobes, renforçant ainsi l'effet barrière du film formé.

Ces observations sont cohérentes avec les travaux d'Ostovari et al. [8], qui ont montré que l'extrait de henné inhibe efficacement la corrosion de l'acier doux en HCl 1 M grâce à l'adsorption de composés organiques actifs. Ainsi, l'extrait CAI-EtOH apparaît comme un inhibiteur performant en milieu acide, capable de maintenir la vitesse de corrosion à des valeurs très faibles pendant la durée de l'essai.

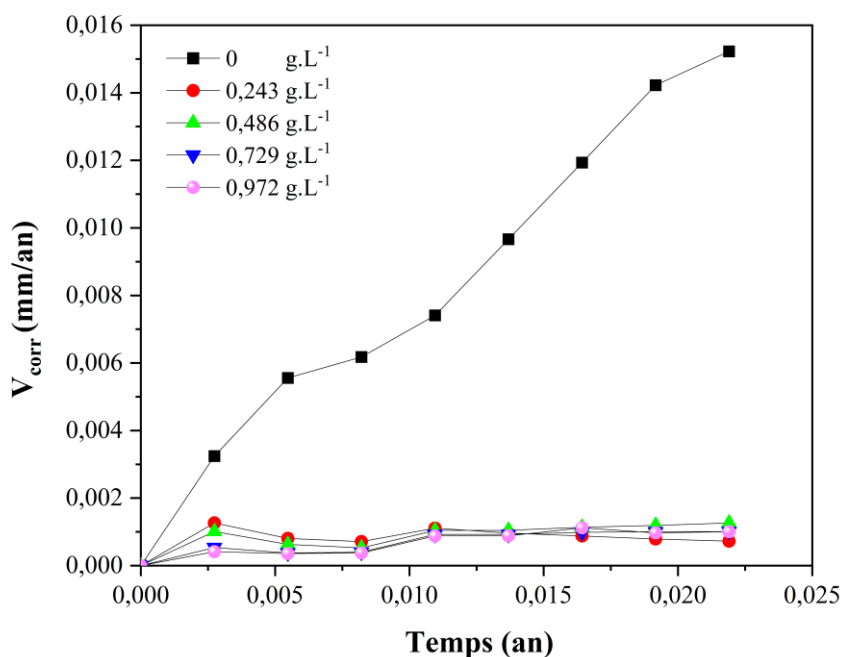


Figure III.5 : Évolution de la vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction du temps en présence de CAI-EtOH.

III.1.2.3 *Cistus Libanitus* L. (CLi-EtOH)

La figure III.7 présente la variation de la vitesse de corrosion de l'acier (V_{corr}) en milieu HCl 1 M après addition de différentes concentrations de l'extrait éthanolique de *Cistus libanotis* L. (CLi-EtOH).

L'extrait CLi-EtOH réduit clairement (V_{corr}) par rapport au témoin, ce qui met en évidence son effet inhibiteur en milieu acide. Les valeurs obtenues restent faibles durant toute la durée d'immersion, indiquant que les composés extraits par l'éthanol participent efficacement à la protection de la surface métallique.

L'évolution des courbes ne suit pas une relation proportionnelle avec la concentration. Certaines concentrations intermédiaires ou élevées assurent une protection plus stable, tandis qu'une augmentation supplémentaire de la dose ne se traduit pas nécessairement par une diminution plus importante de (V_{corr}). Ce comportement peut être expliqué par la nature complexe de l'extrait végétal : à une concentration appropriée, les molécules actives s'adsorbent de manière plus favorable sur l'acier ; en revanche, un excès de matière organique peut favoriser des interactions entre molécules en solution ou une organisation moins homogène du film adsorbé, réduisant ainsi l'efficacité réelle de la protection [2,12].

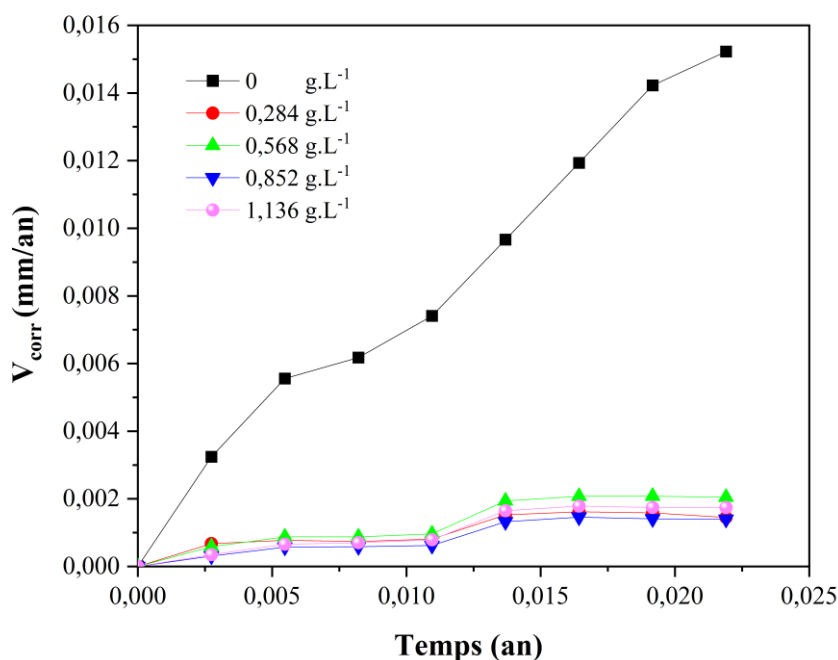


Figure III.6 : Évolution de la vitesse de corrosion (V_{corr}) dans HCl 1 M en absence et en présence de CAL-EtOH.

La meilleure efficacité de CLi-EtOH peut être liée à l'extraction de composés de polarité intermédiaire ou partiellement hydrophobes, capables de former après adsorption un film organique plus compact que celui obtenu avec l'extrait aqueux [14,15]. Cette couche limite la diffusion des ions (H^+) et (Cl^-) vers les sites actifs de l'acier, réduisant ainsi la dissolution anodique du fer et les réactions cathodiques de dégagement d'hydrogène [4–6]. En milieu HCl, la stabilité du film peut être renforcée par une combinaison d'interactions physiques et chimiques : adsorption des espèces protonées, intervention possible des ions chlorure adsorbés, puis ancrage des groupements hydroxyles, carbonyles, des hétéroatomes et des systèmes aromatiques sur la surface métallique. Ces interactions expliquent la protection plus marquée et plus stable.

Des résultats comparables ont été rapportés pour d'autres inhibiteurs naturels en milieu HCl. L'extrait de *Cistus monspeliensis* a montré une activité anticorrosive intéressante en HCl 1 M, attribuée à sa richesse en composés phénoliques [14]. De même, les extraits de *Cryptocarya nigra*, *Schinopsis lorentzii*, *Pimenta dioica* et *Pistia stratiotes* ont confirmé que l'efficacité des inhibiteurs végétaux dépend fortement de la composition chimique de l'extrait, de la concentration utilisée et de la stabilité du film formé sur la surface métallique [16–18].

III.2 Évaluation de l'efficacité inhibitrice des extraits végétaux en milieu neutre NaCl 3%

En milieu NaCl 3 %, le suivi de la corrosion est basé sur l'évolution de la perte de masse (W) au cours du temps. Contrairement au milieu acide HCl 1 M, la corrosion n'est pas dominée par la réduction des protons, mais par l'action des ions chlorure, qui favorisent la rupture des films protecteurs et la corrosion localisée. Dans ce milieu, un bon inhibiteur doit donc non seulement réduire la perte de masse, mais aussi maintenir la protection au cours de l'immersion.

III.2.1 Effet des extraits aqueux

III.2.1.1 *Cleome arabica* L. (CAr-Aq)

La figure III.7 illustre la variation de la perte de masse de l'acier (W) en milieu NaCl 3 %, sans inhibiteur et après addition de différentes concentrations de l'extrait aqueux de *Cleome arabica* L. (CAr-Aq).

Le témoin montre une augmentation continue de (W) au cours de l'immersion, atteignant environ $0,0016 \text{ g.cm}^{-2}$ après 13 jours. Cette évolution traduit une attaque progressive de la

surface métallique en milieu chloruré. En présence de CAr-Aq, la perte de masse est nettement réduite pour toutes les concentrations étudiées, avec un effet plus marqué lorsque la dose d'extrait augmente. Cette évolution traduit un recouvrement progressif de la surface de l'acier par les composés hydrosolubles de l'extrait. En s'adsorbant sur les zones actives du métal, ces molécules limitent le contact direct avec la solution saline et ralentissent la pénétration des ions (Cl^-), responsables de l'attaque localisée en milieu chloruré [19–21].

La concentration de $1,56 \text{ g.L}^{-1}$ présente la meilleure performance. A cette concentration, la perte de masse reste très faible et se stabilise autour de $0,0003 \text{ g.cm}^{-2}$. Cette valeur montre que la surface est mieux protégée, probablement grâce à un recouvrement plus important par les molécules organiques de l'extrait. La progression observée entre $0,39$ et $1,56 \text{ g.L}^{-1}$ confirme donc une relation favorable entre la concentration et le pouvoir inhibiteur dans ce milieu.

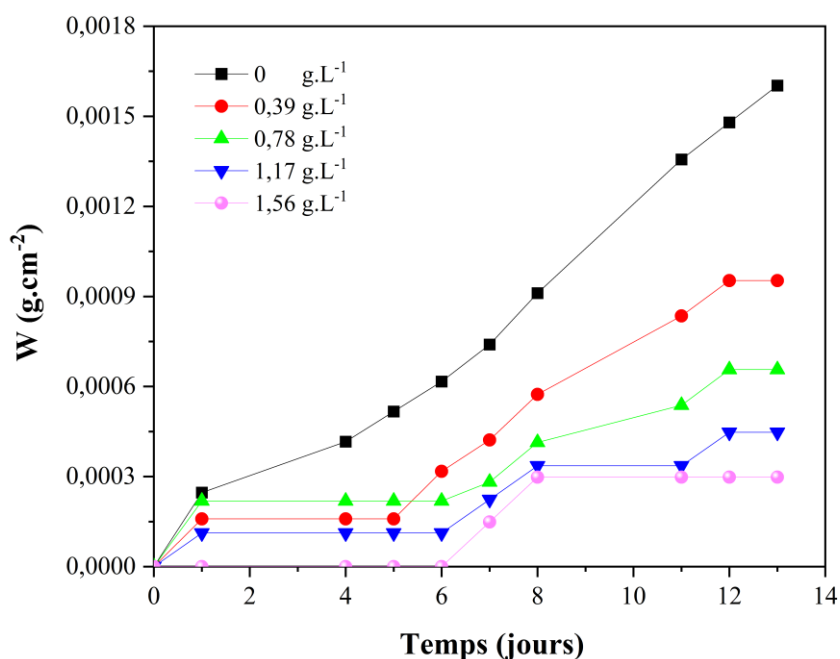


Figure III.7 : Évolution de la perte de masse (W) en fonction du temps en présence de CAr-Aq.

La figure III.8 montre que l'efficacité inhibitrice augmente également avec la concentration. Après 6 jours d'immersion dans NaCl 3%, la protection est particulièrement élevée, atteignant presque 100 % à la concentration de $1,56 \text{ g.L}^{-1}$. Après 13 jours, le rendement diminue légèrement, mais reste important, autour de 81,4 % à la concentration maximale. Cette

diminution peut s'expliquer par la pénétration progressive des ions (Cl^-) dans les défauts du film organique, ce qui fragilise localement la couche protectrice et favorise la corrosion localisée [22,23]. Ce phénomène est typique des milieux salins, où la durabilité de l'inhibition dépend fortement de la compacité, de l'adhérence et de la résistance du film adsorbé face à l'action agressive des ions chlorure [19,21,22].

L'efficacité de CAr-Aq peut être attribuée aux composés polaires présents dans l'extrait, capables de s'adsorber rapidement sur la surface métallique par leurs groupements fonctionnels. Ces molécules forment une couche organique qui ralentit le transfert de matière et limite le contact entre l'acier et la solution chlorurée. Des résultats proches ont été rapportés pour des extraits naturels étudiés en NaCl 3,5 %, notamment ceux de *Levisticum officinale* et de *Citrus clementine*, avec des rendements inhibiteurs pouvant atteindre 87,8 % [19]. Une inhibition significative a également été observée avec l'huile essentielle de *Thymus satureoides* en NaCl 3 %, dont l'efficacité atteint 82 % à 1600 ppm [20].

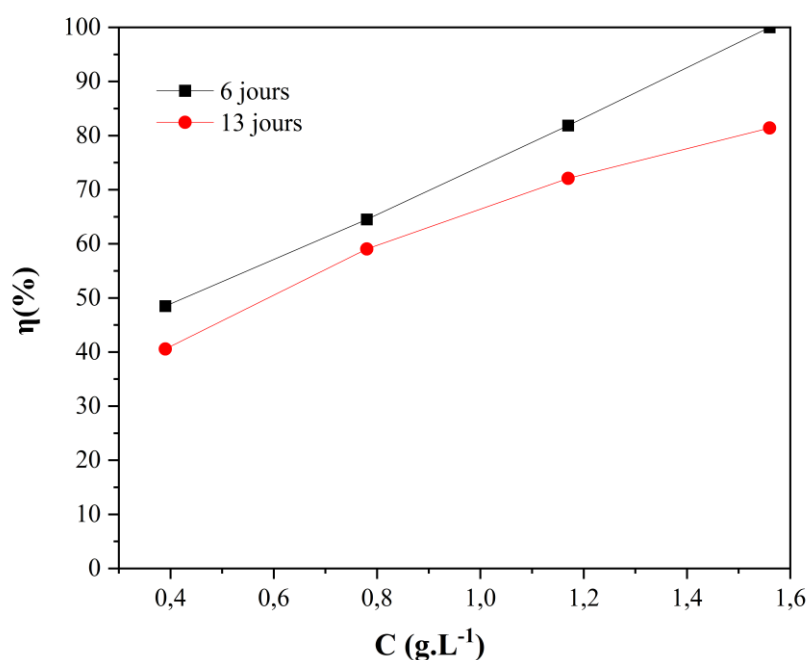


Figure III.8 : Efficacité inhibitrice de CAr-Aq en milieu NaCl 3 % après 6 et 13 jours d'immersion.

L'extrait aqueux de *Cleome arabica* L. apparaît donc comme un candidat particulièrement intéressant pour la protection de l'acier en milieu NaCl 3 %. Son efficacité élevée et sa

dépendance positive à la concentration indiquent une adsorption efficace et une bonne couverture de surface. Toutefois, la légère baisse de l'efficacité inhibitrice entre 6 et 13 jours montre que la durabilité du film doit être confirmée par des essais plus longs et par des observations de surface.

III.2.1.2 *Cistus albidus* L. (CAI-Aq)

La figure ci-dessous présente la variation temporelle de la perte de masse de l'acier (W) en milieu NaCl 3 %, après addition de différentes concentrations de l'extrait aqueux de *Cistus albidus* L. (CAI-Aq).

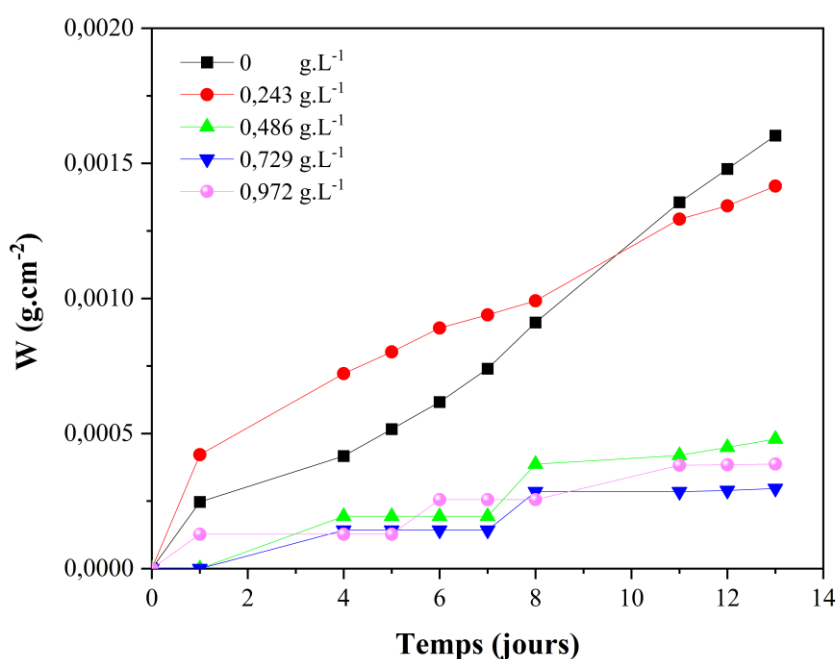


Figure III.9 : Évolution de la perte de masse (W) en milieu NaCl 3 % en présence de l'extrait CAI-Aq.

A 0,243 g.L^{-1} , la perte de masse augmente dans un premier temps, ce qui montre que cette faible concentration ne permet pas de recouvrir suffisamment la surface de l'acier. Les ions (Cl^-) peuvent alors atteindre les zones non protégées et favoriser une attaque localisée. La diminution observée après environ 11 jours peut être attribuée à une réorganisation progressive des molécules organiques adsorbées, éventuellement associée à la formation de produits de corrosion adhérents. Ces derniers peuvent limiter temporairement l'accès des ions chlorure à la

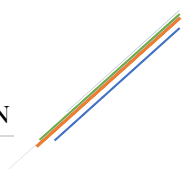
surface métallique, sans assurer une véritable protection du métal. Ainsi, à faible concentration, le film formé reste instable et insuffisamment compact pour inhiber efficacement la corrosion en milieu chloruré [19,22,23]. Cette interprétation est appuyée par le faible rendement inhibiteur obtenu après 13 jours d'immersion, soit seulement 11,66 % (tableau III.1).

L'augmentation de la concentration améliore nettement l'efficacité de CAI-Aq. Le rendement atteint 70,07 % à 0,486 g.L⁻¹, puis un maximum de 81,48 % à 0,729 g.L⁻¹, concentration qui peut être considérée comme optimale dans les conditions étudiées. Cependant, à 0,972 g.L⁻¹, le rendement diminue légèrement à 75,85 %. Cette évolution montre que la protection ne dépend pas uniquement de la quantité d'extrait ajoutée, mais aussi de l'organisation des molécules adsorbées à l'interface métal/solution. Une concentration trop élevée peut favoriser des interactions entre constituants organiques en solution, réduisant leur disponibilité pour l'adsorption sur l'acier [19–21].

Tableau III.1 : Efficacité inhibitrice en fonction de la concentration de CAI-Aq après 13 jours d'immersion dans le milieu NaCl 3 %.

Concentration de CAI-Aq (g.L ⁻¹)	$\eta(\%)$
0,243	11,66
0,486	70,07
0,729	81,48
0,972	75,85

Ces résultats montrent que l'efficacité maximale de CAI-Aq résulte d'un équilibre entre la concentration en molécules actives et leur capacité à former un film protecteur homogène. Des travaux réalisés en milieux chlorurés ont rapporté des comportements similaires avec d'autres extraits naturels, notamment ceux de *Levisticum officinale*, *Citrus clementine*, *Thymus satureoides* et la paille de riz [19–21]. Ces études confirment que les extraits végétaux peuvent limiter l'action des ions chlorure lorsqu'ils forment une couche adsorbée suffisamment stable à la surface métallique.



III.2.1.3 *Cistus Libanitus* L. (CLi-Aq)

La figure III.10 présente la variation en fonction du temps d'immersion de la perte de masse de l'acier (W) en milieu NaCl 3 %, en absence et en présence de différentes concentrations de l'extrait aqueux de *Cistus libanotis* L. (CLi-Aq).

L'extrait CLi-Aq réduit globalement la perte de masse de l'acier par rapport au témoin, mais son efficacité dépend fortement de la concentration utilisée. Après 13 jours d'immersion, l'efficacité inhibitrice ($\eta(\%)$) passe de 31,88 % à 0,243 g.L⁻¹ à une valeur maximale de 61,86 % à 0,486 g.L⁻¹. Cette dernière concentration peut donc être retenue comme la concentration optimale dans les conditions étudiées. A 0,729 g.L⁻¹, le rendement reste proche du maximum ((57,22 %)), alors qu'il diminue nettement à 0,972 g.L⁻¹ ((33,75 %)). Cette évolution montre qu'une augmentation de la concentration d'extrait n'améliore pas systématiquement la protection.

Tableau III.2 : Efficacité inhibitrice de CLi-Aq après 13 jours d'immersion en milieu NaCl 3 %.

Concentration de CLi-Aq (g.L ⁻¹)	(W) après 13 jours (g.cm ⁻²)	$\eta(\%)$
0	0,00160	—
0,243	0,00109	31,88
0,486	0,000610	61,86
0,729	0,000685	57,22
0,972	0,00106	33,75

Ce comportement peut être lié à l'organisation des molécules adsorbées à l'interface métal/solution. A concentration appropriée, les composés hydrosolubles de CLi-Aq peuvent se fixer efficacement sur les zones actives de l'acier et réduire son exposition au milieu salin. En revanche, une concentration trop élevée peut favoriser des interactions entre molécules organiques en solution ou conduire à un dépôt moins homogène, ce qui limite le recouvrement protecteur réel. Des observations similaires ont été rapportées pour d'autres inhibiteurs naturels

en milieu NaCl 3,5 %, où la meilleure efficacité est obtenue à une concentration optimale et non à la dose la plus élevée [24,25].

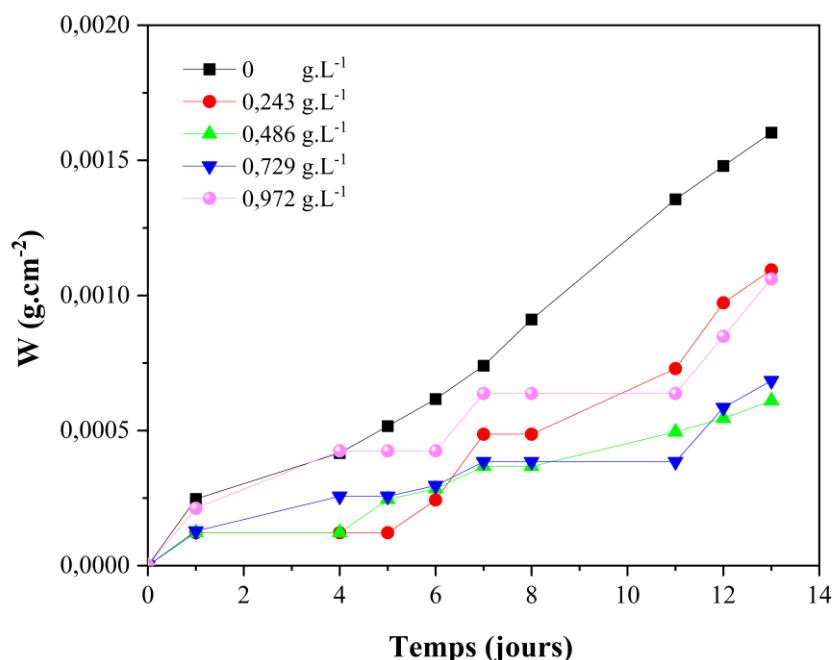


Figure III.10 : Évolution de la perte de masse (W) en milieu NaCl 3 % en présence de l'extrait CLi-Aq.

La protection observée peut être attribuée à l'adsorption de molécules organiques hydrosolubles sur la surface de l'acier, limitant ainsi le contact direct avec la solution chlorurée. Toutefois, en milieu NaCl, la stabilité et l'homogénéité de cette couche restent déterminantes, car les ions chlorure peuvent exploiter les défauts locaux du film et relancer l'attaque de la surface métallique. Les travaux réalisés sur les extraits de *Myrmecodia pendans*, *Allium sativum* et *Nigella sativa* confirment que l'efficacité des inhibiteurs végétaux en milieu salin dépend essentiellement de la qualité du film adsorbé et de son aptitude à résister à l'action des ions (Cl^-) [24–26].

Ainsi, l'extrait aqueux de *Cistus libanotis* L. présente un potentiel inhibiteur réel en milieu NaCl 3 %, avec une efficacité maximale à 0,486 g.L⁻¹. La baisse du rendement aux concentrations plus élevées montre l'importance d'optimiser la dose afin d'obtenir une couche protectrice plus stable et plus homogène.

III.2.2 Effet des extraits éthanoliques

Dans cette partie, l'objectif est d'examiner l'effet des extraits éthanoliques sur la perte de masse de l'acier en milieu NaCl 3 %. Ces extraits peuvent contenir des composés moins polaires que ceux extraits par l'eau, ce qui peut influencer la nature du film formé à la surface métallique et sa résistance face aux ions (Cl^-).

III.2.2.1 *Cleome arabica* L. (CAr-EtOH)

La figure III.11 met en évidence l'évolution temporelle de la perte de masse de l'acier (W) dans le milieu NaCl à 3%, en absence et en présence de différentes concentrations de l'extrait éthanolique de *Cleome arabica* L. (CAr-EtOH).

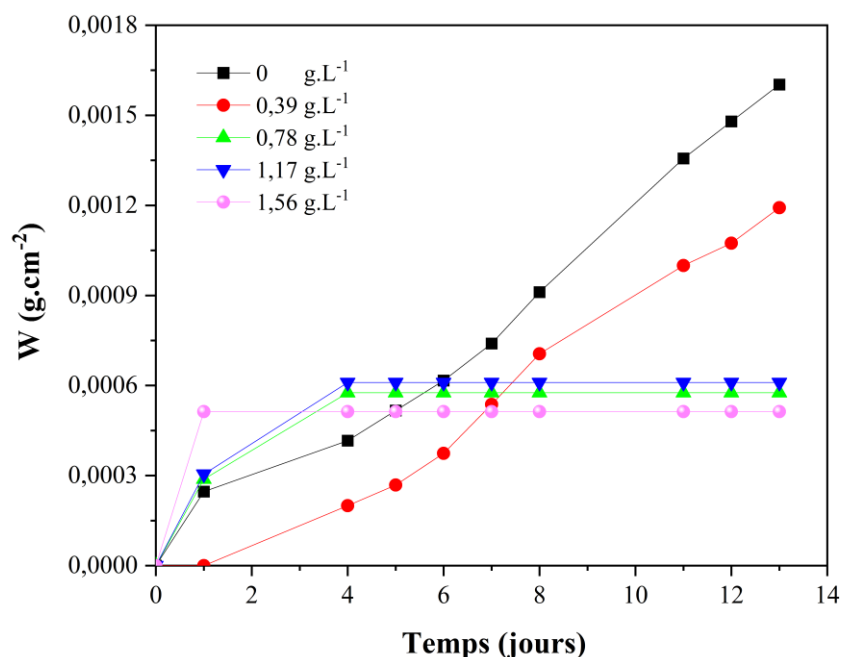


Figure III.11 : Évolution de la perte de masse (W) en milieu NaCl 3 % en présence de l'extrait CAr-EtOH.

Avant 5 jours d'immersion, certaines courbes obtenues en présence de CAr-EtOH présentent des valeurs de (W) supérieures à celles du témoin. Ce comportement indique que l'action inhibitrice de l'extrait n'est pas immédiate. Durant cette phase initiale, les molécules organiques ne semblent pas encore suffisamment organisées pour former une couche protectrice continue.

Une adsorption partielle peut alors créer une interface hétérogène, laissant des zones de l'acier accessibles aux ions (Cl^-). Il est également possible que certains constituants de l'extrait modifient temporairement l'état de surface ou favorisent la solubilisation de produits de corrosion peu adhérents [22,23,27].

Après environ 5 jours, l'évolution devient plus favorable, notamment aux concentrations de 0,78, 1,17 et 1,56 g.L^{-1} . Les courbes tendent vers un palier traduisant une stabilisation progressive de la couche adsorbée. La concentration de 1,56 g.L^{-1} donne la perte de poids la plus faible et peut être considérée comme la concentration optimale. A cette concentration, la quantité de composés actifs semble suffisante pour assurer un recouvrement plus continu de la surface. En revanche, à 0,39 g.L^{-1} , la protection reste limitée, probablement en raison d'un film incomplet et plus vulnérable à l'attaque chlorurée [24,27,28].

Ces résultats peuvent être rapprochés de plusieurs travaux menés en milieux salins. Haddadi et al. ont montré que l'extrait de coque verte de *Juglans regia* protège efficacement l'acier doux en NaCl 3,5 % grâce à l'adsorption de molécules organiques formant une barrière protectrice [27]. Royani et al. ont également rapporté une efficacité supérieure à 80 % pour l'extrait d'*Aloe vera* appliqué à l'acier API 5L en environnement marin [28]. D'autres études portant sur les extraits de Terebinth, de *Leucaena leucocephala* et de *Morinda citrifolia* confirment que la performance en milieu chloruré dépend principalement de l'adhérence, de la compacité et de la résistance du film adsorbé face aux ions (Cl^-) [29–31].

III.2.2.2 *Cistus albidus* L. (CAI- EtOH)

La figure ci-dessous présente la variation en fonction du temps de la perte de poids de l'acier en milieu NaCl 3 %, en absence et en présence de l'extrait éthanolique de *Cistus albidus* L. (CAI-EtOH).

L'extrait CAI-EtOH réduit globalement la perte de masse de l'acier par rapport au témoin, confirmant ainsi son action inhibitrice en milieu chloruré. Toutefois, cette protection dépend à la fois de la concentration de l'extrait et du temps d'immersion. Aux concentrations de 0,243 et 0,729 g.L^{-1} , (W) augmente progressivement, indiquant que le film formé n'est pas suffisamment stable pour maintenir une protection stable face aux ions (Cl^-). Ces derniers peuvent pénétrer les défauts de la couche adsorbée et favoriser une corrosion localisée, ce qui explique la remontée progressive de la perte de masse au cours de l'essai [22,23]. Des comportements

similaires ont été rapportés pour d'autres inhibiteurs verts testés en NaCl 3,5 %, où l'efficacité dépend fortement de la concentration optimale et de la qualité du film adsorbé [24,27].

Le comportement observé à $0,486 \text{ g.L}^{-1}$ est particulier. Durant les 5 premiers jours d'immersion, la perte de masse reste pratiquement nulle, ce qui suggère une protection initiale très efficace. Cette stabilité peut être attribuée à une adsorption rapide des composés actifs de l'extrait sur la surface de l'acier. Au-delà de 5 jours, l'augmentation progressive de (W) indique une fragilisation partielle du film, probablement liée à la pénétration des ions (Cl^-) dans certaines zones moins compactes ou à une désorption progressive de molécules inhibitrices [22,23].

Après 13 jours d'immersion, la concentration de $0,972 \text{ g.L}^{-1}$ donne les plus faibles valeurs de (W) et peut donc être considérée comme la concentration optimale. A cette concentration, les composés éthanol-solubles semblent former une couche plus résistante à l'attaque prolongée des ions chlorure. L'efficacité de CAI-EtOH dépend ainsi moins de la quantité totale d'extrait ajoutée que de l'organisation des molécules adsorbées à l'interface métal/solution. Lorsque cette couche est homogène et suffisamment compacte, elle limite mieux l'accès des espèces agressives à la surface de l'acier [27–31].

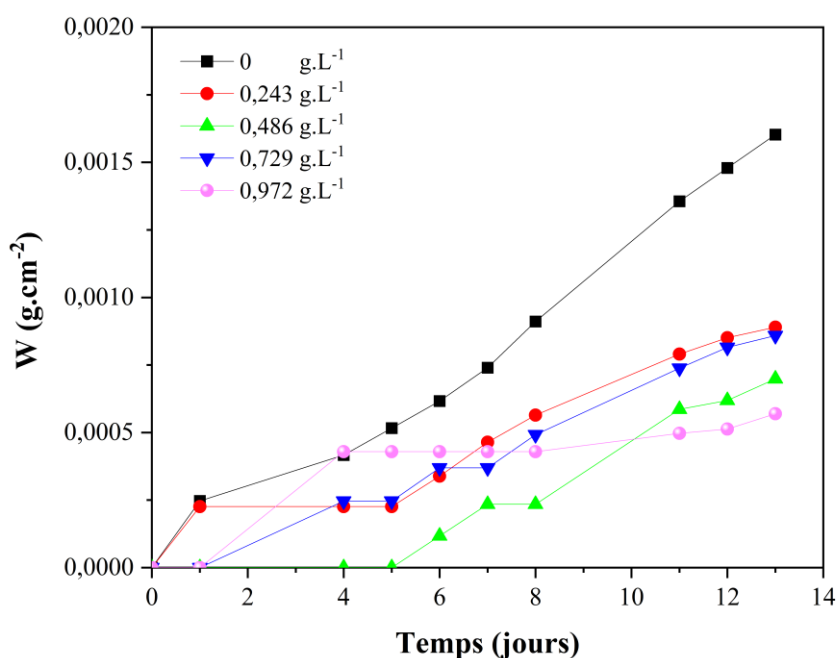


Figure III.12 : Évolution de la perte de masse (W) en milieu NaCl 3 % en présence de l'extrait CAI-EtOH.

La bonne performance de l'extrait CAI-EtOH peut être reliée à la richesse des espèces du genre *Cistus* en composés phénoliques, tanins et flavonoïdes, connus pour leur capacité à interagir avec les surfaces métalliques par leurs groupements hydroxyles, carbonyles et leurs systèmes aromatiques [32,33]. L'éthanol, en tant que solvant hydroalcoolique, favorise l'extraction de molécules de polarité intermédiaire, susceptibles de renforcer l'effet barrière du film adsorbé [34]. Ainsi, l'extrait éthanolique de *Cistus albidus* L. présente un pouvoir inhibiteur intéressant en milieu NaCl 3 %, avec une protection initiale marquée à 0,486 g.L⁻¹ et une efficacité plus durable à 0,972 g.L⁻¹.

III.2.2.3 *Cistus Libanitus* L. (CLi-EtOH)

La figure ci-dessous montre que l'extrait CLi-EtOH diminue la perte de masse de l'acier par rapport au témoin pour toutes les concentrations étudiées, confirmant son effet inhibiteur en milieu chloruré. Les courbes correspondant à 0,243 g.L⁻¹ et 0,486 g.L⁻¹ sont pratiquement superposées, ce qui indique que l'augmentation de la concentration de 0,243 à 0,486 g.L⁻¹ n'apporte pas d'amélioration significative de la protection. Ces deux concentrations conduisent à des pertes de masse faibles et comparables en fin d'essai.

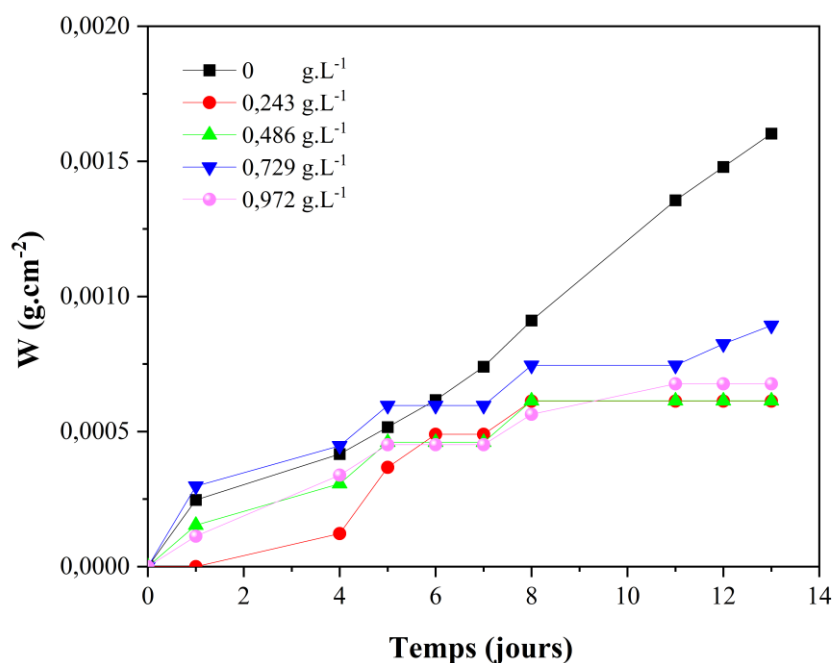


Figure III.13 : Évolution de la perte de masse (W) en milieu NaCl 3 % en présence de l'extrait CLi-EtOH.

Cependant, la concentration de 0,729 g.L⁻¹ présente une perte de masse plus élevée aux temps longs, traduisant une protection moins stable. La concentration de 0,972 g.L⁻¹ montre également une bonne efficacité, mais sans amélioration nette par rapport aux deux premières concentrations. Ainsi, la concentration de 0,243 g.L⁻¹ peut être considérée comme la concentration optimale efficace, car elle permet d'obtenir une protection comparable à celle de 0,486 g.L⁻¹, tout en utilisant une quantité plus faible d'extrait.

Ce comportement montre que l'efficacité de CLi-EtOH ne dépend pas uniquement de la dose ajoutée, mais surtout de l'organisation des molécules adsorbées à la surface de l'acier. Une faible concentration peut suffire à former un film protecteur efficace, tandis qu'une concentration plus élevée peut conduire à une couche moins homogène ou moins stable face à l'action des ions (Cl⁻) [22,23].

III.3. Étude comparative de l'efficacité inhibitrice des extraits végétaux

L'analyse comparative des résultats permet de mieux apprécier le comportement inhibiteur des trois espèces végétales étudiées. Les extraits de *Cleome arabica* L., *Cistus albidus* L. et *Cistus libanotis* L. réduisent tous la corrosion de l'acier, mais leur performance varie selon la nature de la plante, le solvant d'extraction, la concentration appliquée et le milieu corrosif [2,12]. Cette différence montre que l'efficacité d'un inhibiteur naturel dépend surtout de la composition chimique de l'extrait, notamment de la présence de composés phénoliques, flavonoïdes, tanins ou terpènes, ainsi que de leur capacité à s'adsorber sur la surface métallique pour former une couche protectrice stable [3,11,32]. En milieu chloruré, la stabilité de cette couche devient particulièrement importante, car les ions (Cl⁻) peuvent pénétrer les défauts du film et favoriser une corrosion localisée [22,23].

III.3.1. Comparaison entre les trois espèces végétales

Parmi les trois espèces étudiées, *Cleome arabica* L. présente une efficacité remarquable, particulièrement en milieu acide HCl 1 M. Son extrait aqueux agit rapidement et permet de réduire fortement la vitesse de corrosion dès les faibles concentrations. Cette action peut être liée à la présence de composés polaires, notamment des polyphénols et des flavonoïdes, capables de s'adsorber sur l'acier et de limiter la dissolution du fer [2,3].

Cistus albidus L. montre également un comportement très intéressant. Ses extraits aqueux et éthanoliques assurent une bonne protection, souvent à des concentrations modérées. Cette performance peut être expliquée par la richesse des espèces du genre *Cistus* en composés phénoliques, tanins et flavonoïdes, dont les groupements hydroxyles, carbonyles et les cycles aromatiques favorisent l'interaction avec les sites actifs du métal [11,12,32]. Des travaux réalisés sur *Cistus monspeliensis* ont d'ailleurs attribué son activité anticorrosive à l'adsorption de composés phénoliques sur la surface de l'acier [11,14].

Pour *Cistus libanotis* L., l'effet inhibiteur est bien présent, mais il apparaît plus sensible aux conditions expérimentales. En milieu acide, l'extrait aqueux nécessite une concentration plus élevée pour atteindre une protection satisfaisante. En milieu NaCl 3 %, son efficacité reste plus modérée, surtout sous forme aqueuse, ce qui suggère que le film formé est moins résistant à l'action prolongée des ions chlorure. L'extrait éthanolique améliore toutefois son comportement, probablement grâce à l'extraction de molécules de polarité intermédiaire capables de renforcer l'effet barrière [14,15].

Ainsi, *Cleome arabica* L. se distingue par une action rapide et efficace, tandis que *Cistus albidus* L. offre le meilleur compromis entre protection et quantité d'extrait utilisée. *Cistus libanotis* L. présente un potentiel réel, mais son efficacité nécessite une optimisation plus poussée, notamment en ce qui concerne la concentration et le choix du solvant.

III.3.2. Comparaison entre les extraits aqueux et éthanoliques

Le solvant d'extraction joue un rôle important dans la performance inhibitrice. Les extraits aqueux renferment principalement des composés polaires, capables de se fixer rapidement sur la surface métallique grâce à leurs groupements fonctionnels. Cette propriété explique la bonne efficacité observée pour certains extraits aqueux, en particulier CAr-Aq en HCl 1 M et en NaCl 3 % [2,19].

Les extraits éthanoliques, quant à eux, peuvent contenir des molécules moins polaires ou partiellement hydrophobes. Après adsorption, ces composés peuvent former un film plus compact, moins perméable à l'eau et aux espèces agressives. Cet effet est particulièrement utile en milieu chloruré, où la durabilité de la protection dépend fortement de la résistance du film face aux ions (Cl^-) [22,23].

Cependant, les résultats montrent que l'extrait éthanolique n'est pas toujours plus performant que l'extrait aqueux. Dans certains cas, les molécules hydrosolubles assurent une adsorption initiale plus efficace, alors que les composés extraits par l'éthanol contribuent davantage à la stabilité du film à long terme. L'efficacité optimale semble donc résulter d'une complémentarité entre les molécules polaires, qui favorisent la fixation sur la surface de l'acier, et les molécules plus hydrophobes, qui renforcent l'effet barrière du film protecteur. Cette synergie est souvent rapportée dans les travaux sur les inhibiteurs verts, où la performance dépend du solvant d'extraction, de la composition chimique de l'extrait et de l'organisation du film adsorbé à l'interface métal/solution [2,12,27,28].

III.3.3. Influence du milieu corrosif sur l'efficacité inhibitrice

Le passage du milieu acide HCl 1 M au milieu neutre chloruré NaCl 3 % modifie nettement le comportement des extraits. En HCl 1 M, la corrosion est principalement liée à la dissolution du fer et au dégagement d'hydrogène. Dans ce cas, les molécules organiques peuvent être protonées puis s'adsorber sur la surface métallique, ce qui entraîne une diminution rapide de la vitesse de corrosion [4–6].

En milieu NaCl 3 %, le mécanisme est plus progressif. Les ions chlorure peuvent pénétrer les défauts du film protecteur et provoquer une corrosion localisée. Ainsi, un extrait peut donner une bonne protection au début de l'immersion, puis perdre une partie de son efficacité si la couche adsorbée devient moins compacte ou moins adhérente avec le temps [22,23].

Cette différence explique pourquoi certaines concentrations très efficaces en milieu acide ne donnent pas nécessairement les meilleurs résultats en milieu salin. En NaCl 3 %, la concentration optimale correspond plutôt à celle qui permet de former un film homogène et stable, capable de résister à l'action prolongée des ions (Cl^-). Dans plusieurs cas, une dose intermédiaire s'est révélée plus favorable qu'une concentration plus élevée, probablement parce qu'elle permet une meilleure organisation des molécules à l'interface métal/solution.

Ces observations sont cohérentes avec les travaux consacrés aux extraits naturels en milieux chlorurés. Plusieurs études ont montré que la protection dépend de la concentration optimale, de l'adhérence du film et de sa résistance à la pénétration des ions chlorure [19–21,24–28]. Les résultats obtenus confirment donc que l'efficacité des extraits végétaux repose principalement sur leur capacité à former une couche adsorbée suffisamment stable pour limiter l'accès des espèces corrosives à la surface de l'acier.

En conclusion, les extraits étudiés agissent principalement par adsorption de molécules bioactives sur l'acier. En milieu acide, cette adsorption permet une inhibition rapide de la corrosion, tandis qu'en milieu chloruré, la stabilité du film devient le facteur déterminant. Les extraits de *Cleome arabica* L. et de *Cistus albidus* L. apparaissent comme les plus prometteurs, alors que *Cistus libanotis* L. nécessite une optimisation supplémentaire afin d'améliorer la durabilité de sa protection.

III.4. Isothermes d'adsorption

L'étude des isothermes d'adsorption permet de mieux préciser le mode d'interaction des molécules inhibitrices avec la surface de l'acier. Dans le cas des extraits végétaux, l'effet protecteur est principalement associé à la fixation de composés organiques sur les sites actifs du métal. Cette couche adsorbée agit comme une barrière interfaciale, réduisant l'accès des espèces corrosives à la surface métallique et améliorant ainsi le comportement anticorrosif du matériau [35–37].

Afin d'identifier le modèle décrivant le mieux ce processus, le taux de recouvrement de surface, noté θ , a été déterminé à partir des résultats de perte de masse, puis exploité selon différents modèles d'adsorption. Les isothermes de Langmuir, Temkin et Frumkin ont été retenues, car elles permettent de distinguer une adsorption idéale en monocouche, d'une adsorption plus complexe, influencée par l'hétérogénéité de la surface ou par les interactions entre molécules adsorbées [36–38].

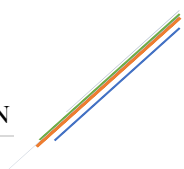
Le modèle de Langmuir suppose que la surface métallique possède un nombre fini de sites d'adsorption équivalents, chaque site pouvant accueillir une seule molécule inhibitrice, sans interaction significative entre les espèces adsorbées. Il est exprimé par la relation suivante [7,36] :

$$\frac{\theta}{1-\theta} = K C \quad (\text{III.3})$$

ou, sous forme linéaire :

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K} + C \quad (\text{III.4})$$

où (C) représente la concentration de l'inhibiteur, (K) la constante d'équilibre d'adsorption et (θ) le taux de recouvrement de la surface métallique. Ce dernier est relié à l'efficacité inhibitrice par la relation :



$$\theta = \frac{\eta(\%)}{100} \quad (\text{III.5})$$

Un bon ajustement au modèle de Langmuir indique que les molécules inhibitrices forment une couche protectrice relativement homogène, proche d'une monocouche. Toutefois, cette interprétation doit rester nuancée dans le cas des extraits végétaux, car ceux-ci sont constitués d'un mélange complexe de composés organiques de tailles, polarités et fonctions chimiques différentes.

Le modèle de Temkin a également été appliqué afin de prendre en compte la variation de l'énergie d'adsorption avec le taux de recouvrement. Ce modèle est donné par l'équation suivante [36,38] :

$$\exp(-2a\theta) = KC \quad (\text{III.6})$$

Le paramètre (a) renseigne sur la nature des interactions entre les molécules adsorbées. Lorsque ce modèle décrit mieux les données expérimentales, cela signifie que l'énergie d'adsorption n'est pas constante et que les premières molécules peuvent se fixer préférentiellement sur les sites les plus actifs de la surface métallique.

Le modèle de Frumkin permet, quant à lui, d'intégrer plus explicitement les interactions latérales entre espèces adsorbées. Il est représenté par l'équation suivante [36,37] :

$$\left(\frac{\theta}{1-\theta}\right) \exp(-2a\theta) = KC \quad (\text{III.7})$$

Un meilleur ajustement à ce modèle traduit une adsorption non idéale, où les molécules fixées à la surface peuvent interagir entre elles. Ces interactions peuvent favoriser la formation d'un film plus compact, mais elles peuvent aussi conduire, à forte concentration, à une organisation moins homogène de la couche protectrice.

La comparaison des coefficients de corrélation (R^2) obtenus pour les trois modèles permet donc de sélectionner l'isotherme la plus représentative du comportement expérimental [36,37]. Un accord satisfaisant avec Langmuir suggère une adsorption proche d'une monocouche, tandis qu'un meilleur ajustement avec Temkin ou Frumkin indique une adsorption plus complexe, influencée par l'état réel de la surface métallique et par les interactions entre les constituants de l'extrait.

Ainsi, les isothermes d'adsorption confirment que l'efficacité inhibitrice des extraits étudiés repose essentiellement sur la formation d'un film organique adsorbé à la surface de l'acier. La

diminution de l'efficacité observée à certaines fortes concentrations peut être attribuée à la saturation des sites actifs, à des interactions entre molécules en solution ou à une organisation moins régulière du film protecteur. L'adsorption apparaît donc comme une étape déterminante dans le mécanisme d'inhibition de la corrosion par les extraits végétaux.

Les Figures III.14 à III.17 présentent les isothermes d'adsorption selon le modèle de Langmuir pour les extraits aqueux et éthanoliques étudiés en milieux HCl 1 M et NaCl 3 %. Les tableaux III.3 et III.4 regroupent, quant à eux, les coefficients de corrélation (R^2) obtenus respectivement avec les modèles de Temkin et de Frumkin. La comparaison de ces coefficients permet d'identifier le modèle qui décrit le mieux le comportement d'adsorption des molécules inhibitrices à la surface de l'acier. En général, plus la valeur de (R^2) est proche de 1, plus l'ajustement du modèle aux résultats expérimentaux est satisfaisant [7,36].

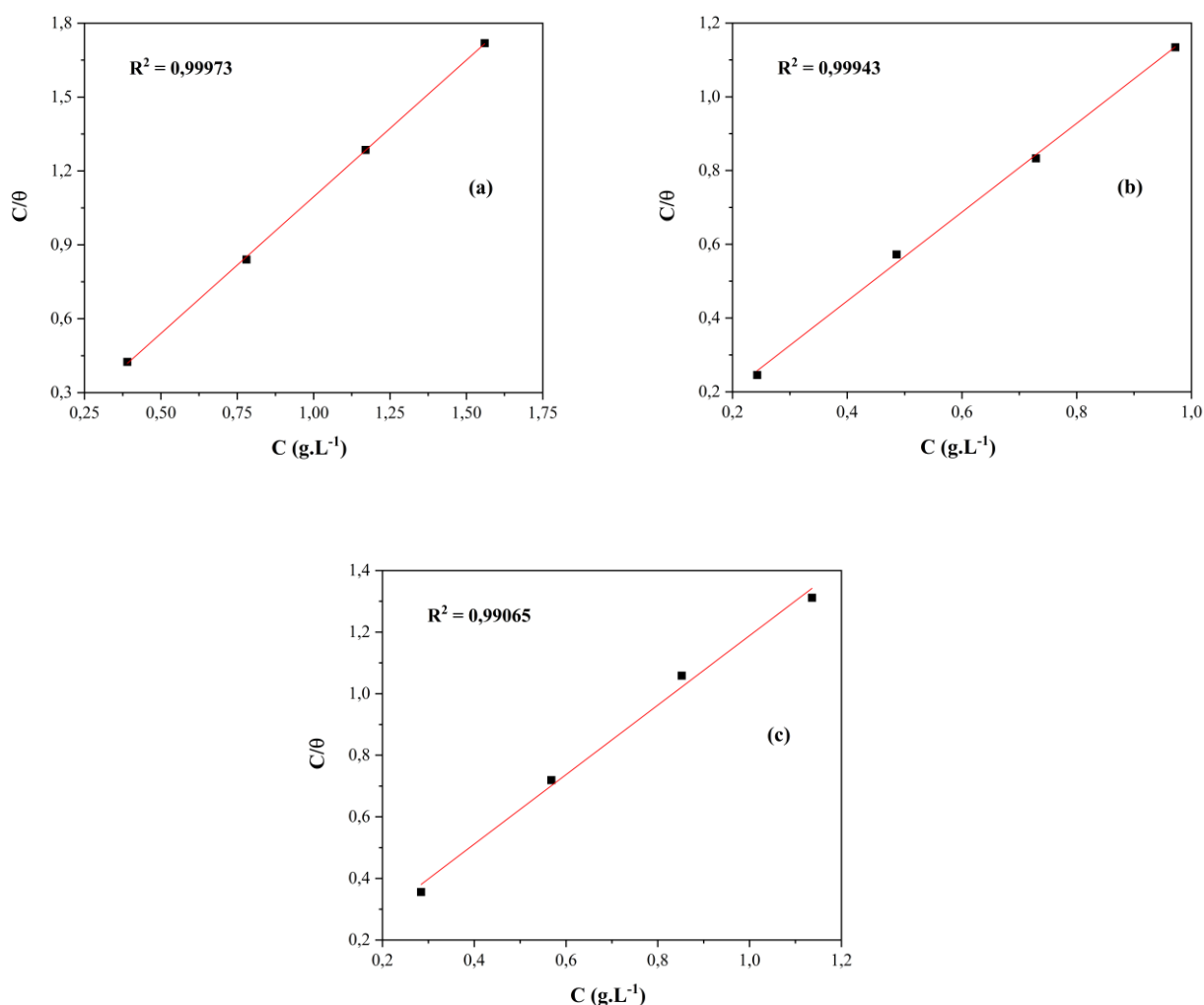


Figure III.14 : Isothermes d'adsorption selon le modèle de Langmuir de l'acier dans HCl 1 M en présence des extraits aqueux de : (a) CAr-Aq, (b) CAL-Aq et (c) CLi-Aq.

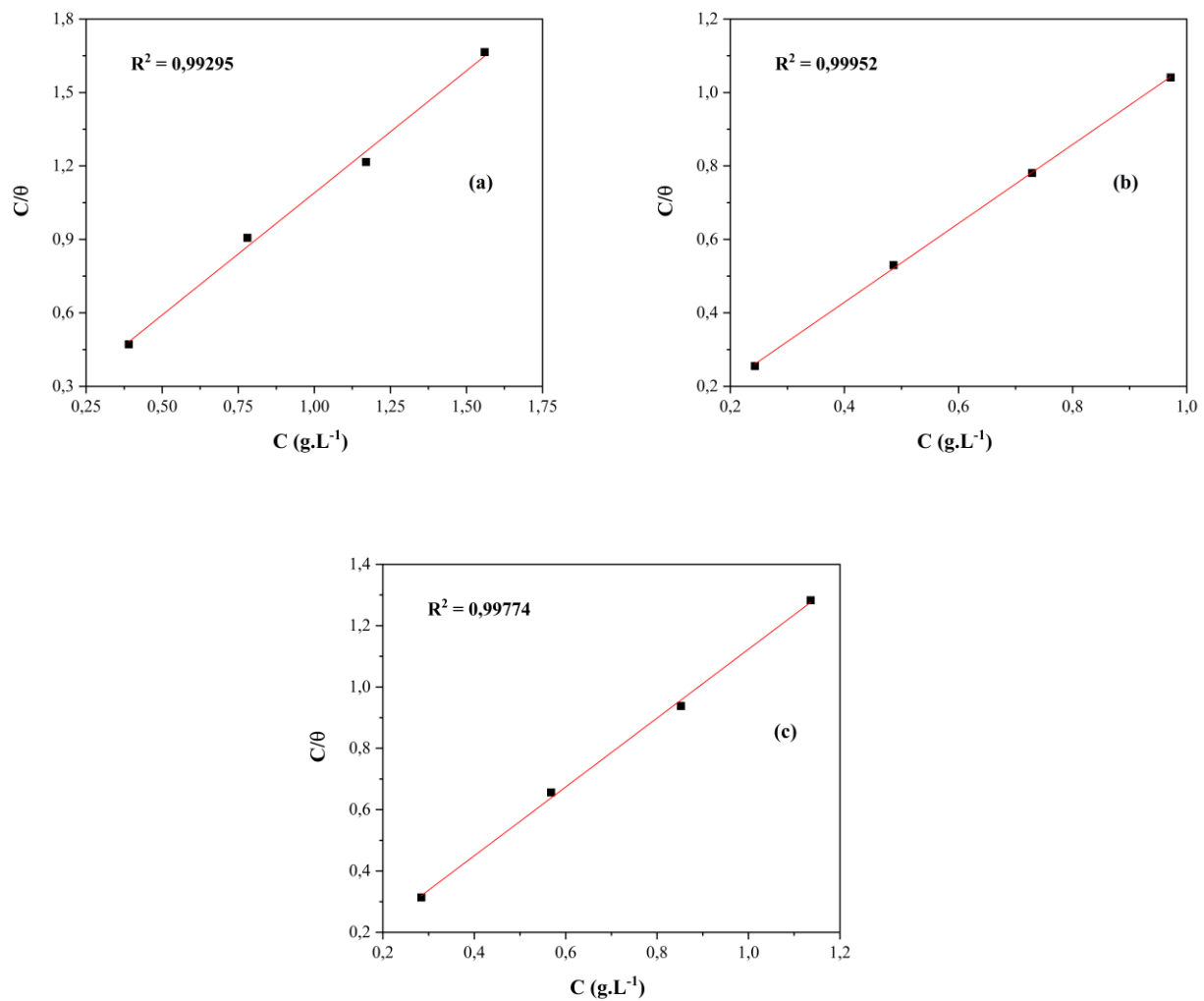


Figure III.15 : Isothermes d'adsorption selon le modèle de Langmuir de l'acier dans HCl 1 M en présence des extraits éthanoliques de : **(a)** CAr-EtOH, **(b)** CAI-EtOH et **(c)** CLi-EtOH.

Tableau III.3 : Coefficients de corrélation (R^2) obtenus selon le modèle de Temkin pour les extraits étudiés en milieux HCl 1 M et NaCl 3 %.

Milieu HCl 1 M				Milieu NaCl 3 %			
Extraits aqueux	R^2	Extraits éthanoliques	R^2	Extraits aqueux	R^2	Extraits éthanoliques	R^2
CAr-Aq	-0,01531	CAr-EtOH	-0,45125	CAr-Aq	0,90406	CAr-EtOH	0,99002
CAI-Aq	0,55447	CAI-EtOH	-0,1177	CAI-Aq	0,74745	CAI-EtOH	0,74745
CLi-Aq	0,21757	CLi-EtOH	-0,45125	CLi-Aq	-0,4336	CLi-EtOH	-0,10169

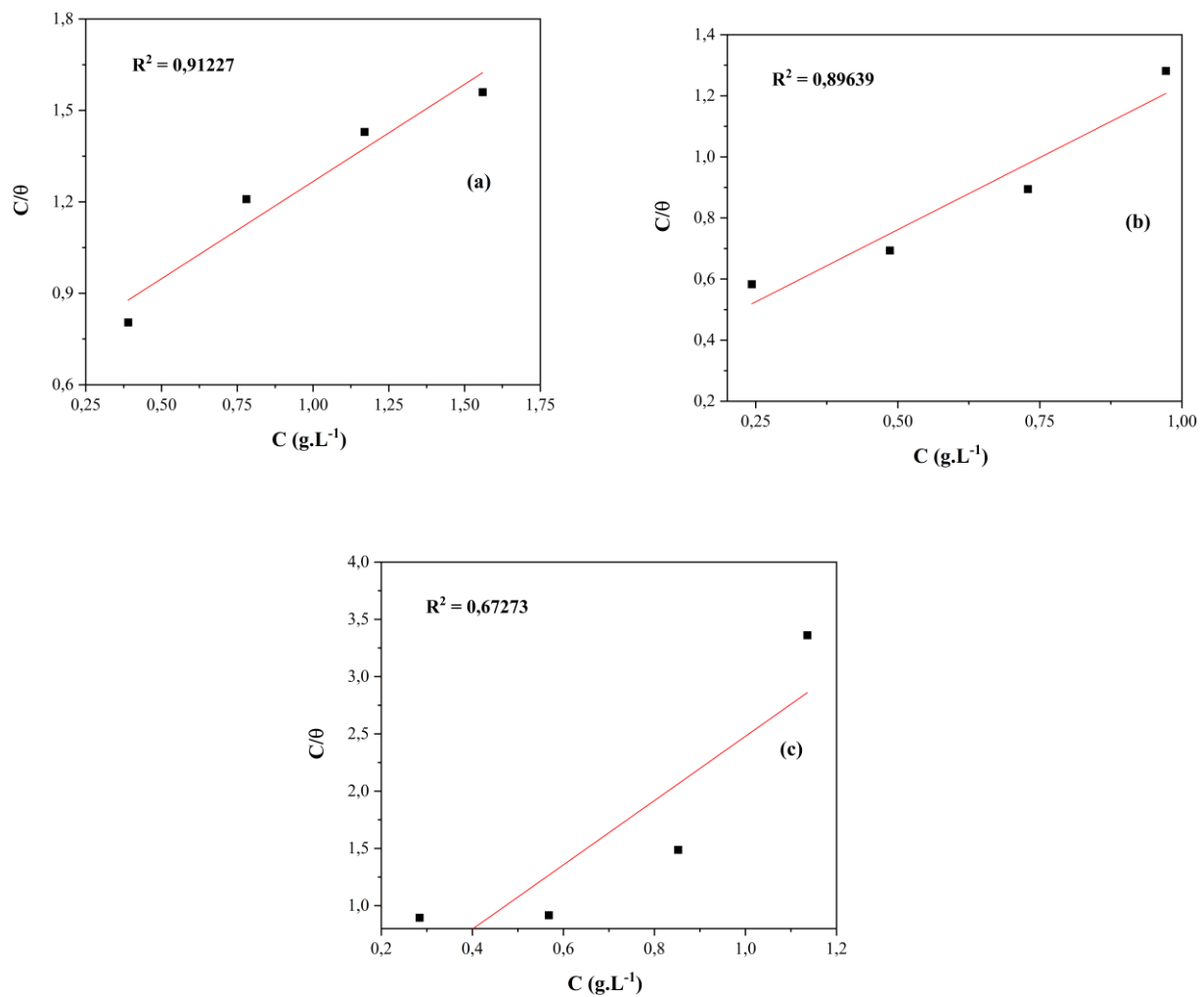


Figure III.16 : Isothermes d'adsorption selon le modèle de Langmuir de l'acier dans NaCl 3 % en présence des extraits aqueux de : **(a)** CAr-Aq, **(b)** CAI-Aq et **(c)** CLi-Aq.

Tableau III.4 : Coefficients de corrélation (R^2) obtenus selon le modèle de Frumkin pour les extraits étudiés en milieu HCl 1 M et NaCl 3 %.

Milieu HCl 1 M				Milieu NaCl 3 %			
Extraits aqueux	R^2	Extraits éthanoliques	R^2	Extraits aqueux	R^2	Extraits éthanoliques	R^2
CAr-Aq	0,20982	CAr-EtOH	0,26028	CAr-Aq	0,71557	CAr-EtOH	0,92142
CAI-Aq	0,92664	CAI-EtOH	-0,18309	CAI-Aq	0,43114	CAI-EtOH	0,76543
CLi-Aq	-0,31167	CLi-EtOH	-0,18309	CLi-Aq	0,16247	CLi-EtOH	0,41345

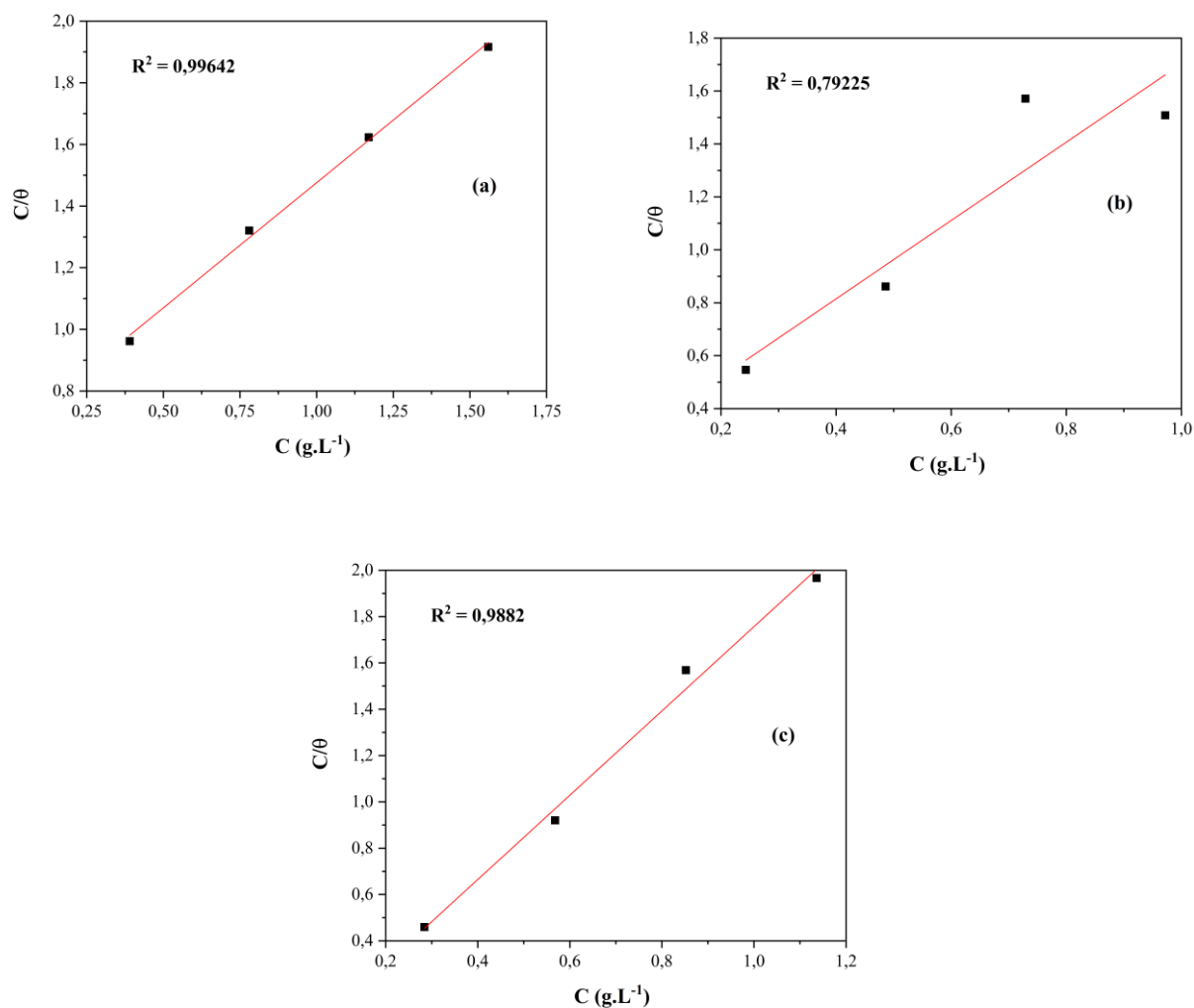


Figure III.17 : Isothermes d'adsorption selon le modèle de Langmuir de l'acier dans NaCl 3 % en présence des extraits éthanoliques de : **(a)** CAR-EtOH, **(b)** CAL-EtOH et **(c)** CLI-EtOH.

L'analyse comparative des résultats montre que le modèle de Langmuir présente les meilleurs coefficients de corrélation pour la majorité des extraits étudiés. Ce modèle peut donc être retenu comme le plus représentatif du mécanisme d'adsorption dominant. Il suggère que les molécules inhibitrices présentes dans les extraits végétaux se fixent progressivement sur les sites actifs de l'acier, conduisant à la formation d'un film organique protecteur. Ce comportement est cohérent avec les travaux rapportant que les inhibiteurs végétaux agissent principalement par adsorption de composés riches en groupements hydroxyles, carbonyles, hétéroatomes et systèmes aromatiques à la surface métallique [7,2,3,36]. Les faibles valeurs de (R^2), ainsi que les valeurs

rapportées comme négatives, traduisent un mauvais ajustement des modèles de Temkin ou de Frumkin aux données expérimentales.

III.5. Discussion générale du mécanisme d'inhibition

Les résultats obtenus en milieux HCl 1 M et NaCl 3 % indiquent que l'action inhibitrice des extraits aqueux et éthanoliques repose essentiellement sur un phénomène d'adsorption à l'interface acier/solution. Les molécules bioactives issues de *Cleome arabica* L., *Cistus albidus* L. et *Cistus libanotis* L. se fixent sur les zones réactives de l'acier et réduisent ainsi l'accès des espèces corrosives. Cette interprétation est cohérente avec le mécanisme général proposé pour les inhibiteurs organiques, où la protection résulte de la formation d'une couche adsorbée capable de bloquer les sites anodiques et cathodiques [39].

En milieu HCl 1 M, la corrosion de l'acier est principalement contrôlée par deux réactions électrochimiques complémentaires : la dissolution anodique du fer et la réduction cathodique des protons. La réaction anodique peut être représentée par :



Les électrons libérés sont consommés au niveau des zones cathodiques par réduction des ions hydrogène :

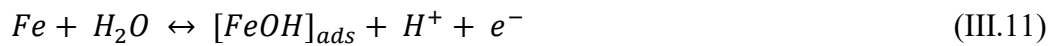


La réaction globale de corrosion en milieu acide peut alors s'écrire :

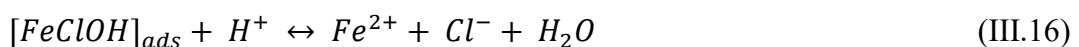
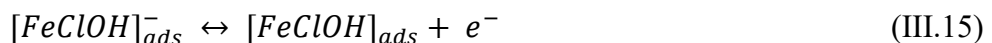
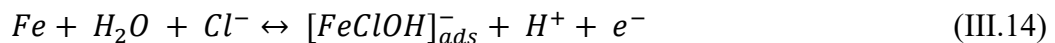


Dans un milieu chloruré acide, des espèces intermédiaires adsorbées telles que $[FeOH]_{ads}$ et $[FeClOH]_{ads}$ peuvent participer à la dissolution progressive du métal. L'ajout d'un extrait végétal modifie cette interface : les molécules organiques remplacent une partie des molécules d'eau adsorbées et forment des espèces de type $Fe - Inh_{ads}$. Cette étape ralentit la formation des intermédiaires responsables de la dissolution du fer [39,43].

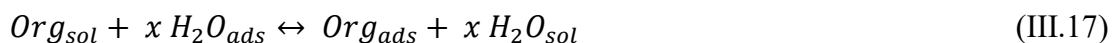
Dans un milieu chloruré acide, les ions Cl^{-} peuvent accélérer la dissolution du fer en favorisant la formation d'espèces intermédiaires adsorbées. Ces espèces jouent un rôle dans le passage du fer métallique vers les ions Fe^{2+} en solution [39,43]. Le chemin réactionnel peut être schématisé par les étapes suivantes :



En présence d'ions chlorure, un autre chemin implique la formation d'un complexe chloré adsorbé :

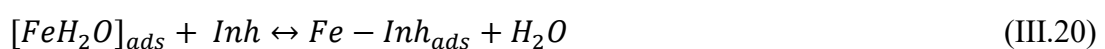
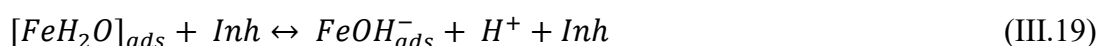


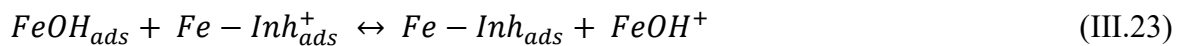
Le processus peut être résumé par une réaction de substitution interfaciale [39,40] :



Dans cette équation, Org_{sol} et Org_{ads} désignent respectivement les molécules inhibitrices en solution et celles adsorbées à la surface du métal. Les termes H_2O_{sol} et H_2O_{ads} correspondent aux molécules d'eau en solution et adsorbées. Le paramètre x représente le nombre de molécules d'eau déplacées par une molécule inhibitrice. Il dépend de la taille, de l'orientation et de la géométrie de la molécule adsorbée. Une structure relativement plane favorise un meilleur recouvrement de la surface métallique et améliore ainsi la compacité du film protecteur.

Les inhibiteurs entraînent également la formation d'intermédiaires adsorbés de type métal-inhibiteur. Ces espèces réduisent la disponibilité des sites actifs et ralentissent la libération des ions ferreux dans la solution. Ce phénomène peut être représenté par les équilibres suivants [43,44] :





La formation du complexe $Fe - Inh_{ads}$ traduit la fixation des molécules inhibitrices sur la surface métallique. Cette fixation peut se produire par physisorption, à travers des interactions électrostatiques entre les espèces protonées, les ions chlorure adsorbés et la surface métallique, mais aussi par chimisorption grâce aux doublets électroniques des hétéroatomes tels que O, N ou S et aux électrons π des cycles aromatiques. Ces interactions favorisent la formation d'un film organique plus stable et plus adhérent [39].

En milieu NaCl 3 %, le rôle des ions chlorure devient dominant. Ces ions peuvent s'insérer dans les défauts du film adsorbé et initier une attaque localisée. Dans ce cas, la protection ne dépend pas seulement de la quantité d'extrait adsorbée, mais aussi de la compacité, de l'adhérence et de la stabilité de la couche formée. Les extraits capables de produire un film plus continu limitent mieux la pénétration des ions Cl^- et réduisent la perte de masse de l'acier [12,22].

Les différences observées entre extraits aqueux et éthanoliques peuvent être reliées à la nature des composés extraits. Les extraits aqueux contiennent surtout des molécules polaires et hydrosolubles, tandis que les extraits éthanoliques peuvent renfermer des constituants moins polaires ou partiellement hydrophobes. Ces derniers peuvent renforcer l'effet barrière du film, notamment lorsque le milieu est riche en ions chlorure [40].

Les isothermes d'adsorption confirment cette interprétation. Le meilleur ajustement au modèle de Langmuir suggère une adsorption dominante proche d'un recouvrement en monocouche. Néanmoins, les contributions de Temkin et de Frumkin observées pour certains extraits montrent que l'adsorption réelle peut s'écarter du modèle idéal, en raison de l'hétérogénéité de la surface métallique et des interactions entre molécules adsorbées [39,45].

Ainsi, le mécanisme général d'inhibition peut être décrit comme une succession d'étapes : migration des molécules organiques vers l'interface, remplacement partiel des molécules d'eau adsorbées, fixation sur les sites actifs, puis formation d'un film protecteur. Ce film réduit la dissolution du fer en milieu acide et limite la pénétration des ions chlorure en milieu salin. L'efficacité finale dépend donc de la composition de l'extrait, du solvant d'extraction, de la concentration utilisée et de la stabilité du film adsorbé.

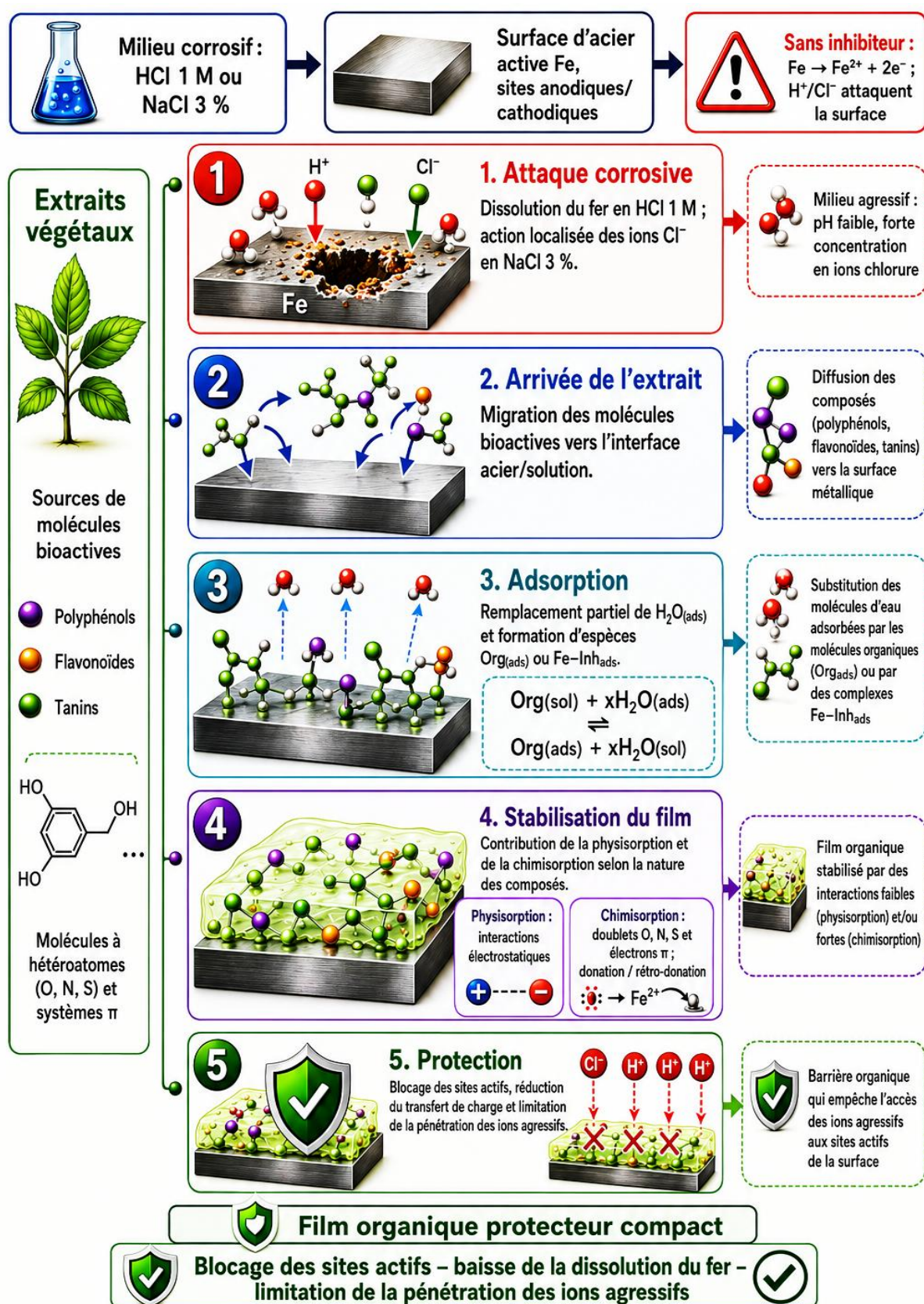
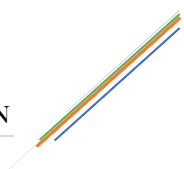


Figure III.18 : Mécanisme proposé d'inhibition de la corrosion de l'acier par les extraits végétaux, inspiré du mécanisme réactionnel des inhibiteurs organiques sur les surfaces de fer [39].



III.6. Conclusion

Ce chapitre a montré que les extraits aqueux et éthanoliques de *Cleome arabica* L., *Cistus albidus* L. et *Cistus libanotis* L. réduisent efficacement la corrosion de l'acier en milieux HCl 1 M et NaCl 3 %. Leur action inhibitrice repose principalement sur l'adsorption des molécules bioactives à la surface métallique, entraînant la formation d'un film protecteur qui limite l'accès des espèces corrosives.

En milieu acide, ce film ralentit la dissolution du fer et la réaction cathodique de dégagement d'hydrogène. En milieu salin, la protection dépend surtout de la stabilité de la couche adsorbée face à la pénétration des ions chlorure. Les résultats montrent également que l'efficacité varie selon la plante, le solvant d'extraction et la concentration utilisée.

L'étude des isothermes confirme une adsorption principalement décrite par le modèle de Langmuir, avec certaines contributions liées à l'hétérogénéité de la surface et aux interactions entre molécules adsorbées. Ainsi, les extraits étudiés peuvent être considérés comme des inhibiteurs verts prometteurs pour la protection de l'acier contre la corrosion.

III.7. Références bibliographiques

- [1] Andrade, C., & Alonso, C. (2004). Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures*, 37(9), 623–643. <https://doi.org/10.1007/bf02483292>.
- [2] Miralrio, A., & Vázquez, A. E. (2020). Plant extracts as green corrosion inhibitors for different metal surfaces and corrosive media: a review. *Processes*, 8(8), 942. <https://doi.org/10.3390/pr8080942>.
- [3] Ait Bouabdallah, A., Adjal, F., Zaabar, A., Benchikh, A., Guerniche, D., Ramdane-Terbouche, C. A., Piedade, A. P., Ibrahim, M. Z., Nasrallah, N., & Abdi, A. (2024). *Cleome arabica* L. extract as a novel green corrosion inhibitor for AISI 1045 carbon steel in 0.5 M HCl: insights from experimental and theoretical DFT analyses. *RSC Advances*, 14(49), 36423–36436. <https://doi.org/10.1039/d4ra06477a>.
- [4] Yildiz, M., Gerengi, H., Solomon, M. M., Kaya, E., & Umoren, S. A. (2018). Influence of 1-butyl-1-methylpiperidinium tetrafluoroborate on St37 steel dissolution behavior in HCl environment. *Chemical Engineering Communications*, 205(4), 538–548. <https://doi.org/10.1080/00986445.2017.1407759>.

- [5] Kowsari, E., Payami, M., Amini, R., Ramezanzadeh, B., & Javanbakht, M. (2013). Task-specific ionic liquid as a new green inhibitor of mild steel corrosion. *Applied Surface Science*, 289, 478–486. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.11.017>.
- [6] Ahanotu, C. C., Onyeachu, I. B., Solomon, M. M., Chikwe, I. S., Chikwe, O. B., & Eziukwu, C. A. (2019). *Pterocarpus santalinoides* leaves extract as a sustainable and potent inhibitor for low carbon steel in a simulated pickling medium. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 15, 100196. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2019.100196>.
- [7] Langmuir, I. (1918). The Adsorption of Gases on Plane Surfaces of Glass, Mica and Platinum. *Journal of the American Chemical Society*, 40(9), 1361–1403. <https://doi.org/10.1021/ja02242a004>.
- [8] Ostovari, A., Hoseinieh, S., Peikari, M., Shadizadeh, S., & Hashemi, S. (2009). Corrosion inhibition of mild steel in 1M HCl solution by henna extract: A comparative study of the inhibition by henna and its constituents (Lawson, Gallic acid, α -d-Glucose and Tannic acid). *Corrosion Science*, 51(9), 1935–1949. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.05.024>.
- [9] Da Rocha, J. C., Da Cunha Ponciano Gomes, J. A., & D'Elia, E. (2010). Corrosion inhibition of carbon steel in hydrochloric acid solution by fruit peel aqueous extracts. *Corrosion Science*, 52(7), 2341–2348. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.03.033>.
- [10] Satapathy, A., Gunasekaran, G., Sahoo, S., Amit, K., & Rodrigues, P. (2009). Corrosion inhibition by *Justicia gendarussa* plant extract in hydrochloric acid solution. *Corrosion Science*, 51(12), 2848–2856. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.08.016>.
- [11] Mechbal, N., Bouhrim, M., Bnouham, M., Hammouti, B., Karzazi, Y., Kaya, S., & Serdaroğlu, G. (2021). Anticorrosive and antioxidant effect of the aqueous extract of the leaves, flowers, and stems of *Cistus monspeliensis* L: Experimental and computational study. *Journal of Molecular Liquids*, 331, 115771. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115771>.
- [12] Salleh, S. Z., Yusoff, A. H., Zakaria, S. K., Taib, M. a. A., Seman, A. A., Masri, M. N., Mohamad, M., Mamat, S., Sobri, S. A., Ali, A., & Ter Teo, P. (2021). Plant extracts as green corrosion inhibitor for ferrous metal alloys: A review. *Journal of Cleaner Production*, 304, 127030. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127030>.

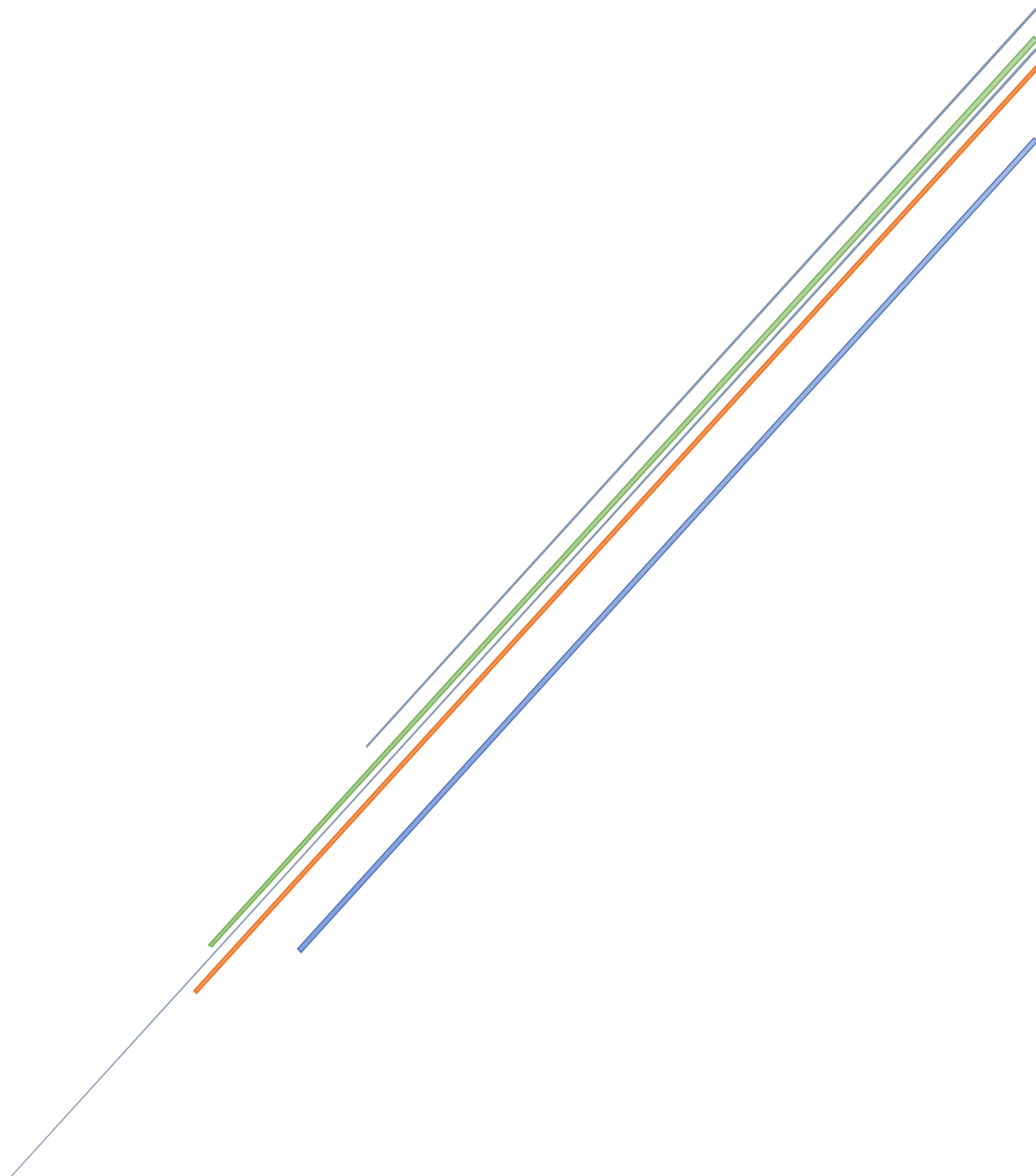
- [13] Alimohammadi, M., Ghaderi, M., SA, A. R., & Mahdavian, M. (2023). *Falcaria vulgaris* leaves extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid media. *Scientific Reports*, 13(1), 3737. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30571-6>.
- [14] Haida, S., Bakkouche, K., Ouakki, M., Galai, M., Kribii, A., Touhami, M. E., Cherkaoui, M., & Kribii, A. (2020). *Cistus monspeliensis* extract as antioxidant and corrosion inhibitor of ordinary steel in 1 M hydrochloric acid medium. *Mediterranean Journal of Chemistry*, 10(2), 185–196. <https://doi.org/10.13171/mjc10202002211186sh>.
- [15] Anupama, K., Ramya, K., Shainy, K., & Joseph, A. (2015). Adsorption and electrochemical studies of *Pimenta dioica* leaf extracts as corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid. *Materials Chemistry and Physics*, 167, 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.09.013>.
- [16] Faiz, M., Zahari, A., Awang, K., & Hussin, H. (2020). Corrosion inhibition on mild steel in 1 M HCl solution by *Cryptocarya nigra* extracts and three of its constituents (alkaloids). *RSC Advances*, 10(11), 6547–6562. <https://doi.org/10.1039/c9ra05654h>.
- [17] Gerengi, H., & Sahin, H. I. (2011). *Schinopsis lorentzii* Extract As a Green Corrosion Inhibitor for Low Carbon Steel in 1 M HCl Solution. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(2), 780–787. <https://doi.org/10.1021/ie201776q>.
- [18] Sedik, A., Lerari, D., Salci, A., Athmani, S., Bachari, K., Gecibesler, İ., & Solmaz, R. (2020). Dardagan Fruit extract as eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel in 1 M HCl: Electrochemical and surface morphological studies. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 107, 189–200. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2019.12.006>.
- [19] Ciobotaru, I., Mic, O. C., & Vaireanu, D. (2024). The use of some natural extracts as environmentally friendly carbon steel corrosion inhibitors. *Applied Sciences*, 14(24), 11528. <https://doi.org/10.3390/app142411528>.
- [20] Simescu-Lazar, F., Slaoui, S., Essahli, M., Bohr, F., Lamiri, A., Vanoye, L., & Chopart, J. P. (2023). *Thymus satureoides* Oil as Green Corrosion Inhibitor for 316L Stainless Steel in 3% NaCl: Experimental and Theoretical Studies. *Lubricants*, 11(2), 56. <https://doi.org/10.3390/lubricants11020056>.
- [21] Othman, N., Yahya, S., & Ismail, M. (2018). Corrosion inhibition of steel in 3.5% NaCl by rice straw extract. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 70, 299–310. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.10.030>.

- [22] Frankel, G. S. (1998). Pitting Corrosion of Metals: A review of the Critical factors. *Journal of the Electrochemical Society*, 145(6), 2186–2198. <https://doi.org/10.1149/1.1838615>.
- [23] Natishan, P. M., & O'Grady, W. E. (2014). Chloride Ion Interactions with Oxide-Covered Aluminum Leading to Pitting Corrosion: A Review. *Journal of the Electrochemical Society*, 161(9), C421–C432. <https://doi.org/10.1149/2.1011409jes>.
- [24] Pradityana, A., Sulistijono, Shahab, A., Noerochim, L., & Susanti, D. (2016). Inhibition of corrosion of carbon steel in 3.5% NaCl solution by Myrmecodia Pendans Extract. *International Journal of Corrosion*, 2016, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2016/6058286>.
- [25] Devikala, S., Kamaraj, P., Arthanareeswari, M., & Patel, M. B. (2019). Green corrosion inhibition of mild steel by aqueous Allium sativum extract in 3.5% NaCl. *Materials Today Proceedings*, 14, 580–589. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.04.182>.
- [26] Jayakumar, S., Jouhar, M., Khan, F., Vadivel, M., Nandakumar, T., Lahiri, B. B., & Philip, J. (2024). Aqueous Black Seed (*Nigella sativa* L.) Extract-Mediated Corrosion Inhibition in Mild Steel Exposed to 3.5% NaCl: Effect of Temperature, pH, Time, and In Situ Analysis Using Atomic Force Microscopy. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 77(11), 3385–3396. <https://doi.org/10.1007/s12666-024-03399-5>.
- [27] Haddadi, S. A., Alibakhshi, E., Bahlakeh, G., Ramezanzadeh, B., & Mahdavian, M. (2019). A detailed atomic level computational and electrochemical exploration of the Juglans regia green fruit shell extract as a sustainable and highly efficient green corrosion inhibitor for mild steel in 3.5 wt% NaCl solution. *Journal of Molecular Liquids*, 284, 682–699. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.04.045>.
- [28] Royani, A., Hanafi, M., Mubarak, N. M., Priyotomo, G., Aigbodion, V. S., Musabikha, S., & Manaf, A. (2024). Unveiling green corrosion inhibitor of Aloe vera extracts for API 5L steel in seawater environment. *Scientific Reports*, 14(1), 14085. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64715-z>.
- [29] Barbouchi, M., Benzidia, B., Aouidate, A., Ghaleb, A., Idrissi, M. E., & Choukrad, M. (2020). Theoretical modeling and experimental studies of Terebinth extracts as green corrosion inhibitor for iron in 3% NaCl medium. *Journal of King Saud University - Science*, 32(7), 2995–3004. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.08.004>.
- [30] Ikhmal, W. M., Maria, M. F. M., Rafizah, W. A. W., Norsani, W. N. W. M. & Sabri, M. G. M. (2019). Corrosion inhibition of mild steel in seawater through green approach using

- Leucaena leucocephala leaves extract. International Journal of Corrosion and Scale Inhibition, 8(3), 628–643. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2019-8-3-12>.
- [31] Royani, A., Hanafi, M., Haldhar, R., & Manaf, A. (2024). Evaluation of Morinda citrifolia extract as sustainable inhibitor for mild steel in saline environment. Journal of Engineering Research, 12(3), 321–327. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.01.013>.
- [32] Zalegh, I., Akssira, M., Bourhia, M., Mellouki, F., Rhallabi, N., Salamatullah, A. M., Alkaltham, M. S., Alyahya, H. K., & Mhand, R. A. (2021). A Review on Cistus sp.: Phytochemical and Antimicrobial Activities. Plants, 10(6), 1214. <https://doi.org/10.3390/plants10061214>.
- [33] Papaefthimiou, D., Papanikolaou, A., Falara, V., Givanoudi, S., Kostas, S., & Kanellis, A. K. (2014). Genus Cistus: a model for exploring labdane-type diterpenes' biosynthesis and a natural source of high value products with biological, aromatic, and pharmacological properties. Frontiers in Chemistry, 2, 35. <https://doi.org/10.3389/fchem.2014.00035>.
- [34] Bendifallah, L., Alouan, S., Drah, S., & Dougarem, F. (2012). Phytochemical Study of Cistus Albidus (Cistaceae) In a Northern Mountainous Region of Algeria. Acta Horticulturae, 955, 79–82. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2012.955.8>.
- [35] Verma, C., Ebenso, E. E., Bahadur, I., & Quraishi, M. (2018). An overview on plant extracts as environmental sustainable and green corrosion inhibitors for metals and alloys in aggressive corrosive media. Journal of Molecular Liquids, 266, 577–590. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.06.110>.
- [36] Foo, K., & Hameed, B. (2009). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. Chemical Engineering Journal, 156(1), 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>.
- [37] Kokalj, A. (2023). On the use of the Langmuir and other adsorption isotherms in corrosion inhibition. Corrosion Science, 217, 111112. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111112>.
- [38] Alrefaee, S. H., Rhee, K. Y., Verma, C., Quraishi, M., & Ebenso, E. E. (2020). Challenges and advantages of using plant extract as inhibitors in modern corrosion inhibition systems: Recent advancements. Journal of Molecular Liquids, 321, 114666. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114666>.

- [39] Othman, K. A., Hamad, W. M., & Omer, R. A. (2024). Theoretical and experimental exploration of organic molecules adsorption on iron surfaces for corrosion inhibition: a review. *Corrosion Reviews*, 43(3), 335–359. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2024-0039>.
- [40] Bensouda, Z., Assiri, E. H. E., Sfaira, M., Touhami, M. E., Farah, A., & Hammouti, B. (2019). Extraction, Characterization and Anticorrosion Potential of an Essential Oil from Orange Zest as Eco-friendly Inhibitor for Mild Steel in Acidic Solution. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 5(4). <https://doi.org/10.1007/s40735-019-0276-y>.
- [41] Verma, C., Quraishi, M., & Singh, A. (2015). A thermodynamical, electrochemical, theoretical and surface investigation of diheteroaryl thioethers as effective corrosion inhibitors for mild steel in 1 M HCl. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 58, 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.06.020>.
- [42] Zhao, W., Li, F., Lv, X., Chang, J., Shen, S., Dai, P., Xia, Y., & Cao, Z. (2023). Research progress of organic corrosion inhibitors in metal corrosion protection. *Crystals*, 13(9), 1329. <https://doi.org/10.3390/cryst13091329>.
- [43] Mathur, P. B., & Vasudevan, T. (1982). Reaction rate studies for the corrosion of metals in Acids—I, iron in mineral acids. *Corrosion*, 38(3), 171–178. <https://doi.org/10.5006/1.3579270>.
- [44] Oakes, G., & West, J. M. (1969). Influence of thiourea on the dissolution of mild steel in strong hydrochloric acid. *British Corrosion Journal*, 4(2), 66–73. <https://doi.org/10.1179/000705969798325622>.
- [45] Sato, N. (2011). Basics of corrosion chemistry. In *Green Corrosion Chemistry and Engineering* (pp. 1–32). Wiley-VCH.

CONCLUSION GENERALE



Ce travail a pour objectif d'évaluer le pouvoir inhibiteur d'extraits végétaux de *Cleome arabica* L., *Cistus albidus* L. et *Cistus libanotis* L. vis-à-vis de la corrosion de l'acier en milieux HCl 1 M et NaCl 3 %. Les résultats obtenus ont montré que l'ajout de ces extraits permet de réduire la vitesse de corrosion en milieu acide et de limiter la perte de masse en milieu salin, comparativement aux solutions témoins. Cette diminution traduit la capacité des composés naturels présents dans les extraits à interagir avec la surface métallique et à freiner l'attaque corrosive.

L'efficacité inhibitrice dépend de plusieurs paramètres, notamment la nature de la plante, le solvant d'extraction, la concentration de l'extrait et le type de milieu corrosif. En milieu HCl 1 M, la corrosion de l'acier est principalement liée à la dissolution du fer et au dégagement d'hydrogène. Dans ces conditions, les extraits étudiés agissent rapidement en bloquant une partie des sites actifs de la surface métallique. En milieu NaCl 3 %, le comportement est différent, car les ions chlorure peuvent pénétrer les défauts du film protecteur et favoriser une corrosion localisée. La protection dépend alors davantage de la stabilité, de l'adhérence et de l'homogénéité de la couche formée.

La comparaison entre les extraits aqueux et éthanoliques a montré que le choix du solvant joue un rôle important dans l'efficacité anticorrosive. Les extraits aqueux, riches en composés polaires et hydrosolubles, peuvent favoriser une adsorption rapide sur l'acier. Les extraits éthanoliques, quant à eux, peuvent contenir des molécules moins polaires ou partiellement hydrophobes, capables de renforcer l'effet barrière du film adsorbé. Ainsi, aucun solvant ne peut être considéré comme systématiquement supérieur ; l'efficacité dépend surtout de la composition chimique de l'extrait et de l'organisation des molécules à l'interface métal/solution.

L'étude comparative a permis de mettre en évidence le comportement prometteur de *Cleome arabica* L. et de *Cistus albidus* L. Ces deux plantes ont présenté une bonne capacité à protéger l'acier dans les conditions étudiées, avec des performances intéressantes même à des concentrations modérées. *Cistus libanotis* L. a également montré un effet inhibiteur réel, mais son efficacité apparaît plus sensible aux conditions expérimentales, notamment à la concentration et au solvant utilisé. Son utilisation pourrait donc être améliorée par une optimisation plus poussée du protocole d'extraction et de la dose appliquée.

L'étude des isothermes d'adsorption a confirmé que le mécanisme de protection repose principalement sur l'adsorption des molécules bioactives à la surface de l'acier. Cette adsorption

conduit à la formation d'un film organique qui réduit le contact direct entre le métal et les espèces corrosives. Selon la nature des composés présents dans les extraits, cette fixation peut impliquer des interactions physiques et chimiques. Le modèle de Langmuir décrit globalement le comportement observé, ce qui suggère la formation d'une couche protectrice relativement organisée, même si la complexité des extraits végétaux peut également entraîner des interactions entre molécules adsorbées.

En conclusion, les extraits étudiés constituent des alternatives naturelles intéressantes aux inhibiteurs conventionnels de corrosion. Leur disponibilité, leur origine végétale et leur capacité à réduire l'attaque de l'acier leur confèrent un potentiel réel dans le domaine de la protection anticorrosion. Toutefois, pour confirmer leur application pratique, des études complémentaires restent nécessaires. Il serait notamment utile de réaliser une caractérisation chimique approfondie des extraits par des techniques telles que la HPLC, la GC-MS ou la FTIR, afin d'identifier les molécules responsables de l'effet inhibiteur. Des analyses électrochimiques, comme la polarisation potentiodynamique et la spectroscopie d'impédance électrochimique, permettraient également de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu. Enfin, des essais de longue durée et des observations de surface seraient importants pour évaluer la stabilité du film protecteur dans des conditions plus proches des milieux réels.

Résumé

Dans une perspective de protection durable des matériaux métalliques, ce mémoire évalue le potentiel d'extraits végétaux issus de *Cleome arabica* L., *Cistus albidus* L. et *Cistus libanotis* L. comme inhibiteurs verts de corrosion de l'acier. Les extraits ont été préparés par deux voies complémentaires, l'extraction aqueuse à reflux et l'extraction éthanolique assistée par ultrasons, puis testés dans deux milieux agressifs : HCl 1 M et NaCl 3 %. Les résultats montrent une diminution nette de la vitesse de corrosion et de la perte de masse par rapport au témoin, confirmant l'adsorption des molécules bioactives sur la surface métallique et la formation d'un film protecteur. L'efficacité dépend de la plante, du solvant d'extraction, de la concentration en inhibiteur et du milieu corrosif. *Cleome arabica* L. et *Cistus albidus* L. apparaissent comme les extraits les plus prometteurs, tandis que *Cistus libanotis* L. nécessite une optimisation supplémentaire. Cette étude met en évidence l'intérêt des ressources végétales locales pour développer des solutions anticorrosion plus simples, économiques et respectueuses de l'environnement.

Mots clés : Corrosion ; acier ; inhibiteurs verts ; extraits végétaux ; adsorption.

Abstract

In the search for sustainable protection of metallic materials, this work investigates the potential of plant extracts obtained from *Cleome arabica* L., *Cistus albidus* L. and *Cistus libanotis* L. as green corrosion inhibitors for steel. The extracts were prepared using two complementary methods, aqueous reflux extraction and ultrasound-assisted ethanolic extraction, and were evaluated in two aggressive media: 1 M HCl and 3% NaCl. The results reveal a clear decrease in corrosion rate and weight loss compared with the uninhibited medium, confirming the adsorption of bioactive molecules onto the steel surface and the formation of a protective organic film. The inhibition performance depends on the plant species, extraction solvent, inhibitor concentration and corrosive environment. *Cleome arabica* L. and *Cistus albidus* L. showed the most promising behavior, whereas *Cistus libanotis* L. requires further optimization. Overall, this study highlights locally available plant resources as attractive eco-friendly and cost-effective alternatives to conventional corrosion inhibitors.

Keywords: Corrosion; steel; green inhibitors; plant extracts; adsorption.

ملخص

في إطار البحث عن حماية مستدامة للمواد المعدنية، تهدف هذه المذكرة إلى تقييم فعالية المستخلصات النباتية المحضرة من *Cleome arabica* L. و *Cistus albidus* L. و *Cistus libanotis* L. كمثبطات خضراء لتآكل الفولاذ. تم تحضير المستخلصات بطريقتين متكاملتين، هما الاستخلاص المائي بالارتداد والاستخلاص الإيثانولي بمساعدة الأمواج فوق الصوتية، ثم اختبارها في وسطين عدوانيين: HCl 1 M و NaCl 3 %. أظهرت النتائج انخفاضاً واضحاً في سرعة التآكل وفقدان الكتلة مقارنة بالوسط الشاهد، مما يؤكد قدرة المركبات الفعالة بيولوجياً على الامتزاز فوق سطح الفولاذ وتكوين طبقة عضوية واقية. كما بينت الدراسة أن الفعالية ترتبط بنوع النبات، وطبيعة المذيب، وتركيز المستخلص، والوسط المسبب للتآكل. وقد برز كل من *Cleome arabica* L. و *Cistus albidus* L. كأكثر المستخلصات وعداء، بينما يحتاج *Cistus libanotis* L. إلى تحسين إضافي لشروط الاستخلاص أو التركيز. وتؤكد هذه النتائج أهمية الموارد النباتية المحلية كبديل بيئي واقتصادي للمثبطات التقليدية.

الكلمات المفتاحية: التآكل؛ الفولاذ؛ المثبطات الخضراء؛ المستخلصات النباتية؛ الامتزاز.