



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ DE 20 AOÛT 1955 - SKIKDA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE DES PROCÉDÉS

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de :

Master

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique

Étude de l'efficacité inhibitrice de l'extrait de noyaux de dattes contre la corrosion en milieu acide et salin.

Réalisé par : - Boukeloua Aya

- Haibeche Samah

- Boudebane Amani

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

N°	Nom et Prénom	Grade	Établissement d'affiliation	Qualité
1	Damous Maamar	MCA	Université de 20 Août 1955 - Skikda	Encadrant
2	Boultif Walid	MCB	Université de 20 Août 1955 - Skikda	Co-encadrant
3	Boussaha El Hadi	Professeur	Université de 20 Août 1955 - Skikda	Président
4	Khelfaoui Malika	MCA	Université de 20 Août 1955 - Skikda	Examinatrice

Année Universitaire **2025 - 2026**.

Remerciement

*Nous remercions Monsieur **Damous Mamar**, notre encadrant, pour son accompagnement durant la réalisation de ce mémoire.*

*Nous adressons nos sincères remerciements à nos enseignants, Monsieur **Boussaha El Hadi** et Monsieur **Boultif Walid**, pour leur aide, leurs conseils et leur soutien tout au long de notre parcours universitaire. Nous leur sommes particulièrement reconnaissants pour leur accompagnement dans la réalisation de ce mémoire ainsi que pour leur disponibilité et leurs encouragements tout au long de ce travail.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à l'ensemble des **ingénieurs du Hall Technologique de l'Université du 20 Août 1955 de Skikda**, notamment Monsieur **Djilani Karim**, pour leur aide précieuse, leur disponibilité et leur soutien technique.*

*Nous remercions également **le personnel du laboratoire de la Raffinerie de Skikda** pour leur accueil, leur assistance et leur contribution à la réalisation des travaux expérimentaux.*

Enfin, nous adressons nos plus vifs remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidés, conseillés et soutenus de près ou de loin dans la réalisation de ce mémoire.

*À nos **familles**, nos amis et à tous ceux qui ont contribué à notre réussite, nous exprimons notre profonde reconnaissance.*

Dédicaces

Au terme de ce parcours, je tiens à dédier ce travail à toutes les personnes qui ont laissé une empreinte précieuse dans ma vie et qui ont contribué, chacune à sa manière, à la réalisation de ce rêve.

À mes très chers parents, Vous avez été mon premier refuge, ma première école et ma plus grande source de courage. Merci pour votre amour inconditionnel, vos sacrifices silencieux, vos prières sincères et votre confiance inébranlable. Chaque réussite que j'accomplis porte une part de vos efforts, de votre patience et de votre dévouement. Que ce mémoire soit le témoignage de ma reconnaissance éternelle et de mon profond amour pour vous.

À ma famille, Merci d'avoir toujours cru en moi, de m'avoir soutenu dans les moments de doute et d'avoir partagé avec moi les joies comme les difficultés. Votre présence a été une lumière qui a éclairé mon chemin lorsque celui-ci semblait obscur.

À mes collègues de mémoire Aya et Amani, Nous avons partagé bien plus qu'un travail académique : des moments de stress, de fatigue, d'espoir et de persévérance. Merci pour votre esprit d'équipe, votre soutien et les souvenirs inoubliables que nous avons construits ensemble. Cette réussite est aussi le fruit de notre solidarité.

À mes amis, Merci d'avoir été présents dans les moments de faiblesse comme dans les moments de joie. Vos paroles réconfortantes, votre affection et votre fidélité ont été une force précieuse tout au long de ce parcours.

À mes collègues de travail du Complexe d'Aïn T'sila, pour leur compréhension, leurs encouragements et leur soutien qui m'ont permis de concilier mes responsabilités professionnelles et mes études.

Enfin, à toutes les personnes qui ont cru en moi, qui m'ont tendu la main, encouragé ou inspiré(e), même par un simple mot ou un geste discret.

Je dédie ce mémoire avec une immense gratitude, convaincu qu'aucune réussite n'est le fruit d'un seul effort, mais celui de l'amour, du soutien et de la confiance des personnes qui nous entourent.

Avec tout mon respect, mon affection et ma reconnaissance.

Samah2026

Dédicaces

Avec tous mes sentiments de respect et l'expression de ma profonde reconnaissance, je dédie
mon travail, mon diplôme et ma joie :

À la source de ma joie et de mon bonheur, ma lune et mon fil d'espoir qui illumine mon
chemin, mon repère et ma moitié, **ma chère maman**.

À celui qui a fait de moi la femme que je suis aujourd'hui, ma source de vie, d'amour et
d'affection, à mon soutien qui a toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, à
mon héros, mon **papa**.

À mes sœurs **Amani** et **Anfel** pour leur confiance, leur fierté et leur amour, ainsi qu'à mon
petit prince, mon frère **Diaa**.

À tous les membres de **ma grande famille**, mes tantes pour leurs conseils, leur aide et leur
intérêt, mes cousins, ma grand-mère pour son amour et son affection, et surtout mon grand-
père qui n'a cessé de me conseiller et de m'encourager tout au long de mes études.

À tous mes amis **Lina**, **Amani** et **Samah** pour leur écoute, leur présence, pour les fous rires
dans les moments de réconfort et pour tous les moments adorables partagés ensemble.

À mes collègues de ce travail **Samah** et **Amani** pour leur soutien, leur patience et leur
compréhension tout au long de ce projet.

À tous ceux qui ont participé à ma réussite et à tous ceux qui m'aiment.

Aya2026

Dédicaces

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail

À mes chers parents,

pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices.

*À mon frère **Mohamed** et ma sœur **Aya**,*

pour leur présence, leurs encouragements et leur affection

*À tous **mes précieux amis**, avec qui j'ai partagé des moments inoubliables et qui ont toujours
été là pour me rebooster `*

Aya, Samah, lina, Oumaima et Ghada.

*À mes collègues **Aya** et **Samah***

Tous ceux qui me connaissent de loin ou de pré.

Avec toute mon affection

Amaní2026

ملخص :

في إطار البحث عن حلول صديقة للبيئة لمكافحة التآكل، يتناول هذا العمل دراسة الفعالية التثبيطية لأربعة أنواع من مستخلصات نوى التمور (دقلة، غرس، تمر، ومزيج منها) في الحد من تآكل فولاذ (API 5L X42). تم تحضير المستخلصات بطريقة النقع في الإيثانول، وتم تقييم فعاليتها باستعمال الطريقة الوزنية (فقدان الكتلة) في وسطين مسببين للتآكل هما محلول حمض الكبريتيك (H_2SO_4) بتركيز 5% ومحلول كلوريد الصوديوم (NaCl) بتركيز 5%.

ركزت الدراسة على تأثير عدة عوامل، تتمثل في تركيز المثبط (من 1% إلى 5%)، وزمن الغمر، ودرجة الحرارة، على سرعة التآكل ومردود التثبيط. أظهرت النتائج أن مستخلصات نوى التمور تمتلك فعالية تثبيطية معتبرة، تختلف باختلاف نوع المستخلص والتركيز والظروف التجريبية. وتبرز هذه الدراسة الإمكانيات الواعدة لنوى التمور كمثبطات طبيعية للتآكل، كما تساهم في تثمين أحد المخلفات الزراعية الغذائية المتوفرة بكثرة في الجزائر.

الكلمات المفتاحية: التآكل، فولاذ API 5L X42، مثبطات طبيعية، نوى التمور، الطريقة الوزنية، حمض الكبريتيك، كلوريد الصوديوم، مردود التثبيط

Résumé :

Dans le contexte de la recherche de solutions écologiques pour lutter contre la corrosion, ce travail porte sur l'étude de l'efficacité inhibitrice de quatre variétés d'extraits de noyaux de dattes (Degla, Ghars, Tmar et leur mélange) vis-à-vis de la corrosion de l'acier API 5L X42. Les extraits ont été obtenus par macération à l'éthanol et évalués par la méthode gravimétrique (perte de masse) dans deux milieux corrosifs : une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) à 5 % et une solution de chlorure de sodium (NaCl) à 5 %.

L'étude a porté sur l'influence de plusieurs paramètres, notamment la concentration de l'inhibiteur (1 à 5 %), le temps d'immersion et la température, sur la vitesse de corrosion et le rendement d'inhibition. Les résultats obtenus montrent que les extraits de noyaux de dattes présentent une activité inhibitrice appréciable, dont l'efficacité varie selon la variété utilisée, la concentration et les conditions expérimentales. Cette étude met en évidence le potentiel des noyaux de dattes comme inhibiteurs naturels de corrosion et contribue à la valorisation d'un sous-produit agroalimentaire abondant en Algérie.

Mots-clés : Corrosion, acier API 5L X42, inhibiteurs naturels, noyaux de dattes, méthode gravimétrique, H₂SO₄, NaCl, rendement d'inhibition.

Abstract :

In the context of the search for environmentally friendly solutions to combat corrosion, this work investigates the inhibitory efficiency of four date pit extract varieties (Degla, Ghars, Tmar, and their mixture) against the corrosion of API 5L X42 steel. The extracts were obtained by ethanol maceration and evaluated using the gravimetric method (weight loss) in two corrosive media: a 5% sulfuric acid (H₂SO₄) solution and a 5% sodium chloride (NaCl) solution.

The study focused on the influence of several parameters, namely inhibitor concentration (1–5%), immersion time, and temperature, on the corrosion rate and inhibition efficiency. The results showed that date pit extracts exhibit significant inhibitory activity, whose effectiveness depends on the variety used, concentration, and experimental conditions. This study highlights the potential of date pits as natural corrosion inhibitors and contributes to the valorization of an abundant agro-industrial by-product in Algeria.

Keywords : Corrosion, API 5L X42 steel, natural inhibitors, date pits, gravimetric method, H₂SO₄, NaCl, inhibition efficiency

Sommaire

Remerciement

Dédicaces

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Introduction générale..... 1

Chapitre I :

Généralité sur la corrosion et les moyens de lutte

I.1	Introduction	3
I.2	Généralités sur la corrosion	3
I.2.1	Définition de la corrosion	3
I.2.2	Les modes de la corrosion	4
I.2.2.1	Corrosion chimique	4
I.2.2.2	La corrosion biochimique (bactérienne)	4
I.2.2.3	La corrosion électrochimique	5
I.2.3	Les formes de la corrosion	7
I.2.3.1	Corrosion uniforme (généralisée)	7
I.2.3.2	Corrosion localisé	8
I.2.3.2.1	Corrosion galvanique (bimétallique)	8
I.2.3.2.2	Corrosion par piquûre	9
I.2.3.2.3	Corrosion intergranulaire	10
I.2.3.2.4	Corrosion sélective	11
I.2.3.2.5	Corrosion de crevasse	12
I.2.3.2.6	Corrosion filiforme	13
I.2.3.2.7	Corrosion sous contrainte	14
I.2.3.2.8	Corrosion par érosion	15
I.2.4	Les facteurs de corrosion	16
I.2.4.1	La composition chimique du métal	17
I.2.4.2	La microstructure du métal	17
I.2.4.3	La composition chimique de l'environnement	17
I.2.4.4	Les conditions d'emploi	17

	I.2.4.5	Le facteur temps.....	18
I.2.5		Les paramètres influençant sur la vitesse de corrosion	18
	I.2.5.1	Effet de température	18
	I.2.5.2	La salinité	18
	I.2.5.3	Acidité	18
	I.2.5.4	Régime hydrodynamique	19
	I.2.5.5	Influence de l'oxygène	19
I.2.6		Moyens de lutte contre la corrosion	19
	I.2.6.1	Prévention par un choix judicieux des matériaux	19
	I.2.6.2	Protection cathodique	20
	a)	Protection par anode sacrificielle	21
	b)	Protection par courant imposé	21
	I.2.6.3	Protection anodique	21
	I.2.6.4	Protection par revêtements	21
	a)	Revêtements non métalliques	21
	b)	Revêtements métalliques	22
	I.2.6.5	Protection par inhibiteur	22
I.3		Conclusion	23
		Les Références Bibliographiques	24

Chapitre II :

Généralités sur les inhibiteurs de corrosion et les méthodes d'extractions

II.1		Introduction	26
II.2		Protection contre la corrosion par l'utilisation des inhibiteurs	26
II.3		Historique de l'inhibition de corrosion	26
II.4		Définition des inhibiteurs de corrosion	27
II.5		Propriétés des inhibiteurs de corrosion	27
II.6		Utilisation des inhibiteurs de corrosion	28
II.7		Les critères de choix d'un inhibiteur	29
II.8		Classification des inhibiteurs de corrosion.....	30
	II.8.1	Classification selon la réaction partielle	30
	II.8.1.1	Inhibiteurs anodiques	30
	II.8.1.2	Inhibiteurs cathodiques	30
	II.8.1.3	Inhibiteurs mixtes	31
	II.8.2	Classification selon le mécanisme réactionnel	31
	II.8.2.1	Inhibition de corrosion par adsorption	31
	II.8.2.2	Inhibition de corrosion par passivation	32
	II.8.2.3	Inhibition de corrosion par précipitation	33
	II.8.2.4	Inhibition de corrosion par élimination de l'agent corrosif ...	33

II.8.3	Classification selon le domaine d'application.....	33
II.8.3.1	Inhibition en milieu acide	33
II.8.3.2	Inhibition en milieu neutre	34
II.8.3.3	Inhibition en phase gazeuse	35
II.8.3.4	Inhibiteurs pour le milieu organique	35
II.9	Inhibiteurs naturels de corrosion	36
II.10	Les inhibiteurs spécifiques aux métaux ferreux	36
II.11	Les méthodes d'extractions	37
II.11.1	Méthode d'extraction par solvant	37
II.11.2	Macération (méthode de trempage)	37
II.11.3	L'extraction Soxhlet	38
II.11.4	Extraction par reflux chauffant	39
II.11.5	Méthode de décoction	39
II.11.6	Extraction assistée par ultrasons (EAU / UAE)	39
II.12	Conclusion	40
	Les Références Bibliographiques	41

Chapitre III :

Généralités sur les noyaux de dattes

III.1	Introduction	43
III.2	Le palmier dattier	43
III.2.1	Définition et origine	43
III.2.1.1	Définition.....	43
III.2.1.2	Origine	44
III.2.2	Répartition géographique des palmier dattier	44
III.2.2.1	Dans le monde	44
III.2.2.2	Dans l'Algérie.....	45
III.2.3	L'importance économique en Algérie.....	45
III.3	Variétés des dattes en Algérie	46
III.4	Les noyaux de dattes	46
III.4.1	Morphologie et caractéristiques	47
III.4.2	Composition chimique des noyaux.....	47
III.4.3	L'activité antioxydante des noyaux de dattes.....	48
III.5	Valorisation des noyaux de dattes.....	48
III.5.1	Utilisation industrielle	48

III.5.2	Utilisation comme inhibiteur de corrosion	49
III.6	Conclusion	50
	Les Références Bibliographiques	51

Chapitre IV :

Partie Expérimental

IV.1	Introduction	53
IV.2	Conditions expérimentales	53
IV.2.1	Préparation de la poudre	53
IV.2.2	Caractéristiques physico-chimiques	55
IV.2.3	Matériaux utilisés	59
IV.2.3.1	Propriété métallurgique (composition chimique)	59
IV.2.3.2	Propriété mécanique	60
IV.2.3.3	Polissage	60
IV.2.4	Milieus d'étude	62
IV.2.4.1	Préparation de la solution corrosive 1 (H_2SO_4 1%, 2%, 3%, 4% et 5%)	62
IV.2.4.2	Préparation de la solution corrosive 2 (NaCl 3%, 4% et 5%)	63
IV.2.5	Solution inhibitrice	64
IV.2.5.1	Matériels utilisés	64
IV.2.5.2	Produits utilisés	64
IV.2.5.3	Mode opératoire	65
IV.2.5.4	Préparation des solutions inhibitrice	67
IV.2.5.5	Détermination du rendement de l'extrait	67
IV.3	Méthodes d'étude de la corrosion	68
IV.3.1	Méthode gravimétrique	68
IV.3.2	Effet de la température du milieu	68
IV.3.3	Les analyses UV-Visible des extraits de noyaux de dattes	69
IV.3.4	Lame de cuivre	70
IV.4	Résultats et discussion	71
IV.4.1	Résultats des tests phytochimiques	71
IV.4.2	Calcul du rendement de l'extraction	76
IV.4.3	Résultats et discussion de l'analyse UV-Visible des extraits de noyaux de dattes	77
IV.4.4	Résultats et discussion du test de la lame de cuivre	78
IV.4.5	Résultats et interprétation des courbes d'essais	79
IV.4.5.1	Effet de temps d'immersion	79
IV.4.5.1.1	Etude de la corrosion sans inhibiteur	79
IV.4.5.1.2	Etude de la corrosion avec inhibiteur	82

IV.4.5.2	Effet de température	105
IV.5	Conclusion	111
	Les Références Bibliographiques	112
	Conclusion générale	113

Liste des figures :

Chapitre I		
Fig I.1	Biofilm sur un acier inoxydable après 5 jours en eau de mer naturelle.	04
Fig I.2	Diagramme de stabilité du fer dans l'eau.	07
Fig I.3	Cellule électrochimique.	07
Fig I.4	Corrosion généralisée.	07
Fig I.5	Corrosion localisée.	08
Fig I.6	Corrosion galvanique.	09
Fig I.7	Corrosion par piquûre.	10
Fig I.8	Corrosion intergranulaire.	11
Fig I.9	Schéma de la corrosion intergranulaire.	11
Fig I.10	Dézincification d'une tige de laiton ayant séjourné douze ans dans l'eau.	12
Fig I.11	Corrosion graphitique d'une font à graphite lamellaire.	12
Fig I.12	(a) Corrosion Caverneuse. (b) son mécanisme.	13
Fig I.13	Corrosion sous contrainte d'une pipe en acier : (a) surface extérieure. (b) surface intérieure.	15
Fig I.14	Photos du coude de la sortie d'un refroidisseur : (a) photo extérieure du coude. (b) photo intérieure du coude. (c) croquis de la défaillance.	16
Chapitre II		
Fig II.1	Propriétés des inhibiteurs.	28
Fig II.2	Action des inhibiteurs de corrosion.	31
Fig II.3	Schéma du processus d'adsorption d'un inhibiteur de corrosion sur la surface du métal.	32
Fig II.4	Appareillage de l'extraction Soxhlet.	38
Chapitre III		
Fig III.1	Schéma du palmier dattier (Munier, 1973).	43
Fig III.2	Répartition géographique du palmier dattier. (El Hadrami, 2007).	44
Fig III.3	La production des dattes en Algérie. Source : (FAOSTAT, 2022).	46

<i>Chapitre IV</i>		
Fig IV.1	Les noyaux des dattes.	54
Fig IV.2	Broyage des noyaux des dattes.	54
Fig IV.3	Infusion.	55
Fig IV.4	Réactif de Mayer et Wagner.	56
Fig IV.5	Réactif de Fehling.	58
Fig IV.6	Solution du FeCl ₃ .	58
Fig IV.7	Appareille d'analyse de la composition chimique de l'échantillon OX FORD X-MET 7000.	59
Fig IV.8	La polisseuse.	61
Fig IV.9	L'acier avant et après le polissage.	61
Fig IV.10	Pied à coulisse.	61
Fig IV.11	Solution mère de H ₂ SO ₄ .	62
Fig IV.12	Solutions filles de H ₂ SO ₄	63
Fig IV.13	Solutions filles de NaCl	63
Fig IV.14	Montage d'évaporation rotatif.	66
Fig IV.15	Récupération de l'extrait.	66
Fig IV.16	Préparation des solutions inhibitrice.	67
Fig IV.17	Effet de température sur la corrosion.	69
Fig IV.18	Test de la lame de cuivre – Milieu acide inhibé.	71
Fig IV.19	Mise en évidence des alcaloïdes par le teste de Wagner.	72
Fig IV.20	Mise en évidence des alcaloides par le test de Mayer.	72
Fig IV.21	Mise en évidence des saponines.	73
Fig IV.22	Mise en évidence des anthraquinones libres.	73
Fig IV.23	Mise en évidence des glycosides.	74
Fig IV.24	Mise en évidence des composés réducteurs.	74
Fig IV.25	Mise en évidence les polyphénols.	75
Fig IV.26	Mise en évidence les tanins.	75
Fig IV.27	Spectres UV-Visible des extraits de noyaux de dattes des variétés Déglà, Rars, Tmar et du mélange.	77
Fig IV.28	Comparaison de la lame de cuivre après essai avec l'échelle de référence ASTM D130.	78

Fig IV.29	Evolution de la vitesse de corrosion en fonction du temps d'immersions dans les différences concentration de H_2SO_4 .	79
Fig IV.30	Variation de la vitesse de corrosion en fonction du temps d'immersions dans les différences concentration de NaCl.	81
Fig IV.31	Évolution de la vitesse de corrosion avec le temps d'immersion dans le milieu corrosif H_2SO_4 (5 %) en présence de l'inhibiteur (Mélange) à diverses concentrations.	83
Fig IV.32	Evolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations de l'inhibiteurs (Mélange) en fonction du temps d'immersion dans H_2SO_4 5%.	84
Fig IV.33	Évolution de la vitesse de corrosion avec le temps d'immersion dans le milieu corrosif H_2SO_4 (5 %) en présence de l'inhibiteur (Dégla) à diverses concentrations.	85
Fig IV.34	Evolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations de l'extrait du Degla en fonction du temps d'immersion dans H_2SO_4 5%.	87
Fig IV.35	Évolution de la vitesse de corrosion avec le temps d'immersion dans le milieu corrosif H_2SO_4 (5 %) en présence de l'inhibiteur (Ghars) à diverses concentrations.	89
Fig IV.36	Evolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations de l'extrait du ghars en fonction du temps d'immersion dans H_2SO_4 5%	90
Fig IV.37	Évolution de la vitesse de corrosion avec le temps d'immersion dans le milieu corrosif H_2SO_4 (5 %) en présence de l'inhibiteur (Tmar) à diverses concentrations.	91
Fig IV.38	Evolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations de l'extrait du tmar en fonction du temps d'immersion dans H_2SO_4 5%	93
Fig IV.39	Évolution de la vitesse de corrosion avec le temps d'immersion dans le milieu corrosif NaCl (5 %) en présence de l'inhibiteur (Mélange) à diverses concentrations.	95
Fig IV.40	Evolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations de l'extrait de mélange en fonction du temps d'immersion dans NaCl 5%	96

Fig IV.41	Évolution de la vitesse de corrosion avec le temps d'immersion dans le milieu corrosif NaCl (5 %) en présence de l'inhibiteur (Dégla) à diverses concentrations.	97
Fig IV.42	Evolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations de l'extrait de tmar en fonction du temps d'immersion dans NaCl 5%	98
Fig IV.43	Évolution de la vitesse de corrosion avec le temps d'immersion dans le milieu corrosif NaCl (5 %) en présence de l'inhibiteur (Ghars) à diverses concentrations.	100
Fig IV.44	Evolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations de l'extrait de ghars en fonction du temps d'immersion dans NaCl 5%	101
Fig IV.45	Évolution de la vitesse de corrosion avec le temps d'immersion dans le milieu corrosif NaCl (5 %) en présence de l'inhibiteur (Tmar) à diverses concentrations.	102
Fig IV.46	Evolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations de l'extrait de tmar en fonction du temps d'immersion dans NaCl 5%.	103
Fig IV.47	Évolution de la vitesse de corrosion en fonction de la température dans une solution de H ₂ SO ₄ à 5 % en absence et en présence des différents extraits de noyaux de dattes.	106
Fig IV.48	Evolution de l'efficacité inhibitrice des différents extraits de noyaux de dattes en fonction de la température dans une solution de H ₂ SO ₄ à 5 %	107
Fig IV.49	Évolution de la vitesse de corrosion en fonction de la température dans une solution de NaCl à 5 % en absence et en présence des différents extraits de noyaux de dattes.	109
Fig IV.50	Evolution de l'efficacité inhibitrice des différents extraits de noyaux de dattes en fonction de la température dans une solution de NaCl à 5 %	110

Liste des tableaux :

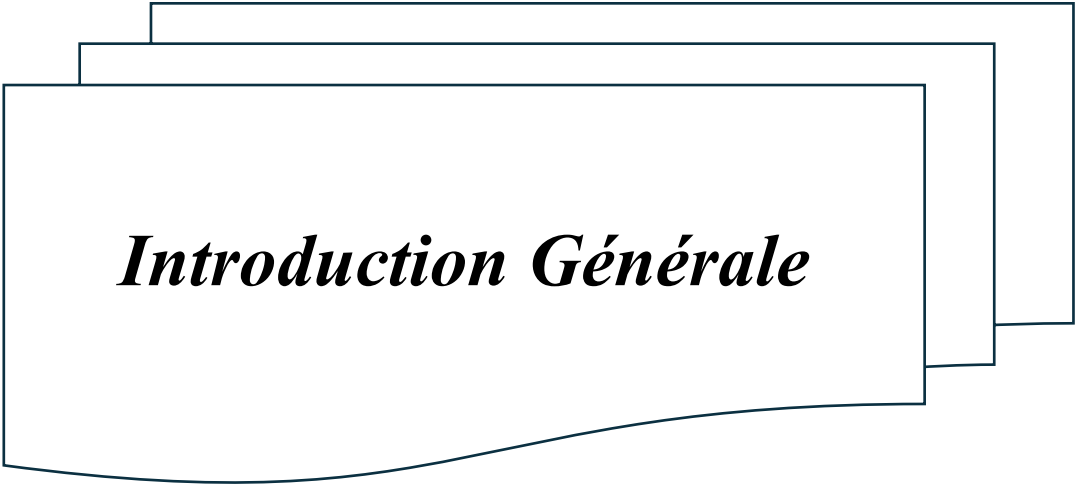
Chapitre I		
Tableau I.1	Résistance à la corrosion de certains métaux dans les milieux corrosifs.	20
Chapitre II		
Tableau II.1	Inhibiteurs les plus couramment utilisés pour la protection des métaux ferreux.	36
Chapitre III		
Tableau III.1	La composition chimique des noyaux de dattes selon différentes études.	47
Chapitre IV		
Tableau IV.1	Composition chimique du garde X42 (analyse PMI).	59
Tableau IV.2	Composition chimique selon la norme API 5L Garde X42.	60
Tableau IV.3	Propriétés mécaniques selon la norme API 5L Garde X42.	60
Tableau IV.4	Propriétés d'acide Sulfurique.	62
Tableau IV.5	Les volumes des solutions préparées.	63
Tableau IV.6	Les résultats obtenus lors du criblage phytochimique des extraits de noyaux de datte	76
Tableau IV.7	Vitesse de corrosion en fonction du temps à différentes concentration d'immersions d'acide sulfurique.	79
Tableau IV.8	Vitesse de corrosion de l'acier sans inhibiteur en fonction du temps d'immersions dans dans les différences concentration de NaCl.	80
Tableau IV.9	Variation de la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice dans une solution de H ₂ SO ₄ à 5 % en présence de l'inhibiteur issu du mélange de noyaux de dattes à différentes concentrations.	82
Tableau IV.10	Variation de la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice dans une solution de H ₂ SO ₄ à 5 % en présence de l'inhibiteur issu des noyaux de dattes de la variété Déglà à différentes concentrations.	85

Tableau IV.11	Variation de la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice dans une solution de H ₂ SO ₄ à 5 % en présence de l'inhibiteur issu des noyaux de dattes de la variété Ghars à différentes concentrations.	88
Tableau IV.12	Variation de la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice dans une solution de H ₂ SO ₄ à 5 % en présence de l'inhibiteur issu des noyaux de dattes de la variété Tmar à différentes concentrations.	91
Tableau IV.13	Variation de la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice dans une solution de NaCl à 5 % en présence de l'inhibiteur issu du mélange de noyaux de dattes à différentes concentrations.	94
Tableau IV.14	Variation de la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice dans une solution de NaCl à 5 % en présence de l'inhibiteur issu des noyaux de dattes de la variété Dégla à différentes concentrations.	97
Tableau IV.15	Variation de la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice dans une solution de NaCl à 5 % en présence de l'inhibiteur issu des noyaux de dattes de la variété Ghars à différentes concentrations.	99
Tableau IV.16	Variation de la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice dans une solution de NaCl à 5 % en présence de l'inhibiteur issu des noyaux de dattes de la variété Tmar à différentes concentrations.	102
Tableau IV.17	Évolution de la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice à différentes températures dans une solution de H ₂ SO ₄ à 5 % en absence (Blans) et en présence des différents extraits de noyaux de dattes (Dégla, Ghars, Tmar et Mélange).	105
Tableau IV.18	Évolution de la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice à différentes températures dans une solution de NaCl à 5 % en absence (Blans) et en présence des différents extraits de noyaux de dattes (Dégla, Ghars, Tmar et Mélange).	107

Liste des abréviations :

ABTS	Acide 2,2'-azino-bis(3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique)
Ca	Calcium
Cu	Cuivre
Δm (g)	Perte de masse
DPPH	2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle
EAU / UAE	Extraction assistée par ultrasons (Ultrasound Assisted Extraction)
EI (%)	Efficacité inhibitrice
FAO	Food and Agriculture Organization
FAOSTAT	Base de données statistique de la FAO
Fe	Fer
Fe²⁺	Ion ferreux
Fe³⁺	Ion ferrique
Fe(OH)₂	Hydroxyde ferreux
Fe(OH)₃	Hydroxyde ferrique
FRAP	Ferric Reducing Antioxidant Power
H⁺	Ion hydrogène
H₂	Dihydrogène (Hydrogène gazeux)
H₂O	Eau
H₂SO₄	Acide sulfurique
K	Potassium
M	Métal (utilisé pour désigner un métal de manière générale dans les réactions)
MADR	Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural
Mg	Magnésium
Mn	Manganèse
MS	Matière sèche
N, O, S, P	Azote, Oxygène, Soufre, Phosphore
N₂H₄	Hydrazine

Na	Sodium
NaCl	Chlorure de sodium
Na₂SO₃	Sulfite de sodium
O₂	Dioxyde d'oxygène (Oxygène)
OH⁻	Ion hydroxyle
P	Phosphore
PASA	Programme d'Appui au Secteur Agricole
Pb₃O₄	Oxyde de plomb
Zn	Zinc
ZnCrO₄	Chromate de zinc



Introduction Générale

Introduction générale :

La corrosion des matériaux métalliques constitue l'un des problèmes majeurs rencontrés dans de nombreux secteurs industriels tels que l'industrie pétrolière, gazière, chimique, maritime et les infrastructures métalliques. Ce phénomène de dégradation progressive des métaux sous l'action de leur environnement entraîne d'importantes pertes économiques, une diminution de la durée de vie des équipements ainsi que des risques pour la sécurité des installations. Face à ces conséquences, plusieurs méthodes de protection ont été développées afin de limiter ou de ralentir la corrosion.

Parmi les techniques de lutte contre la corrosion, l'utilisation d'inhibiteurs chimiques est largement répandue en raison de leur efficacité et de leur facilité d'application. Cependant, la plupart des inhibiteurs conventionnels sont souvent coûteux et présentent des effets néfastes sur l'environnement et la santé humaine en raison de leur toxicité. Ces préoccupations environnementales ont conduit les chercheurs à s'orienter vers le développement d'alternatives écologiques, renouvelables et économiquement viables.

Dans ce contexte, les inhibiteurs organiques naturels, également appelés inhibiteurs verts, suscitent un intérêt croissant. De nombreuses études ont démontré leur capacité à réduire efficacement la vitesse de corrosion grâce à la présence de composés organiques riches en hétéroatomes et en fonctions chimiques capables de s'adsorber sur les surfaces métalliques. Les extraits végétaux représentent ainsi une source prometteuse de substances inhibitrices respectueuses de l'environnement.

L'Algérie figure parmi les principaux producteurs de dattes au monde, générant chaque année d'importantes quantités de sous-produits agricoles, notamment les noyaux de dattes. Dans une perspective de valorisation de ces déchets agroalimentaires et de développement durable, notre travail s'intéresse à l'étude de l'efficacité inhibitrice des extraits de noyaux de dattes vis-à-vis de la corrosion de l'acier API 5L X42. Trois variétés de noyaux de dattes, à savoir Tmar, Ghars, Degla et un mélange des deux variétés, ont été sélectionnées comme source potentielle d'inhibiteurs naturels.

L'objectif principal de cette étude est de caractériser les extraits obtenus à partir des différentes variétés de noyaux de dattes et d'évaluer leur pouvoir inhibiteur dans deux

milieux corrosifs, un milieu acide à base d'acide sulfurique (H_2SO_4) et un milieu salin à base de chlorure de sodium (NaCl). L'évaluation de l'efficacité inhibitrice a été réalisée par la méthode gravimétrique en étudiant l'influence de plusieurs paramètres, notamment la concentration de l'extrait, le temps d'immersion et la température.

Afin d'atteindre ces objectifs, ce mémoire est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre présente des généralités sur la corrosion et les principales méthodes de protection contre ce phénomène. Le deuxième chapitre est consacré aux inhibiteurs de corrosion, leurs mécanismes d'action et leurs différentes classifications. Le troisième chapitre porte sur une étude bibliographique relative au palmier dattier, aux dattes et aux noyaux de dattes, ainsi qu'à leur valorisation dans le domaine de la protection contre la corrosion. Enfin, le quatrième chapitre décrit les matériaux et les méthodes expérimentales utilisés, suivi de la présentation des résultats obtenus et de leur discussion.

Ce travail s'inscrit dans une démarche de valorisation des ressources naturelles locales et de développement d'inhibiteurs de corrosion écologiques, contribuant ainsi à la réduction de l'impact environnemental des traitements anticorrosion conventionnels.

[1][2][3]

Chapitre I

I.1 Introduction :

La corrosion est un phénomène naturel qui provoque la dégradation des métaux lorsqu'ils sont exposés à des milieux agressifs tels que l'air, le sol ou le milieu marin. Elle se traduit par une détérioration progressive du matériau due à des interactions physico-chimiques avec l'environnement, entraînant une altération de ses propriétés mécaniques et fonctionnelles. L'acier, largement utilisé comme matériau de construction, est particulièrement concerné par ce phénomène.

Face à son impact technique et économique important, de nombreuses études ont été menées dans différentes industries chimiques afin de mieux comprendre les mécanismes de corrosion et de développer des méthodes de protection adaptées. Ces méthodes visent principalement à ralentir la vitesse de corrosion, notamment par la réduction de l'agressivité du milieu.

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique sur le phénomène de corrosion ainsi que sur les principales méthodes de protection utilisées pour limiter ses effets.

I.2 Généralités sur la corrosion :**I.2.1 Définition de la corrosion :**

La corrosion est un phénomène naturel, progressif et irréversible de dégradation des matériaux, touchant principalement les métaux et leurs alliages. Elle résulte d'interactions physico-chimiques, souvent de nature électrochimique, entre le matériau et le milieu environnant, tel que l'atmosphère humide, l'eau douce ou saline, ou encore les sols contenant des agents agressifs. Ce processus se manifeste par une altération de la surface du métal, suivie d'une perte de ses propriétés intrinsèques, notamment mécaniques et fonctionnelles, pouvant conduire à une défaillance des structures. La corrosion entraîne ainsi des conséquences techniques, économiques et sécuritaires importantes, en particulier dans les secteurs industriels sensibles comme celui du transport des hydrocarbures, où les matériaux sont choisis principalement pour des raisons économiques. En d'autres termes, la corrosion correspond au retour thermodynamique du métal vers des formes plus stables telles que les oxydes, sulfures ou carbonates, sous l'action de l'environnement, ce qui compromet sa durabilité et son aptitude à l'usage prévu. [1][2][3][4]

I.2.2 Les modes de la corrosion :

I.2.2.1 Corrosion chimique :

La corrosion chimique est un mode de dégradation résultant d'une réaction hétérogène directe entre un métal à l'état solide et un milieu corrosif liquide ou gazeux. Lorsque l'agent corrosif est gazeux, on parle de corrosion sèche, tandis qu'en présence d'un milieu liquide, le métal subit une attaque chimique accompagnée de la formation de produits de corrosion à sa surface. Ce type de corrosion se distingue par l'absence de conduction électrique, car il ne fait pas intervenir de réactions électrochimiques. Elle se produit généralement dans des milieux non électrolytiques ou sous l'action de gaz corrosifs tels que l'oxygène, le dioxyde de carbone ou le sulfure d'hydrogène. Un exemple typique est la corrosion du fer sous l'influence de l'oxygène à haute température, où une couche d'oxyde se forme à la surface du métal. Cette couche étant non protectrice et non étanche, elle permet la diffusion continue de l'oxygène vers le métal sous-jacent, entraînant ainsi la poursuite de l'attaque jusqu'à une dégradation avancée du matériau. [2][4]

I.2.2.2 La corrosion biochimique(bactérienne) :

La corrosion bactérienne est un phénomène principalement induit par des micro-organismes, notamment certaines bactéries, qui colonisent la surface des matériaux et déclenchent des réactions chimiques corrosives. Elle se manifeste le plus souvent dans les canalisations ou les réservoirs enterrés. Les bactéries anaérobies impliquées sont capables de transformer certains éléments chimiques du matériau en ions ou de produire des substances chimiques agressives qui endommagent le métal. [2]

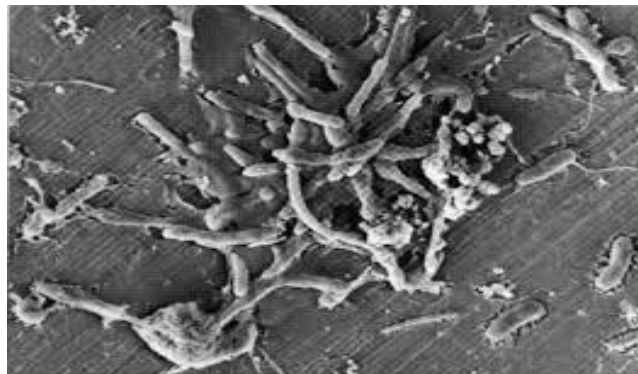


Fig I.1: Biofilm sur un acier inoxydable après 5 jours en eau de mer naturelle. [5]

I.2.2.3 La corrosion électrochimique :

Lorsque le milieu corrosif est liquide, la dégradation du métal est généralement associée à un mécanisme de corrosion électrochimique, également appelée corrosion humide. Ce type de corrosion se manifeste par l'oxydation du métal, qui passe sous forme d'ions métalliques ou d'oxydes, accompagnée de la réduction d'agents oxydants présents dans la solution électrolytique. [2]

La corrosion électrochimique résulte de transferts d'électrons entre un métal et une solution électrolytique avec laquelle il est en contact direct. Elle se développe lorsque des hétérogénéités existent, soit au sein du matériau métallique (différences de composition, de structure ou d'état de surface), soit dans le milieu corrosif. Ces hétérogénéités conduisent à la formation d'une pile électrochimique locale, favorisant la circulation d'un courant électrique entre des zones anodiques et cathodiques au sein du même système.

Les zones anodiques sont le siège de la dissolution du métal et correspondent aux régions attaquées par la corrosion, tandis que les zones cathodiques assurent la réduction des espèces oxydantes. La présence d'un réducteur, tel que l'eau ou les ions hydrogène, est indispensable au déroulement de ce mécanisme. En leur absence, la réaction anodique nécessaire à la corrosion du métal ne peut avoir lieu. [2]

La corrosion des métaux résulte d'une réaction d'oxydoréduction irréversible entre le métal et un agent oxydant de l'environnement. Lors de ce processus, l'oxydation du métal s'effectue nécessairement en parallèle avec la réduction de l'agent oxydant, conformément à la réaction globale suivante :



Dans un milieu aqueux, la corrosion d'un métal M de valence z met en jeu deux réactions électrochimiques simultanées :

- Réaction anodique (oxydation) :

À l'anode, le métal se dissout dans la solution électrolytique avec libération d'électrons. Le courant électrique circule du métal vers la solution :



Cette réaction est responsable de la perte de matière métallique.

- Réaction cathodique (réduction) :

À la cathode, les électrons produits à l'anode sont consommés par la réduction d'un oxydant dissous dans l'électrolyte. Le courant circule de la solution vers le métal. La réaction cathodique générale s'écrit :

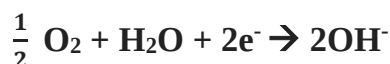


➤ **Demi-réactions cathodiques possibles :**

En milieu désaéré (réduction de l'hydrogène) :



En milieu aéré (réduction de l'oxygène) :



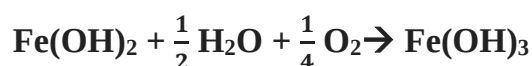
Ces réactions peuvent entraîner la formation d'ions hydroxyles ou le dégagement d'hydrogène à la surface du métal.

➤ **Cas de la corrosion des aciers**

L'oxydation des aciers conduit à la formation d'ions ferreux Fe^{2+} , lesquels peuvent réagir avec les ions hydroxyles pour former de l'hydroxyde ferreux $\text{Fe}(\text{OH})_2$, susceptible de former, dans certains cas, un film protecteur à l'interface métal/solution :



En présence d'oxygène dissous, l'hydroxyde ferreux est oxydé en hydroxyde ferrique $\text{Fe}(\text{OH})_3$ selon la réaction :



Ces produits de corrosion peuvent soit ralentir la corrosion en formant un film protecteur, soit favoriser sa propagation selon leurs propriétés physico-chimiques.

➤ **Diagramme de Pourbaix :**

Le diagramme potentiel-pH de Pourbaix permet de déterminer les domaines de stabilité thermodynamique des différentes espèces chimiques en milieu aqueux. Il précise les conditions pour lesquelles le métal est stable, soumis à la corrosion ou protégé par passivation. [4]

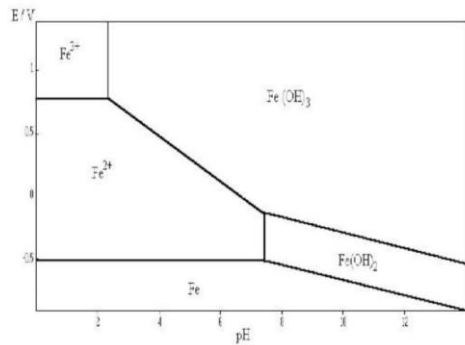


Fig I.2 : Diagramme de stabilité du fer dans l'eau.[4]

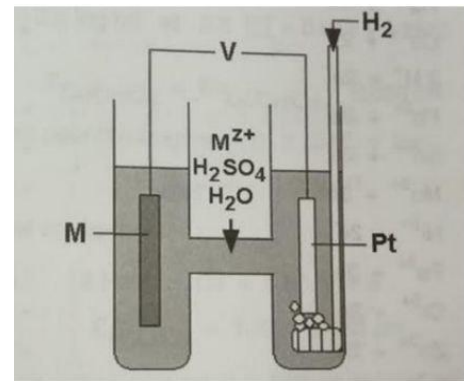


Fig I.3 : Cellule électrochimique.[2]

I.2.3 Les formes de la corrosion :

I.2.3.1 Corrosion uniforme (généralisée) :

La corrosion uniforme, également désignée sous le terme de corrosion généralisée, constitue la forme de corrosion la plus courante et la plus aisée à maîtriser. Elle se développe de manière homogène sur l'ensemble de la surface du matériau exposé à un milieu corrosif. Ce type de corrosion se traduit par une perte régulière de matière, conduisant à une réduction progressive et uniforme de l'épaisseur du matériau.

La corrosion généralisée peut apparaître dans différents environnements corrosifs, tels que l'eau, l'air humide, ainsi que les milieux acides ou basiques. Elle est principalement due à des réactions électrochimiques se produisant entre le matériau et le milieu environnant. [3]



Fig I.4 : Corrosion généralisée. [6]

I.2.3.2 Corrosion localisé :

La corrosion localisée résulte de la présence d'hétérogénéités, soit au niveau du matériau, soit dans le milieu environnant. Elle se caractérise par une attaque préférentielle du métal en des zones spécifiques de sa surface, tandis que le reste du matériau demeure relativement intact.

Ces zones attaquées correspondent généralement à des régions anodiques, par opposition aux zones non affectées, qui jouent le rôle de cathodes. La corrosion localisée regroupe plusieurs formes distinctes, parmi lesquelles on peut citer la corrosion par piqûres, la corrosion galvanique, la corrosion par aération différentielle, la corrosion sélective, entre autres. [4]



Fig I.5 : Corrosion localisé. [3]

I.2.3.2.1 Corrosion galvanique (bimétallique) :

La corrosion galvanique se manifeste lorsqu'une différence de potentiel électrochimique existe entre deux métaux dissemblables mis en contact électrique et immergés dans un milieu corrosif. Cette différence de potentiel provoque un transfert d'électrons entre les deux métaux. Le métal le moins noble, donc le plus sensible à la corrosion, joue le rôle de l'anode et subit la dissolution, tandis que le métal le plus noble se comporte comme une cathode.

Ce type de corrosion est généralement plus intense au niveau de la zone de jonction entre les deux métaux, puis son ampleur diminue avec l'augmentation de la distance par rapport à cette jonction. Une corrosion galvanique sévère peut se produire lorsque le système associe une cathode de grande surface à une anode de petite surface, ce qui accélère l'attaque de cette dernière.

Un exemple courant de corrosion galvanique est observé au niveau des soudures, au plomb ou sans plomb, dans les canalisations en cuivre destinées au transport de l'eau potable. [7]

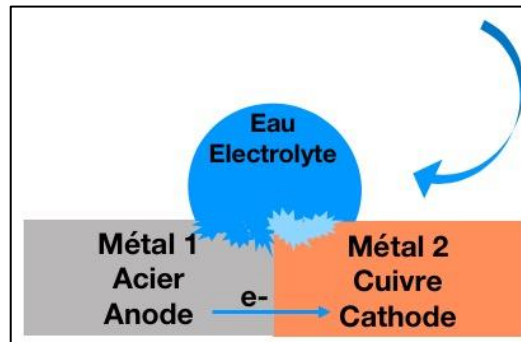


Fig I.6 : Corrosion galvanique. [8]

I.2.3.2.2 Corrosion par piquûre :

La corrosion par piquûres se caractérise par la formation de cavités de profondeurs variables à la surface du métal. Ces cavités sont généralement de l'ordre du millimètre pour la profondeur, avec un diamètre allant de quelques dizaines à quelques centaines de micromètres. L'attaque débute habituellement sur la partie supérieure d'une surface horizontale et se propage presque verticalement vers le bas.

Ce type de corrosion est principalement provoqué par des anions, notamment les ions chlorures. La présence de défauts dans la couche passive favorise le développement de la corrosion en créant des microsites anodiques, c'est-à-dire des zones localement non protégées où se produit la dissolution du métal.

La corrosion par piquûres affecte tous les métaux passifs exposés à des milieux suffisamment agressifs, dès que le potentiel de piquûre ou de rupture est atteint. Trois étapes successives sont nécessaires pour que l'attaque se développe :

Piquûres embryonnaires, Piquûres stables, Dommages irréversibles.

Les sites d'initiation des piquûres correspondent souvent à des zones privilégiées telles que les inclusions non métalliques, les précipités, les dislocations ou les joints de grains. Ces imperfections ne servent de points de départ pour le développement des cavités. [4]

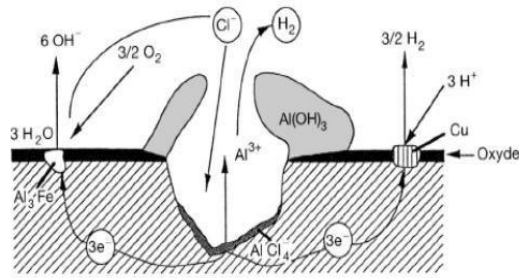


Fig I.7 : Corrosion par piqûre. [4]

I.2.3.2.3 Corrosion intergranulaire :

Les métaux sont constitués d'un ensemble de cristaux, ou grains, séparés par des interfaces appelées frontières ou joints de grains. Ces zones constituent des discontinuités structurales où les propriétés chimiques et électrochimiques peuvent différer de celles du cœur des grains. Dans certaines conditions, les régions situées à proximité des joints de grains deviennent plus réactives, car elles se comportent de manière plus anodique que le reste du matériau.

La corrosion peut alors se propager préférentiellement le long de ces joints de grains, pénétrant ainsi à l'intérieur du métal. Ce mode de dégradation est désigné sous le nom de **corrosion intergranulaire**, également appelée **corrosion inter cristalline**.

Ce type de corrosion peut entraîner une diminution significative de la résistance mécanique des structures, en conduisant à une microstructure fragilisée dans laquelle la cohésion entre les grains est fortement altérée, voire totalement détruite.

La corrosion intergranulaire peut avoir diverses origines. Un cas fréquemment rencontré concerne les aciers inoxydables soumis à des opérations de soudage, où l'attaque corrosive se développe dans une zone située à environ 5 mm de part et d'autre du cordon de soudure, en raison des modifications microstructurales induites par le cycle thermique. [9]



Fig I.8 : Corrosion intergranulaire. [3]

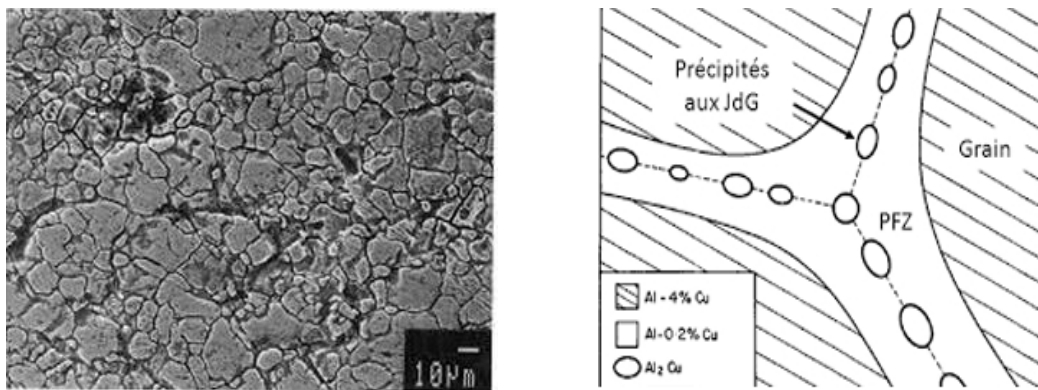


Fig I.9 : Schéma de la corrosion intergranulaire. [10]

I.2.3.2.4 Corrosion sélective :

Pour certains alliages, la corrosion peut se manifester de manière sélective en affectant préférentiellement l'un de leurs constituants, qu'il s'agisse d'une solution solide ou d'un assemblage de phases. Parmi les exemples les plus courants figure la **dézincification des laitons**, qui correspond à une dissolution sélective du zinc et se traduit par la formation de zones poreuses riches en cuivre. Cette attaque peut être fortement localisée, apparaissant sous forme de taches, et progresser principalement en profondeur à l'intérieur de l'alliage plutôt que de manière latérale.

L'ajout de certains éléments d'alliage, tels que l'arsenic, l'antimoine ou le phosphore, permet de limiter ou de prévenir le phénomène de dézincification dans les laitons.

Les fontes grises peuvent également subir une dissolution sélective du fer, conduisant au maintien d'une structure poreuse constituée de graphite. Ce mode de dégradation est

désigné sous le nom de **corrosion graphitique** ou **graphitisation**, et son développement est favorisé par la présence de sulfates dans le milieu corrosif.

De manière générale, ces mécanismes de corrosion sélective entraînent une altération profonde de la microstructure des matériaux concernés, se traduisant par une dégradation significative de leurs propriétés mécaniques. [7]

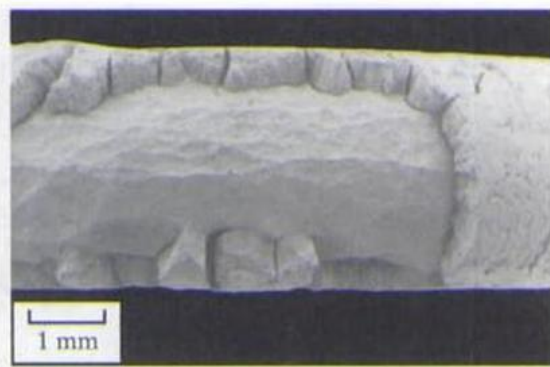


Fig I.10 : Dézincification d'une tige de laiton ayant séjourné douze ans dans l'eau.[11]

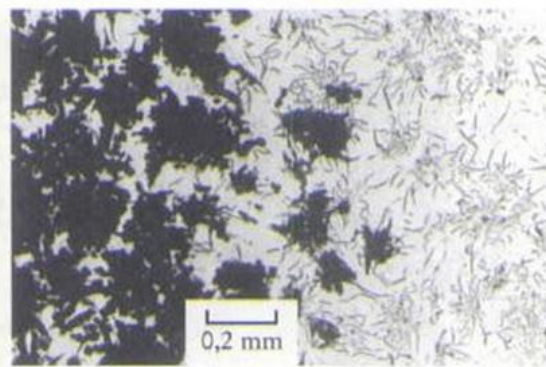


Fig I.11 : Corrosion graphitique d'une fonte à graphite lamellaire. [11]

I.2.3.2.5 Corrosion de crevasse :

La corrosion caverneuse est un mode de dégradation localisée qui se développe préférentiellement dans les zones confinées des surfaces métalliques en contact avec des milieux corrosifs. Elle apparaît notamment dans les crevasses, les trous, les zones de joints, les assemblages à recouvrement, sous les dépôts de surface ainsi que sous les têtes de boulons et de rivets, où de faibles volumes de solution stagnante peuvent être piégés. Ce phénomène est également désigné sous les termes de **corrosion de dépôt** ou **corrosion de joint**.

Les dépôts à l'origine de la corrosion caverneuse peuvent être constitués de sable, de saletés, de produits de corrosion ou d'autres particules solides. Par ailleurs, le contact entre une surface métallique et une surface non métallique, telle qu'un joint, favorise l'initiation de ce type de corrosion. Les aciers inoxydables présentent une sensibilité particulière à la corrosion caverneuse.

Le mécanisme de la corrosion caverneuse repose sur la formation de cellules électrochimiques locales, impliquant l'oxydation du métal et la réduction de l'oxygène dissous avec formation d'ions hydroxyles. Au cours du temps, l'oxygène présent à l'intérieur de la crevasse est progressivement consommé, ce qui entraîne une diminution de sa concentration. L'attaque du métal se poursuit alors, et l'excès de charges positives généré est compensé par la migration des ions chlorure depuis la solution environnante vers l'intérieur de la crevasse, aggravant ainsi le processus corrosif. [7]

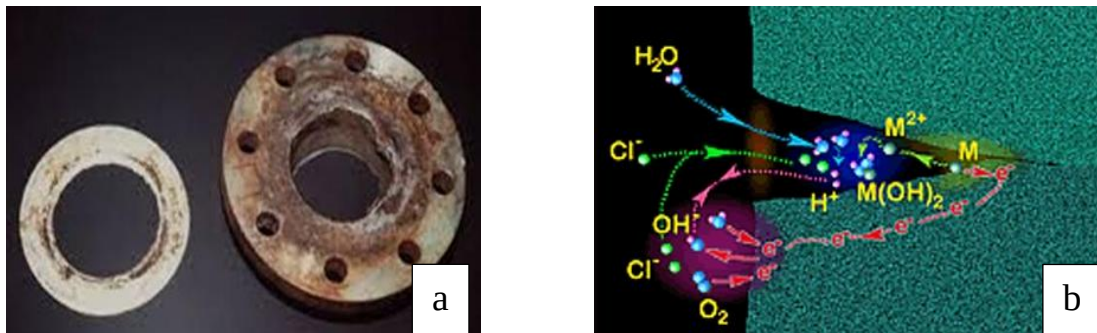


Fig I.12 : Corrosion Caverneuse (a) [12], et son mécanisme (b) [4].

I.2.3.2.6 Corrosion filiforme :

La corrosion filiforme est un mode de dégradation qui se développe sous des revêtements organiques ou métalliques apparemment intacts, présentant une bonne adhérence et une forte résistance à l'isolement vis-à-vis du milieu extérieur, notamment à l'oxygène et à l'humidité. Malgré ces propriétés, des défauts locaux du revêtement peuvent permettre l'initiation du processus corrosif.

L'attaque se manifeste par la formation de filaments fins et ramifiés, qui se propagent sous le revêtement à partir des zones de discontinuité ou de défauts, et s'étendent dans différentes directions à la surface du métal.

En cas d'apparition de corrosion filiforme, il est généralement nécessaire d'éliminer entièrement le revêtement dégradé, de procéder à un traitement approprié de la surface métallique, puis d'appliquer un nouveau revêtement protecteur afin de prévenir toute réapparition du phénomène. [3]

I.2.3.2.7 Corrosion sous contrainte :

Le phénomène de **corrosion sous contrainte (CSC)** se caractérise par la propagation de fissures dans de nombreux métaux et alliages passivables soumis à des contraintes mécaniques statiques, lorsqu'ils sont exposés à un environnement corrosif spécifique. Ce mode d'endommagement résulte de l'interaction entre un état de contrainte appliqué et des réactions de corrosion localisée se développant à la surface du matériau, initialement protégée par un film passif.

Au cours de la corrosion sous contrainte, l'attaque corrosive peut être négligeable sur la majeure partie de la surface du métal, tandis que des fissures fines et profondes se propagent progressivement à l'intérieur du matériau. Les principaux paramètres influençant ce phénomène sont la température, la composition chimique du milieu, la nature du métal ou de l'alliage, le niveau de contrainte appliquée ainsi que la microstructure du matériau.

Des exemples classiques de fissuration par corrosion sous contrainte incluent la fissuration saisonnière des laitons et la fragilisation caustique des aciers. Bien que l'aspect de la rupture soit comparable à celui d'une fracture mécanique fragile, l'origine des fissures est de nature corrosive.

Selon le chemin de propagation, la corrosion sous contrainte peut être classée en deux types principaux : la fissuration **intergranulaire**, qui se développe préférentiellement le long des joints de grains, et la fissuration **transgranulaire**, qui progresse à travers les grains sans préférence pour les joints. À l'échelle microscopique, la propagation des fissures transgranulaires est généralement discontinue et se produit par sauts successifs de l'ordre du micromètre, tandis que la propagation des fissures intergranulaires peut être continue ou discontinue selon le système matériau–environnement considéré. [7]

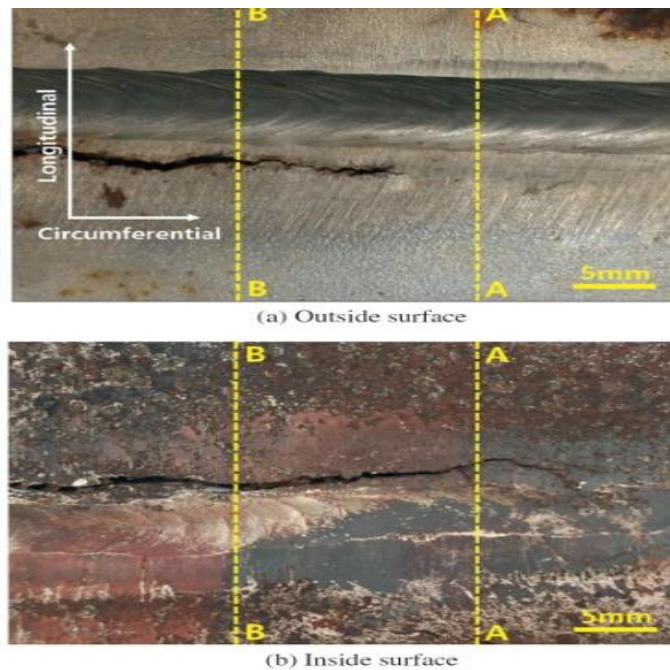


Fig I.13 : Corrosion sous contrainte d'une pipe en acier (a) surface extérieure, (b) surface intérieure. [11]

I.2.3.2.8 Corrosion par érosion :

La corrosion par érosion correspond à une intensification de l'attaque corrosive d'un métal résultant de l'interaction entre un fluide corrosif en mouvement et la surface métallique. Ce phénomène est généralement associé à des vitesses d'écoulement élevées, pour lesquelles des effets d'usure mécanique et d'abrasion viennent s'ajouter aux mécanismes électrochimiques de corrosion.

La corrosion par érosion se développe principalement dans les zones où l'écoulement du fluide devient fortement turbulent, à la suite de perturbations du régime d'écoulement. Ces conditions se rencontrent notamment dans les conduites situées en aval de rétrécissements, d'obstacles, de coudes ou de changements brusques de direction.

Le métal est alors progressivement éliminé de la surface, soit sous forme d'ions dissous, soit sous forme de produits de corrosion relativement stables, lesquels sont ensuite arrachés mécaniquement par l'action du fluide. Ce mode de dégradation survient plus facilement dans le cas des métaux tendres ou lorsque la couche protectrice formée à la

surface du matériau est fragilisée ou détruite. La corrosion par érosion se manifeste généralement par une corrosion uniforme dont la cinétique est fortement accélérée.

La présence de particules solides ou de bulles de gaz dans le fluide accroît considérablement la sévérité du phénomène. Les dommages caractéristiques de la corrosion par érosion peuvent être identifiés par des traces suivant le sens de l'écoulement, prenant la forme de cavités, de rainures, de vagues ou de ravins à surface lisse. [9]

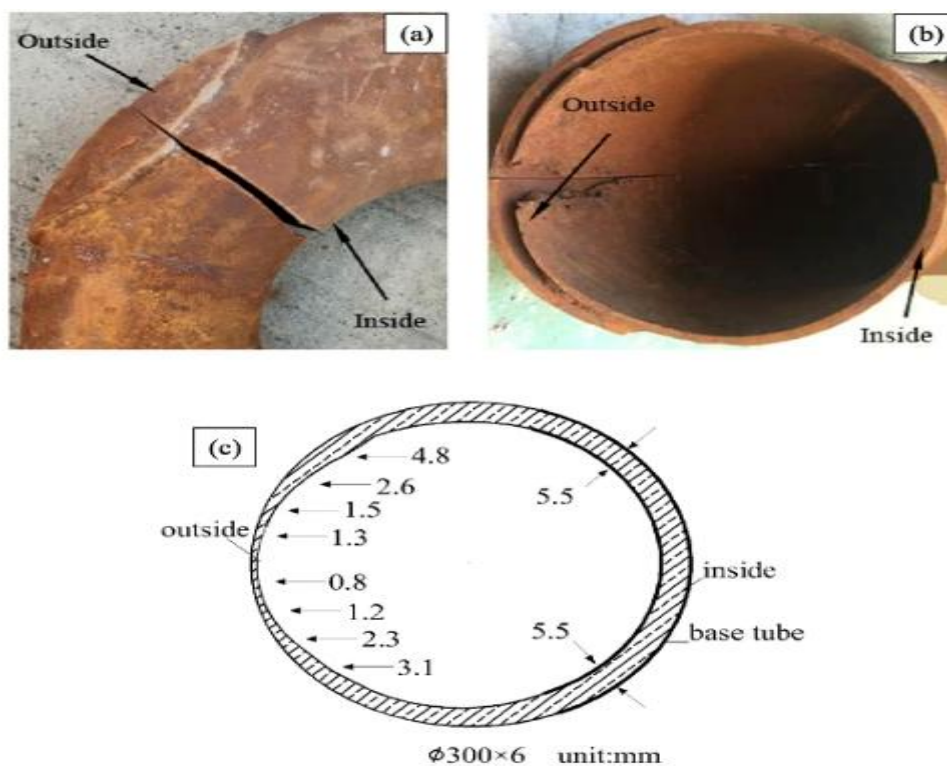


Fig I.14 : Photos du coude de la sortie d'un refroidisseur, **(a)** photo extérieure du coude, **(b)** photo intérieure du coude, **(c)** croquis de la défaillance. [13]

I.2.4 Les facteurs de corrosion :

La corrosion des métaux résulte d'une réaction d'oxydo-réduction (redox) irréversible se produisant entre le métal et un agent oxydant présent dans le milieu corrosif. Cette réaction implique l'oxydation du métal et la réduction de l'agent oxydant, conduisant à

la formation d'un métal oxydé et d'un agent réducteur. Ce phénomène peut être schématiquement représenté par l'équation suivante :



La corrosion est un phénomène complexe résultant de multiples facteurs liés aux interactions chimiques et/ou physiques entre le matériau et son environnement. Parmi les principaux facteurs influençant la corrosion des métaux, on peut citer :

I.2.4.1 La composition chimique du métal : qui correspond à la nature et à la proportion des éléments chimiques constituant le matériau. Elle détermine les caractéristiques de l'alliage et influence directement les propriétés physiques, mécaniques et la résistance à la corrosion du métal.

I.2.4.2 La microstructure du métal : qui désigne l'organisation et la répartition des grains et des phases à l'échelle microscopique. Elle résulte des processus de solidification, de refroidissement et des traitements thermiques ou thermochimiques appliqués au matériau. La microstructure joue un rôle déterminant sur les propriétés mécaniques, la ductilité et le comportement du métal vis-à-vis de la corrosion.

I.2.4.3 La composition chimique de l'environnement : qui concerne la nature et la concentration des espèces chimiques présentes dans le milieu entourant le matériau. Elle peut inclure l'air (teneur en oxygène), l'eau (salinité, pH), les produits chimiques industriels (concentration des réactifs, présence d'inhibiteurs), ainsi que divers contaminants, notamment biologiques. Ces éléments peuvent agir comme agents oxydants ou corrosifs et accélérer les mécanismes de corrosion.

I.2.4.4 Les conditions d'emploi : qui regroupent l'ensemble des paramètres liés à l'utilisation du matériau, tels que la température, l'humidité, la pression, l'état de surface, la géométrie des pièces et les procédés d'assemblage. La prise en compte de ces conditions est essentielle pour évaluer la durabilité du matériau et comprendre les mécanismes de corrosion susceptibles de se développer.

I.2.4.5 Le facteur temps, qui permet d'analyser l'évolution et la cinétique des phénomènes de corrosion. Il intervient dans l'étude de la formation des produits de corrosion, des dépôts et de la dégradation progressive du matériau, ainsi que dans l'évaluation de la corrosion sur différentes périodes d'exposition. [2]

I.2.5 Les paramètres influençant sur la vitesse de corrosion :

Plusieurs facteurs contrôlent la corrosion d'un métal dans un environnement agressif, surtout le pH et la température. Ces paramètres ont un impact direct sur la vitesse de corrosion et un effet indirect sur les propriétés de la phase aqueuse, modifiant sa nature corrosive dans ce cas.

Ces paramètres affectant la vitesse de corrosion incluent :

I.2.5.1 Effet de température : La température exerce une influence importante sur les phénomènes de corrosion, qui correspondent à la dégradation d'un matériau par interaction avec son environnement. En général, l'augmentation de la température entraîne une élévation de la vitesse de corrosion.

Cela s'explique par le fait que des températures plus élevées accélèrent les réactions chimiques et électrochimiques responsables du processus de corrosion. Par ailleurs, la température peut également affecter la stabilité et l'efficacité de la couche de passivation, dont le rôle est de protéger le métal contre l'attaque corrosive. Lorsque cette couche devient instable ou se détériore sous l'effet de la chaleur, le matériau devient plus vulnérable à la corrosion. [4]

I.2.5.2 La salinité : La salinité joue un rôle majeur dans les phénomènes de corrosion. Les ions chlorure, particulièrement agressifs, favorisent l'apparition de corrosions localisées. Leur présence dans la solution provoque des effets combinés : une acidification locale du milieu et une augmentation de la conductivité électrique de l'environnement aqueux, ce qui accélère les mécanismes corrosifs. [4]

I.2.5.3 Acidité : La corrosion d'un matériau dépend fortement du pH de l'électrolyte. En effet, plus la concentration en ions H est grande, plus le milieu devient agressif et plus il perturbe l'équilibre chimique et électrochimique. La vitesse s'accroît progressivement avec la diminution du pH. [14]

I.2.5.4 Régime hydrodynamique : Le régime hydrodynamique affecte la cinétique des réactions électrochimiques en régulant les vitesses de transport des réactifs vers l'interface et en éliminant les produits de réaction de l'interface. Ces conditions peuvent également modifier la concentration des espèces chimiques et le potentiel d'équilibre. Le transport de matière, qui est régi par les conditions hydrodynamiques, influence le taux de réaction en déterminant l'établissement d'une couche limite de diffusion connue sous le nom de couche de Nernst. Cela explique l'importance du brassage de l'électrolyte dans les essais de corrosion de laboratoire. [14]

I.2.5.5 Influence de l'oxygène : L'oxygène joue un rôle crucial dans les mécanismes de corrosion des métaux et de leurs alliages dans les environnements aérés. Dans l'eau de mer, sa concentration dissoute varie considérablement, en fonction de facteurs physiques, chimiques et biologiques tels que : les échanges à l'interface air/océan, la diffusion et le mélange dans la masse d'eau, la photo-oxydation et les réactions chimiques d'oxydation.

La dissolution de l'oxygène est régie par des lois physiques et dépend de la pression atmosphérique, de la température et de la salinité. Sa solubilité diminue avec l'augmentation de la température et de la salinité, mais augmente lorsque la pression augmente. Par exemple, à 20 °C, la solubilité de l'oxygène en eau pure est de $2,8 \times 10^{-4}$ mol/L, alors qu'elle tombe à $2,3 \times 10^{-4}$ mol/L pour une salinité de 0,35 %. De manière générale, la concentration d'oxygène dissous dans l'eau de mer varie entre 0 et 5×10^{-3} mol/L. [14]

I.2.6 Moyens de lutte contre la corrosion :

I.2.6.1 Prévention par un choix judicieux des matériaux :

La réduction des risques de corrosion peut être assurée par une sélection appropriée des matériaux. Ce choix repose sur plusieurs critères essentiels, notamment le domaine d'utilisation, la nature et l'intensité des sollicitations mécaniques et thermiques, les traitements appliqués, ainsi que les considérations économiques liées au coût et à la disponibilité des matériaux.

Le matériau retenu doit être choisi en fonction des conditions réelles d'exploitation et de l'agressivité du milieu environnant. Il n'existe pas de métal ou d'alliage totalement résistant à la corrosion ; seuls certains matériaux présentent une bonne résistance dans

des environnements spécifiques. Le comportement à la corrosion constitue donc un critère important dans la sélection des matériaux, bien qu'il ne soit pas le seul facteur déterminant.

Par ailleurs, la résistance à la corrosion dépend non seulement de la nature du métal, mais également des caractéristiques du milieu dans lequel il évolue.

Un tableau récapitulatif présente la résistance à la corrosion de quelques métaux purs dans différents environnements. [14]

Tableau I.1 : Résistance à la corrosion de certains métaux dans les milieux corrosifs.[14]

Milieu	Fe	Cr	Ni	Cu	Al	Zn	Ti	Ta
Air humide	-	+	+	+	+	m	+	+
Eau froide naturelle aérée	m	+	+	+	-	+	+	+
Eau de mer	-	+	+	m	m	-	+	+
Acide non oxydant	-	m	m	+	-	-	+	+
Acide oxydant	-	+	m	-	-	-	+	+
Acide + Cl ⁻	-	+	m	-	-	-	m	+
Base + O ₂	+	+	+	+	-	-	+	m
Oxydation à haute température	m	+	+	-	-	-	m	-

+ : Bonne résistance à la corrosion ; - : Mauvaise résistance à la corrosion ; m : résistance moyenne

I.2.6.2 Protection cathodique :

La protection cathodique est une technique visant à empêcher la corrosion d'un métal en lui fournissant un courant électrique externe. Elle repose sur le principe de rendre le métal à protéger cathodique afin de limiter les réactions de corrosion. On distingue principalement deux méthodes : la protection par anode sacrificielle et la protection par courant imposé.

a) Protection par anode sacrificielle : Aussi appelée protection cathodique galvanique, cette méthode consiste à fixer au métal à protéger une anode constituée d'un matériau plus électropositif. Cette anode se corrode de manière préférentielle, assurant ainsi la protection du métal principal contre la corrosion.

b) Protection par courant imposé : Cette technique repose sur l'application d'un courant continu fourni par une source externe, telle qu'un générateur ou un redresseur. Le courant appliqué maintient la surface métallique à un potentiel cathodique, ce qui permet de réduire ou d'empêcher les phénomènes de corrosion.[2]

I.2.6.3 Protection anodique :

La protection anodique s'applique aux métaux passifs ou passivables. Elle repose sur la modification de la polarité électrochimique afin que le métal à protéger fonctionne comme une anode, ce qui permet de maîtriser le phénomène de corrosion. Cette technique est employée dans des cas particuliers, notamment pour certaines structures en béton armé. Bien qu'une corrosion subsiste, celle-ci reste lente et homogène, donc acceptable. Le passage de l'état actif à l'état passif se traduit par une forte réduction de la densité de courant. En pratique industrielle, cette méthode est utilisée pour maintenir la passivité des métaux. [2]

I.2.6.4 Protection par revêtements :

Cette technique repose sur l'application d'un revêtement agissant comme une barrière physique entre le métal et le milieu agressif, afin de limiter son exposition aux agents corrosifs. Les revêtements les plus couramment utilisés comprennent les peintures, les vernis, les films polymères, les couches céramiques ainsi que les revêtements métalliques tels que la galvanisation. On distingue généralement deux grandes catégories : les revêtements non métalliques et les revêtements métalliques.

a) Revêtements non métalliques : Les revêtements non métalliques sont dépourvus de constituants métalliques. Ils peuvent être à base de polymères, de céramiques, de peintures ou d'autres matériaux similaires. Leur rôle principal est d'assurer une protection anticorrosion en créant une barrière isolante ou en limitant les réactions chimiques indésirables entre le substrat métallique et l'environnement corrosif. Ces revêtements incluent notamment :

Les revêtements polymériques, tels que les résines époxy, les polyuréthanes ou les polyesters, largement utilisés pour la protection des surfaces métalliques ;

Les revêtements céramiques, comme ceux à base de zircone ou d'alumine, offrant une résistance accrue à la corrosion, à l'usure et aux températures élevées ;

Les peintures anticorrosion, formulées avec des additifs spécifiques destinés à renforcer la durabilité des surfaces métalliques.

b) Revêtements métalliques : Les revêtements métalliques consistent à déposer une couche de métal sur la surface du matériau à protéger. Ils assurent une protection efficace contre la corrosion en isolant le substrat du milieu corrosif. En outre, ils peuvent améliorer la résistance mécanique, la conductivité électrique ou thermique, ainsi que l'aspect esthétique du matériau. Dans ce type de protection, le métal de revêtement n'interagit pas chimiquement avec le substrat et ne diffuse pas au sein de celui-ci. [2]

1.2.6.5 Protection par inhibiteur :

Les inhibiteurs de corrosion sont des substances chimiques introduites dans un milieu corrosif afin de ralentir, voire d'empêcher, les mécanismes de dégradation des matériaux métalliques. Leur action repose soit sur la formation d'un film protecteur à la surface du métal, soit sur la modification des propriétés chimiques du milieu, ce qui réduit l'intensité des réactions de corrosion. Ces composés sont couramment employés dans les milieux acides, les circuits de vapeur ainsi que les systèmes de refroidissement. Contrairement à d'autres méthodes, la protection s'effectue par l'intermédiaire du milieu corrosif et non directement sur le matériau.

La protection offerte par les inhibiteurs peut être permanente, assurant une action durable, ou temporaire, notamment lors des phases de stockage ou de transport.

L'efficacité d'un inhibiteur correspond à sa capacité à diminuer ou à prévenir la corrosion dans un environnement donné. Elle est généralement évaluée à travers plusieurs paramètres, tels que la réduction du taux de corrosion sans altération des propriétés physico-chimiques du métal, la formation d'un film protecteur stable, la durée de la protection, la résistance aux variations des conditions environnementales, la stabilité thermique, la compatibilité avec d'autres additifs présents dans le milieu et le coût économique du procédé.

Il est important de souligner que les performances d'un inhibiteur dépendent fortement de la nature du matériau, du milieu corrosif et des conditions d'exploitation. Des essais expérimentaux approfondis sont donc nécessaires afin d'évaluer son efficacité réelle dans chaque application spécifique.

Les inhibiteurs de corrosion peuvent être classés selon leur composition chimique ou leur mécanisme d'action. On distingue notamment les inhibiteurs inorganiques, tels que les chromates, nitrates, phosphates et silicates, les inhibiteurs organiques comprenant les amines, imidazoles et sels d'ammonium quaternaire, ainsi que les inhibiteurs organométalliques. Il existe également des inhibiteurs volatils, principalement à base de composés azotés, des inhibiteurs favorisant la formation de films passifs, utilisés pour l'aluminium et les aciers inoxydables, et enfin des inhibiteurs mixtes combinant plusieurs familles afin d'optimiser la protection anticorrosion. [2]

I.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions générales sur la corrosion, ses mécanismes et ses différentes formes. La corrosion est un phénomène naturel qui provoque la dégradation des métaux sous l'effet de leur environnement, ce qui entraîne des pertes techniques et économiques importantes.

La compréhension de ce phénomène est essentielle pour choisir les méthodes de protection adaptées et limiter ses effets.

Ainsi, après avoir présenté les bases théoriques du phénomène de corrosion et les principes généraux de sa protection, il devient pertinent de s'intéresser à des solutions plus respectueuses de l'environnement. Dans cette optique, le chapitre suivant sera consacré aux inhibiteurs verts ainsi qu'aux méthodes d'extraction des composés naturels utilisés dans la lutte contre la corrosion.

Les Références Bibliographiques :

- [1] Bachega Cruz, J. P., Gabriel Veruz, E., Vieira Aoki, I., Miralles Schleder, A., Francisco Martha de Souza, G., Leitão Vaz, G., Oliveira de Barros, L. et Theodoro Ramos Martins, R. (2026). « Uniform corrosion assessment in oil and gas pipelines using commercial corrosion prediction models – Part 2: Uncertainty and risk considerations based on statistical analyses of gravimetric laboratory tests, offshore pipelines inspections, and manufacturing tolerances ». *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 100, 105836.
- [2] Laid, S. (2023). Étude du traitement de surface par boruration sur l'acier allié Z80. Thèse de doctorat, École Nationale Polytechnique, Alger, Algérie.
- [3] Khattab, K. (2024). Diagnostic des courants vagabonds dans un site industriel sous protection cathodique. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie.
- [4] Boulmerka, R. (2022). Étude de la corrosion des instruments chirurgicaux dentaires lors de la stérilisation. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie.
- [5] HAL Archives Ouvertes. (2017). Document disponible à l'adresse : <https://hal.science/hal-02433874/file/201700001512.pdf> (consulté le 09 janvier 2026).
- [6] Qasim, A. et Shariff, A. M. (2019). « Perspective sur les inhibiteurs d'hydrates de gaz et de corrosion à double usage pour la garantie d'écoulement ». *Journal of Petroleum Science and Engineering*.
- [7] Hamadi, L. (2020). Application des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers en milieux agressifs. Thèse de doctorat, Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd, Batna, Algérie.
- [8] GBM France. Une solution complète pour la fabrication et la protection contre la corrosion. Disponible à l'adresse : <https://www.gbmfrance.com> (consulté le 18 janvier 2026).
- [9] Khoshnaw, F. (2025). « General Aspects of Corrosion, Corrosion Control, and Corrosion Prevention ». Dans : *Corrosion Atlas Series Section A: Corrosion Atlas Case Studies*, p. XXIX–XIV.

- [10] Chababe, D. (2022). Corrosion et méthodes de protection. Support de cours, Université Moulay Ismaïl, Meknès, Maroc.
- [11] Bensaada. (2015). Corrosion et protection des métaux : Chapitre 5 – Les différentes formes de corrosion. Support pédagogique, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie.
- [12] Bensaha, A. et Sabrou, A. (2020). Étude de l'inhibition de la corrosion du fer en milieu acide par l'extrait de Periploca. Mémoire universitaire, Université de Ghardaïa, Algérie.
- [13] Zhu, M., Sun, L., Ou, G., Wang, K. et Sun, Y. (2016). « Erosion corrosion failure analysis of the elbow in sour water stripper overhead condensing reflux system ». Engineering Failure Analysis, 62, p. 93-102.
- [14] Khiati, Z. et Mrah, L. (2023). Corrosion et protection des métaux. Polycopié de cours, Faculté de Chimie, Département de Chimie physique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf (USTO-MB), Oran, Algérie.



Chapitre II

II.1 Introduction :

Dans le domaine de la protection contre la corrosion, les inhibiteurs constituent une solution efficace et largement utilisée pour réduire la dégradation des matériaux métalliques en milieu agressif. Leur efficacité dépend non seulement de leur nature chimique et de leur mode d'action, mais également des conditions d'application et du milieu corrosif. Afin d'obtenir des inhibiteurs d'origine naturelle, plusieurs méthodes d'extraction à partir de matrices végétales sont employées.

Ce chapitre présente les notions générales relatives aux inhibiteurs de corrosion, notamment leur définition, leur classification ainsi que leurs principaux critères de choix. Il décrit également les différentes techniques d'extraction utilisées pour l'obtention de composés actifs. L'objectif est de mettre en évidence les principes fondamentaux de chaque méthode ainsi que leurs avantages et limites.

II.2 Protection contre la corrosion par l'utilisation des inhibiteurs :

La protection contre la corrosion peut être obtenue par l'incorporation d'un composé spécifique, dénommé « inhibiteur de corrosion », utilisable tant pour une protection permanente que temporaire (stockage, nettoyage ou décapage). Ajouté à faible concentration dans le milieu électrolytique, cet inhibiteur agit en diminuant de manière substantielle la cinétique des réactions de corrosion, pouvant les inhiber totalement, sans affecter les propriétés physico-chimiques du matériau métallique, notamment sa résistance mécanique. [1]

II.3 Historique de l'inhibition de corrosion :

Il est ardu de dater précisément l'émergence de l'inhibition comme technologie autonome. Avant 1945, moins d'une trentaine de publications traitaient de ce domaine. Waldrip (1948) cite un rapport de 1943 relatif à la protection anticorrosion dans les puits pétroliers. De 1945 à 1954, une profusion d'études a porté sur l'inhibition, couvrant des secteurs variés tels que l'aviation, les chaudières, les circuits de refroidissement, les moteurs diesel, les sels de déneigement, les raffineries et les pétroliers. Ces travaux marquent un essor technologique notable.

Par la suite, l'intérêt pour l'inhibition s'est accru de manière soutenue, comme l'illustre l'augmentation exponentielle des publications. Ainsi, en 1970, 647 articles étaient déjà recensés sur ce sujet. [2]

II.4 Définition des inhibiteurs de corrosion :

Selon la définition adoptée par la National Association of Corrosion Engineers (NACE), les inhibiteurs de corrosion sont des substances chimiques, organiques ou inorganiques, ajoutées à faible concentration dans un milieu corrosif, généralement liquide et plus rarement gazeux, afin de réduire la vitesse ou la cinétique des processus de corrosion. Leur action repose principalement sur la formation d'une couche protectrice à la surface métallique, jouant le rôle d'une barrière isolante partielle ou totale vis-à-vis du milieu agressif, ce qui permet de limiter la dégradation du métal.

Les inhibiteurs de corrosion constituent ainsi une méthode de protection des matériaux métalliques agissant directement au sein du milieu corrosif. Cette approche se distingue des techniques conventionnelles telles que les revêtements protecteurs ou la protection cathodique, puisqu'elle n'intervient pas directement sur le métal, mais agit à travers la modification des interactions physicochimiques au sein du milieu agressif. Elle présente plusieurs avantages, notamment sa simplicité de mise en œuvre, son coût relativement modéré ainsi que son efficacité dans des systèmes métal/milieu spécifiques.[2][3]

II.5 Propriétés des inhibiteurs de corrosion :

- Bonne capacité d'adsorption sur la surface métallique afin de former une couche protectrice.
- Formation d'un film barrière isolant le métal du milieu corrosif.
- Bonne stabilité chimique et thermique dans différentes conditions opératoires.
- Bonne solubilité ou dispersibilité dans le milieu corrosif.
- Efficacité inhibitrice élevée même à faible concentration.
- Compatibilité avec la nature du métal et le milieu agressif.
- Faible toxicité et impact environnemental réduit.
- Coût économique raisonnable et facilité d'utilisation en milieu industriel. [3] [4]

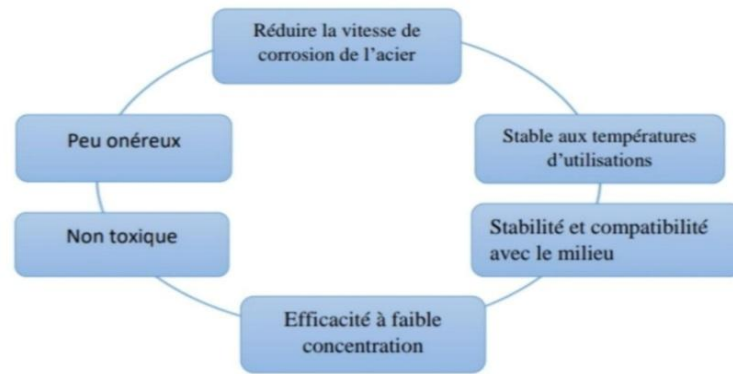


Fig II.1 : Propriétés des inhibiteurs. [5]

II.6 Utilisation des inhibiteurs de corrosion :

- **Traitement des eaux :** Les inhibiteurs de corrosion sont largement utilisés dans les eaux de refroidissement, les eaux sanitaires, les procédés industriels et les chaudières. Ils permettent de limiter les réactions électrochimiques responsables de la corrosion, de réduire les dépôts (tartre, boues) et de contrôler les effets des gaz dissous tels que l'oxygène et le dioxyde de carbone. Leur utilisation contribue ainsi à améliorer la durée de vie des équipements et à maintenir leur rendement thermique.
- **Industrie pétrolière :** Dans ce secteur, les inhibiteurs sont essentiels à toutes les étapes, du forage à l'extraction, jusqu'au raffinage, au stockage et au transport. La corrosion y est favorisée par la présence d'eau, de gaz acides (CO_2 , H_2S) et de milieux agressifs. Les inhibiteurs, souvent organiques, agissent par adsorption sur les surfaces métalliques, formant une barrière protectrice qui réduit les interactions avec le milieu corrosif.
- **Systèmes de gaz corrosifs :** Les pipelines transportant des gaz contenant des composés soufrés (comme H_2S) sont particulièrement exposés à la corrosion. L'utilisation d'inhibiteurs chimiques, notamment ceux à base d'ions ammonium ou d'amines, permet de ralentir les mécanismes de corrosion et d'assurer la sécurité et la durabilité des installations.
- **Industrie des peintures :** Les inhibiteurs sont incorporés comme additifs dans les revêtements protecteurs appliqués sur les métaux. Ils renforcent la résistance à la

corrosion en formant une couche protectrice qui empêche la pénétration de l'humidité et des agents agressifs, améliorant ainsi la durabilité des structures métalliques.

- **Réseaux d'eau potable** : Dans les canalisations en acier ou en fonte, les inhibiteurs tels que les polyphosphates ou les bicarbonates de calcium sont utilisés pour former une couche protectrice interne, limitant la dissolution du métal et la contamination de l'eau.
- **Liquides de refroidissement des moteurs** : Les circuits de refroidissement des moteurs automobiles contiennent des inhibiteurs (chromates, nitrites, borates, etc.) qui protègent les différents métaux (acier, aluminium, cuivre) contre la corrosion, tout en assurant un bon transfert thermique.
- **Industrie de la construction** : Les armatures en acier dans le béton sont sensibles à la corrosion, notamment en présence de chlorures ou de carbonatation. L'ajout d'inhibiteurs (nitrates, phosphates, chromates, etc.) permet de retarder l'initiation de la corrosion et d'augmenter la durabilité des structures.
- **Protection temporaire des métaux** : Les inhibiteurs sont utilisés lors des opérations de décapage acide, de nettoyage ou de stockage pour prévenir la corrosion transitoire. Ils peuvent être appliqués sous forme d'inhibiteurs volatils ou incorporés dans des huiles et graisses de protection.
- **Huiles de coupe et procédés d'usinage** : Dans les opérations de fabrication mécanique, les inhibiteurs sont ajoutés aux huiles de coupe afin de protéger les pièces métalliques et les outils contre la corrosion pendant et après l'usinage. [6]

II.7 Les critères de choix d'un inhibiteur :

Un inhibiteur de corrosion doit généralement répondre aux exigences suivantes :

- Réduire efficacement la vitesse de corrosion du métal sans altérer ses propriétés physico-chimiques, notamment sa résistance mécanique (en évitant, par exemple, la fragilisation par l'hydrogène en milieu acide).
- Exhiber une bonne stabilité chimique face aux constituants du milieu corrosif, particulièrement les agents oxydants.
- Être économiquement viable, avec un coût raisonnable.
- Conserver son efficacité dans la plage de températures d'utilisation.

- Performant à faibles concentrations.
- Respecter les normes de sécurité, incluant faible toxicité et conformité environnementale. [7]

II.8 Classification des inhibiteurs de corrosion :

Les inhibiteurs de corrosion peuvent être classés selon trois critères principaux :

- En fonction de la réaction partielle.
- En fonction de leur mécanisme d'action.
- En fonction de leur domaine d'application.

II.8.1 Classification selon la réaction partielle :

II.8.1.1 Inhibiteurs anodiques :

Les inhibiteurs anodiques, appelés aussi inhibiteurs de passivation, sont généralement de nature inorganique. Ils agissent en ralentissant la réaction anodique et en favorisant la formation d'une couche passive protectrice à la surface du métal.

Ces inhibiteurs réagissent avec les premiers produits de corrosion pour former un film cohésif, stable et insoluble, qui protège le métal. Leur action peut également impliquer un phénomène d'adsorption sur la surface.

Du point de vue électrochimique, ils provoquent un déplacement du potentiel vers des valeurs plus positives, en raison du ralentissement de la réaction anodique. [8]

II.8.1.2 Inhibiteurs cathodiques :

Les inhibiteurs cathodiques empêchent ou ralentissent la réaction cathodique lors du processus de corrosion. Ils sont généralement de nature inorganique et contiennent des ions métalliques capables de réagir en milieu alcalin pour former des composés insolubles.

Ces composés se déposent préférentiellement sur les zones cathodiques, créant une couche protectrice. De plus, ces inhibiteurs peuvent s'adsorber à la surface du métal pour former un film compact et adhérent.

Cette couche augmente l'impédance de la surface métallique et limite la diffusion des espèces réductibles, ce qui renforce l'inhibition de la réaction cathodique. [8]

II.8.1.3 Inhibiteurs mixtes :

Les inhibiteurs mixtes sont généralement des composés organiques, y compris certains extraits de plantes. Ils agissent à la fois sur les réactions anodiques et cathodiques, en réduisant la vitesse des deux, sans modifier significativement le potentiel de corrosion.

En pratique, le potentiel de corrosion en présence de l'inhibiteur reste proche de celui mesuré sans inhibiteur.

Leur action repose principalement sur leur adsorption à la surface du métal, où ils forment une couche protectrice hydrophobe. Cette couche constitue une barrière qui limite la dissolution du métal dans l'électrolyte. Pour être efficaces, ces inhibiteurs doivent être solubles ou bien dispersés dans le milieu environnant. [8]

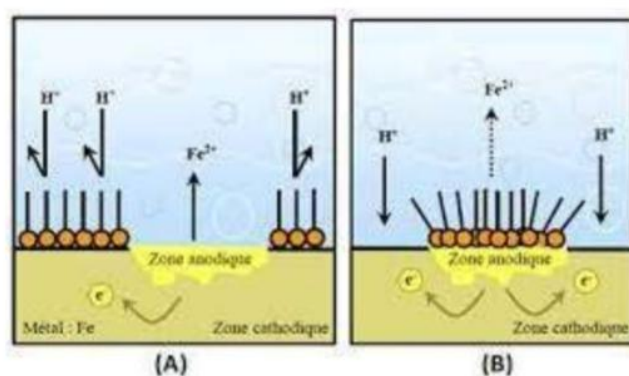


Fig II.2 : Action des inhibiteurs de corrosion. [9]

II.8.2 Classification selon le mécanisme réactionnel :

II.8.2.1 Inhibition de corrosion par adsorption :

L'inhibition de la corrosion par adsorption repose sur la fixation d'une espèce inhibitrice à la surface du métal, ce qui permet de ralentir le processus de corrosion. En général, les inhibiteurs organiques agissent selon ce mécanisme en formant une barrière protectrice qui limite l'action du milieu agressif. Cette adsorption se fait principalement via la

fonction active de la molécule inhibitrice, bien que d'autres groupes polaires puissent également y participer.

Par ailleurs, les inhibiteurs agissant par chimisorption sont généralement plus efficaces que ceux reposant sur la physisorption, car ils établissent des liaisons plus fortes avec la surface métallique grâce à un partage d'électrons. Dans ce cas, la molécule inhibitrice joue le rôle de donneur d'électrons, tandis que le métal agit comme accepteur. [8]

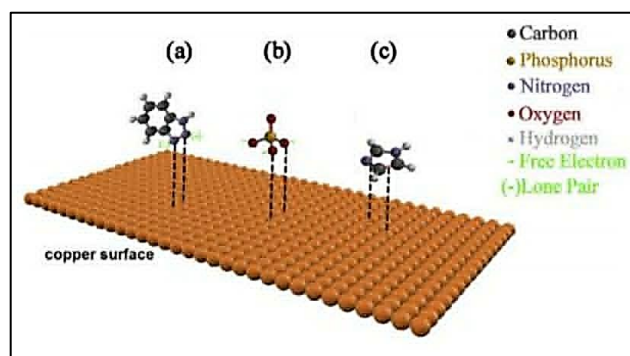


Fig II.3 : Schéma du processus d'adsorption d'un inhibiteur de corrosion sur la surface du métal. [10]

II.8.2.2 Inhibition de corrosion par passivation :

L'inhibition de la corrosion par passivation consiste à rendre le métal moins réactif, soit en appliquant un revêtement, soit en modifiant de manière spécifique sa surface. Certains inhibiteurs oxydants peuvent provoquer une passivation spontanée du métal, ce qui permet de ralentir la corrosion. Ce phénomène peut également être renforcé par la présence d'agents tampons, qui augmentent le pH à proximité de la surface métallique.

En général, les inhibiteurs minéraux agissent selon ce mécanisme. Ils favorisent la formation et le renforcement de la couche d'oxyde protectrice qui se développe naturellement à la surface du métal, assurant ainsi la passivation du substrat. Par ailleurs, ces inhibiteurs peuvent se réduire au niveau des pores de la couche d'oxyde ou d'hydroxyde, dont le degré de protection peut varier.

L'ion chromate constitue un exemple classique d'inhibiteur passivant. Toutefois, son utilisation reste limitée en raison de sa forte toxicité et de son caractère cancérogène. [8]

II.8.2.3 Inhibition de corrosion par précipitation : Les inhibiteurs agissant par précipitation favorisent la formation d'un film protecteur à la surface du métal. Ce film est constitué de sels minéraux ou de complexes organiques peu solubles, issus de la précipitation des produits formés lors des réactions cathodiques. Ainsi, ils limitent simultanément la réaction cathodique et empêchent la dissolution anodique.

Ces inhibiteurs sont généralement des sels issus d'un acide faible et d'une base forte, tels que les borates, les silicates, les phosphates, les polyphosphates ainsi que les sels de zinc. [11]

II.8.2.4 Inhibition de corrosion par élimination de l'agent corrosif :

S'applique principalement aux systèmes fermés. Elle est couramment utilisée dans les circuits d'eau chaude des centrales thermiques. Cette méthode consiste à ajouter de faibles quantités de sulfite de sodium (Na_2SO_3) ou d'hydrazine (N_2H_4) à une eau préalablement dégazée et déionisée, afin d'éliminer les dernières traces d'oxygène dissous.

Ainsi, la suppression de cet agent corrosif permet de prévenir efficacement la corrosion.[8]

II.8.3 Classification selon le domaine d'application :

Les inhibiteurs de corrosion peuvent être classés en fonction de leur domaine d'utilisation.

On distingue ainsi ceux employés en milieux aqueux, gazeux ou organiques, notamment dans les peintures, les lubrifiants et les carburants. En milieu aqueux, le choix des inhibiteurs dépend principalement de la valeur du pH. La classification peut donc être établie comme suit :

II.8.3.1 Inhibition en milieu acide :

Les inhibiteurs utilisés en milieu acide servent principalement à limiter l'attaque chimique de l'acier lors des opérations de décapage et de détartrage, qui se déroulent dans des environnements acides. Ils sont également largement employés dans l'industrie pétrolière, notamment par leur ajout aux fluides de forage.

Dans ce type de milieu, les inhibiteurs les plus courants sont d'origine organique, en raison de leur forte capacité à s'adsorber sur les surfaces métalliques, bloquant ainsi les sites électroactifs. Leur structure est généralement constituée de deux parties : une partie non polaire, hydrophobe et volumineuse, formée essentiellement de chaînes carbonées, et une partie polaire hydrophile comportant un ou plusieurs groupes fonctionnels.

Le groupe fonctionnel joue un rôle clé dans le processus d'adsorption à la surface du métal, tandis que la partie non polaire contribue à bloquer partiellement les sites actifs.

L'adsorption peut se faire soit par une simple attraction électrostatique entre les sites polaires, soit par un partage d'électrons via des phénomènes de conjugaison.

Par ailleurs, certains inhibiteurs agissent en formant des complexes peu solubles avec les cations métalliques issus de la dissolution partielle du métal. Ces complexes précipitent ensuite à la surface, formant une couche protectrice qui limite la corrosion.[8]

II.8.3.2 Inhibition en milieu neutre :

En milieu neutre ou alcalin, les inhibiteurs de corrosion sont largement utilisés pour protéger les conduites, notamment dans les circuits de refroidissement. Dans ces milieux, la corrosion est principalement due à l'oxygène dissous. Ainsi, la protection du métal peut être assurée en ralentissant le transfert de l'oxygène vers la surface, ce qui diminue la vitesse de la réaction de réduction cathodique.

D'autres approches permettent également de limiter la corrosion, comme la passivation du métal ou l'utilisation de molécules capables de s'adsorber à sa surface. L'inhibition par précipitation repose sur la formation de films superficiels qui agissent comme une barrière, freinant la diffusion des espèces électroactives vers les sites cathodiques. Les polyphosphates et les organophosphates en sont des exemples courants.

Par ailleurs, l'inhibition par passivation est particulièrement intéressante pour la protection de l'acier et d'autres métaux utilisés dans les systèmes de refroidissement. Elle est favorisée par l'emploi d'inhibiteurs oxydants et d'agents tampons, qui maintiennent un pH élevé et facilitent la formation d'oxydes ou d'hydroxydes peu solubles à la surface du métal. [8]

II.8.3.3 Inhibition en phase gazeuse :

L'inhibition en phase gazeuse est utilisée pour assurer une protection temporaire des pièces métalliques lors de leur transport ou de leur stockage, notamment pour les machines et les composants électroniques. Dans ce type d'application, on emploie généralement des composés organiques à pression de vapeur élevée, capables de se volatiliser et de se répartir dans l'environnement à protéger.

Ces inhibiteurs, principalement organiques, agissent en se déposant par adsorption sur la surface du métal, formant ainsi une couche protectrice qui limite les phénomènes de corrosion. Par ailleurs, les inhibiteurs dits « verts » constituent une alternative intéressante pour ce type d'usage, car ils sont composés de molécules organiques biodégradables et présentent généralement une faible écotoxicité. [8]

II.8.3.4 Inhibiteurs pour le milieu organique :

De façon générale, les inhibiteurs utilisés en milieu organique sont incorporés dans des produits tels que l'essence, les lubrifiants pour moteurs et les peintures. Dans le cas des systèmes de revêtement, l'application se fait généralement en deux étapes : une couche primaire, suivie d'une couche de finition. Avant cela, une couche d'apprêt est appliquée afin d'assurer le rôle de liant entre le métal et la peinture.

À l'interface entre la surface métallique et le revêtement se forme une zone appelée «interphase», caractérisée par des propriétés spécifiques, notamment la diffusion d'espèces entre les différentes phases et la possibilité de réactions chimiques. L'amélioration de la stabilité et de la résistance de cette interface repose souvent sur la conception d'une interphase aux propriétés adaptées.

La couche d'apprêt, appliquée comme une étape distincte, joue un rôle essentiel : elle améliore l'adhérence initiale du revêtement, renforce la stabilité chimique en milieu agressif et assure une transition progressive des propriétés mécaniques entre le métal et la peinture. L'ajout d'inhibiteurs de corrosion dans ces formulations est largement répandu, afin de protéger les métaux à court et à long terme en formant une barrière physique contre le milieu corrosif.

Parmi les inhibiteurs utilisés en milieu organique, on peut citer l'oxyde de plomb

(Pb_3O_4) et le chromate de zinc (ZnCrO_4). Par ailleurs, certains constituants organiques des peintures, tels que les tanins, peuvent également contribuer à l'inhibition de la corrosion. [8]

II.9 Inhibiteurs naturels de corrosion :

De manière générale, les inhibiteurs naturels sont des composés organiques qui agissent principalement par adsorption. Ils proviennent le plus souvent d'extraits de plantes, utilisés sans nécessiter de purification ni de prétraitement, et présentent l'avantage d'être écoresponsables et peu toxiques.

Leur efficacité repose sur leur capacité à s'adsorber à la surface du métal, formant ainsi une couche protectrice qui limite l'action du milieu agressif. Cette adsorption se fait essentiellement via les fonctions actives de l'inhibiteur, bien que d'autres groupements polaires puissent également participer à la fixation sur la surface métallique. [8]

II.10 Les inhibiteurs spécifiques aux métaux ferreux :

De manière générale, chaque matériau possède une famille d'inhibiteurs adaptée pour assurer une protection efficace contre la corrosion. Par exemple, dans le cas du cuivre, les dérivés azolés sont fréquemment utilisés et présentent une grande efficacité dans certaines conditions.

Concernant les métaux ferreux, notamment en milieux neutres ou alcalins, il existe une large variété d'inhibiteurs de corrosion. Ces différents inhibiteurs sont généralement répertoriés et présentés dans un tableau récapitulatif :

Tableau II.1 : Inhibiteurs les plus couramment utilisés pour la protection des métaux ferreux.

Molécules inhibitrices	Matériaux
Amine grasse, polyamines	Acier (XC35)
Phosphonates et acides phosphoniques	Acier (XC35)
Alkylamine	Fer (99.99 %)
Acides phosphoniques / amines grasses ou acide Polyacriques /amines grasses	Acier (4340)

Alkyimidazole amines grasses / sels d'acide	Acier (XC38)
Phosphonocarboxylique	Acier (XC38)
Carboxylates	Acier
Benzoates	Fer
Phosphonates	Acier
Benzimidazoe	Acier(XC38)
Acides phosphoniques	Acier(X28)

L'ensemble de ces molécules inhibitrices offre de bonnes performances pour la protection des métaux ferreux en milieux neutres et alcalins, qu'elles soient utilisées seules ou en combinaison synergique. Ces composés organiques contiennent généralement des atomes tels que l'azote (N), l'oxygène (O), le soufre (S) ou le phosphore (P), capables d'interagir avec le métal par échange d'électrons.

Parmi les inhibiteurs les plus couramment employés, on retrouve notamment les amines ainsi que les sels d'acides carboxyliques. [11]

II.11 Les méthodes d'extractions :

II.11.1 Méthode d'extraction par solvant :

La méthode par solvant consiste à extraire des inhibiteurs de corrosion à partir de plantes en utilisant différents types de solvants. L'eau et l'éthanol sont les plus couramment employés, notamment dans les applications industrielles, car les solvants aqueux offrent de meilleurs avantages. Selon le principe « le semblable dissout le semblable », les extraits solubles dans l'eau se dissolvent plus facilement et sont mieux compatibles avec divers milieux corrosifs. [12]

II.11.2 Macération (méthode de trempage) :

La macération est une méthode d'extraction liquide-solide réalisée à température ambiante pendant une durée pouvant varier de 30 minutes à 48 h, voire plusieurs jours. Elle consiste à laisser la matière végétale en contact avec un solvant, tel que l'eau froide ou une huile végétale, afin de favoriser la diffusion des composés actifs. Toutefois, cette

méthode présente un risque de contamination microbienne du produit final en raison de l'absence de chauffage ou d'ébullition. [13]

II.11.3 L'extraction Soxhlet :

La méthode d'extraction au Soxhlet repose sur l'utilisation continue de solvants organiques volatils, tels que l'éthanol ou l'éther, afin d'extraire les composés présents dans les matrices végétales. Le principe consiste à placer l'échantillon dans un porte-cartouche soumis à des cycles successifs de chauffage, de reflux et de siphonnage. Le solvant chauffé s'évapore, se condense puis traverse progressivement l'échantillon, permettant la dissolution des composés recherchés. Lorsque le niveau du liquide atteint la limite de débordement, un siphon transfère l'extrait vers le ballon de distillation, et le cycle recommence jusqu'à l'achèvement de l'extraction. Cette méthode favorise un contact répété entre l'échantillon et un solvant frais, ce qui améliore le rendement d'extraction et permet une extraction quasi complète des substances bioactives, tout en utilisant une quantité relativement modérée de solvant. De plus, l'utilisation d'un solvant chaud améliore la dissolution des composés d'intérêt sans nécessiter d'étape de filtration après extraction. Cependant, cette méthode présente certains inconvénients, notamment une durée d'extraction relativement longue, une consommation importante de temps et l'exposition prolongée de l'échantillon à des températures élevées, ce qui peut affecter la stabilité thermique de certains composés sensibles. [12][13]

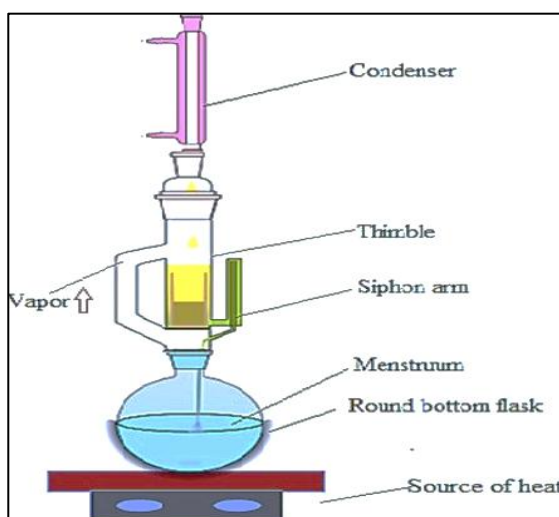


Fig II.4 : Appareillage de l'extraction Soxhlet. [14]

II.11.4 Extraction par reflux chauffant :

L'extraction par reflux chauffant consiste à placer une poudre végétale sèche avec un solvant dans un ballon à fond rond, puis à chauffer le mélange de manière continue tout en condensant les vapeurs du solvant. Ce procédé favorise le transfert progressif des composés actifs vers le solvant grâce à des cycles successifs d'évaporation et de condensation. Il présente l'avantage d'assurer une température bien contrôlée et un chauffage uniforme. Toutefois, il n'est pas adapté aux substances sensibles à la chaleur, en raison de leur exposition prolongée à des températures élevées. [12]

II.11.5 Méthode de décoction :

La décoction est une méthode d'extraction aqueuse qui consiste à faire bouillir les matières végétales, généralement préalablement broyées ou fragmentées, dans de l'eau pendant une durée d'environ 15 à 30 minutes afin d'extraire les composés actifs. Cette technique est particulièrement adaptée aux parties végétales dures ou très dures, telles que les racines, les écorces, les tiges ou le bois. Elle repose sur l'utilisation de l'eau comme solvant d'extraction, ce qui en fait une méthode simple et relativement écologique. Toutefois, l'emploi de températures élevées et d'un temps de traitement prolongé peut entraîner l'altération de certains composés sensibles à la chaleur. [15]

II.11.6 Extraction assistée par ultrasons (EAU / UAE) :

L'extraction assistée par ultrasons consiste à plonger des matériaux végétaux lavés dans un solvant approprié et à utiliser des vibrations ultrasonores pour faciliter l'extraction des composés. Ces ondes accélèrent le transfert de matière par effet de cavitation, permettant un relargage plus rapide des composants à basse température. Cette technique présente l'avantage de se passer de chauffage, réduisant ainsi la consommation d'énergie et protégeant certains composés actifs de la dénaturation thermique, ce qui améliore l'efficacité de l'inhibition de la corrosion. Elle se distingue également par un temps d'extraction court (environ 0,5 à 1 heure), une température basse, et une faible consommation de solvant, ce qui permet de diminuer à la fois le temps et le coût de l'extraction. [12]

II.12 Conclusion :

En conclusion, les inhibiteurs de corrosion constituent une méthode efficace de protection des matériaux métalliques, notamment en milieux agressifs, en agissant directement sur le milieu corrosif pour ralentir les réactions électrochimiques responsables de la dégradation. Parmi eux, les inhibiteurs organiques occupent une place importante grâce à leur capacité d'adsorption sur la surface métallique et à la formation d'un film protecteur limitant l'interaction entre le métal et le milieu corrosif.

L'intérêt croissant pour les inhibiteurs d'origine naturelle s'explique par leur faible toxicité, leur biodégradabilité et leur caractère respectueux de l'environnement. Leur efficacité dépend fortement de la méthode d'extraction utilisée, qui influence la composition chimique des extraits et donc leurs performances inhibitrices. Des techniques telles que la macération, la décoction, l'infusion ou l'extraction au Soxhlet permettent d'obtenir des extraits riches en composés actifs.

Ainsi, les inhibiteurs organiques naturels représentent une alternative prometteuse aux inhibiteurs conventionnels, offrant des solutions à la fois efficaces, économiques et écologiquement durables pour la protection contre la corrosion.

Par ailleurs, dans la continuité de ces travaux portant sur les inhibiteurs de corrosion d'origine naturelle, une attention particulière sera accordée dans le chapitre suivant à l'étude des noyaux de dattes. Ces derniers constituent une biomasse abondante et peu coûteuse, riche en composés organiques susceptibles de présenter une activité inhibitrice intéressante. Leur valorisation dans le domaine de la protection contre la corrosion s'inscrit dans une démarche à la fois économique et environnementale, visant à développer des solutions écologiques alternatives aux inhibiteurs conventionnels.

Les Références Bibliographiques :

- [1] Teboula, A. et Chouafa, S. (2023). Étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier en milieu acide par l'extrait des feuilles de figuier. Mémoire de Master en Chimie physique, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie.
- [2] Mammeri, S. (2022). Élaboration de nouveaux matériaux moléculaires à base de dihydropyrimidinone et étude de leurs propriétés inhibitrices de corrosion et de protéase principale du SARS-CoV-2. Thèse de doctorat en Sciences, Université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie.
- [3] Yousfi, H. et Bourahla, S. (2020). Étude des inhibiteurs de corrosion pour protéger l'acier ordinaire en milieu agressif. Mémoire de Master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arréridj, Algérie.
- [4] Behloul, H. (2020). Étude de l'efficacité d'un adsorbant naturel sur la corrosion. Mémoire de Master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arréridj, Algérie.
- [5] Saouli, K. et Laiadhi, F. (2021). Étude de l'efficacité de l'inhibiteur organique (extrait d'oignon) sur la corrosion de l'acier C45 en milieu acide. Mémoire de Master, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie.
- [6] Boughoues, Y. (2022). Synthèse, étude physicochimique et électrochimique de nouveaux composés organiques comme inhibiteurs de corrosion de l'acier en milieu acide. Thèse de doctorat, Université Mohamed Seddik Ben Yahia, Jijel, Algérie.
- [7] Khadraoui, A. (2014). Extraction et pouvoir bio-inhibiteur de substances naturelles d'origine végétale vis-à-vis de la corrosion acide de l'acier. Thèse de doctorat en Génie des procédés, Université Blida 1, Algérie.
- [8] Chinogurei, C. (2018). Propriétés inhibitrices de l'huile de cade sur la corrosion de l'aluminium. Mémoire de Master en Génie chimique, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie.

- [9] Benyahia Tani, I. et Benmansour, C. (2021). Techniques d'application des inhibiteurs de corrosion dans le béton : analyse et perspectives. Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, Algérie.
- [10] Allali, M. et Hadj Abderrahmane, N. (2020). Synthèse bibliographique sur les inhibiteurs pour lutter contre la corrosion électrochimique. Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie.
- [11] Marmi, H. (2017). Amélioration de la résistance à la corrosion électrochimique des aciers par utilisation des inhibiteurs. Thèse de doctorat en Sciences, option Sciences des matériaux, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie.
- [12] Guo, Y., et al. (2025). « Ultrasound-assisted extraction of corrosion inhibitor from plant and its application ». *Environmental Technology & Innovation*, 40, 104644. Consulté le 15 février 2026. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104644>.
- [13] Nait Taher, R. et Ammar, S. N. (2020). Étude comparative des méthodes d'extraction des substances bioactives des matrices végétales telles que la figue de barbarie. Mémoire de Master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arréridj, Algérie.
- [14] Kim, J., Choi, K. et Chung, D. S. (2012). « Sample preparation for capillary electrophoretic applications ». *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*, p. 701-721. Elsevier (ScienceDirect).
- [15] Djenhi, S. et Belattar, Z. (2021). Caractérisation pharmacologique et effet antimicrobien de quelques plantes médicinales. Mémoire de Master, Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf, Mila, Algérie.



Chapitre III

III.1 Introduction :

Le palmier dattier occupe une place importante dans les régions arides et semi-arides, notamment en Algérie où il constitue une ressource agricole, économique et environnementale essentielle. En plus de ses fruits largement consommés, ce palmier génère des sous-produits tels que les noyaux de dattes, qui suscitent aujourd'hui un intérêt croissant dans différents domaines industriels et scientifiques. Ce chapitre présente des généralités sur le palmier dattier, sa répartition géographique et son importance, avant de mettre en lumière les caractéristiques, la composition et les différentes valorisations des noyaux de dattes, en particulier leur utilisation potentielle comme inhibiteurs de corrosion écologiques.

III.2 Le palmier dattier :

III.2.1 Définition et origine :

III.2.1.1 Définition :

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) est une plante monocotylédone appartenant à la famille des Palmacées. Il se caractérise par un tronc unique appelé stipe, surmonté d'un ensemble de grandes feuilles composées, formées de nombreuses folioles disposées de part et d'autre d'un pétiole commun, issues d'un même point de croissance au sommet du tronc. Ce palmier peut vivre jusqu'à 100 ans et atteindre environ 24 mètres de hauteur, mais en pratique, sa taille est souvent comprise entre 15 et 20 mètres. C'est une plante dioïque, ce qui signifie qu'il existe des pieds mâles et des pieds femelles distincts. Ses fruits, appelés dattes, sont des drupes regroupées en longues grappes appelées régimes. On distingue plusieurs types de dattes : molles, demi-molles et sèches.[1]

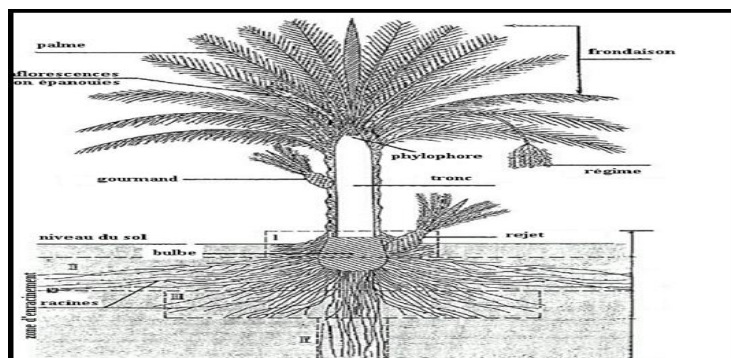


Fig III.1 : Schéma du palmier dattier (Munier, 1973)

III.2.1.2 Origine :

Le palmier dattier est une culture ancienne connue depuis l'Antiquité. Son aire d'origine probable se situerait soit à l'ouest de l'Inde, soit dans la région du golfe Persique. Plusieurs hypothèses ont été proposées quant à sa domestication : certaines la placent à Babylone il y a environ 4 000 ans av. J.-C., tandis que d'autres situent son berceau dans le golfe Persique. Des études plus récentes suggèrent que le palmier dattier résulte de la domestication d'une population sauvage de la même espèce, avec des ancêtres sauvages identifiés notamment en Oman. À partir de son aire d'origine en Eurasie, la culture du dattier s'est diffusée vers la basse Mésopotamie, l'Iran, la vallée de l'Indus, puis depuis l'Égypte vers la Libye et tout le Maghreb. Aujourd'hui, il est répandu dans toutes les régions chaudes, arides et semi-arides : Afrique du Nord, Sahara, Proche-Orient, jusqu'à la vallée de l'Indus (Pakistan), la Mésopotamie (Irak) et le sud de la Perse (Iran).[2]

III.2.2 Répartition géographique des palmier dattiers :

III.2.2.1 Dans le monde :

Le palmier dattier est présent sur les cinq continents, notamment au Moyen-Orient, en Afrique méditerranéenne, en Europe et en Amérique du Nord (Toutain, 1967 ; Munier, 1973). Son aire de répartition s'étend approximativement entre 10° de latitude Nord (Somalie) et 39° de latitude Nord (Elche, en Espagne, ou le Turkménistan). Les zones les plus favorables à sa culture se situent entre 24° et 34° de latitude Nord, ce qui inclut le Maroc, l'Algérie, la Tunisie, la Libye, l'Égypte et l'Irak. Aux États-Unis, la culture du dattier s'étend entre les 33° et 35° parallèles, tandis qu'il est également cultivé à plus petite échelle au Mexique, en Argentine et en Australie.[2]



Fig III.2 : Répartition géographique du palmier dattier. (El Hadrami, 2007)

III.2.2.2 Dans l'Algérie :

En Algérie, la culture du palmier dattier se trouve principalement dans les wilayas sahariennes. Elle s'étend sur toutes les régions situées au sud de l'Atlas saharien, depuis la frontière marocaine à l'ouest jusqu'à la frontière tuniso-libyenne à l'est. Du nord vers le sud, cette culture va de la limite sud de l'Atlas jusqu'à des zones comme Reggane à l'ouest, Tamanrasset au centre et Djanet à l'est. Les palmeraies sont surtout concentrées dans le sud-est du pays, et leur importance diminue progressivement vers l'ouest et le sud. Le palmier dattier est cultivé dans seulement 17 wilayas, couvrant une superficie d'environ 120 830 hectares. Toutefois, quatre wilayas dominent largement la production nationale : Biskra, Adrar, El-Oued et Ouargla, qui représentent à elles seules plus de 80 % du patrimoine phoenicicole du pays.[3]

III.2.3 L'importance économique en Algérie :

La phoeniculture occupe une place majeure dans les régions sahariennes algériennes. La surface cultivée, moyenne de 167 279 ha en 2016, a augmenté pour atteindre 170 500 ha en 2020. La production de dattes, selon les données du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural (MADR), est passée de 1 029 596 tonnes en 2016 à 1 151 909 tonnes en 2020, avec plus de 18 millions de palmiers, dont 15,5 millions sont productifs (MADR, 2018 ; FAO stat, 2022).

Sur le plan commercial, l'Algérie exporte en moyenne 4,7% de sa production. Au cours des cinq dernières années, les exportations de dattes algériennes ont atteint en moyenne 66,4 millions de dollars, avec un pic en 2021 à 79 millions de dollars. La production a culminé en 2019 avec 11,36 millions de quintaux, dominée par la variété « Deglet Nour » (6,14 millions de quintaux), suivie des dattes sèches (3,02 millions de quintaux) et des autres dattes fraîches (2,20 millions de quintaux).

En moyenne, entre 2017 et 2021, 66 pays importaient des dattes algériennes, avec un maximum de 72 pays en 2021 (PASA, 2021 ; FAO stat, 2022).[2]

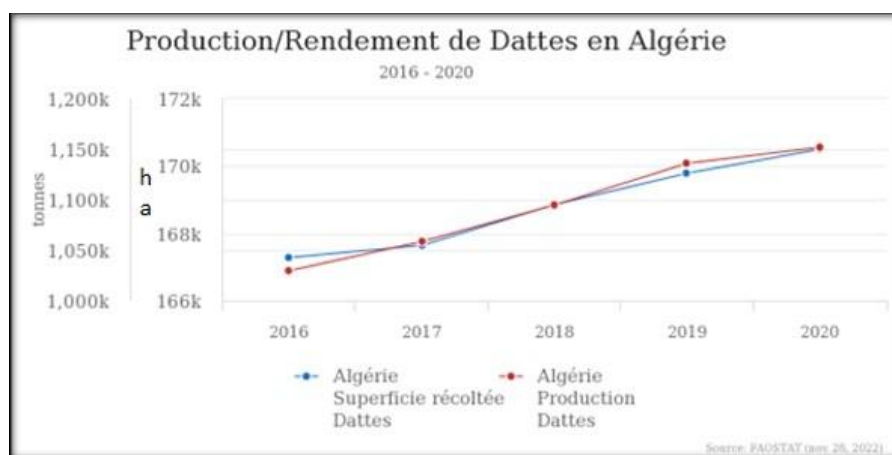


Fig III.3 : La production des dattes en Algérie. Source : (FAOSTAT, 2022)

III.3 Variétés des dattes en Algérie :

L'Algérie possède une très grande diversité variétale, avec plusieurs centaines à plus de 1 000 variétés de dattes recensées, même si seules quelques-unes ont une importance commerciale. Les principales variétés exploitées à grande échelle sont notamment Deglet Nour, Ghars et Degla Beïda (Garbaï), auxquelles s'ajoutent de nombreuses variétés locales comme Mech-Degla, Litima, Hamraya, etc.

- Deglet Nour est la variété emblématique, appelée « reine des dattes », très appréciée pour sa texture moelleuse, sa peau fine et son goût mielleux, et cultivée surtout dans le Bas Sahara (Zibais, Souf, Oued Rigi, etc.).
- D'autres variétés comme Ghars et Degla Beïda sont destinées davantage à la transformation (pâte, sirop, fourrage), tandis que de nombreuses variétés "secondaires" assurent la biodiversité génétique du palmier dattier algérien.[4]

III.4 Les noyaux de dattes :

Les noyaux de dattes (ou "stones/date pits") représentent en général entre 7 et 30% du poids total du fruit selon la variété et le stade de maturité. Ils constituent un sous-produit important des industries de la dattes, pouvant être valorisé en alimentation animale, ingrédients alimentaires, huile ou poudre riche en fibres.[3]

Grâce à leur richesse en composés organiques naturels, ils suscitent également un intérêt croissant comme inhibiteurs de corrosion écologiques dans différents milieux corrosifs.[5]

III.4.1 Morphologie et caractéristiques :

Les noyaux de dattes constituent un sous-produit important issu des industries de transformation des dattes (Djerbi, 1994).

Ils sont entourés d'un endocarpe dur et présentent généralement une forme allongée avec un sillon ventral caractéristique. Leur taille et leur poids varient selon les variétés, avec une longueur comprise entre 0,5 et 3 cm et un poids allant de 0,4 à 2 g (Dammak et al., 2007 ; Jassim et Naji, 2007).

Les noyaux représentent environ 6 à 15 % du poids total du fruit. Leur couleur peut varier du blanc jaunâtre au noir en passant par différentes nuances de brun et d'ambre (Djerbi, 1994).

Ils sont constitués principalement d'un album en blanc, dur et corné, protégé par une enveloppe cellulosique contenant un embryon dorsal (Espiard, 2002).[6]

III.4.2. Composition chimique des noyaux :

Le tableau ci-dessous présente la composition chimique des noyaux de dattes selon différentes études.[7]

Composition chimique	Teneur %
Teneur en eau	7 à 19
Matière protéique (shahal) (MS)	2.29
Matière grasse	13.2
Sucres	4.4 à 4.6
Fibres	70
Polyphénols (MS)	0.0215 à 0.0526
Minéraux (MS)	
• K	25.4-28.9
• Ca	1.35-1.87

• Mg	-
• P	6.74-9.36
• Na	0.38-1.48
• Fe	0.22-1.68
• Zn	-
• Cu	0.07-0.2
• Mn	0.06-0.09

III.4.3 L'activité antioxydante des noyaux de dattes :

Les noyaux de dattes sont riches en composés naturels comme les polyphénols, les flavonoïdes et les tanins. Ces substances possèdent une forte activité antioxydante grâce à leur capacité à neutraliser les radicaux libres responsables du stress oxydatif et des réactions d'oxydation. Les extraits de noyaux de dattes montrent ainsi une bonne efficacité dans les tests DPPH, ABTS et FRAP.

Cette activité antioxydante s'explique principalement par la structure chimique de ces composés, qui peuvent donner des électrons ou des hydrogènes pour stabiliser les radicaux libres. Ils peuvent aussi chélater certains ions métalliques qui accélèrent les réactions d'oxydation. C'est pour cela que les noyaux de dattes sont considérés comme une source naturelle intéressante pour la valorisation et pour la protection contre la corrosion des métaux dans les milieux acides, en formant une couche protectrice à la surface.[8][9][10][11]

III.5 Valorisation des noyaux de dattes :

III.5.1 Utilisation industrielle :

Les noyaux de dattes font l'objet de plusieurs applications industrielles grâce à leur composition riche et leur potentiel de transformation.

- **Dans le domaine agroalimentaire**, ils peuvent être transformés en farine et incorporés dans divers produits alimentaires, ou encore torréfiés afin d'être utilisés comme substitut du café.

- **Dans l'industrie cosmétique**, leurs extraits ainsi que leur huile, riches en composés antioxydants, sont exploités dans la formulation de produits de soin et anti-âge.
- **Sur le plan environnemental**, ils sont valorisés pour la production de charbon actif, utilisé comme matériau adsorbant dans le traitement des eaux afin d'éliminer les polluants et les métaux lourds.
- **Dans l'industrie des matériaux**, ils servent à développer des adsorbants naturels à faible coût destinés aux procédés de dépollution.
- **Dans le secteur chimique**, ils peuvent être transformés en polyols et en divers composés issus de modifications chimiques de leur structure.
- **Enfin, en biotechnologie**, ils sont utilisés comme substrats de fermentation pour la production de biomolécules telles que les antibiotiques et les acides organiques.[12][13]

III.5.2 Utilisation comme inhibiteur de corrosion :

Les noyaux de dattes constituent une biomasse naturelle riche en composés bioactifs tels que les polyphénols, les flavonoïdes et les tanins. Ces composés possèdent des propriétés chimiques capables d'interagir avec les surfaces métalliques.

Récemment, plusieurs études ont mis en évidence l'intérêt des extraits de noyaux de dattes dans le domaine de la protection contre la corrosion, en tant qu'alternative écologique aux inhibiteurs chimiques classiques souvent toxiques et coûteux.

Le mécanisme principal d'action repose sur l'adsorption des molécules organiques sur la surface du métal, formant ainsi une couche protectrice qui :

- isole le métal du milieu corrosif
- réduit les réactions électrochimiques responsables de la corrosion
- diminue la vitesse de dissolution du métal, notamment dans les milieux acides

L'efficacité inhibitrice augmente généralement avec la concentration de l'extrait, ce qui favorise la formation d'un film protecteur plus stable et plus compact à la surface métallique.

Ainsi, les noyaux de dattes représentent une source prometteuse d'inhibiteurs verts de corrosion grâce à leur disponibilité, leur faible coût et leur impact environnemental réduit.[14]

III.6 Conclusion :

En résumé, le palmier dattier représente une richesse naturelle majeure, surtout dans les régions sahariennes, où il joue un rôle clé sur les plans économique et social. Au-delà de la production de dattes, les noyaux issus de ce fruit constituent un sous-produit à fort potentiel de valorisation. Grâce à leur composition riche en composés bioactifs, ils offrent des perspectives intéressantes dans plusieurs domaines, notamment comme inhibiteurs de corrosion respectueux de l'environnement. Ainsi, leur exploitation contribue à une meilleure valorisation des ressources naturelles tout en répondant aux enjeux actuels de développement durable.

Ainsi, après avoir mis en évidence le potentiel des noyaux de dattes comme source de composés valorisables, il convient de passer à leur mise en œuvre expérimentale. Le chapitre suivant porte sur la préparation des extraits et la description des essais et tests réalisés afin d'évaluer leur efficacité, notamment en tant qu'inhibiteurs de corrosion.

Les Références Bibliographiques :

- [1] Kherroubi, F. et Ouezzani, S. (2022). Mise en valeur des noyaux de dattes. Mémoire de Master en Génie des procédés de l'environnement, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie.
- [2] Benouamane, O. (2023). Caractérisation génétique et pharmacologique du pollen et des pennes du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) dans la région de Biskra. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie.
- [3] Benakli, L. (2021). Valeur nutritive de la poudre de noyaux de dattes. Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie.
- [4] Zeribi, K. (2019). Étude de la qualité des dattes (Deglet-Nour) dans trois régions de la wilaya de Biskra. Mémoire de Master, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie.
- [5] El Houdaigui, F., Ouazzani Chahdi, F., et al. (2017). « Date palm waste extracts as green corrosion inhibitors for steel in acidic media ». *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 8(5), p. 1677-1685.
- [6] Bendjama, A. (2021). Étude comparative de l'extraction des huiles des noyaux du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.). Mémoire de Master en Biotechnologie et valorisation des plantes, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie.
- [7] Ould Saïdi, F. et Chouiha, K. (s.d.). Étude physico-chimique et spectroscopie infrarouge de l'huile de noyaux de dattes. Mémoire de Master en Chimie des produits naturels, Université Saad Dahlab, Blida, Algérie.
- [8] Bara, F. (2020). Caractérisation physicochimique et évaluation de l'activité antioxydante et antimicrobienne de l'extrait aqueux des noyaux de dattes de la variété « Degla-Baïda ». Mémoire de Master en Sciences alimentaires, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie.
- [9] Ouladmehbarek, Z., Souilem, M. et Megamez, M. (2023). Étude des activités antioxydante et anti-inflammatoire des extraits de noyaux de dattes de la variété Timjoherte de la région de Ghardaïa. Mémoire de Master en Biochimie appliquée, Université de Ghardaïa, Algérie.

- [10] Benabadji, S. H. (2023). Contribution à l'étude de l'activité antioxydante de l'huile de noyaux de dattes. Mémoire de Master en Sciences alimentaires, option Nutrition et pathologie, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- [11] Naoum, A. et Houalef, R. (2024). Profil phénolique et activité antioxydante de la poudre de noyaux de dattes torréfiés. Mémoire de Master en Sciences biologiques, option Physiologie cellulaire et physiopathologie, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- [12] Khenchelaoui, S. (2021). Valorisation des noyaux issus des différentes variétés de dattes dans le traitement des effluents industriels. Thèse de doctorat en Génie de l'environnement, École Nationale Polytechnique, Alger, Algérie.
- [13] Zaabat, K. et Bouferoua, A. (2025). Valorisation des noyaux de dattes (Ghars) dans le domaine du traitement des eaux. Mémoire de Master en Génie des procédés de l'environnement, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie.
- [14] Mohammed, N. J. et Othman, N. K. (2020). « Date Palm Seed Extract as a Green Corrosion Inhibitor in 0.5 M HCl Medium for Carbon Steel: Electrochemical Measurement and Weight Loss Studies ».



Chapitre IV

IV.1 Introduction :

Dans le cadre de la recherche de solutions écologiques pour la protection des matériaux métalliques contre la corrosion, l'utilisation d'inhibiteurs naturels issus de ressources végétales constitue une voie prometteuse. Les noyaux de dattes, considérés comme un sous-produit agroalimentaire abondant et peu valorisé, renferment plusieurs composés bioactifs susceptibles de réduire les phénomènes de corrosion grâce à leur capacité d'adsorption à la surface des métaux.

Ce chapitre est consacré à la partie expérimentale de cette étude. Il présente les différentes étapes de préparation des extraits de noyaux de dattes des variétés Dégla, Ghars et Tmar, ainsi que de leur mélange. Un criblage phytochimique et une analyse UV-Visible ont été réalisés afin de caractériser les principaux composés présents dans ces extraits et d'évaluer leur potentiel inhibiteur.

Par ailleurs, les essais de corrosion ont été menés sur l'acier API 5L X42 dans des milieux agressifs à base d'acide sulfurique (H_2SO_4) et de chlorure de sodium (NaCl). L'étude de l'efficacité inhibitrice des différents extraits a été effectuée par la méthode gravimétrique en examinant l'influence du temps d'immersion, de la concentration de l'inhibiteur et de la température. Enfin, un test sur lame de cuivre a été réalisé afin d'apprécier le comportement corrosif du milieu étudié.

L'ensemble des résultats obtenus permettra de mettre en évidence l'efficacité des extraits de noyaux de dattes comme inhibiteurs verts de corrosion et de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans leur action protectrice.

IV.2 Conditions expérimentales :

Ce travail a été réalisé au laboratoire N°15 du Hall de Technologie de l'Université de Skikda.

IV.2.1 Préparation de la poudre :

- **Récolte :**

Le matériel végétal utilisé dans ce travail, à savoir les noyaux de datte, a été collecté au niveau de la wilaya de Skikda.



Fig IV.1 : Les noyaux des dattes.

- **Nettoyage :**

Les noyaux de datte ont été soigneusement lavés au laboratoire afin d'éliminer les résidus de pulpe et les autres impuretés.

- **Séchage :**

Après rinçage à l'eau, les noyaux de datte ont été séchés dans une étuve ventilée à température contrôlée jusqu'à élimination complète de l'humidité.

- **Broyage :**

Après séchage, les noyaux de datte ont été broyés à l'aide d'un broyeur électrique afin d'obtenir une poudre fine, puis soumis à l'extraction. Le broyat obtenu a été conservé à température ambiante, dans un endroit sec, à l'abri de l'humidité et de la lumière jusqu'à son utilisation.



Fig IV.2 : Broyage des noyaux des dattes.

IV.2.2 Caractéristiques physico-chimiques :

Criblage phytochimique :

Dans cette partie, une approche classique a été adoptée, consistant à réaliser un criblage phytochimique des principales familles de composés présents dans l'extrait des noyaux de dattes. Ces extraits naturels renferment diverses familles de composés organiques tels que les polyphénols, les alcaloïdes, les tanins et d'autres substances bioactives. Ces composés peuvent présenter des propriétés inhibitrices intéressantes vis-à-vis de la corrosion de différents alliages métalliques.

L'objectif de cette étude est de mettre en évidence les différentes familles chimiques présentes dans les noyaux de dattes à l'aide de tests phytochimiques simples. Il s'agit d'une analyse qualitative basée sur des réactions de coloration ou de précipitation, permettant d'identifier la présence ou l'absence des principaux groupes de composés bioactifs. [1]

Synthèse qualitative :

➤ Infusion :

On verse 150 ml de l'eau bouillante sur 25g de noyaux de dattes en poudre puis on laisse reposer la mixture pendant 15 min, le produit obtenu a été filtré à l'aide d'un tissu propre.



Fig IV.3 : Infusion.

➤ **Les alcaloïdes :**

Les alcaloïdes sont détectés par la formation de précipités salins et leur révélation à l'aide du Réactif de Mayer et du Réactif de Wagner. [2]

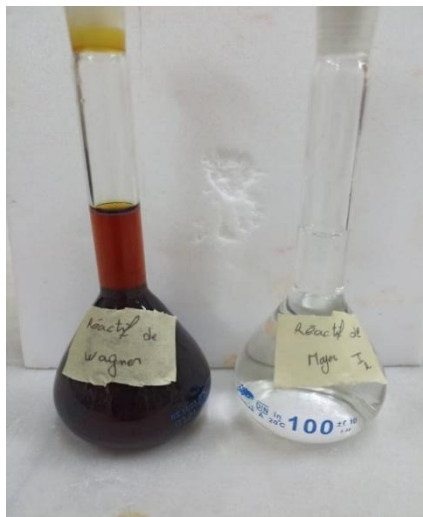


Fig IV.4 : Réactif de Mayer et Wagner.

a. Réactif de Mayer :

Il est préparé en deux solutions :

- **Solution A :** dissoudre 1,355 g de chlorure de mercure dans 20 mL d'eau distillée.
 - **Solution B :** dissoudre 5 g d'iodure de potassium dans 20 mL d'eau distillée.
- Ensuite, on mélange les deux solutions et on complète avec de l'eau distillée jusqu'à 100 mL.

b. Réactif de Wagner :

On dissout 1,27 g d'iode et 2 g d'iodure de potassium dans 75 mL d'eau distillée, puis on complète jusqu'à 100 mL avec de l'eau distillée.

➤ **Les saponines :**

On verse 10 mL de l'extrait aqueux dans un tube à essai, puis on agite pendant 15 secondes. Le tube est ensuite laissé au repos pendant 15 minutes. La hauteur de la mousse formée est mesurée. [3]

L'interprétation des résultats est la suivante :

- Absence de mousse : test négatif
- Mousse < 1 cm : test faiblement positif
- Mousse entre 1 et 2 cm : test positif
- Mousse > 2 cm : test très positif

➤ **Anthraquinones libres :**

Un gramme de poudre végétale est mélangé à 10 mL de chloroforme, puis chauffé avec précaution au bain-marie pendant environ 3 minutes. Après filtration, le volume de l'extrait chloroformique est ajusté à 10 mL si nécessaire. Ensuite, 1 mL de cet extrait est introduit dans un tube à essai, auquel est ajouté 1 mL de NH_4OH diluée, suivi d'une agitation. [4]

L'apparition d'une coloration jaune, rouge ou violette dans la phase aqueuse révèle la présence d'anthraquinones libres.

➤ **Les glycosides :**

Nous avons introduit 1 mL de l'extrait dans un tube à essai, puis nous avons ajouté 5 mL d'acide acétique contenant des traces de FeCl_3 , suivis de 5 mL d'acide sulfurique contenant également des traces de FeCl_3 . [5]

➤ **Les composés réducteurs :**

La présence des composés réducteurs a été mise en évidence par le test de Fehling. L'apparition d'un précipité rouge brique indique une réaction positive. [5]



Fig IV.5 : Réactif de Fehling.

➤ **Les polyphénols :**

À 2 mL de l'extrait, quelques gouttes de solution de FeCl_3 à 2 % sont ajoutées afin de mettre en évidence la présence éventuelle des tanins. L'apparition d'une coloration bleu-noir ou vert-noir indique respectivement la présence des polyphénols. [6]



Fig IV.6 : Solution du FeCl_3

➤ **Les tanins :**

2ml d'extrait + 1ml de solution de gélatine (1%) + 1ml de solution NaCl (10%). [7]

1g (gélatine) → 100 ml (l'eau distillé)

10g (NaCl) → 100 ml (l'eau distillé)

L'apparition d'un précipité blanc indique la présence des tannoïdes ou de tanins vrais.

IV.2.3 Matériaux utilisés :

Dans cette étude, nous avons utilisé l'acier X42, car il :

- présente une faible résistance à la corrosion,
- est relativement économique,
- est largement utilisé dans le secteur industriel, notamment dans le transport des hydrocarbures.

IV.2.3.1 Propriété métallurgique (composition chimique) :

Les résultats de l'analyse de l'échantillon ont été obtenus lors de l'inspection de la raffinerie de Skikda à l'aide de l'appareil d'identification des matériaux PMI (Positive Material Identification) « OXFORD X-MET 7000 ». Ces résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV.1 : Composition chimique du garde X42 (analyse PMI).

Elément	Fe	Pd	Pb	Zn	Au	Co	Nb
%	21.22	21.95	20.05	16.38	13.35	3.78	3.27



Fig IV.7 : Appareille d'analyse de la composition chimique de l'échantillon
OX FORD X-MET 7000.

Tableau IV.2 : Composition chimique selon la norme API 5L Garde X42.

Composition chimique				
Nuance d'acier	Fraction massique, basée sur l'analyse de la coulée et du produit			
	%			
	C	Mn	P	S
	Max	Max	Max	Max
Tube (ou conduite) PSL 1 avec une épaisseur $t \leq 25,0$ mm (0,984 pouce)				
Tube sans soudure				
API 5L X42	0,28	1,30	0,030	0,030

IV.2.3.2 Propriété mécanique :**Tableau IV.3 :** Propriétés mécanique selon la norme API 5L Garde X42.

Propriétés mécanique		
Nuance d'acier	Corps des tubes sans soudure et des tube soudés	
	Limite d'élasticité	Résistance à la traction
	MPa (psi)	
	Tube API 5L X42 PSL 1	
	Minimum	Minimum
API 5L X42	290 (42100)	415 (60200)

IV.2.3.2 Polissage :

Après réception de l'acier, un polissage a été réalisé à l'aide de papiers abrasifs de granulométrie décroissante, allant de 80 à 1200, afin d'obtenir une surface plane, brillante et proche de l'état de miroir, tout en éliminant les fissures et les aspérités présentes.



Fig IV.8: La polisseuse.



Fig IV.9 : L'acier avant et après le polissage.

La surface de l'acier a été déterminée à partir des mesures de dimensions effectuées à l'aide d'un pied à coulisse.

- **Un pied à coulis**

Le pied à coulisse est un instrument de mesure de longueur composé de deux parties qui coulissent l'une par rapport à l'autre. Il est couramment utilisé pour mesurer facilement les dimensions extérieures d'une pièce, le diamètre d'un cylindre ou d'un alésage, ainsi que la profondeur d'une cavité.



Fig IV.10: Pied à coulisse.

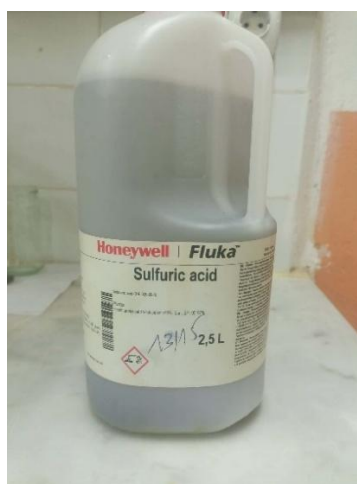
IV.2.4 Milieux d'étude :

IV.2.4.1 Préparation de la solution corrosive 1 (H_2SO_4 1%, 2%, 3%, 4% et 5%) :

La solution corrosive 1 consiste en une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) à des concentrations de 1 %, 2%, 3 %, 4% et 5 %, préparée par dilution d'un acide sulfurique concentré à 95 % avec de l'eau distillée.

Tableau IV.4 : Propriétés d'acide Sulfurique.

Forme brute	H_2SO_4
Densité	1.84
Masse molaire	98 g/mol
Pureté	95%_ 98%

Fig IV.11 : Solution mère de H_2SO_4 .

Les volumes des solutions mères d'acides sont déterminés selon la méthode suivante :

Prenons par exemple le calcul du volume de solution concentrée nécessaire pour obtenir une solution à 1 %.

$$1\% \rightarrow 1\text{g dans } 100\text{ ml}$$

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho} = \frac{1}{1.84} = 0.54\text{ mL} \quad \text{Volume soluté}$$

$$V_{\text{Solvant}} = 95 - 1 = 94\text{ ml} \quad \text{Volume solvant}$$

$$V_{\text{Solution}} = V_{\text{Solvant}} + V_{\text{Soluté}} = 94 + 0.54 = 94.54\text{ mL}$$

$$0.54 \rightarrow 94.54$$

$$V_X \rightarrow 100$$

$$V_X = 0.57 \text{ ml}$$

Tableaux IV.5 : Les volumes des solutions préparées.

Concentration (%)	1	2	3	4	5
Volume (ml)	0.57	1.147	1.63	2.32	2.92

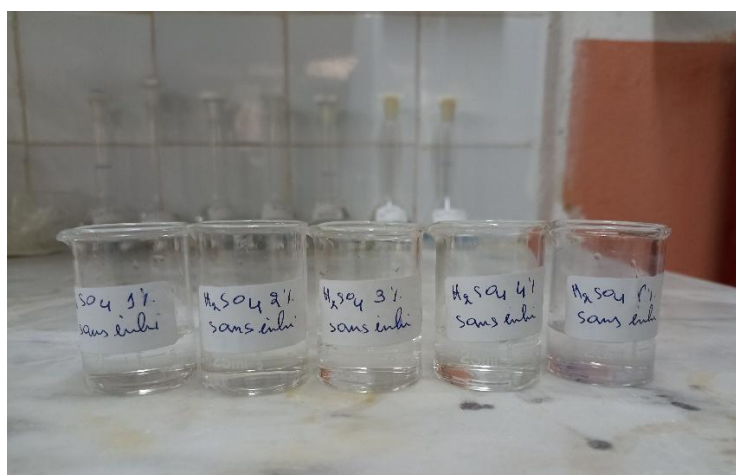


Fig IV.12 : Solutions filles de H_2SO_4 .

IV.2.4.2 Préparation de la solution corrosive 2 (NaCl 3%, 4% et 5%) :

La solution corrosive 2 est une solution de NaCl à 3%, 4% et 5%, obtenue par dissolution de 3 g, 4 g et 5 g de chlorure de sodium cristallisé dans 100 mL d'eau distillée, suivie d'une agitation afin d'assurer l'homogénéité du mélange.

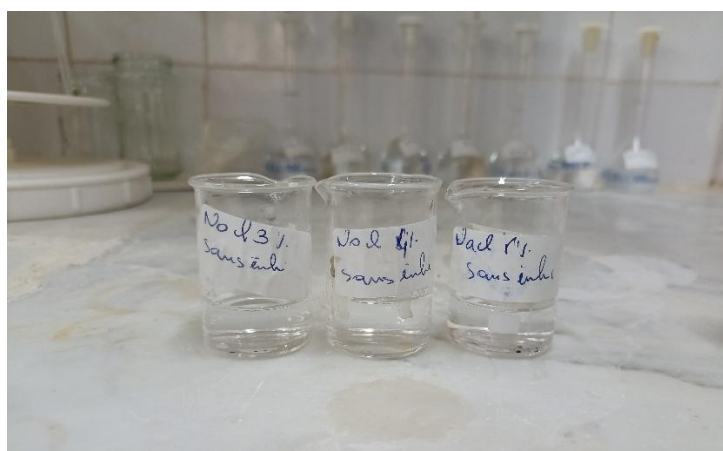


Fig IV.13 : Solutions filles de NaCl

IV.2.5 Solution inhibitrice :

L'inhibiteur vert étudié est constitué d'un extrait pur de noyaux de dattes dissous dans l'éthanol.

IV.2.5.1 Matériels utilisés :

- Balance électrique.
- Agitateur.
- Etuve.
- Eprouvettes graduées, Béchers et Erlenmeyer.
- Entonnoir.
- Dispositif filtration :
 - Fiole.
 - Entonnoir.
 - Un tissu propre.
- Dispositif évaporateur rotatif :
 - Deux ballons (de solution initiale, de récupération du solvant).
 - Réfrigérant.
 - Pompe à vide.
 - Chauffe ballon (plaque chauffante).
 - Elévateur.

IV.2.5.2 Produits utilisés :

- Ethanol.
- Poudre de noyaux de datte.
- **Choix de L'éthanol comme solvant pour l'extraction :**

L'éthanol est un type d'alcool dont la formule semi-développée est $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$. Il se présente sous la forme d'un liquide incolore, volatil et inflammable. Il est entièrement

soluble dans l'eau. Grâce à sa nature polaire, il constitue un excellent solvant et s'associe bien avec divers solvants organiques.

En outre, les méthodes d'extraction les plus efficaces pour isoler les polyphénols totaux et les flavonoïdes reposent principalement sur la macération avec des solvants tels que l'éthanol et l'acétone.

IV.2.5.3 Mode opératoire :

1^{er} étape : Macération (extraction solide-liquide) :

Au cours de cette étape, nous avons procédé à l'extraction des composés actifs, notamment les composés phénoliques et les flavonoïdes.

- Peser 55 grammes de la matière végétal ;
- Mettre la matière végétale dans 250 ml du solvant d'extraction (éthanol) ;
- Mettre en agitation pendant 24h à une vitesse de 700 RPM et à température ambiante ;
- Laisser macérer pendant 24h.

2^{ème} étape : La filtration :

Nous avons procédé à la filtration du macérât à l'aide d'un dispositif de filtration, afin de séparer la phase solide (poudre des noyaux de datte) de la phase liquide (éthanol contenant l'extrait des noyaux de datte).

3^{ème} étape : évaporation du solvant d'extraction :

Après la filtration, le macérât obtenu est introduit dans le ballon d'évaporation et soumis à une température de 70 °C sous agitation rotative. Le système de refroidissement est ensuite activé en faisant circuler de l'eau froide dans le réfrigérant afin d'assurer la condensation du solvant. La distillation se poursuit jusqu'à l'arrêt de l'écoulement du distillat dans le ballon récepteur.

À la fin de l'opération, l'alimentation en eau est interrompue, le chauffage du bain-marie est arrêté, puis le ballon du rotavap est retiré et laissé refroidir avant manipulation.



Fig IV.14 : Montage d'évaporation rotatif.

4eme étape : Récupération de l'extrait :

L'extrait récupéré est ensuite placé dans une étuve afin d'assurer son séchage complet.

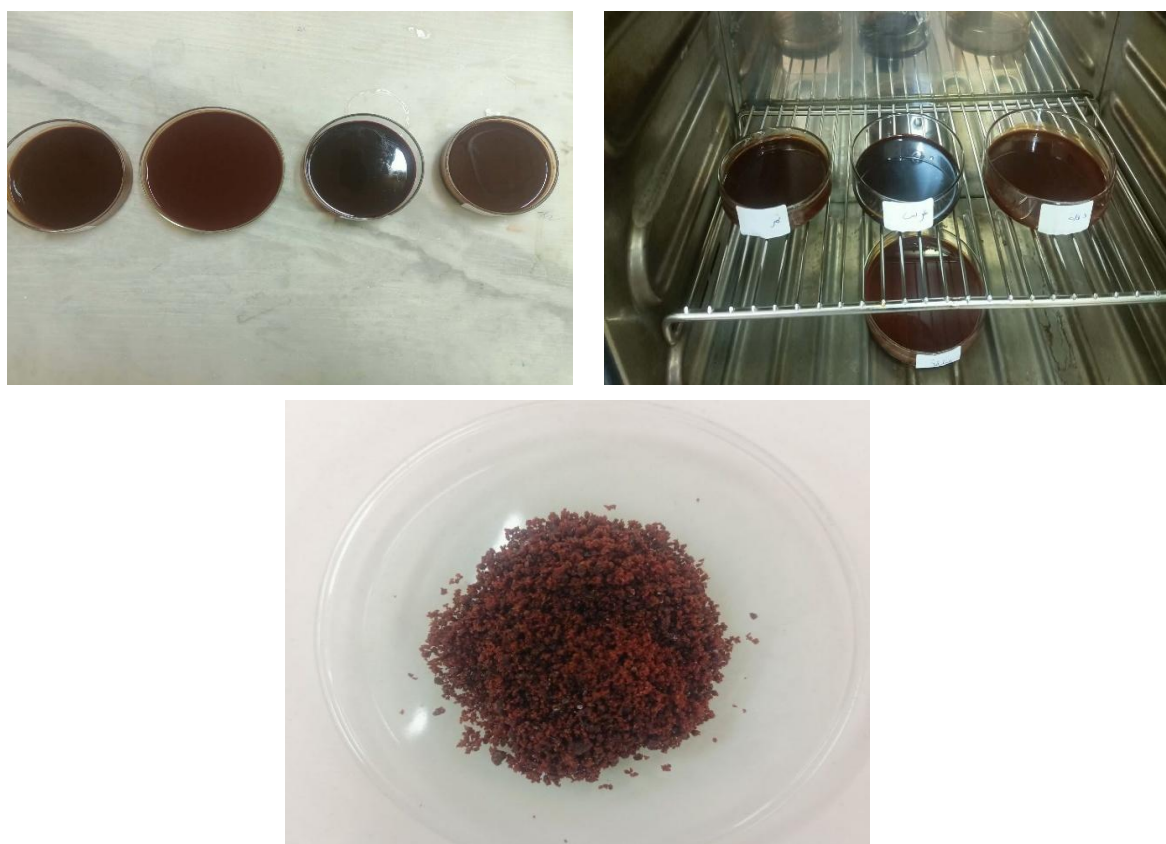


Fig IV.15 : Récupération de l'extrait.

IV.2.5.4 Préparation des solutions inhibitrice :

Les solutions inhibitrices ont été préparées dans deux milieux corrosifs : une solution d' H_2SO_4 à 5 % et une solution de NaCl à 5 %, choisies en raison de leur forte agressivité vis-à-vis du matériau étudié.

Pour chaque inhibiteur, différentes concentrations (1 %, 2 %, 3 %, 4 % et 5 %) ont été préparées dans les deux milieux corrosifs

Pour la préparation des solutions inhibitrices, 0,1 g d'inhibiteur a été ajouté à 10 mL de milieu corrosif (H_2SO_4 à 5 % ou NaCl à 5 %) afin d'obtenir une concentration de 1 %. De la même manière, 0,2 g, 0,3 g, 0,4 g et 0,5 g d'inhibiteur ont été ajoutés à 10 mL de milieu corrosif pour préparer respectivement les concentrations de 2 %, 3 %, 4 % et 5 %. Les solutions obtenues ont ensuite été soumises à une agitation magnétique jusqu'à homogénéisation complète avant leur utilisation dans les essais de corrosion.



Fig IV.16 : Préparation des solutions inhibitrice.

IV.2.5.5 Détermination du rendement de l'extrait :

Le rendement d'extraction correspond au rapport entre la masse de l'extrait récupéré et la masse initiale de la matière végétale en poudre utilisée. Il est exprimé en pourcentage (%) selon la formule suivante :

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

R : rendement de l'extraction en (%) ;

m_{extrait} : masse de l'extrait en (g) ;

$m_{\text{matière première}}$: masse de matière végétale en (g).

IV.3 Méthodes d'étude de la corrosion :

IV.3.1 Méthode gravimétrique :

Les mesures gravimétriques, basées sur les essais de perte de masse, constituent une première approche pour l'étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier dans des milieux électrolytiques.

Avant chaque essai, les échantillons d'acier sont polis à l'aide de papiers abrasifs de granulométrie décroissante afin d'obtenir une surface lisse et homogène. Leurs dimensions (épaisseur et diamètre) sont ensuite mesurées à l'aide d'un pied à coulisse. Les échantillons sont ensuite dégraissés successivement avec de l'acétone, rincés à l'eau distillée, puis séchés à l'aide d'un séchoir électrique.

Après préparation de la surface, les échantillons sont pesés avec précision puis immédiatement immergés dans les solutions corrosives préparées (NaCl 5% et H₂SO₄ 5%). Les essais sont réalisés dans des béchers contenant les milieux corrosifs, en absence et en présence de différentes concentrations de chaque inhibiteur naturel testé séparément, à savoir l'extrait de dattes Degla, l'extrait de dattes Ghars et l'extrait de dattes Tmar, ainsi que leur mélange.

Les essais de référence sont d'abord effectués sans inhibiteur, puis avec l'ajout des différentes concentrations de chaque extrait afin d'évaluer leur efficacité inhibitrice vis-à-vis de la corrosion de l'acier.

IV.3.2 Effet de la température du milieu :

Une fois la préparation de l'état de surface achevée, les échantillons sont pesés puis immédiatement immergés dans les solutions électrolytiques étudiées, à savoir une solution d'acide sulfurique (H₂SO₄) à 5 % et une solution de chlorure de sodium (NaCl) à 5 %. Les essais de corrosion sont réalisés aux températures de 35, 45 et 55 °C afin d'évaluer l'influence de la température sur le comportement du matériau.

Les échantillons sont placés dans des tubes contenant les milieux corrosifs, en absence et en présence de l'inhibiteur élaboré à partir de l'extrait de noyaux de dattes. Ces concentrations varient de 1% à 5%, tandis que le temps d'immersion est maintenu à 3 heures pour l'ensemble des essais.

À la fin de chaque période d'immersion, les échantillons sont retirés des solutions, rincés, séchés puis pesés à nouveau. La différence entre la masse initiale et la masse finale permet de déterminer la perte de masse et d'évaluer l'efficacité inhibitrice de l'extrait de noyaux de dattes vis-à-vis de la corrosion.



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

IV.3.3 Les analyses UV-Visible des extraits de noyaux de dattes :

Les analyses UV-Visible des différents extraits de noyaux de dattes (Dégla, Ghars, Tmar et Mélange) ont été réalisées au laboratoire n°117 du Hall de Technologie de l'Université de Skikda dans le but d'identifier les principaux composés bioactifs présents dans ces extraits, en particulier les composés phénoliques. Le protocole expérimental suivi est présenté ci-dessous :

A) Choix du solvant : L'éthanol a été utilisé comme solvant d'extraction et de dilution, car il est transparent dans la région UV et permet une bonne solubilisation des composés phénoliques. L'éthanol a également servi de blanc pour la calibration du spectrophotomètre.

B) Préparation des solutions : Pour chaque extrait (dégla, ghars, tmar et mélange), une masse de 20 mg a été mélangée avec 10 mL d'éthanol. Les mélanges ont été soumis

à une agitation pendant 10 minutes afin d'assurer une extraction homogène des composés actifs.

C) Ajustement de la concentration : Les solutions obtenues ont été diluées afin d'obtenir une absorbance comprise entre 0,1 et 1, respectant ainsi la validité de la loi de Beer-Lambert.

D) Préparation du blanc : Une cuve contenant uniquement de l'éthanol a été utilisée comme blanc afin de régler le spectrophotomètre et effectuer la mise à zéro.

E) Remplissage des cuves : Les cuves en quartz ont été remplies avec les différentes solutions préparées, en évitant la formation de bulles et en nettoyant les surfaces externes avant la mesure.

F) Mesure : Les spectres UV-Visible des différents extraits (dégla, ghars, tmar et mélange) ont été enregistrés sur la gamme de longueurs d'onde appropriée.

IV.3.4 lame de cuivre :

Les résultats de l'analyse ont été obtenus à partir d'une lame de cuivre soumise à un essai de corrosion dans un milieu acide inhibé par un extrait de noyaux de dattes. Les analyses ont été réalisées au niveau de la raffinerie de Skikda. L'expérimentation a été menée selon le protocole suivant :

A) Préparation de la lame de cuivre : Une lame de cuivre a été soigneusement polie afin d'éliminer les impuretés et les couches d'oxydation de surface. Elle a ensuite été lavée à l'eau distillée puis séchée.

B) Préparation du milieu corrosif : Une solution de H_2SO_4 à 5 % a été préparée, à laquelle a été ajoutée l'extrait de dattes (tmar) à 5 %.

C) Immersion de la lame : La lame de cuivre a été immergée dans la solution préparée (H_2SO_4 5 % + extrait 5%) pendant 2 heures.

D) Conditions expérimentales : L'essai a été réalisé à une température contrôlée de 50 °C.

E) Fin d'essai et nettoyage : Après 2 heures d'immersion, la lame a été retirée, rincée à l'eau distillée pour éliminer les résidus, puis séchée.



Fig IV.18 : Test de la lame de cuivre – Milieu acide inhibé.

IV.4 Résultats et discussion :

IV.4.1 Résultats des tests phytochimiques

Dans le cadre de cette étude, un criblage phytochimique préliminaire a été réalisé sur les extraits des noyaux de dattes afin d'identifier les principales familles de composés chimiques susceptibles d'être responsables de leur activité inhibitrice de corrosion.

Les noyaux de dattes constituent une source importante de composés organiques naturels tels que les composés phénoliques, les flavonoïdes, les tanins, les alcaloïdes et autres métabolites secondaires, connus pour leur capacité à s'adsorber à la surface des métaux et à former une couche protectrice limitant les phénomènes de corrosion.

L'identification qualitative de ces composés a été effectuée par des tests phytochimiques spécifiques. Le principe de ces tests repose soit sur la formation de précipités à la suite de réactions de complexation, soit sur l'apparition de colorations caractéristiques révélant la présence de certaines familles chimiques.

Les résultats obtenus sont interprétés selon l'échelle suivante :

- **+++ : réaction très positive ;**
- **++ : réaction moyennement positive ;**
- **+ : réaction faiblement positive ;**

- – : réaction négative.

Ce criblage phytochimique permet ainsi de mettre en évidence les principaux constituants bioactifs présents dans les noyaux de dattes et d'évaluer leur potentiel d'utilisation comme inhibiteur naturel de corrosion.

➤ Les alcaloïdes :

- Teste de Wgner :

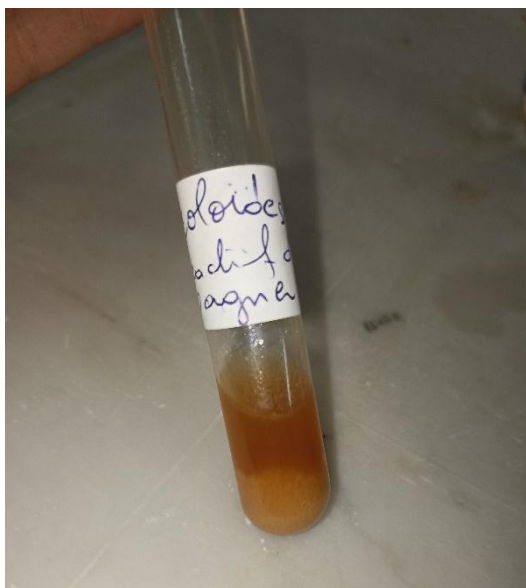


Fig IV.19 : Mise en évidence des alcaloïdes par le teste de Wagner.

- Test de Mayer :



Fig IV.20 : Mise en évidence des alcaloïdes par le test de Mayer.

➤ **Les saponines :**



Fig IV.21 : Mise en évidence des saponines

Après mesure de la hauteur de la mousse formée, la présence des saponines est évaluée selon les critères suivants :

- **Absence de mousse :** test négatif (-).
- **Hauteur de mousse inférieure à 1 cm :** test faiblement positif (+).
- **Hauteur de mousse comprise entre 1 et 2 cm :** test positif (++).
- **Hauteur de mousse supérieure à 2 cm :** test fortement positif (+++).

➤ **Anthraquinones libres :**



Fig IV.22 : Mise en évidence des anthraquinones libres.

➤ Les glycosides :



Fig IV.23 : Mise en évidence des **glycosides**.

➤ Les composés réducteurs :

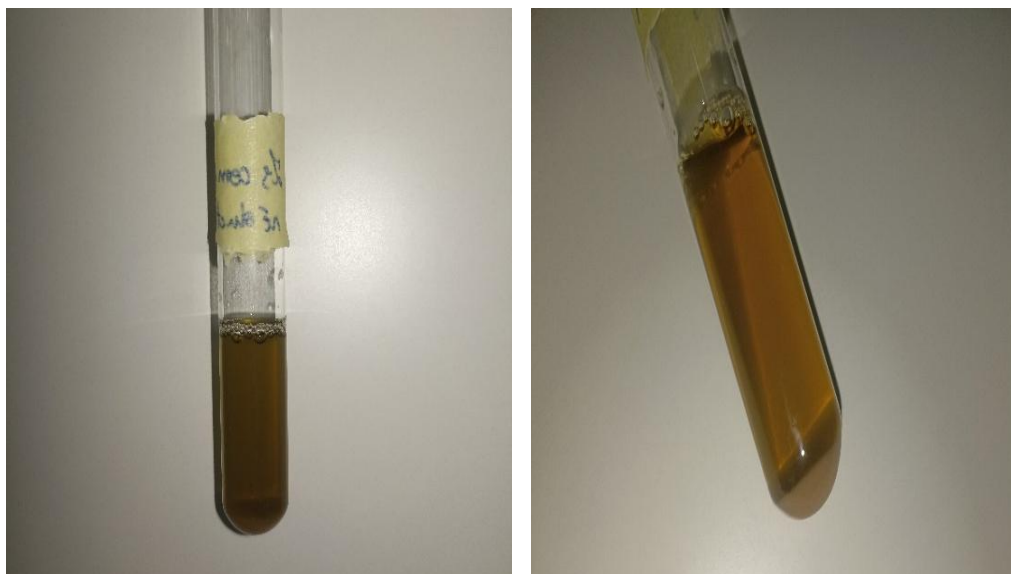


Fig IV.24 : Mise en évidence des composés réducteurs.

➤ Les polyphénols :

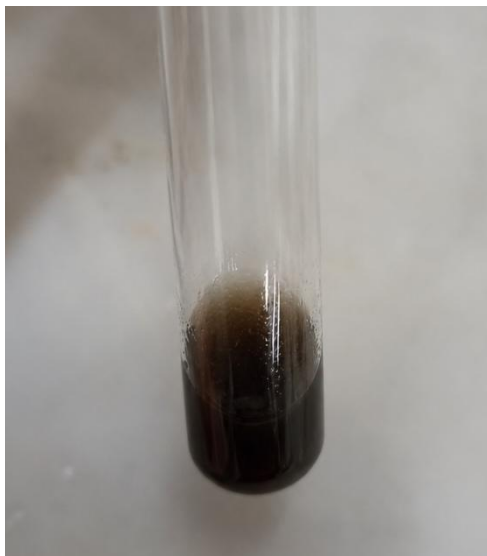


Fig IV.25 : Mise en évidence les polyphénols.

➤ Les tanins :



Fig IV.26 : Mise en évidence les tanins.

Les résultats obtenus lors du criblage phytochimique des extraits de noyaux de datte sont présentés dans le **Tableau IV.6** :

Composées organiques		Extrait de noyaux de datte
Les alcaloïdes	Test Wagner	+++
	Test Mayer	-
Les saponines		++
Anthraquinones libres		++
Les glycosides		-
Les composés réducteurs		-
Les polyphénols		+++
Les tanins		+++

Selon les résultats du criblage phytochimique de l'extrait de noyaux de datte, la présence de plusieurs familles de composés organiques a été mise en évidence. Les polyphénols et les tanins sont fortement présents, tandis que les saponines et les anthraquinones libres présentent une présence modérée. Les alcaloïdes ont également été détectés par le test de Wagner, alors que les glycosides et les composés réducteurs sont absents. La richesse de l'extrait en composés phénoliques et en molécules contenant des groupements fonctionnels riches en électrons favorise leur adsorption à la surface de l'acier. Cette adsorption conduit à la formation d'un film protecteur capable de limiter les réactions électrochimiques responsables de la corrosion et de réduire ainsi la vitesse de dégradation du métal dans les milieux corrosifs.

IV.4.2 Calcul du rendement de l'extraction :

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

- Rendement de l'extrait de dgla : $R (\%) = \frac{8.2572}{55} \times 100 = 15.013 \%$
- Rendement de l'extrait de Tmar : $R (\%) = \frac{9.1417}{55} \times 100 = 16.6 \%$
- Rendement de l'extrait de ghars : $R (\%) = \frac{8.4620}{55} \times 100 = 15.4 \%$
- Rendement de l'extrait de mélange : $R (\%) = \frac{7.6840}{55} \times 100 = 14 \%$

IV.4.3 Résultats et discussion de l'analyse UV-Visible des extraits de noyaux de dattes :

L'analyse UV-Visible a été réalisée sur les différents extraits de noyaux de dattes afin de caractériser les composés bioactifs présents, notamment les composés phénoliques. Les spectres enregistrés fournissent des informations sur la nature des substances absorbantes contenues dans les extraits. Les résultats obtenus sont présentés et discutés ci-après.

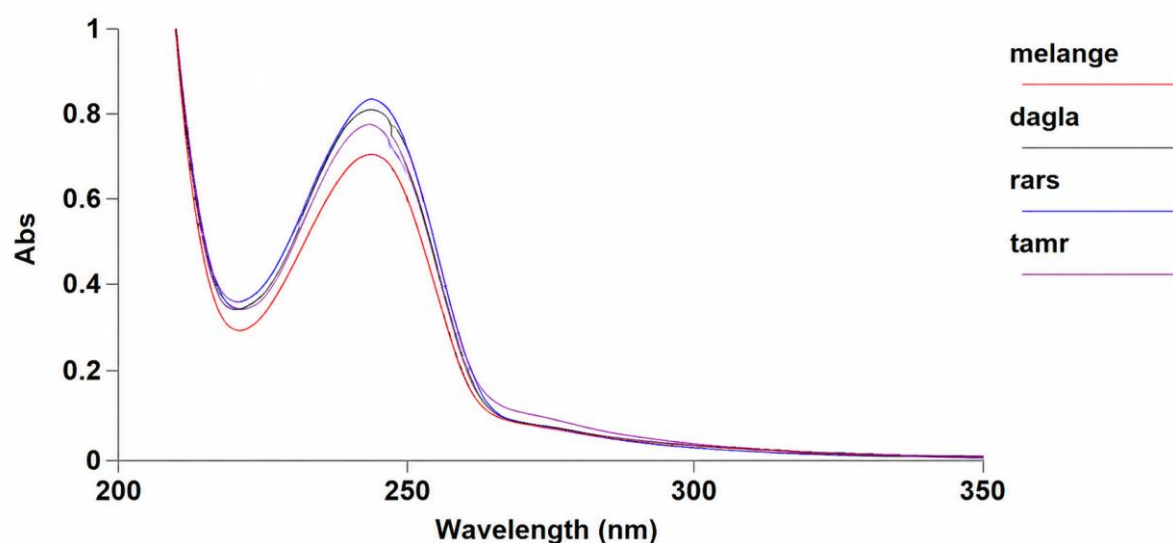


Fig IV.27 : Spectres UV-Visible des extraits de noyaux de dattes des variétés Dégla, Ghars, Tmar et du Mélange.

Interprétation :

La Figure IV.27 présente les spectres UV-Visible des extraits de noyaux de dattes des variétés Dégla, Rars, Tmar ainsi que du mélange. Les spectres obtenus montrent un comportement similaire pour les quatre extraits, indiquant une composition chimique globalement proche.

On observe une forte absorption dans la région UV, principalement entre 250 et 300 nm, avec un maximum situé autour de 280 nm. Cette bande d'absorption est généralement attribuée à la présence de composés phénoliques, connus pour leurs propriétés antioxydantes et leur aptitude à s'adsorber sur les surfaces métalliques.

Ces résultats confirment la présence de substances organiques riches en groupements fonctionnels contenant des hétéroatomes (O, N), susceptibles de contribuer à l'activité inhibitrice de corrosion des extraits de noyaux de dattes.

IV.4.4 Résultats et discussion du test de la lame de cuivre :

Le test de corrosion sur lame de cuivre a été réalisé conformément à la norme ASTM D130 afin d'évaluer l'agressivité potentielle du milieu étudié vis-à-vis du cuivre. Cette méthode repose sur l'observation de l'état de surface de la lame après immersion et sur sa comparaison avec l'échelle de référence ASTM. Les résultats obtenus permettent d'apprécier le degré de ternissement ou de corrosion du métal et sont présentés et discutés ci-après.



Fig IV.28 : Comparaison de la lame de cuivre après essai avec l'échelle de référence ASTM D130.

Interprétation :

La Figure IV.28 présente la lame de cuivre après l'essai de corrosion ainsi que l'échelle de référence ASTM D130 utilisée pour la classification des résultats. L'observation visuelle de la lame montre que sa surface conserve sa couleur cuivre d'origine, avec un aspect brillant et uniforme, sans apparition de taches sombres, de ternissement prononcé ou de produits de corrosion.

En comparant l'aspect de la lame à l'échelle normalisée ASTM D130, le résultat obtenu correspond à la classification 1a, caractérisée par une légère coloration orangée pratiquement identique à celle du cuivre poli. Cette classification indique une absence de corrosion significative et traduit une très faible agressivité du milieu vis-à-vis du cuivre.

Ces résultats montrent que le milieu étudié ne provoque pas d'attaque notable de la surface métallique dans les conditions expérimentales adoptées. La bonne conservation

de l'état de surface de la lame suggère également l'absence de composés sulfurés corrosifs susceptibles d'altérer le cuivre.

IV.4.5 Résultats et interprétation des courbes d'essais

IV.4.5.1 Effet de temps d'immersion :

IV.4.5.1.1 Etude de la corrosion sans inhibiteur :

✚ Milieu H_2SO_4 :

Tableau IV.7 : Vitesse de corrosion en fonction du temps à différentes concentration d'immersions d'acide sulfurique.

t (h)	H_2SO_4 (1%)		H_2SO_4 (2%)		H_2SO_4 (3%)		H_2SO_4 (4%)		H_2SO_4 (5%)	
	Δm (g)	V (g/cm ² h)	Δm (g)	V (g/cm ² h)	Δm (g)	V (g/cm ² h)	Δm (g)	V (g/cm ² h)	Δm (g)	V (g/cm ² h)
0,5	0,0269	0,00014507	0,0084	0,00097482	0,011	0,00159911	0,0066	0,001043152	0,0114	0,001722589
1	0,0324	0,000235015	0,0134	0,001088546	0,0216	0,001570035	0,0171	0,001351356	0,0237	0,001790586
1,5	0,0403	0,000194878	0,0229	0,001240184	0,0348	0,001686334	0,0269	0,001417212	0,0451	0,002271601
2	0,0439	0,000159215	0,033	0,001340374	0,0447	0,00162455	0,0394	0,001556826	0,0637	0,002406336
2,5	0,0554	0,000160738	0,0396	0,001286759	0,051	0,001482811	0,0478	0,00151099	0,077	0,002327006
3	0,0609	0,000147247	0,044	0,001191443	0,0548	0,001480735	0,0567	0,001493605	0,0912	0,002296785
3,5	0,0647	0,000134087	0,0551	0,001278868	0,0712	0,001478657	0,064	0,00144506	0,1045	0,002255771
4	0,0735	0,000133284	0,0593	0,001204306	0,077	0,001399221	0,0709	0,001400748	0,1191	0,002249565
4,5	0,0775	0,000124922	0,0667	0,00120408	0,0851	0,001374588	0,0794	0,001394382	0,1308	0,002196049
5	0,0853	0,000123745	0,0735	0,001194151	0,0917	0,001333076	0,0855	0,001351356	0,1418	0,002142659

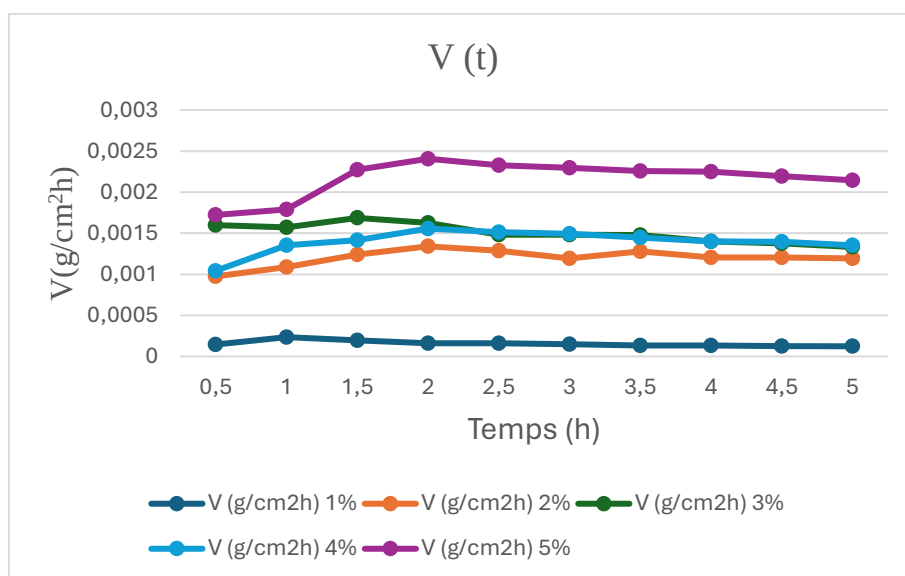


Fig IV.29 : Evolution de la vitesse de corrosion en fonction du temps d'immersions dans les différences concentration de H_2SO_4 .

Interprétation :

Les courbes illustrent l'évolution de la vitesse de corrosion en fonction du temps d'immersion des échantillons d'acier dans des solutions d'acide sulfurique (H_2SO_4) de concentrations comprises entre 1 % et 5 %. Les résultats montrent une augmentation progressive de la vitesse de corrosion avec le temps pour l'ensemble des milieux étudiés. De plus, l'influence de la concentration de l'acide est nettement mise en évidence : la vitesse de corrosion croît avec l'augmentation de la concentration en H_2SO_4 . Ainsi, la solution à 5 % présente le pouvoir corrosif le plus élevé vis-à-vis de l'acier, tandis que la solution à 1 % engendre les vitesses de corrosion les plus faibles. Ces observations confirment que l'agressivité du milieu acide s'intensifie avec l'augmentation de sa concentration.

 Milieu NaCl :

Tableau IV.8 : Vitesse de corrosion de l'acier sans inhibiteur en fonction du temps d'immersions dans les différences concentration de NaCl.

t (h)	NaCl (3%)		NaCl (4%)		NaCl (5%)	
	Δm (g)	V (g/cm ² h)	Δm (g)	V (g/cm ² h)	Δm (g)	V (g/cm ² h)
0,5	0,0023	0,00016657	0,0022	0,000333949	0,004	0,00062045
1	0,0023	0,000174142	0,0046	0,000349129	0,0094	0,000729029
1,5	0,0027	0,000136285	0,0077	0,000389607	0,0175	0,00077556
2	0,0031	0,000117356	0,0096	0,000364308	0,0205	0,000794952
2,5	0,005	0,000151427	0,0106	0,000321805	0,0233	0,000722824
3	0,0059	0,000148904	0,0118	0,00029853	0,025	0,000646302
3,5	0,0063	0,000136285	0,0151	0,000327444	0,0276	0,000611587
4	0,0063	0,000119249	0,0154	0,000292205	0,0286	0,000554527
4,5	0,0065	0,000109364	0,018	0,00030359	0,0326	0,000561852
5	0,0078	0,000118113	0,0206	0,000312698	0,0348	0,000539792

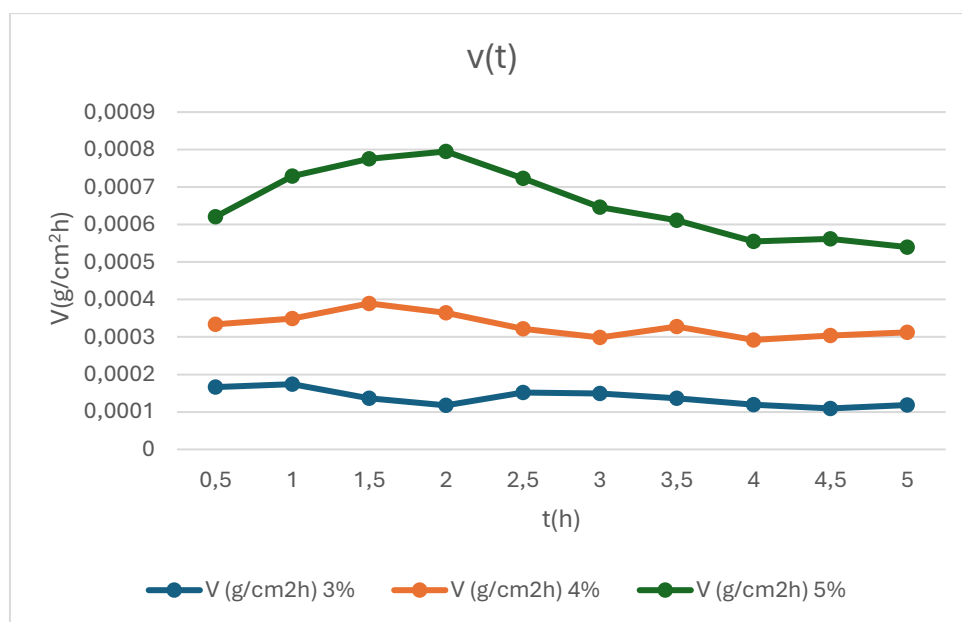


Fig IV.30 : Variation de la vitesse de corrosion en fonction du temps d'immersions dans les différences concentration de NaCl.

Interprétation :

Le graphique illustre l'évolution de la vitesse de corrosion de l'acier dans des solutions de NaCl à différentes concentrations (3 %, 4 % et 5 %). Les résultats mettent en évidence une augmentation de la vitesse de corrosion avec l'accroissement de la concentration en chlorures. La solution à 5 % présente les valeurs de corrosion les plus élevées, suivie respectivement par celles à 4 % et à 3 %, confirmant ainsi le rôle accélérateur des ions chlorure dans le processus de corrosion. Par ailleurs, la vitesse de corrosion atteint un maximum après environ 1,5 à 2 heures d'immersion, avant de tendre vers une stabilisation progressive.

IV.4.5.1.2 Etude de la corrosion avec inhibiteur :

 Milieu H₂SO₄ (5%) :

La concentration de H₂SO₄ à 5 % a été choisie pour les essais d'inhibition, car elle correspond au milieu le plus agressif mis en évidence par les tests gravimétriques préliminaires.

- Extrait issu du Mélange de noyaux de dattes :

Tableau IV.9 : Variation de la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice dans une solution de H₂SO₄ à 5 % en présence de l'inhibiteur issu du mélange de noyaux de dattes à différentes concentrations.

H ₂ SO ₄ (5 %) + l'inhibiteur (Mélange) à diverses concentrations.											
	t (h)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
(1%)	Δm (g)	0,0107	0,0168	0,022	0,0276	0,0315	0,0411	0,0446	0,0526	0,0607	0,0743
	V (g/cm ² h)	0,00150075	0,00117816	0,001028554	0,000967776	0,000883621	0,000960763	0,00089364	0,00092219	0,00094596	0,00104211
	E%	12,878023	34,20244873	54,7211973	59,7821875	62,0275495	58,1692377	60,3842973	59,0057658	56,92455799	51,36360484
(2%)	Δm (g)	0,0108	0,0179	0,0268	0,0345	0,0415	0,0493	0,057	0,0648	0,0733	0,0108
	V (g/cm ² h)	0,00164153	0,00136035	0,001357812	0,001310947	0,001261549	0,001249607	0,001237665	0,00123115	0,00123791	0,00124939
	E%	4,70541073	24,0279189	40,2266508	45,5210158	45,7865919	53,455652	45,1334183	45,2716213	43,63032	41,6897471
(3%)	Δm (g)	0,0031	0,0051	0,0066	0,0092	0,0115	0,00188	0,0158	0,0166	0,0194	0,021
	V (g/cm ² h)	0,00047334	0,00038936	0,000335921	0,00035119	0,00035119	0,00047918	0,000344646	0,00031683	0,00032913	0,00032065
	E%	72,5213921	78,2549849	85,2121418	85,4055989	84,9080625	98,3933878	84,7215717	85,9157343	85,0124077	85,0348544
(4%)	Δm (g)	0,0024	0,0049	0,0056	0,0095	0,0101	0,0132	0,0157	0,0188	0,0203	0,0222
	V (g/cm ² h)	0,00038171	0,00038967	0,00029689	0,00037774	0,00032128	0,00034991	0,00035672	0,00037376	0,00035874	0,00035309
	E%	77,8406368	78,2380094	86,9303978	84,302335	86,1935656	84,7654378	84,1862726	83,385129	83,6642462	83,5211224
(5%)	Δm (g)	0,0235	0,029	0,0355	0,0368	0,0405	0,042	0,0446	0,047	0,0494	0,0507
	V (g/cm ² h)	0,00331321	0,00204432	0,0016707	0,00129708	0,001142	0,00098691	0,00089829	0,0008283	0,00077386	0,00071481
	E%	-92,3387013	-14,1703468	-22,0616224	46,0971095	50,9241346	57,0307157	60,1780762	63,179493	64,761057	66,6392814

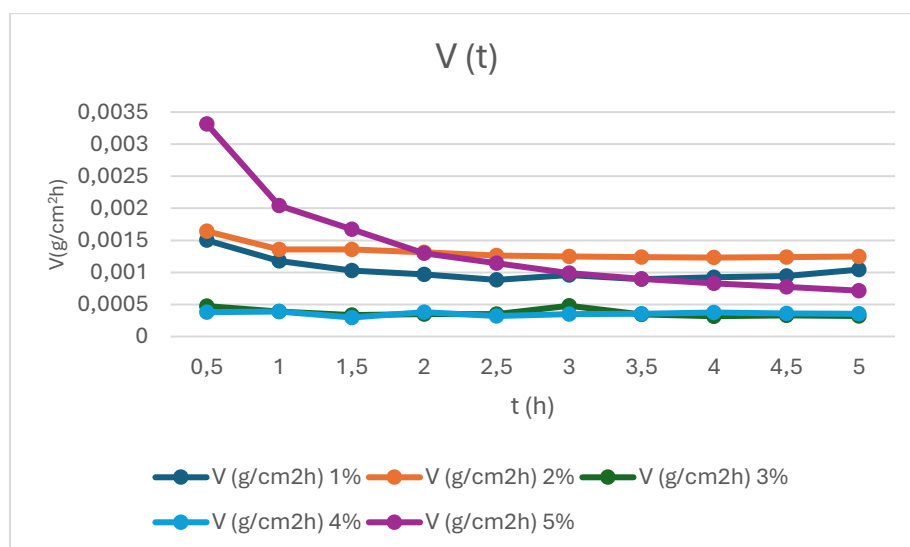


Fig IV.31 : Évolution de la vitesse de corrosion avec le temps d'immersion dans le milieu corrosif H_2SO_4 (5 %) en présence de l'inhibiteur (Mélange) à diverses concentrations.

Interprétation :

La figure présente l'évolution de la vitesse de corrosion de l'acier en fonction du temps d'immersion dans une solution de H_2SO_4 à 5 % en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur issu du mélange de noyaux de dattes (1 %, 2 %, 3 %, 4 % et 5 %).

On observe que, pour toutes les concentrations, la vitesse de corrosion diminue globalement avec le temps, ce qui indique une adsorption progressive des molécules inhibitrices à la surface de l'acier et la formation d'un film protecteur limitant l'attaque du milieu corrosif.

La concentration de 4 % présente les valeurs de vitesse de corrosion les plus faibles durant toute la période d'immersion, ce qui traduit une meilleure efficacité inhibitrice. La concentration de 3 % montre également une bonne performance, avec des vitesses de corrosion relativement faibles et stables.

Pour les concentrations de 1 % et 2 %, la diminution de la vitesse de corrosion est moins marquée, ce qui suggère une protection partielle de la surface métallique.

À 5 %, la vitesse de corrosion est initialement très élevée puis décroît fortement avec le temps. Ce comportement peut être attribué à une adsorption retardée des composés actifs ou à une saturation de la surface, entraînant une efficacité inhibitrice moins optimale au début de l'immersion.

En conclusion, les résultats montrent que l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur améliore généralement la protection contre la corrosion jusqu'à une concentration optimale de 4 %, au-delà de laquelle l'efficacité n'augmente pas nécessairement. La concentration de 4 % apparaît donc comme la concentration optimale dans les conditions expérimentales étudiées.

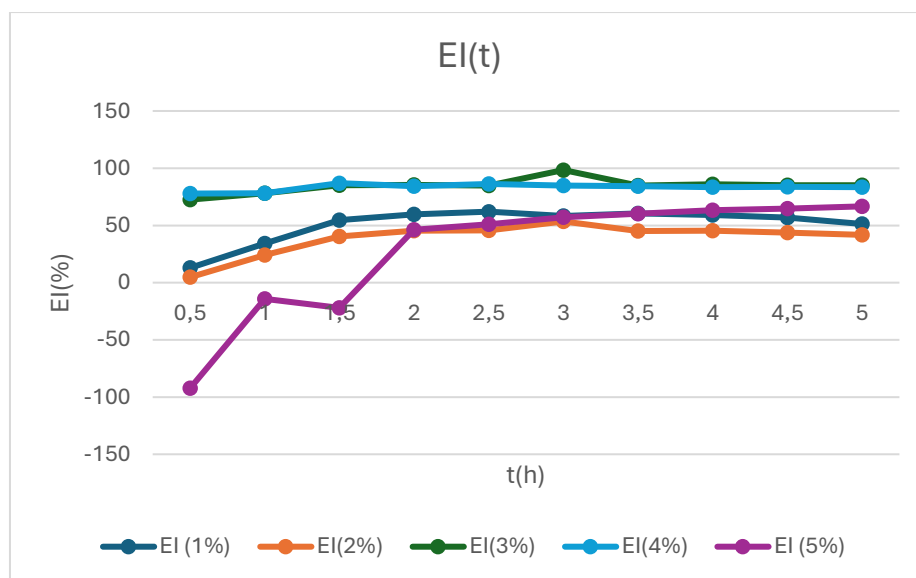


Fig IV.32 : Evolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations de l'inhibiteurs (Mélange) en fonction du temps d'immersion dans H_2SO_4 5%.

Interprétation :

Cette courbe représente l'évolution de l'efficacité inhibitrice (EI%) de l'extrait du mélange en fonction du temps pour différentes concentrations (1 %, 2 %, 3 %, 4 % et 5 %).

Pour toutes les concentrations, l'efficacité inhibitrice augmente rapidement au début de l'expérience puis tend à se stabiliser avec le temps.

Cela suggère que l'agent inhibiteur agit principalement durant les premières périodes, avant d'atteindre un état d'équilibre.

- Extrait issu des noyaux de dattes de la variété Déglà :

Tableau IV.10 : Variation de la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice dans une solution de H_2SO_4 à 5 % en présence de l'inhibiteur issu des noyaux de dattes de la variété Déglà à différentes concentrations.

	H ₂ SO ₄ (5 %) + l'inhibiteur (Degla) à diverses concentrations.										
	t (h)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
(1%)	Δm (g)	0,0125	0,0202	0,0248	0,0343	0,0418	0,0453	0,0563	0,0661	0,0745	0,0821
	V (g/cm ² h)	0,0018308	0,00147929	0,00121077	0,00125593	0,00122444	0,0011058	0,00117799	0,00121016	0,0012124	0,00120247
	E%	-6,28186	17,38536	46,69976	47,80743	47,38137	51,85432	47,77889	46,20478	44,79193	43,87958
(2%)	Δm (g)	0,0033	0,0054	0,0082	0,0118	0,0143	0,0173	0,0206	0,0239	0,0272	0,0295
	V (g/cm ² h)	0,00046184	0,00037787	0,00038253	0,00041285	0,00040026	0,00040352	0,00041185	0,0004181	0,00042296	0,00041285
	E%	73,18935	78,89703	83,16026	82,84302	82,7994	82,4309	81,74217	81,41407	80,73986	80,73167
(3%)	Δm (g)	0,0017	0,003	0,0054	0,0064	0,0076	0,0097	0,0125	0,0141	0,0154	0,0171
	V (g/cm ² h)	0,0002683	0,0002367	0,0002841	0,0002525	0,0002399	0,0002551	0,0002818	0,0002782	0,0002700	0,0002699
	E%	84,42461	86,78086	87,4934	89,50687	89,69062	88,89317	87,5076	87,63316	87,70519	87,4035
(4%)	Δm (g)	0,0026	0,0059	0,0099	0,0121	0,0133	0,0153	0,0182	0,0218	0,022	0,0231
	V (g/cm ² h)	0,00039119	0,00044385	0,00049651	0,00045513	0,00040021	0,00038366	0,00039119	0,00040999	0,00036778	0,00034755
	E%	77,29075	75,2122	78,14288	81,08614	82,80131	83,2956	82,65839	81,77452	83,25253	83,77928
(5%)	Δm (g)	0,0023	0,0039	0,0058	0,0077	0,0096	0,012	0,0132	0,016	0,0191	0,0224
	V (g/cm ² h)	0,00033624	0,00028507	0,00028264	0,00028142	0,00028069	0,00029238	0,00027568	0,00029238	0,00031025	0,00032747
	E%	80,48043	84,07925	87,55776	88,30505	87,93777	87,26985	87,77905	87,00263	85,87226	84,71664

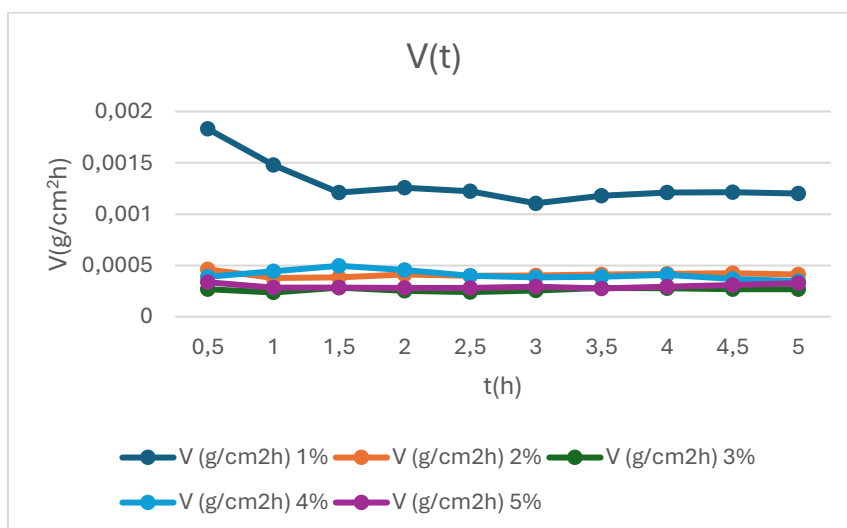


Fig IV.33 : Évolution de la vitesse de corrosion avec le temps d'immersion dans le milieu corrosif H_2SO_4 (5 %) en présence de l'inhibiteur (Déglà) à diverses concentrations.

Interprétation :

La figure illustre l'évolution de la vitesse de corrosion de l'acier dans une solution de H_2SO_4 à 5 % en présence de l'inhibiteur issu de la variété Degla à différentes concentrations (1 %, 2 %, 3 %, 4 % et 5 %).

On observe que la vitesse de corrosion est la plus élevée pour la concentration de 1 % durant toute la période d'immersion. Bien qu'elle diminue au début de l'essai, elle reste nettement supérieure aux autres concentrations, ce qui traduit une protection insuffisante de la surface métallique.

Les concentrations de 2 %, 3 %, 4 % et 5 % conduisent à des vitesses de corrosion beaucoup plus faibles, témoignant d'un effet inhibiteur significatif. Parmi elles, la concentration de 3 % présente les valeurs les plus faibles et les plus stables, indiquant une meilleure efficacité de protection contre la corrosion.

La diminution initiale de la vitesse de corrosion est liée à l'adsorption progressive des molécules inhibitrices sur la surface de l'acier, formant une couche protectrice qui limite les réactions électrochimiques responsables de la corrosion. Après environ 2 à 3 heures d'immersion, les courbes tendent à se stabiliser, ce qui suggère l'établissement d'un équilibre entre les phénomènes de corrosion et la protection assurée par l'inhibiteur.

En conclusion, Les résultats montrent que l'extrait de noyaux de dattes de variété Degla agit comme un inhibiteur efficace de la corrosion en milieu sulfurique. L'efficacité inhibitrice augmente avec la concentration jusqu'à atteindre un optimum autour de 3 %, concentration pour laquelle la vitesse de corrosion est la plus faible. Au-delà de cette concentration, l'amélioration de la protection reste limitée.

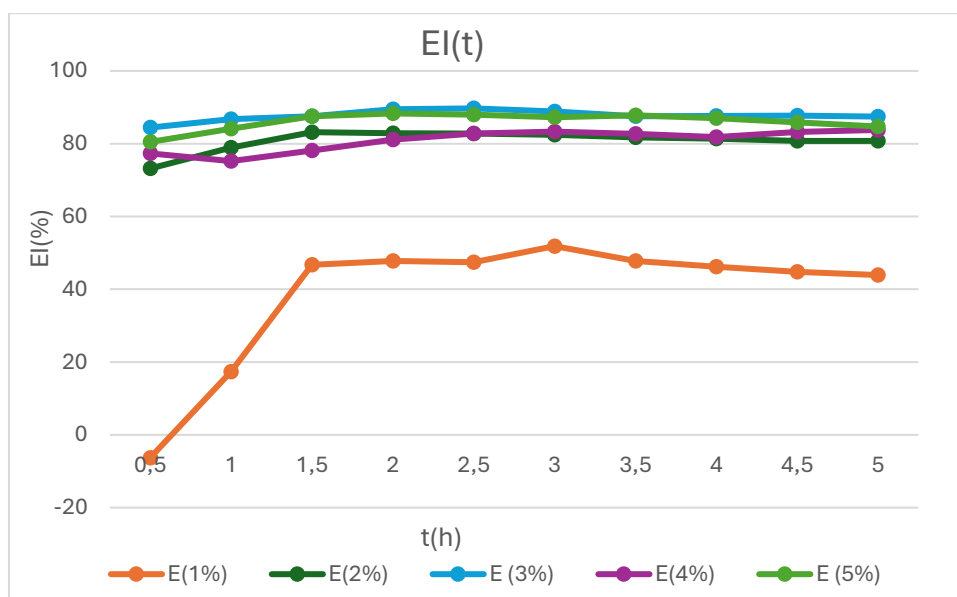


Fig IV.34 : Evolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations de l'extrait du Degla en fonction du temps d'immersion dans H_2SO_4 5%.

Interprétation :

Cette courbe représente l'efficacité inhibitrice (EI %) de l'extrait de Degla en fonction du temps en milieu H_2SO_4 . On observe que l'efficacité inhibitrice augmente progressivement avec le temps, passant de valeurs faibles au début à des valeurs très élevées à la fin.

- Extrait issu des noyaux de dattes de la variété Ghars :

Tableau IV.11 : Variation de la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice dans une solution de H_2SO_4 à 5 % en présence de l'inhibiteur issu des noyaux de dattes de la variété Ghars à différentes concentrations.

H_2SO_4 (5 %) + l'inhibiteur (Ghars) à diverses concentrations.											
	t (h)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
(1%)	Δm (g)	0,0273	0,0442	0,0584	0,0675	0,0773	0,0871	0,1004	0,1121	0,1254	0,1386
	V (g/cm ² h)	0,0040841484	0,0033062154	0,0029122621	0,0025245423	0,0023128547	0,0021717297	0,0021457274	0,0020963051	0,0020844616	0,0020734907
	E%	-137,093	-84,6439	-28,2031	-4,91212	0,608304	5,445004	4,878272	6,813075	14,76999	3,228198
(2%)	Δm (g)	0,003	0,0054	0,0075	0,0126	0,0158	0,019	0,0218	0,0249	0,0288	0,0306
	V (g/cm ² h)	0,0004392346	0,0003953111	0,0003660288	0,0004611963	0,0004626604	0,0004636365	0,0004559673	0,0004557059	0,0004685169	0,0004480193
	E%	74,5015	55,84571	83,88674	80,83412	80,11782	79,81372	79,78662	79,74253	78,66547	79,09051
(3%)	Δm (g)	0,0025	0,0035	0,007	0,0088	0,0111	0,0134	0,016	0,0187	0,0206	0,024
	V (g/cm ² h)	0,0003819357	0,0002673550	0,0003564733	0,0003361034	0,0003391589	0,0003411959	0,0003491984	0,0003571099	0,0003496834	0,0003666583
	E%	77,82782	85,06889	84,30739	86,03259	85,42512	85,14466	84,51977	84,12542	84,07671	82,88771
(4%)	Δm (g)	0,004	0,0071	0,0093	0,0143	0,0173	0,0213	0,025	0,029	0,0317	0,035
	V (g/cm ² h)	0,0006240649	0,0005538576	0,0004836503	0,0005577580	0,0005398161	0,0005538576	0,0005572008	0,0005655588	0,0005495238	0,0005460568
	E%	63,77171	91,28688	78,70883	76,82131	76,80216	75,88558	75,29886	74,85925	74,97672	74,515
(5%)	Δm (g)	0,0037	0,0067	0,0096	0,0126	0,0145	0,0156	0,0197	0,0231	0,0255	0,0285
	V (g/cm ² h)	0,0005444501	0,0004929480	0,0004708757	0,0004635183	0,0004267311	0,0003825865	0,0004141184	0,0004248918	0,0004169212	0,0004193737
	E%	68,39352	72,47008	79,27119	80,73762	81,66183	83,34256	81,64182	81,11231	81,01495	80,42743

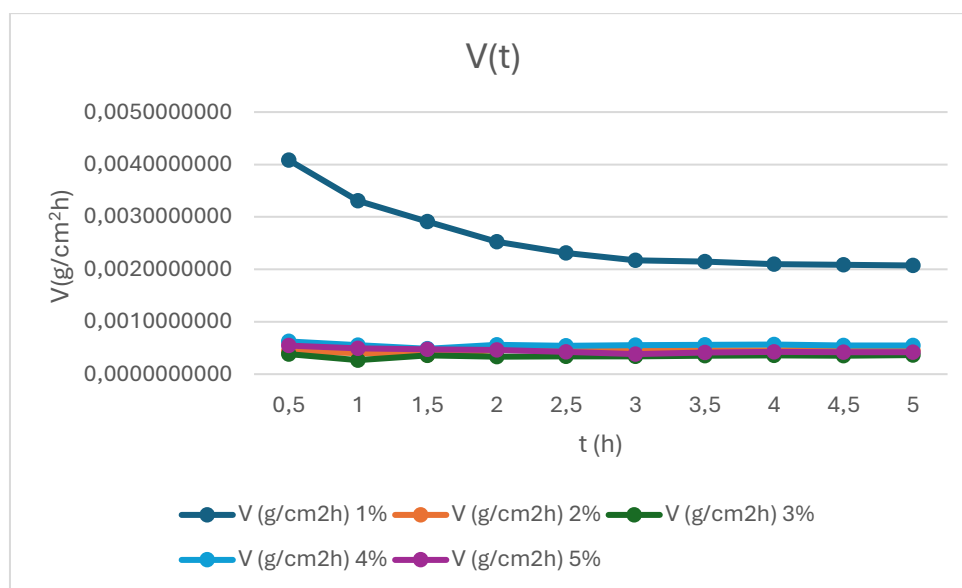


Fig IV.35 : Évolution de la vitesse de corrosion avec le temps d'immersion dans le milieu corrosif H_2SO_4 (5 %) en présence de l'inhibiteur (Ghars) à diverses concentrations.

Interprétation :

La courbe montre l'évolution de la vitesse de corrosion V ($\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{h}$) en fonction du temps dans une solution de H_2SO_4 à 5 % en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur de ghars (1% à 5%).

Globalement, pour toutes les concentrations, la vitesse de corrosion diminue légèrement puis se stabilise au cours du temps, ce qui traduit la formation progressive d'un film protecteur à la surface du métal.

L'influence de la concentration est nette : la concentration 1% présente les vitesses de corrosion les plus élevées, tandis que les concentrations 2% à 5 % montrent des valeurs beaucoup plus faibles et relativement stables. Les meilleures performances sont observées pour 3%–5% , avec une amélioration qui devient marginale à partir de 4%, suggérant une saturation partielle de la surface métallique.

Ce comportement s'explique par l'adsorption des molécules organiques de l'extrait de ghars sur le métal, formant une couche protectrice qui limite les réactions anodiques de dissolution et cathodiques de réduction de l'hydrogène dans le milieu acide.

Ainsi, l'inhibiteur de ghars présente une efficacité inhibitrice significative dans H_2SO_4 5 %, avec une concentration optimale autour de 4%.

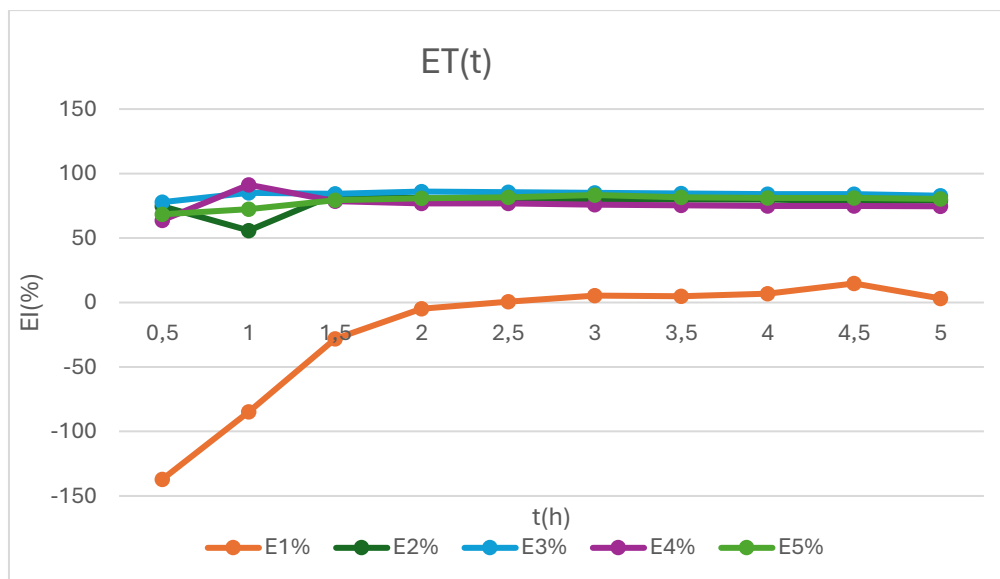


Fig IV.36 : Evolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations de l'extrait du ghars en fonction du temps d'immersion dans H_2SO_4 5%

Interprétation :

La courbe montre que l'efficacité inhibitrice augmente progressivement avec le temps d'immersion, surtout aux concentrations élevées, puis tend vers une stabilisation.

- Extrait issu des noyaux de dattes de la variété Tmar :

Tableau IV.12 : Variation de la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice dans une solution de H_2SO_4 à 5 % en présence de l'inhibiteur issu des noyaux de dattes de la variété Tmar à différentes concentrations.

	H ₂ SO ₄ (5 %) + l'inhibiteur (Tmar) à diverses concentrations.										
	t (h)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
(1%)	Δm (g)	0,006	0,0011	0,0159	0,0209	0,026	0,0304	0,0346	0,0385	0,045	0,051
	V (g/cm ² h)	0,00088307	0,00008095	0,00078004	0,00076901	0,00076533	0,0007457	0,00072748	0,0007083	0,00073589	0,00075061
	E%	48,7358809	54,7913309	65,6610255	68,0422816	67,111099	67,5328794	67,7502355	68,5141294	66,4902252	64,9683427
(2%)	Δm (g)	0,0026	0,0041	0,0053	0,0061	0,0072	0,0086	0,0096	0,0107	0,013	0,0161
	V (g/cm ² h)	0,00042366	0,00033404	0,00028787	0,00024849	0,00023464	0,00023356	0,00022347	0,00021794	0,00023537	0,00026234
	E%	75,4057204	81,344748	87,1779864	89,6734319	89,9165911	89,8312113	90,093493	90,311922	89,2823093	87,7562274
(3%)	Δm (g)	0,0047	0,0071	0,0097	0,0119	0,0151	0,0184	0,021	0,0245	0,022	0,0249
	V (g/cm ² h)	0,00072162	0,00054506	0,00049644	0,00045677	0,00046368	0,00047085	0,00046061	0,00047021	0,00037531	0,00038231
	E%	58,1081494	69,5598672	78,1459601	81,0179082	80,0738791	79,4997327	79,5807614	79,0978547	82,9096295	82,1573377
(4%)	Δm (g)	0,0064	0,0099	0,0131	0,0164	0,0207	0,0244	0,0264	0,0308	0,0384	0,0427
	V (g/cm ² h)	0,00087393	0,00067593	0,00059627	0,00055986	0,00056532	0,00055531	0,00051499	0,00052572	0,00058262	0,00058307
	E%	49,2665123	62,2509137	73,7509041	76,7338774	75,7059894	75,8223223	77,1699306	76,6300087	73,4696441	72,7873247
(5%)	Δm (g)	0,0045	0,0063	0,0094	0,0102	0,0124	0,015	0,0177	0,0204	0,025	0,0281
	V (g/cm ² h)	0,00071004	0,00049702	0,00049439	0,00040235	0,00039131	0,00039446	0,00039897	0,00040235	0,00043829	0,00044338
	E%	58,7809312	72,2423486	80,2040507	83,2794233	83,1840474	82,825388	82,3132723	82,1141774	80,0417353	79,307136

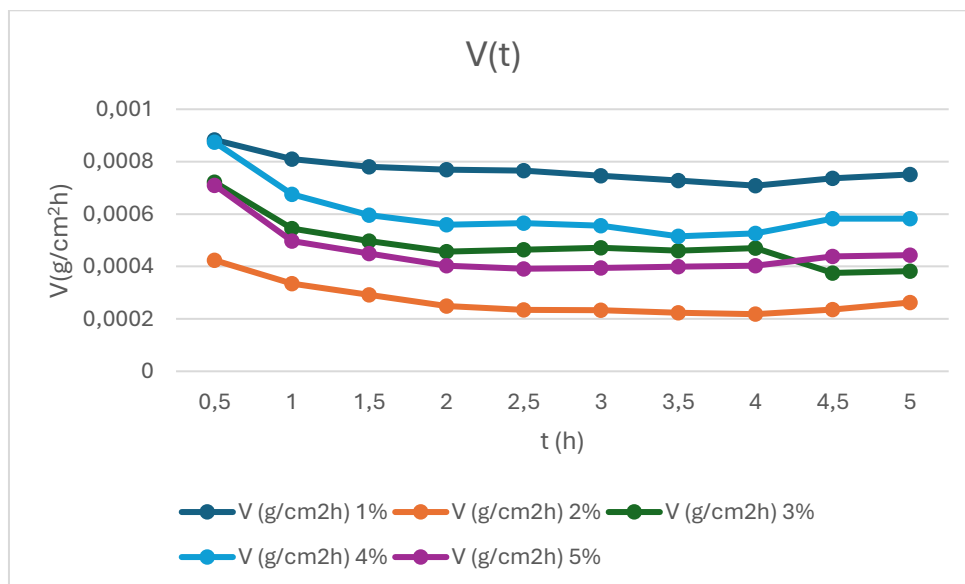


Fig IV.37 : Évolution de la vitesse de corrosion avec le temps d'immersion dans le milieu corrosif H_2SO_4 (5 %) en présence de l'inhibiteur (Tmar) à diverses concentrations.

Interprétation :

La courbe montre l'évolution de la vitesse de corrosion V ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$) en fonction du temps dans une solution de H_2SO_4 à 5 % en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur de Tmar (1 à 5%).

Pour toutes les concentrations, la vitesse de corrosion diminue au début de l'immersion puis tend à se stabiliser avec le temps.

La présence de l'inhibiteur réduit significativement la vitesse de corrosion par rapport à la concentration la plus faible.

La concentration 2 % présente les valeurs de vitesse de corrosion les plus faibles durant toute la période d'essai, indiquant la meilleure efficacité inhibitrice.

Lorsque la concentration augmente au-delà de 2 % (3 %, 4 % et 5 %), la vitesse de corrosion augmente légèrement. Cela suggère que l'efficacité de l'inhibiteur n'augmente pas nécessairement avec la concentration et qu'une concentration optimale existe.

La diminution initiale de la vitesse de corrosion peut être attribuée à l'adsorption progressive des molécules de l'extrait sur la surface métallique, formant un film protecteur qui limite l'attaque du milieu acide.

Après environ 2 heures d'immersion, les courbes deviennent presque constantes, ce qui traduit l'établissement d'un état quasi-stationnaire et la stabilité relative de la couche protectrice.

En conclusion, L'extrait des noyaux de dattes de la variété Tmar agit comme un inhibiteur de corrosion efficace dans le milieu H_2SO_4 (5 %). La concentration optimale observée est d'environ 2 %, pour laquelle la vitesse de corrosion est minimale et l'efficacité inhibitrice maximale.

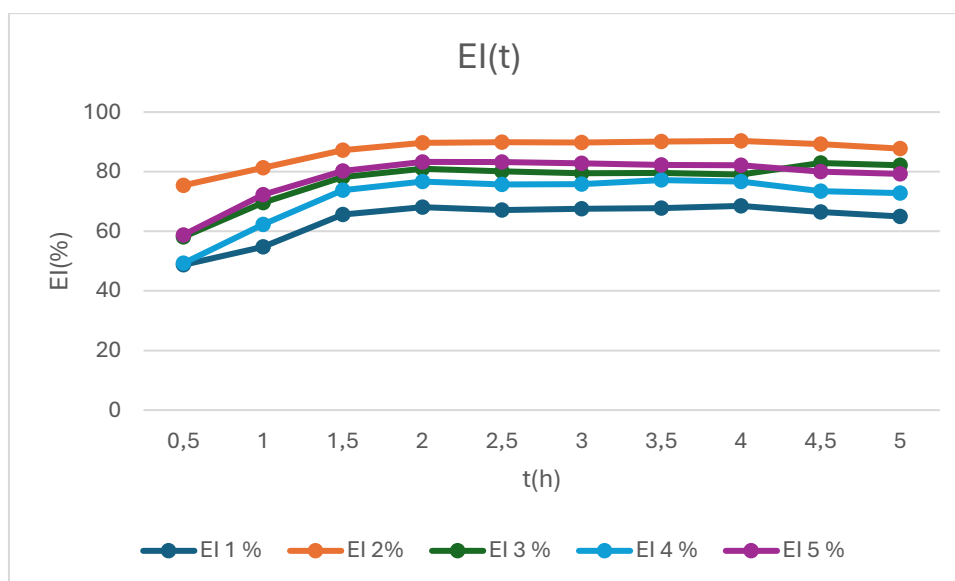


Fig IV.38 : Evolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations de l'extrait du tmar en fonction du temps d'immersion dans H_2SO_4 5%

Interprétation :

La tendance générale de la courbe montre que l'efficacité inhibitrice de l'extrait des noyaux de tamar augmente rapidement au début du temps d'immersion, puis se stabilise après environ 2 heures, avec une légère diminution aux temps les plus longs.

- **Conclusion :** les résultats obtenus pour les différents extraits de noyaux de dattes sont globalement très proches et montrent tous une bonne efficacité inhibitrice vis-à-vis de la corrosion de l'acier dans une solution de H_2SO_4 à 5 %. Dans tous les cas, la vitesse de corrosion diminue avec le temps d'immersion grâce à l'adsorption des molécules actives sur la surface métallique et à la formation d'un film protecteur. Bien que les concentrations optimales varient légèrement d'un extrait à l'autre, les performances observées restent comparables, ce qui confirme le potentiel de ces extraits naturels comme inhibiteurs de corrosion efficaces et écologiques en milieu acide.

Milieu NaCl :

La concentration de NaCl à 5 % a été choisie pour les essais d'inhibition, car elle correspond au milieu le plus agressif mis en évidence par les tests gravimétriques préliminaires.

- **Extrait issu du Mélange de noyaux de dattes :**

Tableau IV.13 : Variation de la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice dans une solution de NaCl à 5 % en présence de l'inhibiteur issu du mélange de noyaux de dattes à différentes concentrations.

NaCl (5 %) + l'inhibiteur (Mélange) à diverses concentrations.											
	t (h)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
(1%)	Δm (g)	0,0052	0,0116	0,015	0,0177	0,0227	0,0259	0,0293	0,0326	0,0344	0,0373
	V (g/cm ² h)	0,000819093	0,00080334	0,000787589	0,00075136	0,000715131	0,000679952	0,000659324	0,000641885	0,000602068	0,000587541
	E%	-32,0158482	-25,3178264	12,9565836	12,3196806	1,06438581	-5,20647593	-7,80558394	-15,7535409	-7,15774369	-8,84595794
(2%)	Δm (g)	0,001	0,0011	0,0023	0,0023	0,0035	0,0045	0,0045	0,0049	0,0058	0,0063
	V (g/cm ² h)	0,00015374	0,00013580	0,00011787	0,00008840	0,00010762	0,00011530	0,00009883	0,00009417	0,00009908	0,00009686
	E%	75,2213574	88,4014865	86,9735136	88,8798287	85,1115452	82,1593774	83,8400157	83,0188324	82,3661194	82,056845
(3%)	Δm (g)	0,0018	0,0031	0,0037	0,0049	0,0059	0,0066	0,0076	0,0089	0,0089	0,0099
	V (g/cm ² h)	0,00028179	0,000242652	0,000193078	0,000191774	0,000184729	0,000172205	0,000169968	0,000174162	0,00015481	0,000154984
	E%	54,5830146	66,7156844	78,6612259	75,8760728	74,4434703	73,3553685	72,2086079	68,5927607	72,4464097	71,2881127
(4%)	Δm (g)	0,002	0,006	0,0063	0,0096	0,0099	0,0127	0,013	0,0145	0,015	0,0165
	V (g/cm ² h)	0,00030101	0,000308535	0,00031606	0,00030703	0,000298	0,000288755	0,000279509	0,00027279	0,000250842	0,00024833
	E%	51,4852357	38,0662583	65,0693697	54,5617817	58,7728612	50,7089995	54,2976858	50,8067075	55,3545114	53,99462
(5%)	Δm (g)	0,0014	0,0033	0,0066	0,0086	0,0112	0,0118	0,0129	0,0129	0,0139	0,0148
	V (g/cm ² h)	0,000382412	0,000352996	0,000323579	0,000316225	0,000302745	0,00028926	0,00027105	0,000237169	0,000227159	0,000217681
	E%	66,8121616	66,7112867	64,2384108	60,2208487	54,4201361	55,2438293	55,6808369	57,230458	59,5695921	59,6732341

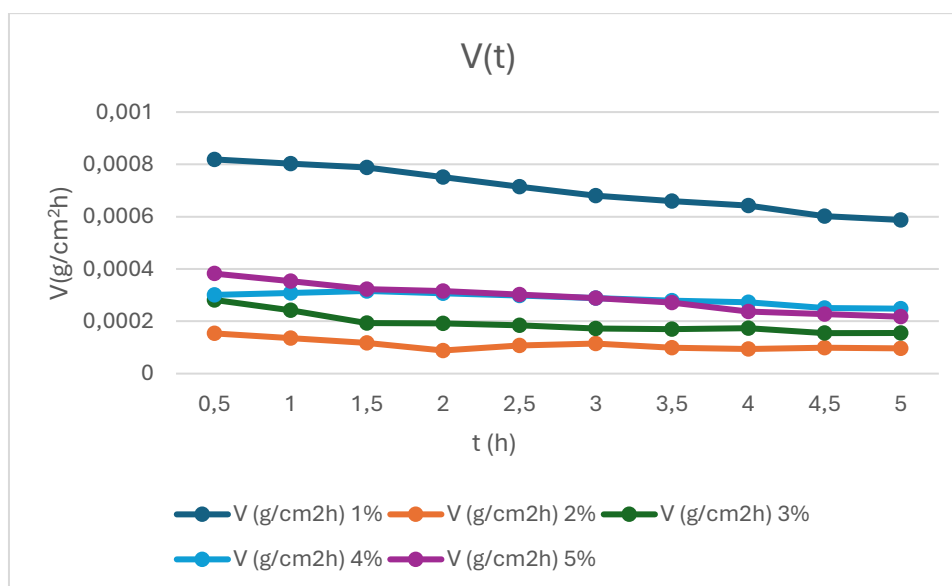


Fig IV.39 : Évolution de la vitesse de corrosion avec le temps d'immersion dans le milieu corrosif NaCl (5 %) en présence de l'inhibiteur (Mélange) à diverses concentrations.

Interprétation :

La figure représente l'évolution de la vitesse de corrosion de l'acier en fonction du temps d'immersion dans une solution de NaCl à 5 % en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur issu du mélange de noyaux de dattes.

On constate que la vitesse de corrosion diminue progressivement avec le temps pour toutes les concentrations étudiées, ce qui indique une adsorption progressive des molécules inhibitrices sur la surface métallique et la formation d'une couche protectrice limitant l'action corrosive des ions chlorure.

La concentration de 2 % présente les valeurs de vitesse de corrosion les plus faibles durant toute la période d'immersion. Cette concentration assure donc la meilleure protection contre la corrosion dans le milieu salin étudié. Les concentrations de 3 %, 4 % et 5 % montrent également une réduction de la vitesse de corrosion, mais leur efficacité reste légèrement inférieure à celle observée à 2 %.

En revanche, la concentration de 1 % présente les vitesses de corrosion les plus élevées tout au long de l'essai, ce qui suggère que la quantité d'inhibiteur est insuffisante pour couvrir efficacement la surface du métal et assurer une protection optimale.

Les courbes tendent vers une stabilisation après quelques heures d'immersion, traduisant l'établissement d'un équilibre entre les phénomènes de corrosion et la protection apportée par l'inhibiteur.

Conclusion : Les résultats montrent que l'inhibiteur extrait du mélange de noyaux de dattes réduit efficacement la corrosion de l'acier dans une solution de NaCl à 5 %. La concentration optimale est de 2 %, car elle conduit aux vitesses de corrosion les plus faibles et donc à la meilleure efficacité inhibitrice.

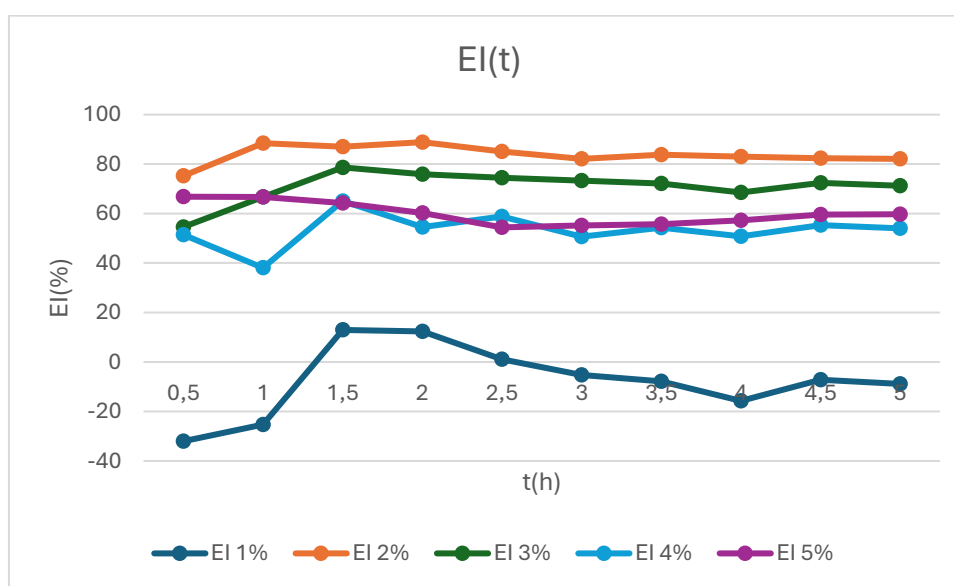


Fig IV.40 : Evolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations de l'extrait de mélange en fonction du temps d'immersion dans NaCl 5%

Interprétation :

La tendance générale montre que l'efficacité inhibitrice augmente rapidement au début de l'expérience puis tend à se stabiliser avec le temps. Dans le milieu salin NaCl, les valeurs d'EI restent globalement élevées pour les concentrations de 2 % et 3 %, tandis que les concentrations de 4 % et 5 % présentent une efficacité moyenne mais relativement stable. La concentration de 1 % montre la plus faible efficacité, avec des valeurs parfois négatives. Globalement, l'inhibiteur conserve une bonne activité dans le milieu salin, avec une efficacité optimale observée autour de 2–3 %.

- Extrait issu des noyaux de dattes de la variété Déglà :

Tableau IV.14 : Variation de la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice dans une solution de NaCl à 5 % en présence de l'inhibiteur issu des noyaux de dattes de la variété Déglà à différentes concentrations.

	NaCl (5 %) + l'inhibiteur (Degla) à diverses concentrations.										
	t (h)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
(1%)	Δm (g)	0,0061	0,0087	0,0104	0,0126	0,0164	0,0191	0,021	0,025	0,0277	0,0304
	V (g/cm²h)	0,000991199	0,000706838	0,000563304	0,000511849	0,000532972	0,000517265	0,000487475	0,000507786	0,000500113	0,000493974
	E%	-59,7548	3,043836	37,74427	35,61263	26,26529	19,96547	20,29341	8,428991	10,98848	8,487933
(2%)	Δm (g)	0,0007	0,0016	0,0039	0,0044	0,0069	0,0079	0,0083	0,009	0,0103	0,0106
	V (g/cm²h)	0,000102722	0,000117397	0,000190769	0,00016142	0,000202509	0,000193215	0,000173999	0,000165089	0,000167942	0,00015555
	E%	83,44395	83,89685	78,91638	79,69433	71,98364	70,10451	71,54965	70,22889	70,10915	71,18324
(3%)	Δm (g)	0,001	0,002	0,0022	0,0023	0,0027	0,0031	0,0039	0,005	0,0062	0,0067
	V (g/cm²h)	0,00015193	0,00015193	0,00011141	0,00008736	0,00008204	0,00007850	0,00008465	0,00009496	0,00010466	0,00010179
	E%	75,51318	79,16016	87,68663	89,01079	88,64989	87,85454	86,15963	82,87635	81,37199	81,14234
(4%)	Δm (g)	0,0011	0,0021	0,0025	0,0025	0,0035	0,0038	0,0056	0,0066	0,0077	0,009
	V (g/cm²h)	0,000170894	0,000163126	0,000129465	0,000097099	0,000108751	0,000098394	0,000124287	0,000128171	0,000132918	0,000139823
	E%	97,49604	77,62417	85,69165	87,78555	84,95474	84,77591	79,67799	76,88651	76,34294	74,09695
(5%)	Δm (g)	0,0013	0,003	0,0049	0,007	0,0104	0,0108	0,0117	0,0129	0,0139	0,0154
	V (g/cm²h)	0,000187729	0,00021661	0,000235865	0,000252712	0,000300366	0,000259932	0,000241366	0,000232856	0,000223028	0,000222387
	E%	69,74309	70,28782	73,93251	68,21038	58,44545	59,78159	60,53447	58,00817	60,30477	58,80138

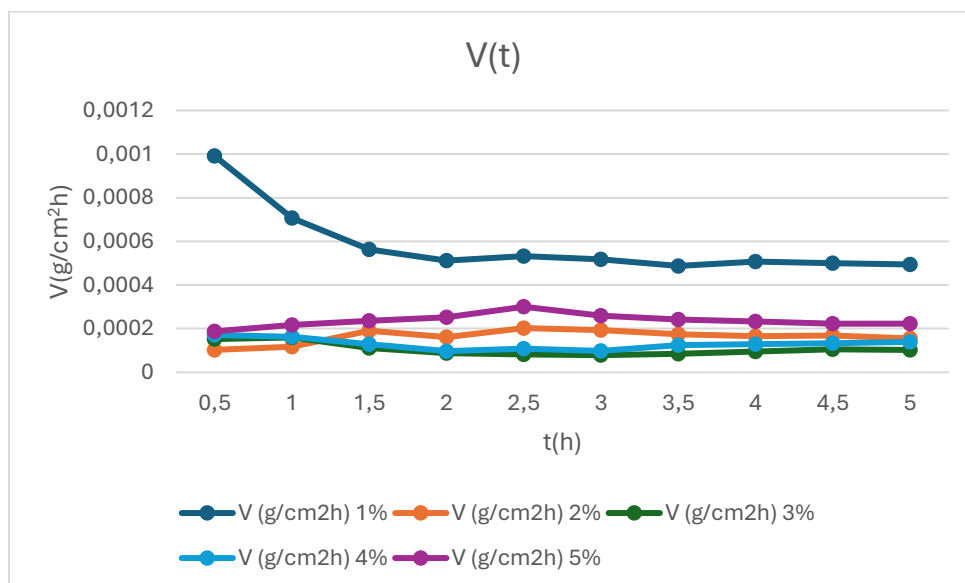


Fig IV.41 : Évolution de la vitesse de corrosion avec le temps d'immersion dans le milieu corrosif NaCl (5 %) en présence de l'inhibiteur (Déglà) à diverses concentrations.

Interprétation :

La courbe montre que la vitesse de corrosion du métal dans une solution de NaCl à 5 % diminue globalement avec l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur issu des noyaux de dattes de la variété Déglà.

Les résultats indiquent que la concentration 1% présente la plus faible efficacité inhibitrice, tandis que 3% et 4% assurent la meilleure protection avec les vitesses de corrosion les plus faibles. À 5%, une légère baisse d'efficacité est observée, ce qui suggère l'existence d'une concentration optimale autour de 3–4%.

Pour toutes les concentrations, la vitesse tend à se stabiliser au cours du temps après une évolution initiale, ce qui traduit l'établissement d'un équilibre à la surface du métal.

Ce comportement s'explique par l'adsorption des composés actifs de l'extrait sur la surface métallique, formant un film protecteur qui limite l'action agressive des ions chlorure et ralentit la dissolution du métal.

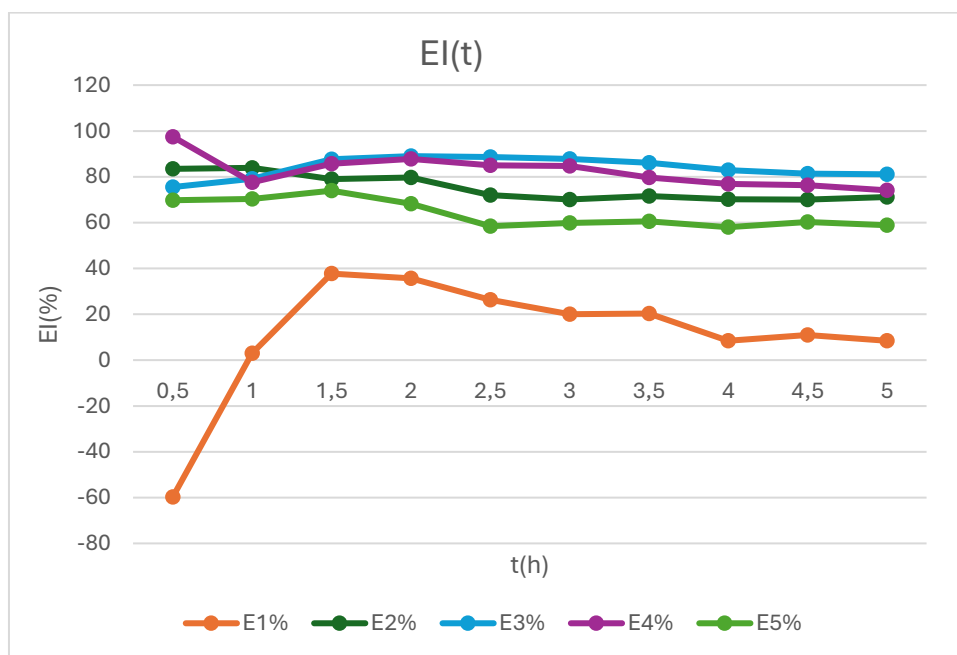


Fig IV.42 : Evolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations de l'extrait de Déglà en fonction du temps d'immersion dans NaCl 5%

Interprétation :

Cette courbe montre l'évolution de l'efficacité inhibitrice (EI %) de l'extrait de Degla en fonction du temps en milieu NaCl. On constate que l'efficacité augmente globalement avec le temps, surtout pour les concentrations moyennes et élevées, ce qui indique une amélioration progressive de la protection du métal. Les faibles concentrations présentent une efficacité limitée au début, tandis que les concentrations plus élevées assurent une meilleure stabilité et une protection plus importante.

- **Extrait issu des noyaux de dattes de la variété Ghars :**

Tableau IV.15 : Variation de la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice dans une solution de NaCl à 5 % en présence de l'inhibiteur issu des noyaux de dattes de la variété Ghars à différentes concentrations.

NaCl (5 %) + l'inhibiteur (Ghars) à diverses concentrations.											
	t (h)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
(1%)	Δm (g)	0,009	0,0133	0,0174	0,0219	0,0279	0,0317	0,035	0,0363	0,0409	0,0424
	V (g/cm ² h)	0,001367335	0,001010308	0,000881171	0,000831795	0,000847747	0,000802676	0,00075963	0,000689365	0,00069042	0,000644167
	E%	-39,5726244	-38,5827476	2,6139884	-4,63467604	-17,2826209	7,53925795	-24,2065053	-24,3156978	-22,8827971	-19,3361418
(2%)	Δm (g)	0,002	0,004	0,0053	0,0064	0,0075	0,0083	0,0089	0,0095	0,0101	0,0124
	V (g/cm ² h)	0,000289948	0,000289948	0,00025612	0,000231958	0,000217461	0,000200547	0,000184324	0,000172156	0,000162693	0,000179767
	E%	53,2682015	60,2282566	71,693882	70,8211209	69,9151512	68,9700858	69,8613763	68,9543996	71,0434868	66,6968792
(3%)	Δm (g)	0,0008	0,0012	0,002	0,0024	0,0032	0,004	0,0047	0,0048	0,0063	0,0072
	V (g/cm ² h)	0,000119768	0,0000898261	0,0000998068	0,0000898261	0,0000958145	0,0000998068	0,00010052	0,000089826	0,000104797	0,000107791
	E%	80,6965716	87,6786627	88,9694695	88,7004321	86,7444268	84,5572573	83,5641099	83,8013188	81,3479143	80,0309361
(4%)	Δm (g)	0,0008	0,0014	0,0021	0,0032	0,0036	0,004	0,0053	0,0066	0,0072	0,008
	V (g/cm ² h)	0,000124813	0,000109211	0,000109211	0,000124813	0,000112332	0,000104011	0,000118127	0,000128713	0,000124813	0,000124813
	E%	79,8834808	85,0196134	87,9300885	84,2993021	84,4593414	83,9067847	80,6852262	76,7886317	77,785439	76,8775642
(5%)	Δm (g)	0,0006	0,0014	0,0024	0,003	0,0034	0,0059	0,0076	0,009	0,0097	0,0111
	V (g/cm ² h)	0,00008829	0,00010300	0,00011772	0,00011036	0,00010006	0,00014470	0,00015976	0,00016554	0,00015859	0,00016334
	E%	85,7701379	85,8710589	86,9898404	86,1172077	86,1569296	77,6116836	73,8775478	70,1471424	71,7730751	69,7410978

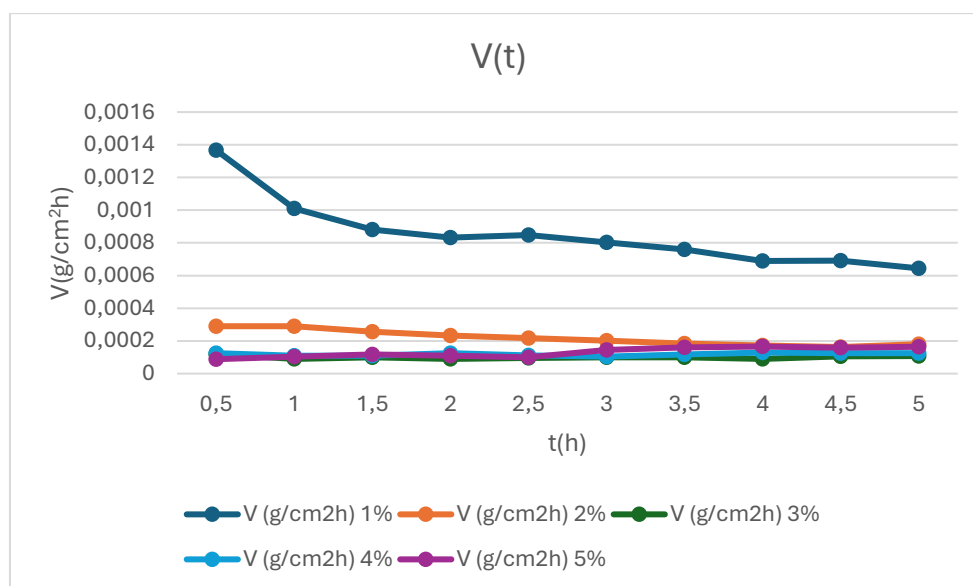


Fig IV.43 : Évolution de la vitesse de corrosion avec le temps d'immersion dans le milieu corrosif NaCl (5 %) en présence de l'inhibiteur (Ghars) à diverses concentrations.

Interprétation :

Ce graphique représente l'évolution de la vitesse de corrosion V ($\text{g/cm}^2\cdot\text{h}$) en fonction du temps d'immersion dans une solution de NaCl à 5 %, en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur Ghars (1 %, 2 %, 3 %, 4 % et 5 %).

Pour toutes les concentrations, la vitesse de corrosion diminue avec le temps d'immersion. Cela indique que l'inhibiteur agit progressivement en formant une couche protectrice sur la surface du métal.

La courbe correspondant à 1 % présente les valeurs les plus élevées de vitesse de corrosion pendant toute la durée de l'essai. Cette concentration est donc la moins efficace pour protéger le métal contre la corrosion.

Lorsque la concentration de l'inhibiteur augmente de 2 % à 5 %, la vitesse de corrosion devient beaucoup plus faible. Cela montre que l'efficacité inhibitrice s'améliore avec l'augmentation de la concentration.

Les concentrations 4 % et 5 % donnent les vitesses de corrosion les plus faibles, indiquant une meilleure protection du matériau. La différence entre ces deux concentrations semble faible, ce qui peut suggérer que l'efficacité de l'inhibiteur tend vers un maximum.

Les résultats montrent que l'inhibiteur Ghars réduit efficacement la corrosion de l'acier dans le milieu NaCl 5 %. Son efficacité augmente avec la concentration et avec le temps d'immersion, probablement grâce à la formation d'un film protecteur adsorbé à la surface du métal. Les meilleures performances sont obtenues pour les concentrations de 4 % et 5 %.

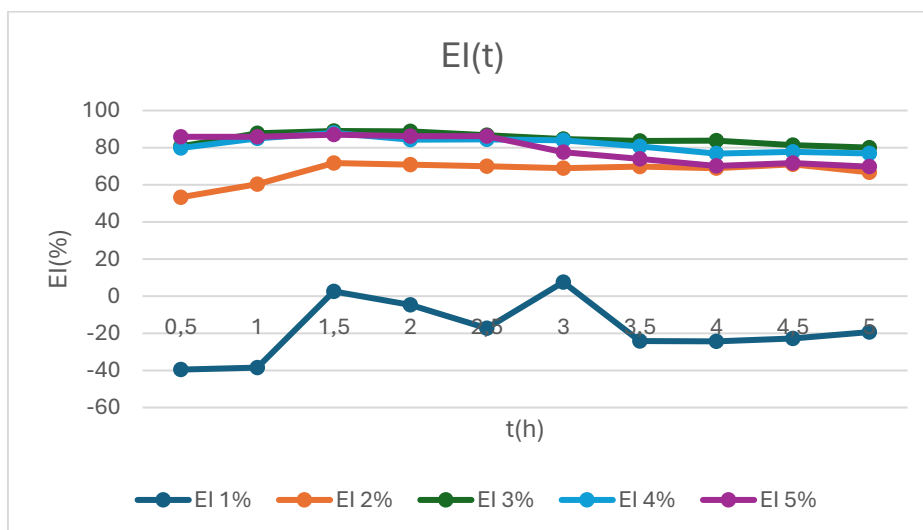


Fig IV.44 : Evolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations de l'extrait de ghars en fonction du temps d'immersion dans NaCl 5%

Interprétation :

Cette courbe représente l'évolution de l'efficacité inhibitrice (EI) de l'extrait de Ghars dans une solution de NaCl 5% en fonction du temps.

On observe que l'efficacité inhibitrice reste globalement élevée et relativement stable au cours du temps, traduisant une bonne protection de l'acier contre la corrosion.

L'efficacité inhibitrice maximale atteint environ 89% vers 1,5 h d'immersion.

- Extrait issu des noyaux de dattes de la variété Tmar :

Tableau IV.16 : Variation de la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice dans une solution de NaCl à 5 % en présence de l'inhibiteur issu des noyaux de dattes de la variété Tmar à différentes concentrations.

NaCl (5 %) + l'inhibiteur (Tmar) à diverses concentrations.											
	t (h)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
(1%)	Δm (g)	0,0004	0,0005	0,0005	0,0008	0,0012	0,0015	0,0018	0,0029	0,0034	0,0039
	V (g/cm ² h)	0,000058467	0,000036542	0,000024361	0,000029233	0,000035080	0,000036542	0,000037586	0,000052985	0,000055218	0,000057005
	E %	90,576748	94,9876319	97,3076423	96,3226334	95,146823	94,3460488	93,8544009	90,4449543	90,1720685	89,439459
(2%)	Δm (g)	0,0003	0,0008	0,0013	0,0014	0,0015	0,0021	0,0026	0,0035	0,0048	0,0054
	V (g/cm ² h)	0,0000451055	0,0000601407	0,0000651525	0,0000526231	0,0000451055	0,0000526231	0,0000558450	0,0000657789	0,0000801876	0,0000811900
	E %	92,7301905	91,7505708	92,7994268	93,3803361	93,7598202	91,8578134	90,8688383	88,13784	85,7279814	84,9590148
(3%)	Δm (g)	0,0004	0,0009	0,0012	0,0016	0,0024	0,0029	0,0058	0,0078	0,009	0,0095
	V (g/cm ² h)	0,000060776	0,000068373	0,000060776	0,000060776	0,000072931	0,000073437	0,000125893	0,000148141	0,000151940	0,000144343
	E %	90,2045593	90,6213865	93,2831264	92,354778	89,9102757	88,6372888	79,4153782	73,2851617	72,9573722	73,2595727
(4%)	Δm (g)	0,0015	0,0026	0,0034	0,0048	0,0058	0,0066	0,0076	0,0082	0,0095	0,0097
	V (g/cm ² h)	0,00023406	0,000202852	0,000176846	0,000187248	0,000181007	0,000171644	0,000169415	0,000159941	0,000164709	0,000151359
	E %	62,2756998	71,8182655	80,1678373	76,445315	74,9584045	73,4420927	72,2990646	71,1571784	70,6845929	71,9597156
(5%)	Δm (g)	0,0014	0,0027	0,003	0,0039	0,0046	0,0056	0,0064	0,0076	0,0081	0,0093
	V (g/cm ² h)	0,000206621	0,000199242	0,000147587	0,000143897	0,00013578	0,000137748	0,000134936	0,000140207	0,000132828	0,000137256
	E %	66,6981636	75,7068629	83,6888965	81,8986534	81,2153958	78,6868247	77,9366716	74,7158885	76,3589067	74,5724895

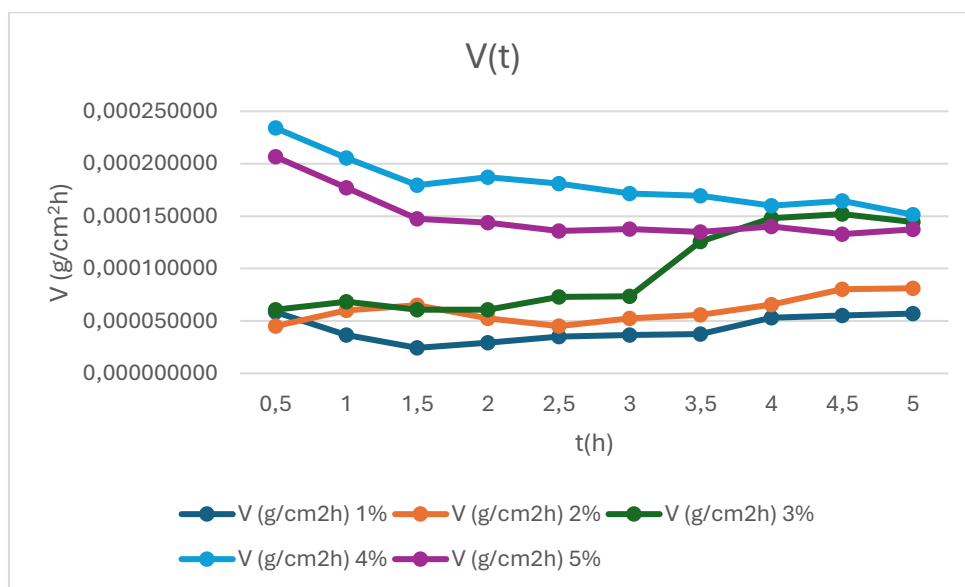


Fig IV.45: Évolution de la vitesse de corrosion avec le temps d'immersion dans le milieu corrosif NaCl (5 %) en présence de l'inhibiteur (Tmar) à diverses concentrations.

Interprétation :

Cette figure représente l'évolution de la vitesse de corrosion V en fonction du temps d'immersion dans une solution de NaCl à 5 %, en présence de l'inhibiteur Tmar à différentes concentrations (1 %, 2 %, 3 %, 4 % et 5 %).

On observe que :

Pour les concentrations 1 % et 2 %, la vitesse de corrosion reste faible et varie légèrement avec le temps. La concentration 1 % présente les valeurs les plus faibles, indiquant une meilleure protection.

À 3 %, la vitesse de corrosion augmente progressivement après environ 3 heures d'immersion, ce qui traduit une diminution de l'efficacité de l'inhibiteur avec le temps.

Les concentrations 4 % et 5 % présentent les vitesses de corrosion les plus élevées dès le début de l'immersion. Bien qu'elles diminuent légèrement au cours du temps, elles restent supérieures à celles obtenues avec les faibles concentrations.

Globalement, la vitesse de corrosion tend à se stabiliser après quelques heures d'immersion.

En conclusion, Les résultats montrent que l'efficacité inhibitrice de l'extrait Tmar dépend de sa concentration. Dans ces conditions expérimentales, les faibles concentrations, notamment 1 %, offrent la meilleure protection contre la corrosion de l'acier en milieu NaCl (5 %), tandis que l'augmentation de la concentration n'améliore pas nécessairement l'effet inhibiteur.

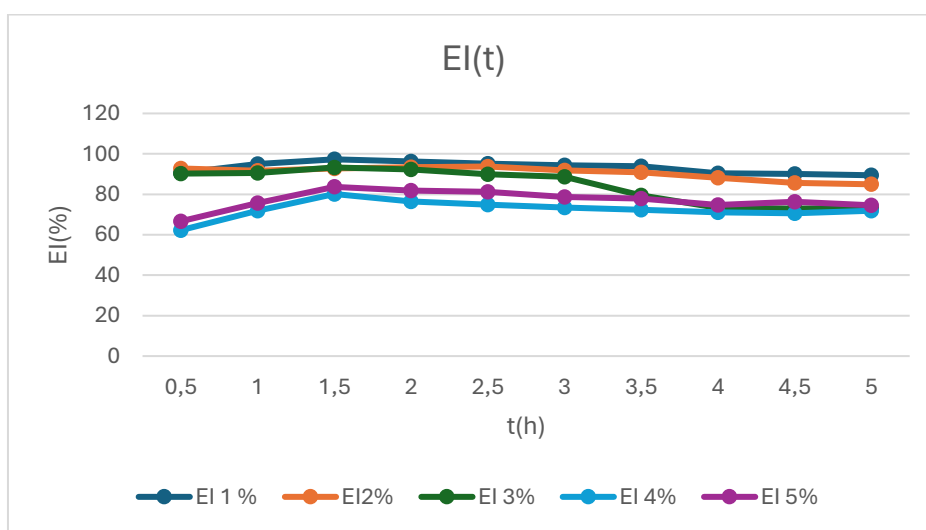


Fig IV.46 : Evolution de l'efficacité inhibitrice à différentes concentrations de l'extrait de tmar en fonction du temps d'immersion dans NaCl 5%.

Interprétation :

La courbe montre que l'efficacité inhibitrice (EI) augmente légèrement au début de l'immersion pour atteindre un maximum vers le deuxième point de mesure, puis diminue progressivement avec le temps pour toutes les concentrations. Malgré cette diminution, les valeurs de l'EI restent relativement élevées, ce qui indique que l'extrait conserve une bonne capacité de protection contre la corrosion durant toute la période d'essai. Les concentrations de 1 % et 2 % présentent globalement les meilleures performances inhibitrices, tandis que les concentrations de 4 % et 5 % montrent des efficacités plus faibles.

- **Conclusion :** tous les extraits de noyaux de dattes étudiés ont montré une bonne efficacité inhibitrice contre la corrosion de l'acier dans la solution de NaCl à 5 %. La vitesse de corrosion diminue généralement avec le temps grâce à la formation progressive d'un film protecteur à la surface du métal. Malgré quelques différences dans les concentrations optimales, les résultats obtenus restent globalement proches et confirment l'intérêt de ces extraits naturels comme inhibiteurs de corrosion efficaces en milieu salin.

IV.4.5.2 Effet de température :

✚ Milieu H_2SO_4 :

Tableau IV.17 : Évolution de la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice à différentes températures dans une solution de H_2SO_4 à 5 % en absence (Blancs) et en présence des différents extraits de noyaux de dattes (Déglà, Ghars, Tmar et Mélange).

H_2SO_4 (5%) + l'inhibiteur pendant 3h				
	T(°C)	35°	45°	55°
Ghars(0,5g)	Δm (g)	0,017	0,064	0,151
	V (g/cm²h)	0,000431014	0,001622641	0,003828419
	E%	85,6162	76,61672	76,04463
Mélange(0,4g)	Δm (g)	0,009	0,052	0,141
	V (g/cm²h)	0,000227864	0,001316546	0,003569866
	E%	92,39573	81,02774	77,66247
Tmar(0,2g)	Δm (g)	0,029	0,140	0,192
	V (g/cm²h)	0,000683572	0,003300004	0,004525719
	E%	77,18784	52,44487	71,68146
Dégla(0,3g)	Δm (g)	0,014	0,084	0,153
	V (g/cm²h)	0,000363691	0,002182149	0,003974628
	E%	87,86289	68,55386	75,12977
Blanc	Δm (g)	0,114	0,264	0,608
	V (g/cm²h)	0,002996525	0,006939322	0,015981469

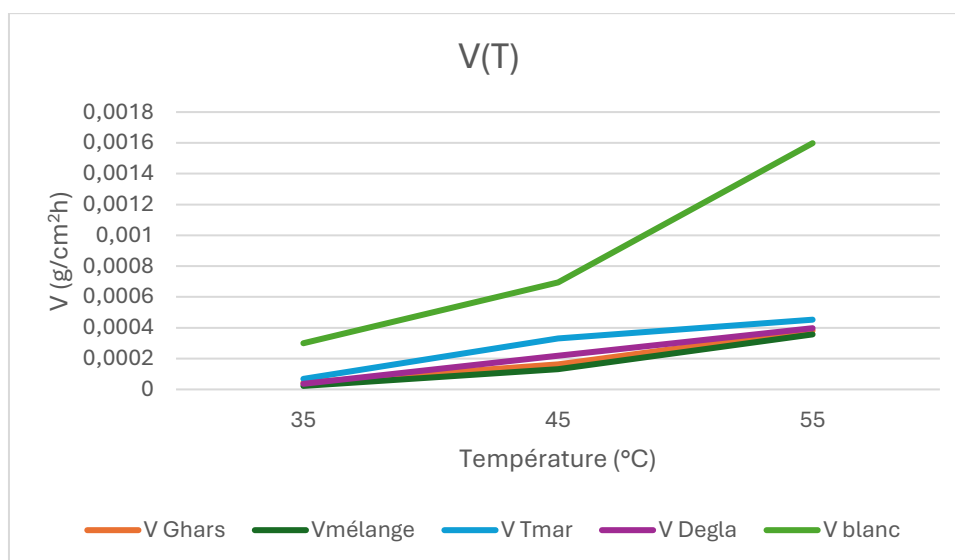


Fig IV.47 : Évolution de la vitesse de corrosion en fonction de la température dans une solution de H_2SO_4 à 5 % en absence et en présence des différents extraits de noyaux de dattes.

Interprétation :

La courbe montre que la vitesse de corrosion de l'acier dans le milieu H_2SO_4 augmente lorsque la température passe de 35 à 55 °C. Cela signifie que l'augmentation de la température favorise la corrosion.

Le blanc (sans inhibiteur) présente les vitesses de corrosion les plus élevées, ce qui indique que l'acier est fortement attaqué en absence de protection.

En présence des extraits de noyaux de dattes, la vitesse de corrosion diminue. Ces extraits jouent donc le rôle d'inhibiteurs de corrosion.

Les extraits de Ghars et du mélange offrent la meilleure protection, tandis que Dégla et Tmar sont un peu moins efficaces.

En conclusion, Les extraits de noyaux de dattes protègent efficacement l'acier contre la corrosion en milieu H_2SO_4 . Leur efficacité diminue légèrement lorsque la température augmente, mais ils restent plus protecteurs que le blanc.

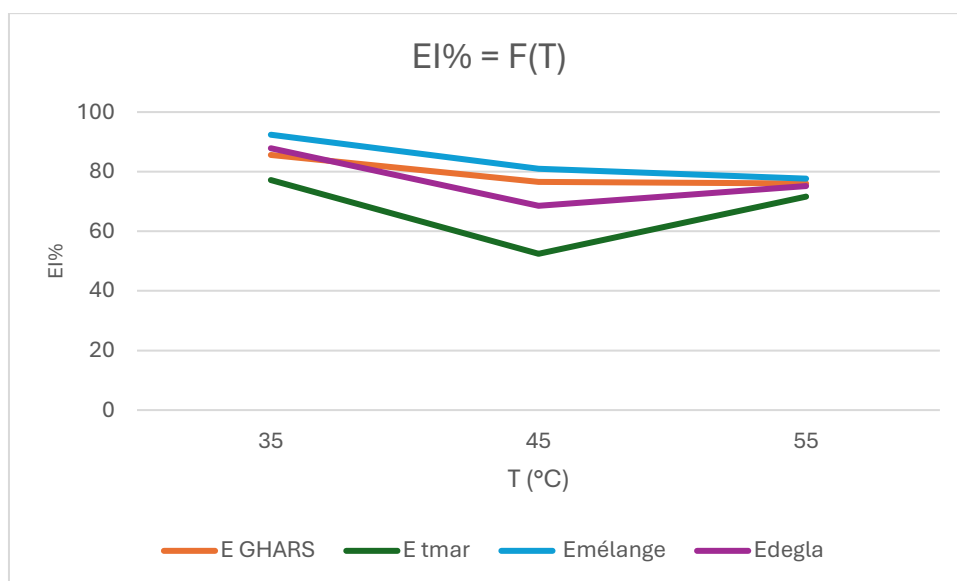


Fig IV.48 : Evolution de l'efficacité inhibitrice des différents extraits de noyaux de dattes en fonction de la température dans une solution de H_2SO_4 à 5 %

Interprétation :

L'efficacité inhibitrice diminue globalement avec l'augmentation de la température. Une forte baisse est observée à 45 °C, suivie d'une légère amélioration à 55 °C. Le mélange présente les meilleures performances, tandis que Tmar montre l'efficacité la plus faible.

 Milieu NaCl :

Tableau IV.18 : Évolution de la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice à différentes températures dans une solution de NaCl à 5 % en absence (Blanc) et en présence des différents extraits de noyaux de dattes (Dégla, Ghars, Tmar et Mélange).

		NaCl (5%) + l'inhibiteur pendant 3h			
		T(°C)	35°	45°	55°
Ghars(0,5g)	Δm (g)		0,004	0,002	0,001
	V (g/cm ² h)		0,000098410	0,000049205	0,000024602
	E%		66,14847	-10.1092	49,2227
Mélange(0,4g)	Δm (g)		0,001	0,002	0,002
	V (g/cm ² h)		0,0000271633	0,000054326	0,000054326
	E%		90,65627	-16.2496	1,1248
Tmar(0,2g)	Δm (g)		0,003	0,003	0,002
	V (g/cm ² h)		0,000074868	0,000074868	0,000049912
	E%		74,24662	-50.0405	-3,0135
Dégla(0,3g)	Δm (g)		0,004	0,003	0,003
	V (g/cm ² h)		0,000098251	0,000073688	0,000073688
	E%		66,20306	-38.1725	-10.0862
Blanc	Δm (g)		0,012	0,001	0,002
	V (g/cm ² h)		0,000290712	0,000024225	0,000048451

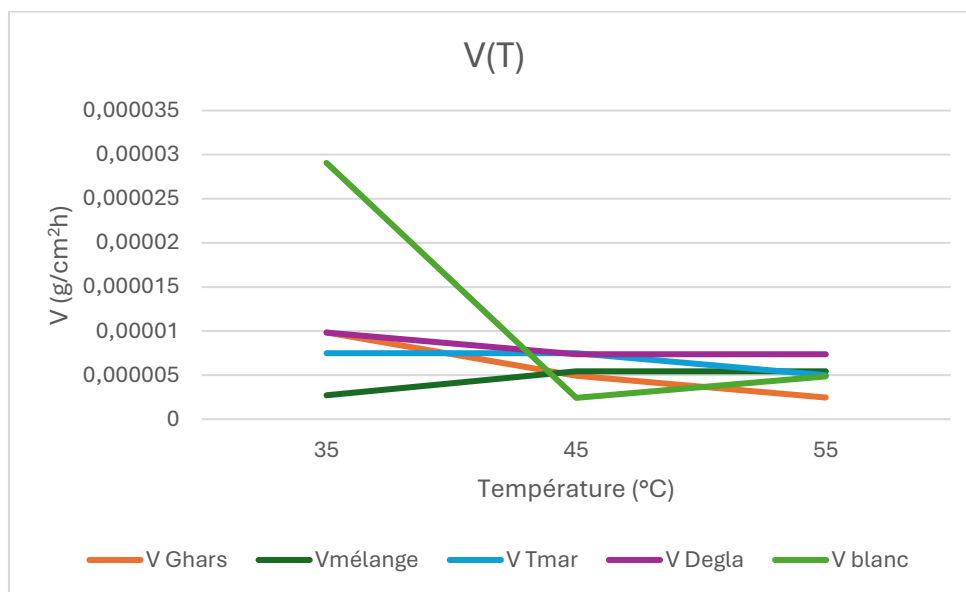


Fig IV.49 : Évolution de la vitesse de corrosion en fonction de la température dans une solution de NaCl à 5 % en absence et en présence des différents extraits de noyaux de dattes.

Interprétation :

Cette courbe montre l'effet de la température sur la vitesse de corrosion de l'acier dans un milieu NaCl, en présence des extraits de noyaux de dattes utilisés comme inhibiteurs. On observe que le blanc (sans inhibiteur) présente la vitesse de corrosion la plus élevée à 35 $^{\circ}\text{C}$, ce qui montre que le métal est plus attaqué en absence d'inhibiteur. En présence des extraits, la vitesse de corrosion est plus faible, ce qui confirme leur effet protecteur. Lorsque la température augmente de 35 à 55 $^{\circ}\text{C}$, la vitesse de corrosion diminue légèrement ou reste presque constante selon les variétés. L'extrait de Ghars semble être le plus efficace, car il donne les vitesses de corrosion les plus faibles à 55 $^{\circ}\text{C}$, tandis que Degla présente une efficacité un peu moins importante.

En conclusion, les extraits de noyaux de dattes réduisent la corrosion de l'acier en milieu NaCl, et l'extrait de Ghars offre la meilleure protection parmi les inhibiteurs étudiés.

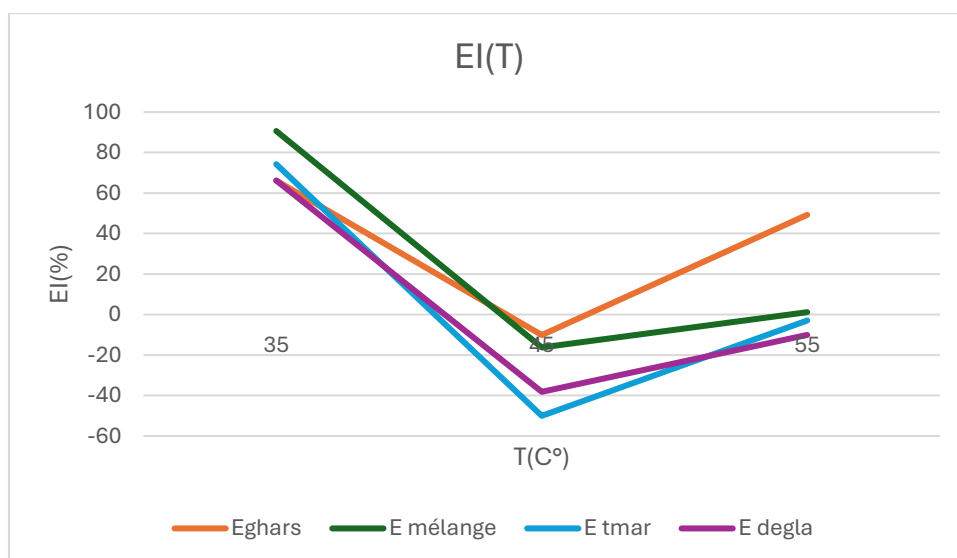


Fig IV.50 : Evolution de l'efficacité inhibitrice des différents extraits de noyaux de dattes en fonction de la température dans une solution de NaCl à 5 %.

Interprétation :

Cette courbe représente l'évolution de l'efficacité inhibitrice (EI) des extraits des différentes variétés de noyaux de dattes dans un milieu NaCl 5 % en fonction de la température.

On observe que l'efficacité inhibitrice diminue globalement avec l'augmentation de la température. Les valeurs les plus élevées sont obtenues à 35 °C, puis une forte baisse est observée à 45 °C. À 55 °C, une légère augmentation apparaît pour certains extraits, mais l'efficacité reste globalement inférieure à celle enregistrée à 35 °C.

- **Conclusion :** les extraits de noyaux de dattes réduisent efficacement la corrosion de l'acier dans les milieux NaCl et H₂SO₄. Cependant, l'augmentation de la température entraîne généralement une légère diminution de leur efficacité inhibitrice, bien qu'ils restent plus performants que le blanc dans toutes les conditions étudiées.

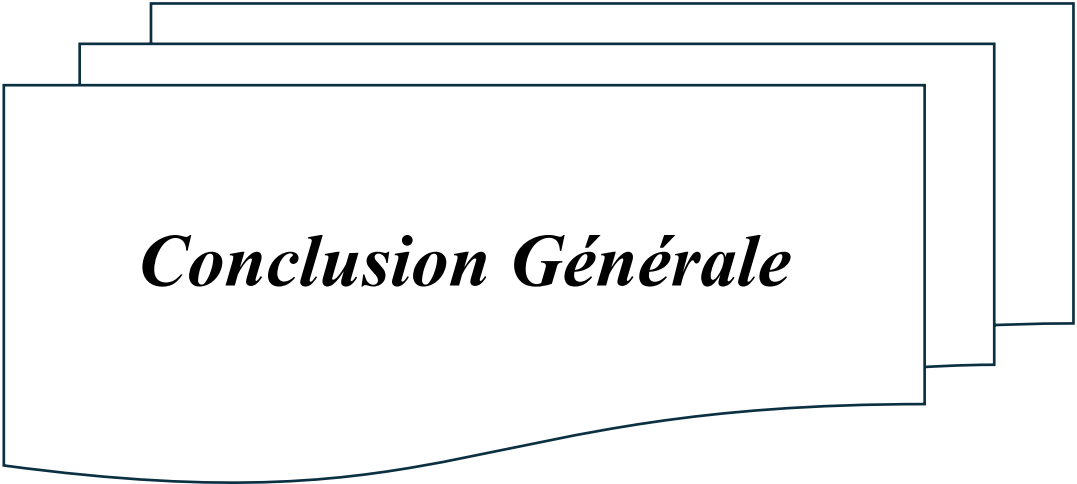
IV.5 Conclusion :

Les principaux résultats observés à partir de l'étude sont les suivants :

- Chaque extrait de noyaux de dattes possède une concentration optimale pour laquelle l'efficacité inhibitrice est maximale et la vitesse de corrosion est minimale.
- La vitesse de corrosion dépend fortement de la concentration de l'inhibiteur.
- L'augmentation de la concentration améliore généralement la protection contre la corrosion, mais cet effet n'est pas systématique ; au-delà d'une certaine concentration, l'efficacité peut se stabiliser ou même diminuer.
- Pour la plupart des extraits, la vitesse de corrosion diminue avec le temps d'immersion, ce qui indique l'adsorption progressive des molécules actives sur la surface de l'acier.
- Après un certain temps d'immersion, les courbes tendent à se stabiliser, traduisant l'établissement d'un état d'équilibre et la stabilité relative de la couche protectrice formée.
- Les extraits étudiés présentent une activité inhibitrice significative aussi bien en milieu acide (H_2SO_4 5 %) qu'en milieu salin (NaCl 5 %).
- L'effet inhibiteur est attribué à la formation d'un film protecteur adsorbé à la surface du métal, limitant les réactions responsables de la corrosion.
- Les performances des différents extraits sont globalement proches, bien que leurs concentrations optimales diffèrent selon la variété étudiée.
- Ces résultats mettent en évidence le potentiel des extraits naturels de noyaux de dattes comme inhibiteurs de corrosion écologiques, économiques et efficaces.
- L'augmentation de la température influence le processus de corrosion et tend généralement à réduire légèrement l'efficacité inhibitrice des extraits, probablement en raison d'une désorption partielle des molécules adsorbées à la surface du métal. Toutefois, les extraits de noyaux de dattes conservent une bonne capacité de protection même aux températures les plus élevées étudiées.

Les Références Bibliographiques :

- [1] A. Benamar, M. Boukraâ, et S. Aissani, « L'étude phytochimique qualitative des extraits des noyaux de quelques variétés de dattes locales (Sebseb, Ghardaïa) », Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, 2020–2021.
- [2] M. Debray, H. Jacquemin, R. Razafindrambo, travaux et document de l'ors tom. Paris (1971).
- [3] G. Koffi, K. Bengré, Z. Guédé, D. Traoré, A. Laurent, « screening phytochimique de quelques plantes médicinales ivoiriennes utilisées en pays krobou (agboville, cote. D'ivoir », article sciences a nature Vol.6 :1-15 (2009).
- [4] A. Kalla « étude et valorisation des principes actifs de quelque plantes du sud algérien », université Mentouri- Constantine, thèse de doctorat (2012).
- [5] Souilah, Y. Étude comparative et modélisation du comportement de deux inhibiteurs organiques et chimiques. Mémoire de Master, Génie, Université du 20 Août 1955 Skikda, (2024).
- [6] Y. Bekro, J. Bekro, B. Boua, H. Fezan, « étude ethnobotanique et screening phytochimique de caesalpinibenthamianaherend et zarucchi », article sciences a nature Vol. 4 :217-225, (2007).
- [7] Okechukwu, C. L., Omosun, G., Obike, A. I., & Iwuagwu, M. O. (2023). Comparative phytochemicals screening of *Annona muricata*, *Annona senegalensis* and *Annona squamosa*. *International Research Journal of Plant Science*, 14 (1).



Conclusion Générale

Conclusion générale :

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressés à l'évaluation de l'efficacité inhibitrice des extraits de quatre variétés de noyaux de dattes (Degla, Ghars, Tmar et leur mélange) vis-à-vis de la corrosion de l'acier dans deux milieux agressifs, à savoir un milieu acide H_2SO_4 et un milieu salin $NaCl$. Cette étude s'inscrit dans une démarche de recherche d'alternatives écologiques aux inhibiteurs de corrosion conventionnels, tout en contribuant à la valorisation des déchets agroalimentaires.

La caractérisation phytochimique des extraits a mis en évidence la présence de composés phénoliques susceptibles de jouer un rôle important dans le mécanisme d'inhibition de la corrosion. Les résultats obtenus ont montré que les extraits de noyaux de dattes possèdent une activité inhibitrice significative dans les deux milieux étudiés.

L'étude a révélé que chaque extrait présente une concentration optimale pour laquelle l'efficacité inhibitrice est maximale et la vitesse de corrosion minimale. La vitesse de corrosion dépend fortement de la concentration de l'inhibiteur ; son augmentation améliore généralement la protection de l'acier, bien que cet effet puisse se stabiliser ou diminuer au-delà d'une certaine concentration. Les résultats ont également montré que, pour la majorité des extraits, la vitesse de corrosion diminue avec le temps d'immersion, traduisant l'adsorption progressive des molécules actives à la surface du métal et la formation d'un film protecteur stable.

L'effet inhibiteur observé est principalement attribué à l'adsorption des composés organiques présents dans les extraits sur la surface métallique, ce qui limite les réactions électrochimiques responsables de la corrosion. Bien que les performances des différents extraits soient globalement proches, les concentrations optimales varient selon la variété de noyaux de dattes considérée.

Par ailleurs, l'étude de l'influence de la température a montré que l'augmentation de celle-ci tend à accélérer le processus de corrosion et à réduire légèrement l'efficacité inhibitrice des extraits, probablement en raison d'une désorption partielle des molécules adsorbées. Néanmoins, les extraits étudiés conservent une capacité de protection appréciable même aux températures les plus élevées examinées.

En conclusion, les résultats obtenus démontrent que les extraits de noyaux de dattes constituent des inhibiteurs de corrosion naturels prometteurs, à la fois efficaces, économiques et respectueux de l'environnement. Leur utilisation représente une voie intéressante pour le développement de solutions durables dans la lutte contre la corrosion, tout en favorisant la valorisation d'un sous-produit agricole abondant. Des études complémentaires portant sur l'identification des composés actifs, les mécanismes d'adsorption et les applications à l'échelle industrielle permettraient de confirmer davantage leur potentiel et d'élargir leurs domaines d'utilisation.