

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ 20 AOÛT 1955 SKIKDA

FACULTE 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'inhibition de la corrosion du métal
(X70) par deux extraits verts dans un milieu
acide

Soutenu le 20/06/2023

Réalisé par : MOUSSAOUI Fadoua

KOUDRI Souad

ALIOUA Rania

Encadré par :

Dr. BOUGHAITA Imen

Année Universitaire 2022-2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

قال النبي ﷺ " من لا يشكر الناس لا يشكر الله "

Remerciement

Avant tout, nous remercions Dieu tout-puissant, qui nous a montré le chemin de la connaissance, nous a guidés et nous a accordé la patience et la force pour mener à bien ce travail.

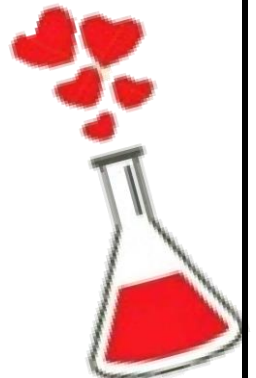
Ensuite, nous tenons à exprimer toute notre gratitude et notre reconnaissance à notre encadrante, le Dr. BOUGHAITA Imen, pour son acceptation de diriger ce travail et pour nous avoir fourni tous les moyens qui nous ont permis de mener à bien cette étude, ainsi que pour son précieux conseil et encouragements.

Nous remercions également M^{me}. SLAMA Hamida, ingénieure de laboratoire à Faculté de Technologie, pour son aide et son soutien tout au long de la période d'attente, et pour nous avoir fourni tous les moyens nécessaires pour travailler dans les meilleures conditions.

Nous remercions Monsieur Dr. BOUSSAHA et Madame BOUHDOUGA Linda pour leur aide et leur animation au sein du laboratoire de la Faculté de Mécanique.

Nous adressons nos sincères remerciements aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils portent à notre recherche et l'ont enrichie de leurs propositions.

Enfin, nos remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Et tous les membres du Collège dans la faculté du génie des procédés portent chacun son nom et sa fonction, et nous dédions cet humble travail à : nos parents, tous les membres de nos familles, collègues et amis, et tous ceux qui croient au réalisme de ses objectifs.



Dédicace



Je dédie cette graduation à celui qui m'a appris à donner et à celui dont je porte le nom avec fierté, et je demande à Dieu de prolonger ta vie pour que tu vois ce que je suis après une longue attente "mon cher père" et à mon ange dans la vie et au sens de l'amour et de la tendresse et au sourire de la vie est au secret de l'existence et à celle dont la supplication était le secret de ma réussite ma très chère bien-aimée, "ma chère mère".

Et à celui avec qui j'ai connu le sens de la vie « mes frères et sœurs », à tous les membres de ma vertueuse famille :

MOUSSAOUI ; KOUDRI ; ALIOUA.

Et à celui qui était avec moi sur le chemin du succès et du bien, "mes chers amis", avec la grâce de Dieu.

À tous ceux qui m'ont enseigné une lettre en ce monde, merci à tous ceux qui se sont adressés à moi et qui m'ont aidé à produire cette étude.



FADOUA ♡ SOUAD ♡ RANIA.

Résumé

Dans ce travail, nous avons étudié l'activité des deux inhibiteurs de corrosion (R) et (B) extraits organiques à partir des plantes vertes sûr de l'acier au carbone (X70) dans une solution d'acide chlorhydrique (HCl 0,5M). L'évaluation du comportement à la corrosion par l'utilisation de la méthode gravimétrie/perte de masse dans les conditions suivant : T= 17 C°, Volume de l'électrolyte HCl = 100 ml, différentes concentrations d'inhibiteurs (0.1-1g/L). Les résultats ont montré que les inhibiteurs utilisés avaient un effet efficace de 99,43 % et 99,71 % pour une concentration optimale de 0,5 g/L en inhibiteurs (R) et (B) respectivement. L'adsorption des inhibiteurs sur la surface de l'acier est soumise au modèle d'isotherme de Langmuir selon la variation linéaire de C/θ avec les concentrations des inhibiteurs (R) et (B).

Mots clés : Acier au carbone (X70), Corrosion, Efficacité, inhibiteurs, extraits organiques, Perte de masse.

ملخص

في هذا العمل، درسنا نشاط مثبطات التآكل (R) و (B) المستخلصات العضوية من النباتات الخضراء على الفولاذ الكربوني (X70) في محلول حمض الهيدروكلوريك (HCl 0,5M). تقييم سلوك التآكل باستخدام قياس الجاذبية/فقدان الكتلة في الظروف التالية: T = 17 درجة مئوية، مل Electrolyte volume HCl = 100 ، تركيزات مثبطة مختلفة (0,1-1 g/L). أظهرت النتائج أن المثبطات المستخدمة كان لها تأثير فعال بنسبة 99.43%، و 99.71% للتركيز الأمثل البالغ 0.5 جرام/لتر في المثبطات (R) و (B) على التوالي. ويخضع امتزاز المثبطات على السطح الفولاذي لنموذج لانغمير المتساوي الحرارة وفقا للتنوع الخطي لـ C/θ مع تركيزات المثبطات (R) و (B).

الكلمات المفتاحية : الفولاذ الكربوني (X70)، التآكل، الكفاءة، المثبطات، المستخلصات العضوية، فقدان الكتلة.

Abstract

In this work, we have studied the activity of the two corrosion inhibitors (R) and (B), organic extracts from the safe green plants of carbon steel (X70) in a solution of hydrochloric acid (HCl 0,5M). Evaluation of corrosion behavior using gravimetry/mass loss under the following conditions: T= 17 C°, Electrolyte volume HCl = 100 ml, different inhibitor concentrations (0.1-1g/L). The results showed that the inhibitors used to have an effective effect of 99.43%, 99.71% for an optimal concentration of 0.5 g/L in inhibitors (R) and (B) respectively. The adsorption of inhibitors on the steel surface is subjected to the Langmuir isotherm model according to the linear variation of C/θ with the concentrations of inhibitors (R) and (B).

Keywords: Carbon steel (X70), Corrosion, Efficiency, inhibitors, organic extracts, Mass loss.

— Liste des tableaux —

Liste des tableaux

N. Tableaux	Le titre	N°. page
Chapitre I : Notion sur la corrosion		
I.1	Les principaux facteurs de corrosion.	9
I.2	Classification de la tenue en corrosion en fonction du taux de corrosion.	16
Chapitre II : Protection contre la corrosion par l'utilisation des inhibiteurs verts		
II.1	L'effet inhibiteur de corrosion des extraits naturels de plantes sur les aciers dans différents milieux acides.	31
Chapitre III : Etude expérimentale		
III.1	Composition chimique des aciers (X70).	57
III.2	Propriété de la solution mère.	58
III.3	Vitesse de corrosion de l'acier sans inhibiteur à différentes température ambiante=17C° et à température 40 C ° en fonction du temps d'immersions dans la solution de (HCl 0.5M).	63
III.4	Variation de la vitesse inhibitrice de corrosion avec inhibiteur (R) de l'acier en fonction de différentes concentrations dans (HCl 0.5M).	65
III.5	Variation de l'efficacité inhibitrice de corrosion de l'acier à différentes concentrations de l'inhibiteur (R) dans (HCl 0.5M).	66
III.6	Variation de la vitesse inhibitrice de corrosion avec inhibiteur (B) de l'acier en fonction de différentes concentrations dans (HCl 0.5M).	67
III.7	Variation de l'efficacité inhibitrice de corrosion de l'acier à différentes concentrations de l'inhibiteur (B) dans (HCl 0.5M).	68
III.8	Paramètre d'isotherme de Freundlich pendant un temps d'immersion 72h en milieu (HCl 0.5M).	70
III.9	Paramètre d'isotherme de Temkin pendant un temps d'immersion 72h en milieu (HCl 0.5M).	70
III.10	Paramètre d'isotherme de Langmuir pendant un temps d'immersion 72h en milieu (HCl 0.5M).	71
III.11	Paramètre d'isotherme de Freundlich pendant un temps d'immersion 72h en milieu (HCl 0.5M).	72
III.12	Paramètre d'isotherme de Temkin pendant un temps d'immersion 72h en milieu (HCl 0.5M).	73
III.13	Paramètre d'isotherme de Langmuir pendant un temps d'immersion 72h en milieu (HCl 0.5M).	74

— **Liste des figures** —

Liste des figures

N°.Figure	Le titre	N°. page
Chapitre I : Notion sur la corrosion		
I.1	Schéma de corrosion uniforme.	5
I.2	Corrosion localisée.	6
I.3	Schéma de corrosion par piqures.	6
I.4	Schéma de corrosion inter granulaire.	7
I.5	Schéma corrosion inter granulaire.	7
I.6	Corrosion sélective.	8
I.7	Corrosion érosion.	8
I.8	Schéma de corrosion sous contrainte.	8
I.9	Corrosion galvanique.	9
I.10	Diagramme potentiel-pH du fer à 25 °C.	15
Chapitre II : Protection contre la corrosion par l'utilisation des inhibiteurs verts		
II.1	Les propriétés des inhibiteurs de corrosion.	21
II.2	Classement des inhibiteurs de la corrosion.	22
II.3	Diagrammes d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur anodique, cathodique ou Mixte.	24
II.4	Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel.	30
Chapitre III : Etude expérimentale		
III.1	Préparation d'un litre de solution (HCl 0.5M).	58
III.2	Les étapes de préparation d'inhibiteurs.	59
III.3	Un échantillon brut avant polissage.	60
III.4	La polisseuse (département de mécanique - université de Skikda).	60
III.5	L'acier (A) avant et (B) après le polissage.	61
III.6	Effet de la température du milieu corrosif (sans inhibition).	61
III.7	Diapositive expérimental de corrosion.	62
III.8	Évolution de la vitesse de corrosion de l'acier sans inhibiteur à T ambiante =17 C° & T=40 C° en fonction du temps d'immersion dans (HCl 0.5M).	64
III.9	Evaluation de la vitesse inhibitrice de corrosion avec l'inhibiteur(R) de l'acier en fonction de différentes concentrations dans (HCl 0.5M).	65
III.10	Evaluation de l'efficacité inhibitrice de corrosion de l'acier à différentes concentrations de l'inhibiteur (R) en fonction du temps d'immersion dans (HCl 0.5M).	66
III.11	Evaluation de la vitesse inhibitrice de corrosion avec inhibiteur (B) de	67

	l'acier en fonction de différentes concentrations dans (HCl 0.5M).	
III.12	Evaluation de l'efficacité inhibitrice de corrosion de l'acier à différentes concentrations de (B) en fonction du temps d'immersion dans (HCl 0.5M).	68
III.13	Isotherme d'adsorption de Freundlich de l'acier (X70) dans (HCl 0.5M) en présence de l'inhibiteur (R).	70
III.14	Isotherme d'adsorption de Temkin de l'acier (X70) dans (HCl 0.5M) en présence de l'inhibiteur (R).	71
III.15	Isotherme d'adsorption de Langmuir de l'acier (X70) dans (HCl 0.5M) en présence de l'inhibiteur (R).	72
III.16	Isotherme d'adsorption de Freundlich de l'acier (X70) dans (HCl 0.5M) en Présence de l'inhibiteur.	73
III.17	Isotherme d'adsorption de Temkin de l'acier (X70) dans (HCl 0.5 M) en présence de l'inhibiteur (B).	74
III.18	Isotherme d'adsorption de Langmuir de l'acier (X70) dans (HCl 0.5M) en présence de l'inhibiteur (B).	74

Liste des symboles et abréviation

Liste des symboles et abréviations

HCl	Acide chlorhydrique.
M	Mole par litre.
V	Volume de la solution.
C	Concentration (g/L).
C_{inh}	Concentration de l'inhibiteur.
E	Efficacité inhibitrice en (%).
V_{corr}	Vitesse de corrosion sans inhibiteur exprimée en (mg.cm ⁻² .h ⁻¹).
V_{inh}	Vitesse de corrosion avec inhibiteur.
Δm	Perte de masse exprimée en (mg).
S	Surface de l'échantillon exposé en (cm ²).
T	Température en (C°).
t	Temps d'immersion en (h).
pH	potentiel d'hydrogène.
n	nombre d'électrons (coefficient stœchiométrique des électrons dans la réaction).
R²	Coefficient de corrélation des inhibiteurs verts (R) et (B).
K	constante d'équilibre du processus d'adsorption.
θ	Le taux de recouvrement pour différentes concentrations d'inhibiteur.

—

Sommaire

—

Sommaire

Le titre	N°. page
Introduction générale.	1
Références bibliographies.	3
Chapitre I : Notion sur la corrosion	
I.1. Définition de la corrosion.	4
I.2. Différents types de corrosion.	4
I. 2.1. Corrosion chimique.	4
I. 2. 2. Corrosion électrochimique.	4
I.2.3. Corrosion biologique.	5
I.3. Formes de corrosion.	5
I.3.1. Corrosion uniforme (généralisée).	5
I.3.2. Corrosion localisée.	6
I.3. 3. Corrosion par piqure.	6
I.3.4. Corrosion inter granulaire.	6
I.3. 5. Corrosion caverneuse.	7
I.3.6. Corrosion sélective.	7
I.3.7. Corrosion-érosion.	8
I.3.8. Corrosion sous contraintes.	8
I.3.9. Corrosion galvanique.	9
I.4. Facteurs de corrosion.	9
I.5. Différents milieux corrosifs.	10
I.5.1. Influence de l'oxygène.	10
I.5.2. Influence du pH.	10
I.5.3. Influence de la température.	10
I.5.4. Influence de Salinité.	10
I.6. Effet de la corrosion sur les ouvrages métalliques.	11
I.7. Mécanisme de la corrosion.	11

I.7.1. Diagramme d'équilibre de POURBAIX pour le fer.	12
I.8. Taux de la corrosion.	15
Références bibliographiques.	17
Chapitre II : Protection contre la corrosion par l'utilisation des inhibiteurs verts	
II.1. Historique.	20
II.2. Définition d'un inhibiteur.	20
II.3. Propriétés essentielles d'un inhibiteur de corrosion.	20
II.4. Classification des inhibiteurs.	21
II.4.1. Classement par domaine d'application.	22
II.4.1.1. Inhibition en milieu acide.	23
II.4.1.2. Inhibition en milieu neutre.	23
II.4.2. Par réaction électrochimique partielle.	23
II.4.3. Par Mécanismes de réaction des inhibiteurs.	24
II.4.4. Nature des inhibiteurs.	25
II.4.4.1. Inhibiteurs organiques.	25
II.4.4.2. Inhibiteurs inorganiques (minéraux).	26
II.5. Domaine d'utilisation de l'inhibiteur.	26
II.6. Inhibiteurs verts de la corrosion.	27
II.7. Méthodes d'évaluation de la corrosion.	27
II.7.1. Méthode gravimétrique.	27
II.7.2. Méthodes électrochimiques.	28
II.7.2.1. Méthodes stationnaires.	28
II.7.2.2. Méthode transitoire.	30
II.8. Quelques études scientifiques faites dernièrement sur l'effet anti corrosion des inhibiteurs verts.	31
II.9. Isothermes d'adsorption.	47
II.10. Modélisation mathématique des isothermes d'adsorption.	47
II.10.1. Modèle de Langmuir.	47
II.10.2. Isotherme de Temkin.	48
II.10.3. Isotherme de Freundlich.	48
Références bibliographiques.	49
Chapitre III : Etude expérimentale	
III.1. Technique expérimental.	56
III.1.1. Méthodes gravimétrie d'étude.	56

III.2. Matériaux et matériels utilisés.	56
III.3. Description des matériaux d'étude.	57
III.3.1. Présentation de l'acier (X70).	57
III.3.2. Milieu d'étude.	57
III.3.3. Préparation d'Inhibiteurs.	58
III.4. Préparation des échantillons.	59
III.5. Mode opératoire.	61
III.6. Résultats et discussion.	62
III.6.1. Variation de la vitesse de corrosion de l'acier.	62
III.7. Isotherme d'adsorption d'inhibition par (R) et (B).	69
III.7.1. Isotherme d'adsorption d'inhibition par (R).	69
III.7.1.1. Isotherme d'adsorption de Freundlich.	69
III.7.1.2. Isotherme d'adsorption de Temkin.	70
III.7.1.3. Isotherme d'adsorption de Langmuir.	71
III.7.2. Isotherme d'adsorption d'inhibition par (B).	72
III.7.2.1. Isotherme d'adsorption de Freundlich.	72
III.7.2.2. Isotherme d'adsorption de Temkin.	73
III.7.2.3. Isotherme d'adsorption de Langmuir.	74
Références bibliographiques.	76
Conclusion générale.	77

Introduction générale

Introduction générale

Le grand développement industriel et l'utilisation croissante de l'acier, souvent préférés dans l'industrie, en raison de sa grande résistance mécanique et de sa disponibilité dans la vie moderne ont aggravé le problème de la corrosion [1]. Les dommages causés par ce phénomène entraînent d'énormes pertes, directes ou indirectes.

La corrosion est la dégradation des matériaux par des réactions physiques et chimiques avec leur environnement entraînant des modifications des propriétés du métal [2], qui de par sa nature tend à revenir à l'état d'origine d'oxyde et de carbonate et est le plus stable par rapport à l'environnement considéré [3].

L'acier dans l'industrie pétrolière est principalement utilisé pour les pipelines et autres installations industrielles. Selon la thermodynamique, la corrosion de ces structures a de graves conséquences pouvant entraîner des arrêts de production, une détérioration de la qualité et du rendement [2].

En raison de la durabilité de l'acier et des coûts de production et d'installation élevés, la plupart des industries ont eu recours à l'utilisation de techniques de protection appropriées pour ce métal précieux, afin de lui permettre de remplir sa fonction pendant la durée de vie prévue de la réalisation technique [4].

Au cours des dernières décennies, l'utilisation des inhibiteurs industriels tel que les chromates ils posent problème en raison de leur forte toxicité et de leur danger cancérigène, beaucoup d'entre eux sont même sur le point d'être interdits, c'est pourquoi la recherche tend à proposer des molécules moins dangereuses pour l'environnement et conformes aux principes de la chimie verte [5].

L'utilisation d'extraits de plantes comme inhibiteurs de corrosion est un domaine de recherche bien développé compte tenu du nombre de publications publiées chaque année. En 2020, il y avait environ 2 387 articles rien que dans Science Directe. En effet, ces extraits naturels contiennent plusieurs familles de composés organiques naturels "respectueux de l'environnement", facilement disponibles et renouvelables [1].

Les tests menés pour étudier les propriétés anticorrosives des produits naturels d'origine végétale ont donné des résultats prometteurs et efficaces confirmant que l'ère des inhibiteurs verts a vraiment commencé.

Ce travail concerne l'étude de l'efficacité inhibitrice des inhibiteurs verts extraits des feuilles des plantes vertes (R) et (B) (choisies parce qu'elles sont rapidement biodégradables et facilement obtenues et en raison de leur caractère non toxique) de manière simple qui ne nécessite pas de réactifs chimiques et nécessite peu de préparations. Ces inhibiteurs préparés sont destinés à protéger l'acier au carbone (X70) de la corrosion en milieu acide (HCl 0,5M). Pour cela, l'action inhibitrice a été évaluée à l'aide de mesures de perte de masse.

Les données de paramètres cinétiques quantitatifs ont permis d'expliquer le phénomène d'adsorption de ces inhibiteurs verts (R) et (B) à la surface du métal.

Le travail présenté dans cette mémoire est divisé en trois chapitres :

- **Le premier chapitre** est consacré à diverses connaissances liées au phénomène de corrosion ainsi qu'à la description des différents types de corrosion et des environnements qui la provoquent ;
- **Le deuxième chapitre** concerne les inhibiteurs de corrosion, donne plus de détails et d'importance aux inhibiteurs verts et à leurs propriétés, et rassemble des recherches scientifiques sur les inhibiteurs verts qui ont été utilisés pour réduire la corrosion ;
- **Dans le troisième** chapitre nous exposons les caractéristiques de nos matériaux et aux techniques expérimentales utilisées : la technique de perte de masse, nous présentons également les différents résultats obtenus et en discutons à la fin du manuscrit.

Nous concluons par une conclusion générale de tous les résultats obtenus et des références bibliographiques utilisées.

Références bibliographiques

- [1] Elsayed A. Ashour, Lobna A. Khorshed, Gehan I. Youssef et all. Electrochemical and Stress Corrosion Cracking Behavior of Alpha-Al Bronze in Sulfide-Polluted Salt Water: Effect of Environmentally-Friendly Additives, Journal of Materials Sciences and Applications, Vol5 No 1, January 14, 2014.
- [2] M.Hélie, Matériaux métalliques, phénomène de corrosion, Université d'Evry, Val d'Essonne, 12 Mars 2021.
- [3] M. Faustin, Etude de l'effet des alcaloïdes sur la corrosion de l'acier C38 en milieu acide chlorhydrique 1M : Application à *Aspidosperma album* et *Geissospermum laeve*, (Apocynacées), Thèse de doctorat, Université des Antilles et de la Guyane ,2013.
- [4] E. Bardal, Corrosion and protection, Inter Edition1, Springer London, 2007.
- [5] Mohamed El Mokhtar Mansouri, Etude de corrosion en utilisant les inhibiteurs, mémoire de master, Université Mohamed Khider, Biskra, 2020.

Chapitre I

Notion sur la corrosion

I.1. Définition de la corrosion

La corrosion est l'attaque destructrice d'un métal par interaction chimique ou électrochimique avec son environnement [1]. Le terme vient du mot latin "coroder" qui signifie "ronger". Ce phénomène est en réalité très complexe car liée aux moyens d'attaque, à la nature du métal et aux conditions d'utilisation [2]. La corrosion peut affecter de nombreuses structures, notamment celles en matériaux métalliques, dont l'acier qui constitue les matériaux de base qui sont utilisés pour créer de nombreuses structures très sensibles Corrosif au contact de temps humide, immergé dans l'eau douce ou salée, ou planté dans le sol [2].

D'une manière générale, la corrosion est un phénomène susceptible de se produire dans les métaux et alliages, entraînant des modifications des propriétés du métal et la détérioration de sa fonction, de son environnement ou de son système technique, car elle tend à restaurer l'état d'origine du métal à partir de oxydes, sulfures, carbonates ou tout autre sel plus stable dans le milieu environnant [3].

I.2. Différents types de corrosion

La corrosion des métaux ou des alliages peut se développer selon différents processus. Trois types de corrosion peuvent être distingués [4] : la corrosion chimique, la corrosion électrochimique et la corrosion biochimique bactérienne.

I. 2.1. Corrosion chimique

Elle correspond à la réaction du matériau métallique avec une phase gazeuse (forme un dépôt solide plus ou moins protecteur) ou une phase liquide (extrêmement rares : exemple de la réaction d'un métal avec un autre métal liquide comme lors de la formation d'un amalgame entre le mercure liquide et des métaux tels que le cuivre, le cadmium...) [5].

La réaction qui se produit est de la forme :

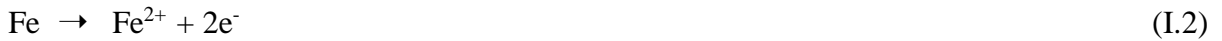


I. 2. 2. Corrosion électrochimique

Lorsqu'ils sont placés au contact des solutions aqueuses, conductrices d'ions (électrolytes, eau condensée), les métaux réactifs conducteurs d'électrons se corrodent [6].

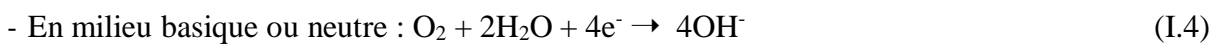
C'est le mode le plus fréquent. Elle se traduit par des transferts électroniques entre un métal et une solution électrolytique à son contact (circulation d'un courant électrique) [7].

- **Réaction anodique (oxydation du métal)**



- **Réaction cathodique**

Cette réaction (I.1) est nécessairement couplée à une réaction cathodique (de réduction)



I.2.3. Corrosion biologique

La corrosion bactérienne est causée par le développement d'organismes qui vivent sur les surfaces métalliques, altérant ainsi l'environnement local et le rendant très agressif [8].

I.3. Formes de corrosion

On donne ici une classification des principales manifestations visibles de la corrosion dont certaines sont plus au moins reliées entre elle [2].

I.3.1. Corrosion uniforme (généralisée)

C'est la forme la plus classique de corrosion, elle se caractérise par l'existence de plusieurs processus électrochimiques élémentaires qui se produisent uniformément sur toute la surface considérée. Elle se traduit en diminution d'épaisseur par unité de temps ou en perte de masse par unité de surface [9].



Figure I.1 : Schéma de corrosion uniforme [9].

I.3.2. Corrosion localisée

C'est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface. On trouve cette attaque notamment sur les métaux exposés aux milieux acides [10].

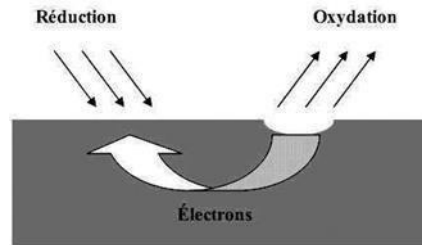


Figure I.2 : Corrosion localisée [11].

I.3.3. Corrosion par piqure

Cette forme de corrosion est particulièrement insidieuse. L'attaque se limite à des trous de très petites diamètres, très localisés et pouvant progresser rapidement en profondeur alors que le reste de la surface est indemne [9].

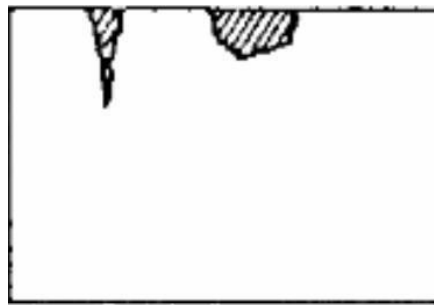


Figure I.3 : Schéma de corrosion par piqures [9].

I.3.4. Corrosion inter granulaire

Dans cette forme de corrosion, l'attaque corrosive se propage dans la masse du métal en suivant les lignes de contact des phases microstructurales, cette forme de corrosion conduit à une perte de résistance mécanique du métal [9].



Figure I.4: Schéma de corrosion inter granulaire [9].

I.3. 5. Corrosion caverneuse

Cette forme de corrosion est généralement associée à la présence de petits volumes de solution stagnante dans des dépôts, des joints ou des crevasses [9].

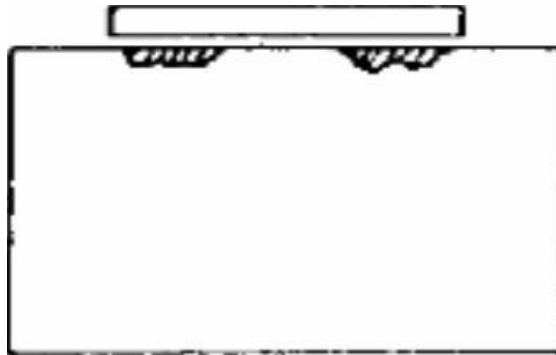


Figure I.5 : Schéma corrosion caverneuse [9].

I.3.6. Corrosion sélective

La corrosion sélective est un type de corrosion qui entraîne la dissolution spontanée d'un élément dans un alliage [5]. La corrosion transitoire attaque un élément de l'alliage et dissout cet élément de la structure de l'alliage. Par conséquent, la structure de l'alliage est vieillie [4].

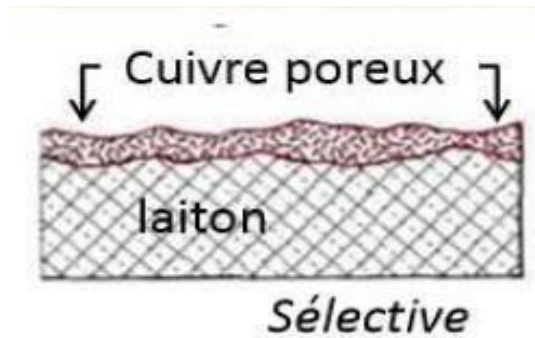


Figure I.6: Corrosion sélective [10].

I.3.7. Corrosion-érosion

Elle résulte du mouvement d'un fluide corrosif et d'une surface métallique. L'aspect mécanique du mouvement est important les phénomènes de frottement et d'usure peuvent intervenir [2].

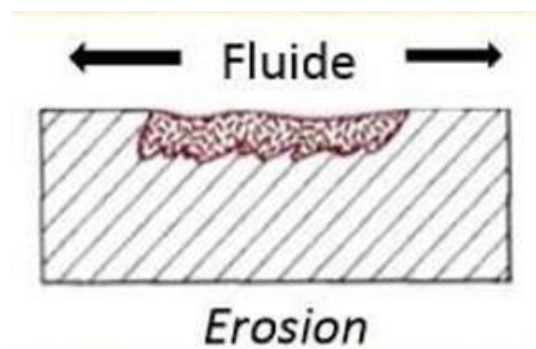


Figure I.7 : Corrosion érosion [10].

I.3.8. Corrosion sous contraintes

C'est une fissuration du métal qui résulte de l'action combinée d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique [2].

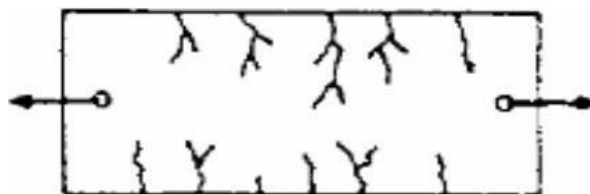


Figure I.8 : Schéma de corrosion sous contrainte [2].

I.3.9. Corrosion galvanique

Elle est aussi appelée corrosion bimétallique, elle est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux. La dégradation du métal le moins résistant devient intensive car il se comportera comme une anode [9].

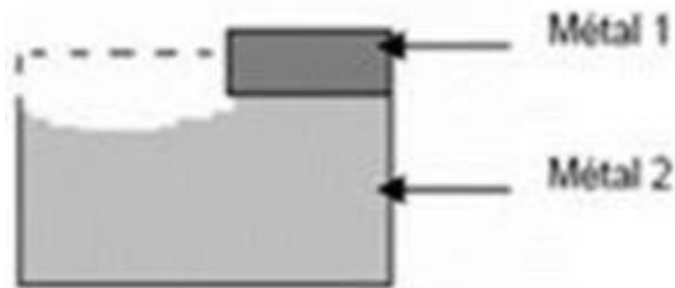


Figure I.9 : Corrosion galvanique [12].

I.4. Facteurs de corrosion

Le phénomène de corrosion dépend d'un grand nombre de facteurs et peut-être classé en quatre groupes principaux (tableau I.1).

Tableau I.1: Les principaux facteurs de corrosion [4].

Facteurs du milieu Corrosif	Facteurs Métallurgiques	Facteurs définissant les conditions d'emploi	Facteurs dépendant du temps
<ul style="list-style-type: none"> - Concentration du réactif - Teneur en oxygène - pH du milieu - Température - Pression - Présence de bactéries 	<ul style="list-style-type: none"> - Composition de l'alliage - Procédés d'élaboration - Impuretés - Traitement thermique - Traitement Mécanique 	<ul style="list-style-type: none"> - Etat de surface, défaut de fabrication - Forme des pièces - Emploi d'inhibiteur - Procédés d'assemblage - Sollicitations mécaniques - Croûtes d'oxydes superficielles - Force électromotrice extérieure 	<ul style="list-style-type: none"> - Vieillessement - Tensions mécaniques internes ou externes - Modification des revêtements protecteurs - Température - Apparition d'un dépôt (calcaire ou autre)

I.5. Différents milieux corrosifs

I.5.1. Influence de l'oxygène

L'oxygène joue un rôle important dans les mécanismes de corrosion du fer et des alliages de fer en milieu aéré [13]. Dans l'eau de mer aérée, la concentration en oxygène dissous est très variable puisqu'elle dépend des facteurs physiques, chimiques et biologiques suivants : échanges à l'interface air/océan, diffusions et mélanges au sein de la masse d'eau, phénomènes de photo-oxydation, réactions d'oxydation chimiques, etc. [13]. La dissolution de l'oxygène est gouvernée par des lois physiques et dépend de la pression atmosphérique, de la température et de la salinité de l'eau. La solubilité de l'oxygène décroît lorsque la température et la salinité augmentent, mais elle s'accroît avec la pression. La solubilité de l'oxygène est de $2,8 \cdot 10^{-4}$ mol/L à 20°C en eau pure alors qu'elle est réduite à $2,3 \cdot 10^{-4}$ mol/L à 20°C pour une salinité de 35%. En général, la concentration en oxygène dissoute est comprise entre 0 et $5 \cdot 10^{-3}$ mol/L [13].

I.5.2. Influence du pH

Le pH de la solution est un facteur susceptible d'affecter la stabilité du film passif, l'augmentation de l'acidité et donc la quantité de protons a tendance à déstabiliser le film passif. Un milieu très acide peut provoquer la dissolution d'un film déjà formé [13].

I.5.3. Influence de la température

Généralement, l'augmentation de la température accélère les phénomènes de corrosion car elle diminue les domaines de stabilité des métaux et accélère les cinétiques de réactions et de transport. L'importance de son influence diffère cependant en fonction du milieu corrosif [14].

I.5.4. Influence de Salinité

Les chlorures sont des ions agressifs, souvent à l'origine de corrosions localisées, leur présence en solution s'accompagne d'effets complémentaires, d'une part, leur concentration locale induit une acidification du milieu et d'autre part, la salinité a une influence sur la conductivité du milieu aqueux [15].

I.6. Effet de la corrosion sur les ouvrages métalliques

Les effets directs ou indirects de la corrosion sont résumés ci-après [16] :

a-Effets directs

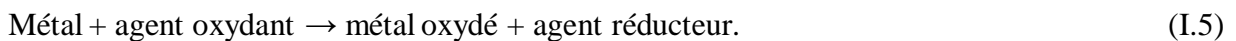
- Coût dû à l'utilisation de matériaux plus nobles ;
- Augmentation des coefficients de sécurité ;
- Protection passive (mise en peinture) et active (protection cathodique) ;
- Coût de l'entretien, du contrôle et de maintenance industrielle.

b-Effets indirects

- Coût des pièces et des équipements à remplacer ;
- Coût des réparations à effectuer ;
- Contamination du produit par les produits de corrosion ;
- Arrêt de production ;
- Fuites [17].

I.7. Mécanisme de la corrosion

La corrosion des métaux est due à une réaction d'oxydoréduction irréversible entre le métal et un agent oxydant contenu dans l'environnement. L'oxydation du métal implique la réduction de l'agent oxydant selon la réaction [18] :



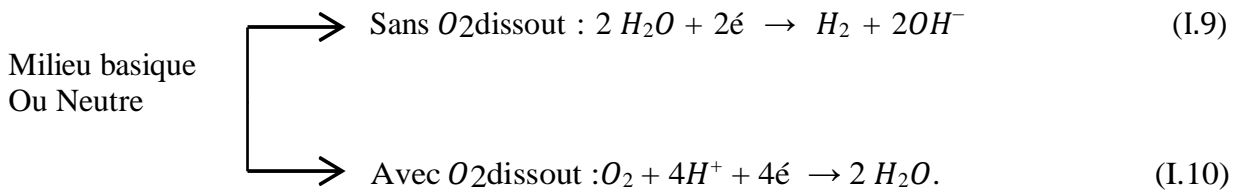
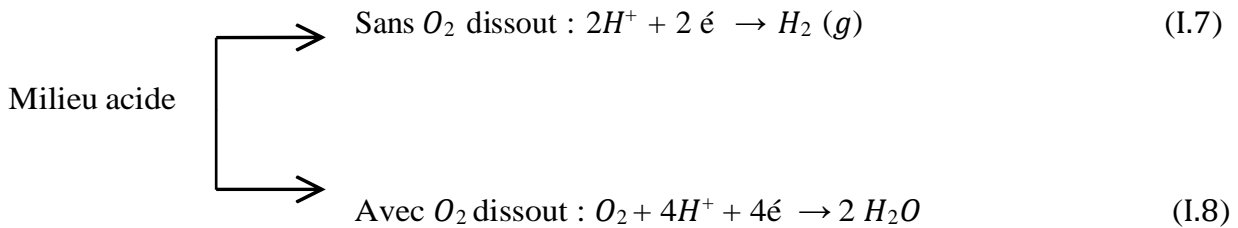
Les phénomènes de corrosion sont importants lorsque le métal est placé en contact d'une solution aqueuse. Cette corrosion humide est dans la plupart des cas de nature électrochimique [17]. Elle se manifeste lorsque le métal et l'électrolyte sont en présence et qu'il existe une hétérogénéité soit dans le métal, soit dans la solution. Elle résulte de l'établissement de courants locaux de l'existence de piles locales, la réduction cathodique et l'oxydation anodique étant localisées en deux zones distinctes. [18]

Toute réaction d'oxydoréduction se compose de deux réactions partielles : la réaction partielle d'oxydation ou réaction partielle anodique, et la réaction partielle de réduction ou réaction partielle cathodique [17,18].

➤ **Oxydation anodique** : Perte d'électrons et passage en solution du métal :



➤ **Réduction cathodique** : Ici plusieurs cas sont possibles [19]



I.7.1. Diagramme d'équilibre de POURBAIX pour le fer

POURBAIX a défini, sous forme de diagrammes potentiel-pH, les régions où le fer est soluble sous forme d'ions Fe^{2+} et Fe^{3+} et les régions où le métal est stable sous forme de phase solide telle que le métal pur ou protégé par ses oxydes [5]. Ces diagrammes représentent, en fonction du pH, le potentiel réversible des réactions d'électrode calculé par l'équation de Nernst.

En thermodynamique, on démontre que l'enthalpie libre $\Delta_r G$ de la réaction s'écrit [20] :

$$\Delta_r G = \Delta_r G^0 + RT \ln \frac{[ox_2]^{n_1} \times [Red_1]^{n_2}}{[ox_1]^{n_2} \times [Red_2]^{n_1}} \quad (I.11)$$

Avec

$$\frac{[ox_2]^{n_1} \times [Red_1]^{n_2}}{[ox_1]^{n_2} \times [Red_2]^{n_1}} = Q_r \quad (I.12)$$

Q_r est le quotient de réaction.

D'autre part :

$$\Delta_r G = -nF\Delta E \quad (\text{I.13})$$

Donc

$$-nF\Delta E = \Delta_r G^0 + RT \ln \frac{[\text{ox}_2]^{n_1} \times [\text{Réd}_1]^{n_2}}{[\text{ox}_1]^{n_2} \times [\text{Réd}_2]^{n_1}} \quad (\text{I.14})$$

On en déduit que :

$$\Delta E = -\frac{\Delta_r G^0}{nF} - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[\text{ox}_2]^{n_1} \times [\text{Réd}_1]^{n_2}}{[\text{ox}_1]^{n_2} \times [\text{Réd}_2]^{n_1}} \quad (\text{I.15})$$

En posant que :

$$\Delta E^0 = -\frac{\Delta_r G^0}{nF} \quad (\text{I.16})$$

On obtient

$$\Delta E = \Delta E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[\text{ox}_2]^{n_1} \times [\text{Réd}_1]^{n_2}}{[\text{ox}_1]^{n_2} \times [\text{Réd}_2]^{n_1}} \quad (\text{I.17})$$

On a $R = 8.31, F = 96485, \ln = 2.34 \log$ et si $T = 298 \text{ K}$

On peut déduire que : $\frac{RT}{F} \ln = 0.06 \log$

Ce qui permet d'écrire :

$$\Delta E = \Delta E^0 - \frac{0.06}{n} \log \frac{[\text{ox}_2]^{n_1} \times [\text{Réd}_1]^{n_2}}{[\text{ox}_1]^{n_2} \times [\text{Réd}_2]^{n_1}} \quad (\text{I.18})$$

Ou :

$$\Delta E = \Delta E^0 - \frac{0.06}{n} \log Q_r \quad (\text{I.19})$$

On posant $\Delta E = E_1 - E_2$ on peut alors écrire :

$$E = \left(E_1^0 + \frac{0.06}{n_1} \log \frac{[\text{ox}_1]^{n_2}}{[\text{Réd}_1]^{n_2}} \right) - \left(E_2^0 + \frac{0.06}{n_2} \log \frac{[\text{ox}_2]^{n_1}}{[\text{Réd}_2]^{n_1}} \right) \quad (\text{I.20})$$

On en déduit l'expression du potentiel redox $E_{\text{Ox/Red}}$ d'un couple Ox/Red dans le cas générale est :

$$E_{\text{ox/Red}} = E^0 + \frac{0,06}{n_1} \log \frac{[\text{OX}]^{v_1}}{[\text{Réd}]^{v_2}} \quad (\text{I.21})$$

Et plus généralement, avec les activités :

$$E_{\text{ox/Red}} = E^0_{\text{ox/Réd}} + \frac{0,06}{n_1} \log \frac{a_{\text{ox}}^{v_1}}{a_{\text{Réd}}^{v_2}} \quad (\text{I.22})$$

C'est la relation ou la loi de Nernst (à T=298k) [21-22].

Si on fixe arbitrairement P_{O_2} et P_0 (les activités), le potentiel E est une fonction affine du pH, qui sépare le plan E-pH en deux domaines. On note E_f cette frontière [23].

Dans les diagrammes d'équilibres de POURBAIX, ils permettent de distinguer les domaines où il y a :

- **Immunité du métal** : dans ce domaine le métal est thermodynamiquement inattaquable en absence du courant extérieur, en pratique, cet état n'est observé que pour les métaux nobles.
- **Corrosion du métal** : le métal est soumis thermodynamiquement à une corrosion sous l'influence d'hétérogénéité.
- **Passivation du métal** : le métal thermodynamiquement attaqué peut être protégé par la formation d'un composé insoluble à savoir la formation d'une couche d'oxyde résistant.
- Stabilité thermodynamique de l'eau à la pression atmosphérique.

La figure (I.10) montre un exemple de diagramme potentiel ferrique hydraté et la magnétite sont les seuls oxydes pris en compte et la concentration en ions ferreux et ferriques dissous.

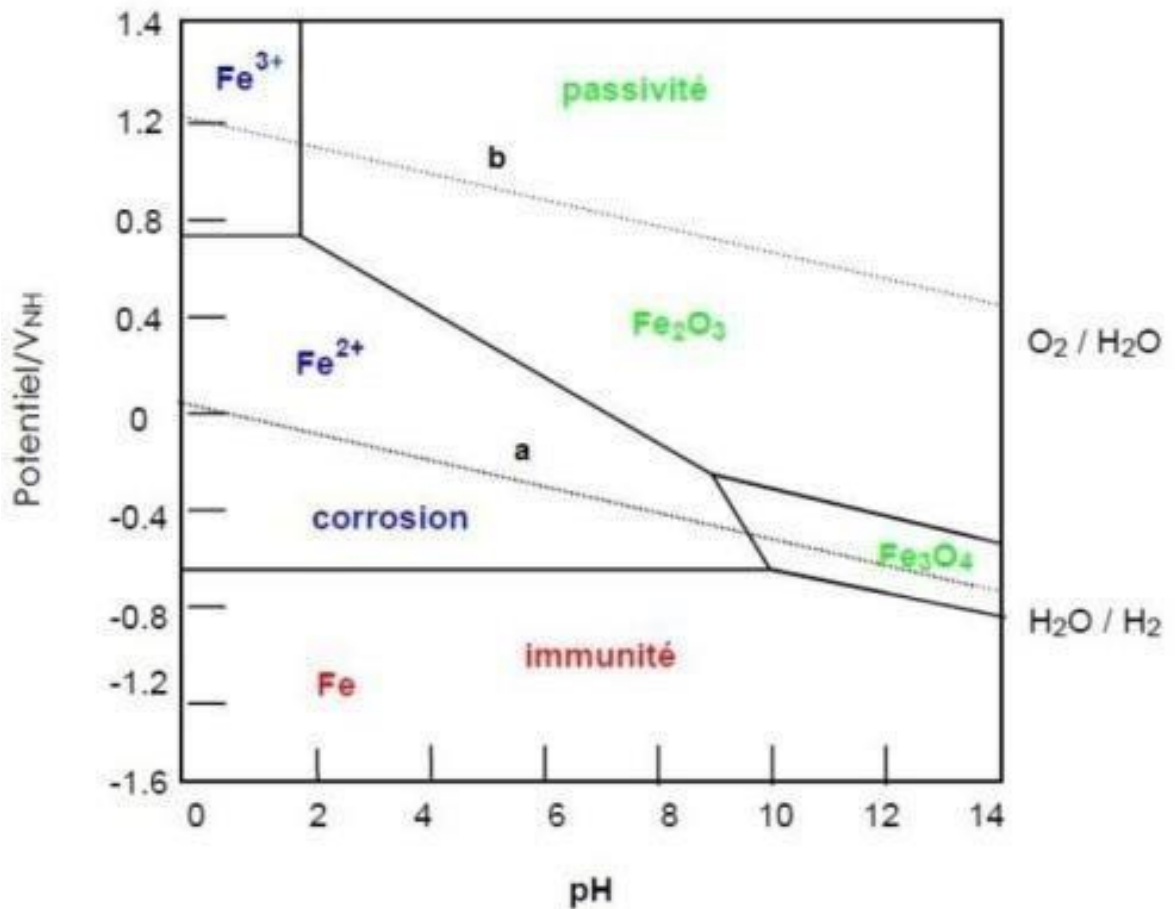


Figure I.10 : Diagramme potentiel-pH du fer à 25 °C [24].

D'après ce diagramme, où le rôle de l'oxygène dissous dans l'eau n'est pas pris en compte, le fer peut réagir avec les protons en milieu acide et neutre, accompagné d'un dégagement d'hydrogène, alors qu'en milieu alcalin, il résiste à la corrosion car les oxydes formés par réaction avec les ions hydroxyde sont pratiquement insolubles [24].

I.8. Taux de la corrosion

Le taux de corrosion peut s'exprimer de différentes manières selon l'application et les préférences personnelles :

- Sous forme de perte de masse par unité de surface et par unité de temps ;
- Comme le nombre de moles transformées par unité de surface et par unité de temps ;
- En profondeur corrodée par unité de temps ;
- Comme densité de courant [10].

Le taux de corrosion est déterminé par la formule suivante [25] :

$$V = \frac{k}{t} \quad (\text{I.23})$$

Ou :

V : vitesse de corrosion ;

t : temps d'immersion ;

k : consommation de matière (perte de poids (mg/cm²)).

Tableau I.2 : Classification de la tenue en corrosion en fonction du taux de corrosion [25].

Taux de corrosion	Tenue
<0.05 mm/an	Excellente
0.05 à 0.130 mm/an	Bonne
0.130 à 1.25 mm/an	Satisfaisante
>1.25mm/an	Non satisfaisante

Références bibliographies

- [1] John Wiley et Sons, Inc., Hoboken New Jersey: corrosion and corrosion control an introduction to Corrosion Science and Engineering, Fourth Edition, Wiley-Interscience, Canada, 2008.
- [2] K. Hamadache H. Kerrouche, Etude du comportement de deux inhibiteurs de corrosion A et B dans différents rapports de mélange par différentes techniques électrochimiques, Mémoire de Master, Université M'hamed Bougarra, Boumerdes, 2005.
- [3] Melle Ghorzi Hayet, M Bouzid Dahou Arkia, Etude expérimentale de l'effet inhibiteur des imidazopyrimidines contre la corrosion d'acier dans un milieu agressif, Mémoire de Master, Université Belhadj Bouchaib, Ain Temouchent, 2021.
- [4] Mezhoud Bilel, Inhibiteurs de corrosion d'acier et d'alliage d'aluminium, Thèse de doctorat, Université Frères Mentouri, Constantine 1, 2019.
- [5] Canevas d'un enseignement de la corrosion et de l'anticorrosion, Introduction A La Corrosion Electrochimique Et A Sa Prévention, 2001.
- [6] S. Chikhi, Evolution du comportement protecteur de deux inhibiteurs de corrosion en fonction de la température dans un milieu diphasique – cas de l'unité GPL1 de CIS – Hassi Messaoud, Projet professionnel de fin d'induction, Algérie, 2017.
- [7] O. Benali Etude de l'inhibition de la corrosion du cuivre et d'aciers au carbone par des composés organiques soufrés en milieux acides, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2007.
- [8] N.Akila, Étude de la corrosion de la soudure de l'acier A33 utilisé en construction navale, mémoire de magister, Université Abderrahmane Mira, Béjaïa, 2007.
- [9] J. L. Crolet et G. Beranger, Corrosion en milieu aqueux des métaux et alliages, M150, Technique de l'ingénieur, 2000.
- [10] D. Landolt, Corrosion et chimie de surface des matériaux, traité des matériaux, Edition, Presses Polytechniques et universitaires Romandes, ISBN2-88074-245-5,1993.
- [11] Commission exploitation, Corrosion et inhibition des puits et collectes, chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel, Edition techno, Paris ,1981.

- [12] I.Khalfaoui, étude de l'efficacité d'inhibiteurs de corrosion organique en milieu HCl, Mémoire de Master, Université Mouhamed khided, Biskra, 2019.
- [13] G. Besma, Etude des Phénomènes de Corrosion liés à la Détérioration des Aciers pour tubes Galvanisés, Université Arbi Tbessi, Tébessa, 2016.
- [14] I.Bouali, Étude d'inhibiteurs de corrosion métallique à base d'ortho phosphates de zirconium lamellaires fonctionnalisés, synthèse, caractérisations et applications, Université de Lorraine, 2018.
- [15] P.Boumersbach, C.Dumont, J.Millet, electrochemical characterization of a corrosion inhibitor influence of temperature on the inhibition mechanism, 207th meeting of the electrochemical society, Quebec City Canada, 2005.
- [16] Noufel Lahiani et Rihab Sahraoui, Utilisation de l'extrait de feuilles d'olivier sauvage comme inhibiteur de corrosion de l'acier, Mémoire de Projet de fin d'études, École Nationale Polytechnique, Alger, 2022.
- [17] Moulay Tahar, huiles essentielles en milieu acide sulfurique, Mémoire de Master, Université Dr.Moulay Tahar, Saida, 2014, Que d'Alger, 2020.
- [18] M.F.chiter, Etude théorique d'inhibiteurs verts de corrosion, Adsorption de la 8-Hydroxyquinolene sur surfaces d'Aluminium, Université de Toulouse, 2015.
- [19] Azeddine, Etude du comportement à la corrosion de l'Aluminium dans différents milieux, Université Mostefa Ben Boulaid, Batna 2, 2017.
- [20] G.M.L.Dumas, R.I.B.Ain. L'indispensable en réactions ioniques on solution aqueuse, édition Nathalie Legros ,2003.
- [21] M. Pourbaix, Thermodynamics and corrosion, Corrosion Science, Vol. 31, 1990.
- [22] D.Cachau-Herreillat, Des expériences de la famille Réd–Ox. De Boeck Supérieur, 2006.
- [23] Cours Transformations chimiques en solutions aqueuses, diagramme potentiel-PH, Lycée F. Buisson PTSI, p13, 2022.
- [24] A.Zaabar, Utilisation de l'extrait de la plante d'Ortie *Urtica dioica* L, comme inhibiteur de corrosion de l'acier dans les milieux HCl 0,5M et NaCl 3%, Mémoire de Magister Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2010.

[25] H. Mamache. , Etude du problème de corrosion au niveau des installations de la surface, Mémoire de fin de période de mise en situation professionnel Ingénieur Exploitation. IAP, 2017.

Chapitre II

Protection contre la corrosion
par l'utilisation des inhibiteurs
verts

II.1. Historique

Tout comme pour bien d'autres domaines, il est difficile de déterminer l'origine temporelle exacte de l'inhibition considérée par ailleurs, comme une technologie à part [1]. Néanmoins, il y'a quelques décennies, il a été observé que le dépôt calcaire formé à l'intérieur des conduites transportant certaines eaux naturelles protégeait cette conduite; plutôt que d'améliorer sans cesse la résistance à la corrosion des conduites en agissant directement sur ces dernières, il s'avère plus pratique d'ajuster les concentrations minérales des solutions transportées, qui sont à l'origine des dépôts calcaires « Protecteurs »[2]. En 1945, on comptait moins de 30 papiers traitant des inhibiteurs [3]. Dans un article de 1948, Wald rip se référait à un rapport datant de 1943 au sujet de sa discussion concernant la protection contre la corrosion des puits de pétrole [1]. De nombreux articles concernant l'inhibition ont été rédigés durant la période couvrant 1945 à 1954 : ceux- ci traitaient entre autres de l'inhibition dans les domaines de l'aviation, des chaudières, des circuits de refroidissement, des moteurs diesel, des sels de déneigement, des raffineries de pétrole, des pétroliers... [3].

Les articles publiés durant cette période témoignent d'un grand développement technologique en matière d'inhibition [2]. Durant les quarante dernières années, un nombre croissant de résumés, d'articles et d'autres ouvrages évoquant ce sujet ont été recensés : en 1970, 647 articles traitant de l'inhibition sont dénombrés [2,3].

En 2012, près de 17 000 articles traitent de l'inhibition de la corrosion [2].

II.2. Définition d'un inhibiteur

Selon la norme internationale ISO 8044 [4] et la Nationale Society of Corrosion Engainée (NACE) [5], un inhibiteur de corrosion est un composé chimique qui, lorsqu'il est ajouté en faible concentration à un milieu corrosif [6], diminuée ou stoppe la vitesse de corrosion à un niveau acceptable. Ils sont généralement utilisés en petites concentrations [7].

II.3. Propriétés essentielles d'un inhibiteur de corrosion

En dehors de tout mécanisme d'action, un inhibiteur de corrosion doit vérifier une certaine propriété fondamentale :

- Abaisser la vitesse de corrosion du métal tout en conservant les caractéristiques physico-chimiques de ce dernier ;

- Être stable en présence des autres constituants du milieu, en particulier vis-à-vis des oxydants, tels certains biocides ;
- Ne pas modifier la stabilité des espèces contenues dans le milieu, comme en provoquant l'apparition d'émulsion et de mousses ;
- Être stable à la température d'utilisation ;
- Être efficace à faible concentration ;
- Être compatible avec les normes de non-toxicité ;
- Être peu onéreux [8].

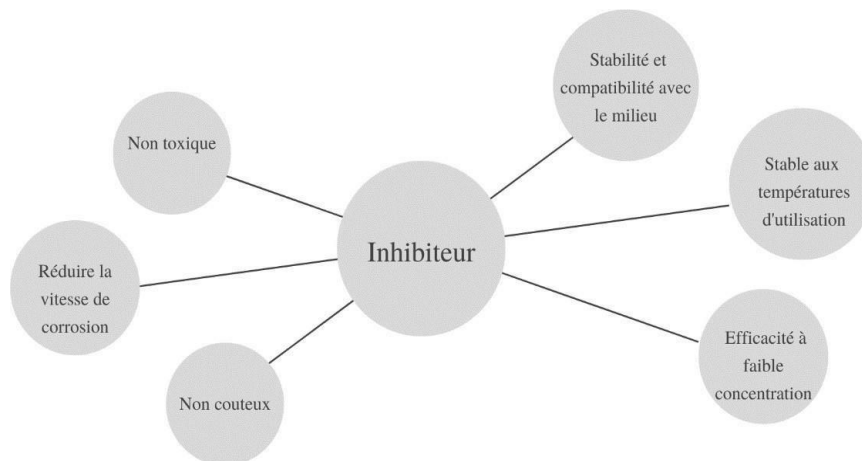


Figure II.1 : Les propriétés des inhibiteurs de corrosion [9].

II.4. Classification des inhibiteurs

Il existe plusieurs possibilités de classement des inhibiteurs, celles-ci se distinguant les unes des autres de diverses manières [10] :

- Soit à partir de la nature des produits (inhibiteurs organiques ou minéraux) ;
- Soit à partir de leur mécanisme d'action électrochimique (inhibiteurs cathodiques, anodiques ou mixtes) ;
- Soit à partir de leurs mécanismes d'interface et principes d'action (adsorption à la surface du métal et/ou formation d'un film protecteur) ;

- Soit à partir du domaine d'application [11].

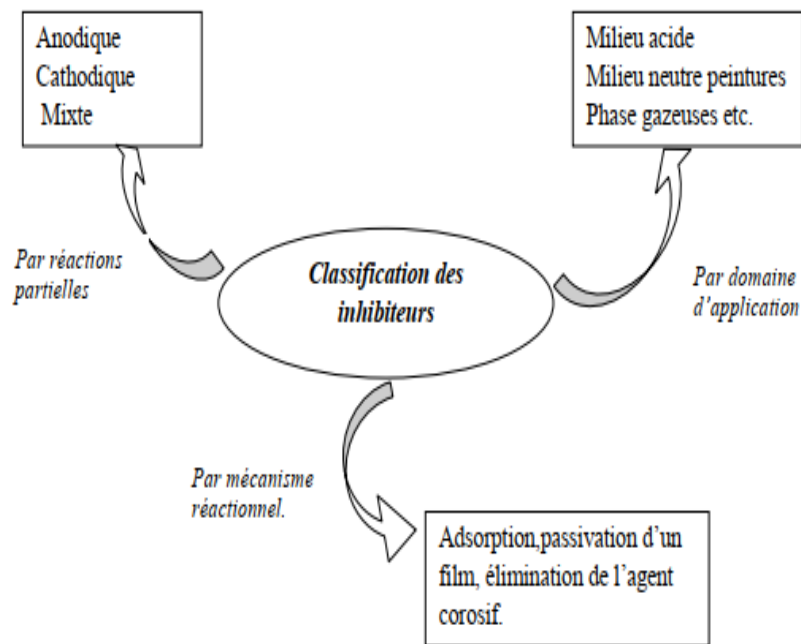


Figure II.2 : Classement des inhibiteurs de la corrosion [12].

II.4.1. Classement par domaine d'application

Dans la classification relative au domaine d'application, on peut distinguer : en milieux aqueux, les inhibiteurs pour milieux acides, sont employés, entre autres, pour éviter l'attaque chimique de l'acier lors d'une opération de décapage, les inhibiteurs pour milieux neutres souvent protégés les conduites des circuits de refroidissement [13].

En milieu organique, de grandes quantités d'inhibiteurs de corrosion sont utilisées dans les lubrifiants pour moteurs et dans l'essence. Ces liquides contiennent souvent des traces d'eau et des espèces ioniques qui peuvent provoquer une corrosion. Les inhibiteurs pour peintures, tels les pigments inorganiques jouent également un rôle important [12].

Enfin, les inhibiteurs pour phases gazeuses sont généralement employés pour une protection temporaire de différents objets emballés pendant le transport et le stockage [13]. Il s'agit le plus souvent de composés organiques ayant une pression de vapeur élevée, ces composés s'adsorbent sur la surface métallique et protègent contre la corrosion atmosphérique [12].

II.4.1.1. Inhibition en milieu acide

Parmi les inhibiteurs pour solutions acides, on trouve un grand nombre de substances organiques différentes, notamment des molécules aromatiques et des macromolécules à chaînes linéaires ou branchées. Ils s'adsorbent à la surface du métal et ralentissent ainsi la corrosion. Leur efficacité dépend, entre autres, de leur structure moléculaire et de leur concentration [13]. Les molécules organiques utilisées comme inhibitrices contiennent une partie non polaire, hydrophobe et relativement volumineuse, constituée principalement d'atomes de carbone et d'hydrogène, et une partie polaire, hydrophile, constituée d'un ou plusieurs groupes fonctionnels, tels: NH₂ (Amine), SH (Mercaptan)...etc. [13, 14].

II.4.1.2. Inhibition en milieu neutre

La corrosion en milieu neutre est normalement due à l'oxygène dissous. Les risques d'une attaque diminuent considérablement si l'on empêche l'oxygène d'accéder à la surface (inhibition cathodique) [13]. Alternativement, on peut diminuer la vitesse de la réaction partielle anodique en rendant le métal passif (inhibition anodique) [14]. On peut encore inhiber la corrosion par des substances tels les benzoates, qui s'adsorbent à la surface et bloquent des sites de réaction. Ce dernier mécanisme s'apparente à celui-ci écrit précédemment pour les milieux acides [13, 14].

II.4.2. Par réaction électrochimique partielle

La présence d'un inhibiteur de corrosion réduit la vitesse de corrosion en affectant la vitesse des réactions électrochimiques partielles impliquées. En fonction de la réaction partielle la plus ralentie, on distingue trois types d'inhibiteurs :

- Inhibiteurs anodiques ;
- Inhibiteurs cathodiques ;
- Inhibiteurs mixtes [15].

La figure (II.3) montre schématiquement comment la présence d'inhibiteurs de corrosion affecte la courbe de polarisation des systèmes dans lesquels les réactions partielles sont régies par la cinétique de Butler Vollmer. Un inhibiteur cathodique abaisse le courant partiel cathodique [16].

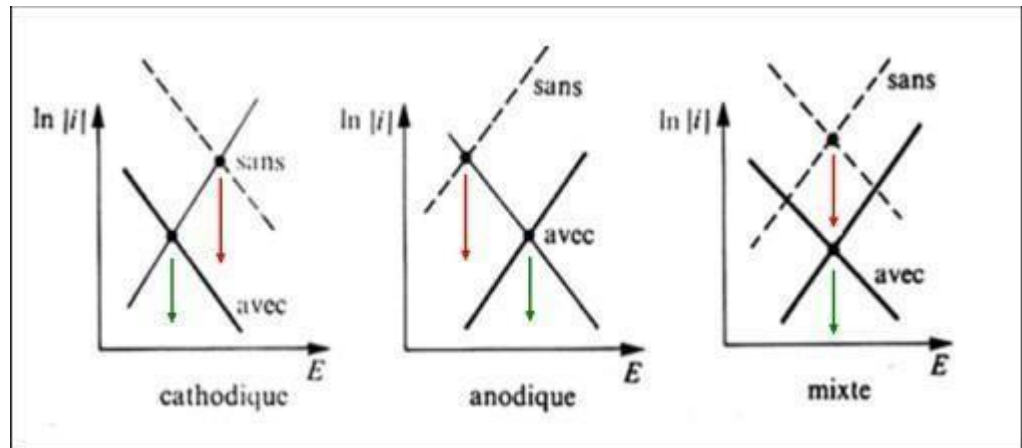


Figure II.3 : Diagrammes d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur anodique, cathodique ou mixte [16].

Un inhibiteur cathodique diminue la densité et déplace le potentiel de corrosion dans le sens négatif, alors qu'un inhibiteur anodique réduit la densité de courant partiel anodique et déplace le potentiel de corrosion dans le sens positif. Un inhibiteur mixte réduit la vitesse des deux réactions partielles, mais à peu d'effet sur le potentiel de corrosion [17].

II.4.3. Par Mécanismes de réaction des inhibiteurs

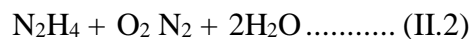
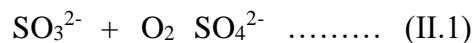
Les inhibiteurs de corrosion agissent par différents mécanismes :

- Adsorption ;
- Passivation ;
- Formation de film par précipitation ;
- Élimination de l'agent oxydant [18,19].

L'adsorption d'un inhibiteur sur la surface métallique ralentit le taux de corrosion en bloquant une partie de la surface. Le degré d'inhibition dépend de l'équilibre entre les espèces inhibitrices dissoutes et adsorbées, exprimé par l'isotherme d'adsorption. Ce mécanisme particulièrement important dans les acides. Certains inhibiteurs favorisent la passivation spontanée d'un métal et réduisent ainsi considérablement la vitesse de corrosion [17]. Les espèces oxydantes telles que les chromates entrent dans cette catégorie. Les agents tampons qui maintiennent un pH élevé à la surface métallique favorisent également l'état passif. D'autres inhibiteurs conduisent à la formation de films de surface par précipitation de sels minéraux ou de complexes organiques faiblement solubles. Ces films

réduisent la capacité de l'oxygène à atteindre la surface et, en outre, ils peuvent entraver la réaction de dissolution anodique [15].

L'inhibition par élimination de l'agent oxydant n'est applicable que dans les systèmes fermés. Les soi-disant capteurs d'oxygène sont utilisés pour éliminer les dernières traces d'oxygène dans les circuits d'eau chaude des centrales électriques. Ensuite, une petite quantité de sulfite de sodium ou d'hydrazine est ajoutée à l'eau préalablement dégazée et des ionisées :



En éliminant l'oxygène, on élimine également la corrosion. Nous n'avons vu précédemment que l'ajout d'un agent desséchant à une atmosphère fermée réduit la corrosion atmosphérique en éliminant l'humidité. C'est une autre façon d'utiliser un inhibiteur pour réduire l'agressivité de l'environnement [15].

II.4.4. Nature des inhibiteurs

II.4.4.1. Inhibiteurs organiques

Il existe de très nombreux composés organiques susceptibles d'être utilisés comme inhibiteurs. À partir d'une molécule-mère manifestant une certaine activité inhibitrice, il est toujours possible de synthétiser d'autres composés dans le but d'améliorer l'efficacité inhibitrice ou encore certaines propriétés physiques telles que : solubilité, pouvoir mouillant, densité ou température d'ébullition... etc. [17]. Selon la nature d'hétéroatome, représentant le centre actif susceptible d'échanger les électrons avec le métal, on peut classer les inhibiteurs organiques en trois grandes classes :

- Les composés azotés : ce sont essentiellement les amines, les pyridines et les sels quaternaires basiques (dérivés de bases comme l'ammoniaque, la pyridine, ...etc.). En plus de leurs rôles importants par l'adsorption à la surface des métaux, ces composés peuvent avoir des effets spécifiques tels que la neutralisation ou l'alcalinisation du milieu corrosif, l'action filmante à la surface du métal et l'hydrophilisation de la surface du métal [17] ;
- Les composés soufrés : ces composés sont moins utilisés que les précédents, quoiqu'ils puissent être largement aussi efficaces, notamment à température élevée.

L'inconvénient majeur résultant de leurs emplois en milieu acide est le risque de décomposition avec formation de sulfure dihydrogène favorisant la pénétration dihydrogène et la fragilisation des aciers en particulier ;

- Les composés oxygénés : ces composés, où l'oxygène est le centre actif responsable des propriétés inhibitrices, sont peu nombreux au regard des composés azotés ou soufrés cités précédemment [17].

II.4.4.2. Inhibiteurs inorganiques (minéraux)

D'une manière générale, les inhibiteurs inorganiques ou minéraux sont utilisés dans les milieux voisins de la neutralité ou alcalins [20]. Les produits se dissocient en solution et ce sont leurs produits de dissociation qui assurent les phénomènes d'inhibition (anions ou cations). Suivant qu'ils nécessitent plus ou moins d'oxygène dissous dans les milieux corrosifs pour être efficaces, on les classe en inhibiteurs passivant (composés du type MeO_x -4 ($x=1, 2$ ou 3), nitrites, les molybdates, les chromates...etc.) et non passivant (phosphates et poly phosphatés, phosphorèment, sels de zinc...etc.). Les inhibiteurs minéraux peuvent agir : en passivant le métal, c'est-à-dire en formant ou stabilisant la couche d'oxyde à la surface du métal, en formant des films protecteurs insolubles ou en alcalinisant le milieu [20].

II.5. Domaine d'utilisation de l'inhibiteur

L'inhibiteur de corrosion est utilisé dans plusieurs domaines d'application :

- Le traitement des eaux (eaux sanitaires, eaux des procédés industriels, eaux de chaudières, etc.) ;
- L'industrie du pétrole : forage, extraction, raffinage, stockage et transport, dans cette industrie, l'utilisation des inhibiteurs de corrosion est primordiale pour la sauvegarde des installations ;
- Les peintures où les inhibiteurs de corrosion sont des additifs assurant la protection anticorrosion des métaux [21] ;
- La protection temporaire des métaux, que ce soit pendant le décapage acide, le nettoyage des installations ou le stockage à l'atmosphère (inhibiteurs volatils,

incorporation aux huiles et graisses de protection temporaire) ou pour le traitement des huiles de coupe [22].

II.6. Inhibiteurs verts de la corrosion

Sachant que les inhibiteurs verts font l'objet d'une grande attention dans le monde de l'industrie et voyaient leur non-toxicité et efficacité dans le domaine de la corrosion [21]. Un grand nombre, de composés organiques, a été étudié pour examiner leur potentiel d'inhibition de la corrosion [23]. Toutes ses recherches révèlent que les composés organiques, en particulier ceux qui contiennent les atomes N, S et O, ont montré une efficacité d'inhibition significative, la plupart de ces composés sont non seulement couteux mais aussi toxiques pour les êtres vivants. Ces effets toxiques ont conduit à envisager l'utilisation de produits naturels écologiques et inoffensifs comme des agents anticorrosifs [23,24]. De nombreuses substances écologiques inhibitrices de la corrosion ont été développées, allant des terres rares aux composés organiques [25]. A ce jour, plus de 4000 articles ont traité des extraits naturels de différentes parties de plantes (tiges, feuilles et graines), comme inhibiteurs de corrosion, des métaux et leurs alliages, dans différents milieux corrosifs [26].

II.7. Méthodes d'évaluation de la corrosion

Les techniques expérimentales utilisées pour évaluer le phénomène de corrosion peuvent être électrochimiques ou non électrochimiques. Parmi ces méthodes on peut citer :

II.7.1 Méthode gravimétrique

Cette méthode présente l'avantage d'être d'une mise en œuvre simple, de ne pas nécessiter un appareillage important, mais ne permet pas l'approche des mécanismes mis en jeu lors de la corrosion. Son principe repose sur la mesure de la perte de poids subie par un échantillon de surface S , pendant un temps d'immersion t dans une solution corrosive maintenue à température constante [11].

La vitesse de corrosion (V_{corr}) est déterminée par-là l'équation suivante :

$$V_{corr} = \frac{\Delta m}{s.t} \quad (II.3)$$

V_{corr} : la vitesse de corrosion ($mg.cm^{-2}.h^{-1}$) ;

Δm : la perte de masse de l'échantillon avant et après immersion ;

S : la surface de l'échantillon exposée (cm^2) ;

t : temps d'immersion (h).

Il existe plusieurs façons d'exprimer l'efficacité d'un inhibiteur ou d'une formulation inhibitrice. Les expressions les plus courantes sont [27] :

- le taux d'inhibition, le plus souvent utilisé [68].

$$E\% = \frac{V_{corr} - V_{inh}}{V_{corr}} \times 100 \quad (II.4)$$

Où :

V_{corr} : est la mesure de la corrosion (perte de masse, intensité de corrosion, etc.) en l'absence d'inhibiteurs ;

V_{inh} : est la mesure de la corrosion en présence d'inhibiteurs.

II.7.2. Méthodes électrochimiques

L'étude électrochimique du comportement des aciers dans un milieu corrosif en absence ou en présence d'inhibiteur, est basée essentiellement sur les tracés des courbes de polarisation $i = f(E)$ et les droites de Tafel [28].

Les méthodes électrochimiques ont l'avantage d'être assez rapides en termes de temps de mesure et elles peuvent fournir non seulement des informations sur la résistance à la corrosion, mais aussi d'autres données mécaniques qui pourraient aider à la conception d'inhibiteurs de corrosion et de stratégies.

Les méthodes électrochimiques peuvent être classées selon deux groupes distincts : les méthodes stationnaires et les méthodes non stationnaires dites transitoires [28].

II.7.2.1. Méthodes stationnaires

Les techniques stationnaires permettent d'étudier un système se trouvant dans un état quasiment d'équilibre thermodynamique ; elles prennent en compte tous les couples redox dans la solution [29].

a. Suivi du potentiel en circuit ouvert

Egalement désigné par potentiel d'abandon ou potentiel libre, il s'agit de la grandeur électrochimique la plus immédiatement mesurable. Cette technique simple apporte des

informations préliminaires sur la nature des processus en cours, à l'interface métal / électrolyte : corrosion, passivation, ... [29].

b. Courbes de polarisation

La courbe de polarisation de l'interface métal-solution est une caractéristique fondamentale de la cinétique électrochimique, mais ne rend compte que de l'étape la plus lente du processus global à l'interface électrochimique. Pour déterminer une courbe de polarisation potentiostatique, on applique, à l'aide d'un potentiostat, différents potentiels entre l'électrode de travail et une électrode de référence [30]. On mesure le courant stationnaire qui s'établit après un certain temps dans le circuit électrique entre cette électrode de travail et une contre-électrode [31].

Cette méthode permet de déterminer d'une façon précise les paramètres électrochimiques d'un métal au contact d'un électrolyte à savoir : la vitesse instantanée de corrosion (V_{corr}), le potentiel de corrosion (E_{corr}), les pentes de Tafel, la résistance de polarisation (R_p), les courantes limites de diffusion [30].

Elle donne des mesures rapides et sa mise en œuvre est relativement simple. La détermination de la vitesse de corrosion à partir des courbes de polarisation est étroitement liée à la cinétique régissant le processus électrochimique [31], on distingue trois principaux types de cinétique :

- ✓ Cinétique de transfert de charge (activation) ;
- ✓ Cinétique mixte de transfert de charge – diffusion ;
- ✓ Cinétique de diffusion.

Pour déterminer expérimentalement ces paramètres électrochimiques, une présentation logarithmique de la densité de courant est en général préférable, car elle met en évidence la relation linéaire entre le logarithme de la densité de courant et le potentiel figure (II.4) [30].

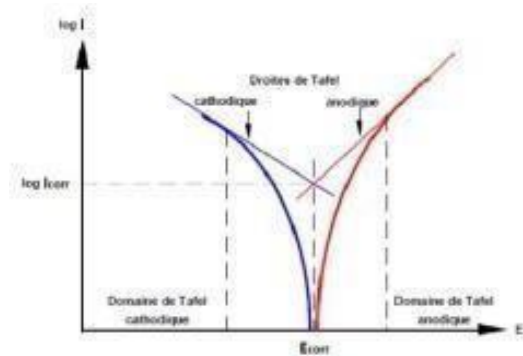


Figure II.4 : Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel [31].

Le tracé permet de confirmer les indications données par l'évolution du potentiel de corrosion et de les préciser en distinguant l'influence de l'inhibiteur sur chacune des réactions élémentaires, anodique et cathodique, l'électrode [30].

II.7.2.2. Méthode transitoire

Les différentes méthodes transitoires se différencient les unes des autres par la forme du signal respectif appliqué : une impulsion, un balayage ou une modulation [29].

a. La spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE)


La spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) est une méthode qui permet de séparer les contributions des différents phénomènes chimiques et électrochimiques se déroulant à l'interface métal / solution [32].

b. La méthode à balayage en potentiel (le voltamètre)


Les mesures de voltamètre cyclique reviennent à effectuer des balayages linéaires en potentiels autour d'une position donnée et d'observer les éventuelles apparitions et/ou disparition des phénomènes électrochimiques (oxydation et/ou réduction). Certains paramètres, tels la vitesse de balayage, permettent de rendre compte de la réversibilité de certaines réactions. Dans l'étude des inhibiteurs, cette technique a été mise en œuvre notamment pour caractériser l'adsorption des molécules inhibitrices au matériau et ce dès les premières minutes d'immersion [29].



II.8. Quelques études scientifiques faites dernièrement sur l'effet anticorrosion des inhibiteurs verts


Tableau II.1 : L'effet inhibiteur de corrosion des extraits naturels de plantes sur les aciers dans différents milieux acides [33].



<i>Réf</i>	<i>Inhibiteurs</i>	<i>Milieu</i>	<i>Métal</i>	<i>Techniques</i>	<i>E (%)</i>	<i>Année</i>
<i>Milieu HCl</i>						
[34]	OLEA EUROPAEA 	2M HCl	Acier au carbone	Gravimétrie , PPD, VC	93% à 900ppm	2007


<p>[35]</p>	<p>MURRAYA KOENIGII</p> 	<p>1M HCl</p>	<p>Acier ordinaire</p>	<p>Gravimétrie , PPD, SIE</p>	<p>84.6%</p>	<p>2010</p>
<p>[36]</p>	<p>SIPARUNA GUIANENSIS</p> 	<p>0.1M HCl</p>	<p>Acier au carbone</p>	<p>SIE, PPD, SR</p>	<p>Feuilles : 79% à 50mg/L</p>	<p>2011</p>
<p>Tiges : 86% à 50mg/L</p>						


<p>[37]</p>	<p>ARGANIA SPINOSA</p> 	<p>1M HCl</p>	<p>Acier ordinaire</p>	<p>Gravimétrie , SIE, PPD</p>	<p>97,3% à 5 g/L</p>	<p>2012</p>
-------------	---	-------------------	----------------------------	-----------------------------------	--------------------------	-------------




<p>[38]</p>	<p>ACALYPHA TORTA</p> 	<p>1M HCl</p>	<p>Acier ordinaire</p>	<p>Gravimétrie , SIE, PPD</p>	<p>91% à 1000ppm</p>	<p>2013</p>
<p>[39]</p>	<p>GEISSOSPERMUM</p> 	<p>1M HCl</p>	<p>Acier au carbone</p>	<p>SIE, PPD, MEB</p>	<p>92% à 100 mg/L</p>	<p>2015</p>


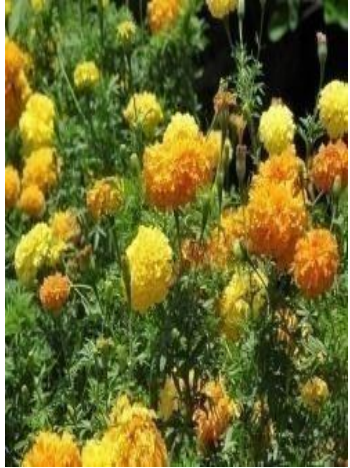

<p>[40]</p>	<p>PHOENIX DACTYLIFERA</p> 	<p>1M HCl</p>	<p>Acier au carbone</p>	<p>Gravimétrie , PPD, SIE, MEB.</p>	<p>88.08% à 2g/L</p>	<p>2015</p>
-------------	--	-------------------	-----------------------------	---	--------------------------	-------------




<p>[41]</p>	<p>TABERNAEMONTAN A DIVARICAT</p> 	<p>1M HCl</p>	<p>Acier au carbone</p>	<p>Gravimétrie , SIE, PPD, MEB, EDX</p>	<p>95% à 500ppm</p>	<p>2016</p>
<p>[42]</p>	<p>THYMUS VULGARI</p> 	<p>1M HCl</p>	<p>acier inoxydable</p>	<p>SIE, PPD, EH</p>	<p>62.15% à 2% (v/v)</p>	<p>2017</p>




<p>[43]</p>	<p>ROLLINIA OCCIDENTALIS</p> 	<p>1M HCl</p>	<p>Acier au carbone</p>	<p>Gravimétrie , SIE, PPD, MEB</p>	<p>85.7% à 1g/L</p>	<p>2018</p>
-------------	--	-------------------	-----------------------------	--	-------------------------	-------------




[44]	CANNON AMURICATA	0.5M H ₂ SO ₄	Acier au carbone	Gravimétrie , PPD, SIE	95.1%	2018
		1M HCl			94.1%	




<i>Milieu H₂SO₄</i>						
[45]	<p>COMBRETUM BRACTEOSUM LEAVES</p> 	H ₂ SO ₄	Acier ordinaire	Gravimétrie, HE	74.76% à 4g/L	2009
[4]	<p>RUTA CHALEPENSI</p> 	2 M H ₂ SO ₄	Acier ordinaire	HE, gravimétrie, PPD, SIE, MEB	99.86% à 1.6 10 ⁻¹ (m/v)	2010
[47]	<p>NAUCLEA LATIFOLIA</p> 	1M H ₂ SO ₄	Acier ordinaire	Gravimétrie	feuille : 94.26% écorce : 91.58% racine : 75.26% à 0.4 g/l	2013




[48]	<p>NYPA FRUTICANS WURMB</p> 	0.1M H ₂ SO ₄	Acier ordinaire	Gravimétrie	74.47% à 0.5 g/L	2014
[49]	<p>TAGETES ERECTA</p> 	0.5M H ₂ SO ₄	Acier ordinaire	Gravimétrie, SIE, PPD	98.19% à 1 g/L	2014
[50]	<p>ALOE VERA</p> 	1M H ₂ SO ₄	Acier inoxydable	BE,SIE, PPD MEB , HPLC	98% à 30% v/v	2015




[51]	<p>NICOTIANA TABACUM</p> 	2M H ₂ SO ₄	Acier ordinaire	Gravimétrie, DFT	94.13% à 10g/L 80.92% à 10g/L	2015
[52]	<p>CASSIA TORA</p> 	0.5M H ₂ SO ₄	Acier ordinaire	Gravimétrie, FTIR, MEB	95.44% à 400 ppm	2016
[53]	<p>POUPARTIA BIRREA BACK</p> 	0.5M H ₂ SO ₄	Acier ordinaire	Gravimétrie	70%	2017

[54]	<p>SIDA CORDIFOLIA</p> 	0.5M H ₂ SO ₄	Acier ordinaire	Gravimétrie , SIE, PPD, MEB, AFM	98.96% à 500 mg/L	2018
[55]	<p>LANNEA COROMANDELICA</p> 	1M H ₂ SO ₄	Acier ordinaire	Gravimétrie , SIE, PPD, FTIR, MEB, AFM	93.8% à 250 mg/L	2017
[56]	<p>AGAVE AMERICANA</p> 	0.5 M H ₂ SO ₄	Acier ordinaire	Gravimétrie, PPD, SIE, FT-IR, MEB	81.87% à 2000 ppm	2019

<i>Milieu H₃PO₄</i>						
[57]	<p>ZENTHOXYLUM ALATUM</p> 	<p>20 % (v/v) 50 % (v/v) 88% (v/v) H₃PO₄</p>	<p>Acier ordinaire</p>	<p>Gravimétrie, SIE, PPD, FT-IR, XPS</p>	<p>98% à 3200 ppm</p>	<p>2004</p>
[58]	<p>ARTEMISIA</p> 	<p>2M H₃PO₄</p>	<p>Acier au carbone</p>	<p>Gravimétrie, PPD, SIE</p>	<p>79% à 6g/l</p>	<p>2006</p>
[59]	<p>ROSEMARY</p> 	<p>2M H₃PO₄</p>	<p>Acier au carbone</p>	<p>Gravimétrie , PPD, SIE</p>	<p>73% à 10g/L</p>	<p>2006</p>

<p>[60]</p>	<p>MANGROVE TANNINS</p> 	<p>NaCl et H₃PO₄</p>	<p>Acier au carbone</p>	<p>PPD, XRD, MEB</p>	<p>90.1%</p>	<p>2008</p>
<p>[61]</p>	<p>TRIBULUS TERRESTRIS L</p> 	<p>1N H₃PO₄</p>	<p>Acier ordinaire</p>	<p>Gravimétrie, FT-IR, PPD</p>	<p>83.2%</p>	<p>2010</p>
<p>[62]</p>	<p>ACALYPHA INDICA L. ALCOHOLIC</p> 	<p>1N H₃PO₄</p>	<p>Acier ordinaire</p>	<p>Gravimétrie, FT-IR, PPD</p>	<p>90.38% à 5mg à 30°C</p>	<p>2010</p>

[63]	<p>BAMBOO</p> 	0.1M H ₃ PO ₄	Acier au carbone	Gravimétrie, PPD, SIE, Chimie Quantique	95.7% à 100 mgL ⁻¹	2014
[64]	<p>EUPHORBIA FALCATA.L</p> 	1N H ₃ PO ₄	Acier au carbone	Gravimétrie,	93% à 3g.L ⁻¹ à 40°C	2015
[65]	<p>MUSA ACUMINATA</p> 	1N H ₃ PO ₄	Acier ordinaire	Gravimétrie	62% à 2 %(v/v)	2015

<p>[66]</p>	<p>RED ONION</p> 	<p>0.75M H₃PO₄</p>	<p>Acier au carbone</p>	<p>HE, gravimétrie, MEB</p>	<p>86.18% à 5 ml</p>	<p>2016</p>
<p>[67]</p>	<p>ZIZIPHUS LOTUS</p> 	<p>5.5M H₃PO₄</p>	<p>Acier au carbone</p>	<p>PPD, SIE</p>	<p>70.5% à 3g/L</p>	<p>2018</p>
<p>[68]</p>	<p>BORAGO OFFICINALIS. L</p> 	<p>1M H₃PO₄</p>	<p>Acier ordinaire</p>	<p>HE, gravimétrie, PPD SEM- EDX</p>	<p>84.29% à 1g.L⁻¹</p>	<p>2018</p>

Cette synthèse bibliographique (Tableau II.1) , nous a permis de conclure que les extraits de plantes sont des substances parfaites pour remplacer les produits organiques synthétisés et d'autres inorganiques coûteux et toxiques. Les extraits de plantes contiennent plusieurs constituants et substances photochimiques pouvant facilement être adsorbés et inhibent la corrosion des aciers ordinaires [32]. Plusieurs parties des plantes, telles que les feuilles, les racines, les tiges...etc., ont été examinées en tant qu'inhibiteurs verts de la corrosion des aciers ordinaire, des aciers au carbone et des métaux et leurs alliages dans des milieux acides (HCl, H₂SO₄, H₃PO₄). Nous pouvons conclure que la feuille est la partie la plus riche de la plante où se déroule la synthèse photochimique. L'utilisation de la synergie a également été étudiée en particulier en présence d'ions halogénures (KF ; KCl ; KBr et KI), qui a donné une amélioration significative de l'efficacité inhibitrice [32].

II.9. Isothermes d'adsorption

La relation, à une température donnée, entre la quantité d'une espèce adsorbée à la surface du matériau et l'activité de cette espèce dans la phase liquide ou gazeuse en contact avec le matériau s'appelle l'isotherme d'adsorption [69].

Les isothermes d'adsorption sont très importantes dans la détermination du mécanisme des réactions organo-électrochimiques. Les plus connus sont les isothermes de : Langmuir, Frumkin, Freundlich, Hill de Boer, Parsons, Temkin, Flory –Huggins et Dhar –Flory Huggins et Bockris –Swinkels [70].

II.10. Modélisation mathématique des isothermes d'adsorption

Plusieurs types d'isothermes d'adsorption (expressions mathématiques) ont été développés pour décrire les courbes expérimentales de la quantité en éléments adsorbés en fonction de la concentration en solution à l'équilibre [71]. Nous proposons de décrire brièvement les isothermes les plus couramment rencontrées dans le cas de l'adsorption solide-solution [72].

II.10.1. Modèle de Langmuir

Ce modèle néglige tout type d'interactions entre les espèces, et considère une adsorption par blocage géométrique des sites [70]. L'équation de l'isotherme est de la forme :

$$\frac{c}{\theta} = \frac{1}{k} + C \quad (\text{II.5})$$

K : constante d'équilibre du processus d'adsorption;

C : la concentration de l'inhibiteur ;

θ : Le taux de recouvrement pour différentes concentrations.

Les hypothèses de ce modèle sont les suivantes [73] :

- Absence d'interaction entre les espèces adsorbées à la surface de l'électrode ;
- Equivalence des sites d'adsorption (surface homogène) ;
- Chaque site donne lieu à l'adsorption d'une molécule d'adsorbat ;
- Les sites d'adsorption sont en nombre bien défini par unité de surface ;
- Le nombre des molécules qui arrivent à la surface est égal au nombre de molécules qui quittent la surface (adsorption réversible) [74].

II.10.2. Isotherme de Temkin

L'isotherme de Temkin est exprimée par l'équation suivante [73,75]

$$KC_{inh} = \frac{\exp(a\theta)-1}{1-\exp[-a(1-\theta)]} \quad (\text{II.6})$$

L'isotherme de Temkin peut être représentée par la variation du taux de recouvrement Θ en fonction de $\ln C_{inh}$. Cette variation doit être linéaire.

Où a est une constante d'interaction entre particules adsorbées, K désigne le coefficient d'adsorption et C_{inh} la concentration de l'inhibiteur dans l'électrolyte. [75].

II.10.3. Isotherme de Freundlich

L'isotherme de Freundlich est représentée par l'équation suivante [70,14] :

$$\ln \left[\frac{\theta}{\theta-1} \right] = \ln k + 2a\theta \quad (\text{II.7})$$

Le paramètre a possède les dimensions suivantes : J/mol par mol/ cm³, il exprime la manière dont un recouvrement accru modifie l'énergie d'adsorption de l'espèce. Si a est positif, les interactions entre deux espèces à la surface sont attractives, si a est négatif, les interactions sont répulsives, si $a \rightarrow 0$ l'isotherme de Freundlich se rapproche de l'isotherme de Langmuir [14].

Références bibliographies

- [1] E. Hamner Norman, Scope and importance of inhibitor technology. In: ET by C.C.Nathan, Houston, NACE Corrosion Inhibitors. USA: Nations Association of Corrosion Engineers, p.28-41, 1973.
- [2] H.E. Waldrip, Present Day Aspects of Condensate Well Corrosion. Corrosion, 4, 1948.
- [3] M. Lagrene, B. Mernari, M. Bouanis, M. Traisnel, F. Bentiss, Corrosion Inhibition of Carbon Steel in Acidic Mediaby Using Actinidia deliciosa (Kiwifruit) Extract , 44, 573, 2002.
- [4] F.Schreiber, Progress in Surface Science, 65, p 151-257, 2000.
- [5] A.Ulman, Chem. Rev, Formation and Structure of Self-Assembled Monolayers, 96, 4, 1533, 1996.
- [6] I. Felhosi, E. Kalman, Corrosion protection of iron by α , ω -diphosphonic acid layers, 47, 695, 2005.
- [7] V.S.Sastri, E.Ghali, M.Elboujdaini, Corrosion Prevention and Protection Practical Solutions, Sons, Ltd, John Wiley, 2007.
- [8] C. Fiaud, Inhibiteurs de corrosion, M160, Technique de l'ingénieur, 2000.
- [9] B.Houda, Modélisation de l'effet de la corrosion sur des tubes inoxydables destines aux appareils à pression, Université 20 Août 1955, Skikda, 2014.
- [10] Soudaki Khadidja, Emploi de l'histidine un produit ami de l'environnement contre la corrosion d'un acier au carbone en milieu NaCl 3%, Université Saad- Dahlab, Blida, 2011.
- [11] Mina Boulkroune, Inhibition de la corrosion du zinc en milieu acide, thèse de doctorat, Université Frères Mentouri, Constantine 1, 2014.
- [12] M. Faustin, Etude de l'effet des alcaloïdes sur la corrosion de l'acier C38 en milieu acide chlorhydrique 1M, Application à *Aspidosperma album* et *Geissospermum laeve* (Apocynacées), Thèse de doctorat, Université des Antilles et de la Guyane ,2013.
- [13] I.B. Sebti, R.B.Kaddour, Etude théorique par DFT d'une série d'inhibiteurs de la corrosion, Université Mohamed Khider, Biskra, 2020.

- [14] F. Bentiss, Synthèses et études physicochimiques des inhibiteurs organiques de corrosion en milieu acide, Université des sciences et technologies, Lille, 1999.
- [15] Von D. Landolt, Corrosion et chimie de surfaces des métaux, Presses Polytechniques et Traité des Matériaux, Vol 12, Universitaires Romandes Lausanne, 1993.
- [16] MILLET, J. P, Durabilité et corrosion, cours Master Science et Technologie de Matériaux, Pitesti, 2008.
- [17] Dr H. Bensabra, Cours de Corrosion et Protection des Métaux, Département de Génie des Procédés, Université Mohammed Seddik Benyahia, Jijel.
- [18] Hamza Bentrach, Corrosion des ouvrages pétroliers, Utilisation de la gomme arabique comme inhibiteur environnemental, thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2015.
- [19] E. Mccafferty, M. K. Bennett, J. S. Murday, An XPS study of passive film formation on iron in chromate solutions, Corrosion Science, p 559-576, 1988.
- [20] Djeridi Boualem, Résine de Schinus molle comme inhibiteur vert pour l'acier API 5L X70 en milieu HCl5%, Université Mohamed Khider, Biskra, 2020.
- [21] C. Fiaud, Inhibiteur de corrosion, Marie curie, ENSC, Techniques de l'ingénieur, Traité corrosion, Vieillissement, Vol Cor 1005, Université Pierre, Paris, 2006.
- [22] B. Mezhoud, Synthèse des inhibiteurs contre la corrosion des aciers, Université frères Mentouri, Constantine ,2011.
- [23] M. Bethencourt, F.J.Botana, J.J.Calvino, M. Marcos, M.A.Rodriguez ET Chacon, Lanthanide compounds as environmentally-friendly corrosion inhibitors of aluminum alloys, a review, Corrosion science, vol40, n° 111, p 1803-1819, 1998.
- [24] M. Areas, A. Conde ET J. Damborenea, Cerium a suitable green corrosion inhibitor for Tinplate, Corrosion science, vol44, p 511–520, 2002.
- [25] E. Cano, P.pinilla, J.polo ET P. Bastidas, Copper a suitable green corrosion inhibition by fast green, fuchsin acid and basic compound in citric acid solution, Material corrosion, vol 54, p 222–228, 2003.

- [26] P. Raja ET M. Sethuraman, Natural product as corrosion inhibitor for metals in media, *Materials letters*, vol 62, p 113, 2008.
- [27] C. FIAUD, Inhibiteurs de corrosion, *Technique de l'ingénieur, Traite de métallurgie*, Doc.M 160, 7, 1994.
- [28] S. Athmani, Etude des couches minces à base de terre rare destinées à la protection des matériaux contre la corrosion, *Université Mohamed Cherif Messaïdiade, Souk Ahres*, 2013.
- [29] P. Boummersbach, Evolution des propriétés d'un film inhibiteur de corrosion sous l'influence de la température et des conditions hydrodynamiques, *Thèse de doctorat, université de Lyon*, 2005.
- [30] H. Hamani, Synthèse, caractérisation et étude du pouvoir inhibiteur de nouvelles molécules basent de Schiff, *Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas, Sétif*, 2015.
- [31] A. Bard, L. Faulkner, *Electrochimie, Principes, Méthodes et Applications*, Editeur, Masson, Paris, 1983.
- [32] C. Gabrielli, *Méthodes électrochimiques, Mesures d'impédances, Techniques d'ingénieur*, V1, 1994.
- [33] Mme.Oulabbas Amel, Effets des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers ordinaires dans deux milieux acides, *Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba*, 2019.
- [34] A. E. Etre, Inhibition of acid corrosion of carbon steel using aqueous extract of olive leaves, *Journal of Colloid and Interface Science*, vol 314, p 578–583, 2007.
- [35] M. Quraishi, A. Singha, D. K. Y. Vinod, Kumar Singha et A. K. Singh, Green approach to corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid and sulphuric acid solutions by the extract of *Murraya koenigii* leaves, *Materials Chemistry and Physics*, vol 122, p 114-122, 2010.
- [36] A. Lecante, F. Robert, M. Lebrini ET C. Roos, Inhibitive Effect of *Siparuna Guianensis* Extracts on the Corrosion of Low Carbon Steel in Acidic Media, *Int, J, Electrochem Sci*, vol 6, p 5249-5264, 2011.
- [37] A.El mouwahidi, Z.Zapata-Benabithé, F.Carrasco-Marín ET C.Moreno-Castilla, Activated carbons from KOH-activation of argan (*Argania spinosa*) seed shells as supercapacitor electrodes, *Bioresource Technology*, vol 111, p 185-190, 2012.

- [38] P. M. Krishnegowda, T. V. Venkatesha, P. K. M. Krishnegowda ET a. S. Shivayogiraju, Acalypha torta Leaf Extract as Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel in Hydrochloric Acid Solution, Ind, Eng, Chem, Res, vol 52, p 722-728, 2013.
- [39] M. Faustin, A. Maciuk, P. Salvin, C. Roos ET M. Lebrini, Corrosion inhibition of C38 steel by alkaloids extract of Geissospermum laeve in 1 M hydrochloric acid, Electrochemical and phytochemical studies, Corrosion Science, vol 92, p 287-300, 2015.
- [40] S. Umoren, Z. Gasem ET I. Obot, Date palm (Phoenix dactylifera) leaf extract as an ecofriendly corrosion inhibitor for carbon steel in 1M hydrochloric acid solution, Anticorrosion Methods and Materials, vol 62, p 19-28, 2015.
- [41] K. Rose, B. Kim, K. Rajagopal, S. Arumugam ET K. Devarayan, Surface protection of steel in acid medium by Tabernaemontana divaricata extract, physicochemical evidence for adsorption of inhibitor, Journal of Molecular Liquids, vol 214, p 111-116, 2016.
- [42] A. Ehsani, M. G. Mahjani, M. Hosseini, R. Safari, R. Moshrefi ET H. Shiri, Evaluation of Thymus vulgaris plant extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for stainless steel 304 in acidic solution by means of electrochemical impedance spectroscopy, electrochemical noise analysis and density functional theory, Journal of Colloid and Interface Science, vol 490, p 444-451, 2017.
- [43] P. E. Alvarez, M. V. Fiori-Bimbi, A. Neske, S. A. Brandán ET C. A. Gervasi, Rollinia occidentalis extract as green corrosion inhibitor for carbon steel in HCl solution, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, vol 58, p 92-99, 2018.
- [44] A. Kanu, Performance Evaluation of Corrosion Inhibitors in Pipelines using Cannon Amuricata (CM) and Cassuttidifilifurmis Leaf (CF) Plant Extracts, These de doctorat University of Technology, Owerri, 2018.
- [45] P. C. Okafor, I. Uwah, O. O. Ekerenam ET U. J. Ekpe, Combretum bracteosum extracts as ecofriendly corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium, Pigment and Resin Technology, vol 38, p 236-241, 2009.
- [46] A. M. Al-Turkustani, S. T. Arab ET L. S. S. Al-Qarni, The use of Ruta chalepensis corrosion inhibitor for steel corrosion in 2M sulphuric acid solution, Oriental Journal of Chemistry, vol 26, p 437-454, 2010.

- [47] I.E.Uwah, P.C.Okafor ET V.E.Ebiekpe, Inhibitive action of ethanol extracts from *Nauclea Latifolia* on the corrosion of mild steel in H₂SO₄ solutions and their adsorption characteristics, *Arabian Journal of Chemistry*, vol 6, p 285-293, 2013.
- [48] N. C. Michael ET J. A.Olubunmi, The corrosion inhibition of mild steel in sulphuric acid solution by flavonoid (catechin) separated from *Nypa fruticans* Wurmb leaves extract, *Science Journal of Chemistry*, vol2, p 27-32, 2014.
- [49] Punita.Mourya, Sitashree Banerjee ET M.M.Singh, Corrosion inhibition of mild steel in acidic solution by *Tagetes erecta* (Marigold flower) extract as a green inhibitor, *Corrosion Science*, vol85, p 352-363, 2014.
- [50] M.Mehdipour, B.Ramezanzadeh ET S.Y.Arman, Electrochemical noise investigation of Aloe plant extract as green inhibitor on the corrosion of stainless steel in 1 M H₂SO₄, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol21, p 318-327, 2015.
- [51] J. Bhawsar, P.K.Jain ET P. Jain, Experimental and computational studies of *Nicotiana tabacum* leaves extract as green corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium, *Alexandria Engineering Journal*, vol54, p 769-775, 2015.
- [52] A. SINGH, *Cassia tora* leaves Extract as Mild Steel Corrosion Inhibitor in Sulphuric Acid Solution, *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, vol2, p 698-701, 2016.
- [53] H. Louis, J. Japari, A. Sadia, M. Philip ET A. Bamanga, Photochemical screening and corrosion inhibition of *Poupartia birrea* back extracts as a potential green inhibitor for mild steel in 0.5 M H₂SO₄ medium, *World News of Natural Sciences*, vol 10, p 95-100, 2017.
- [54] S. Akhil, P. Dwarika, H.Rajesh, S. Gurmeet ET K. Akshay, Use of *Sida cordifolia* extract as green corrosion inhibitor for mild steel in 0.5 M H₂SO₄, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol 6, p 694-700, 2018.
- [55] P.Muthukrishnan, B.Jeyaprabha ET P.Prakash, Adsorption and corrosion inhibiting behavior of *Lansea coromandelica* leaf extract on mild steel corrosion, *Arabian Journal of Chemistry*, vol 10, p s2343-s2354, 2017.
- [56] S. Athmani, S. Abderrahmane, F. Benachour ET G. Kardas, A study of the effect of *Agave Americana* extract inhibitor on the corrosion of mild steel in 0.5 M H₂SO₄, *Materials research express*, vol6, p 1-16, 2018.

- [57] G. Gunasekaran ET L.Chauhan, Eco friendly inhibitor for corrosion inhibition of mild steel in phosphoric acid medium, *Electrochemical Acta*, vol49, p 4387-4395, 2004.
- [58] M.Benabdellah, M.Benkaddour, B.Hammouti, M.Bendahhou ET A.Aouniti, oil, Inhibition of steel corrosion in 2 M H₃PO₄ by artemisia, *Applied Surface Science*, vol 252, p 6212- 6217, 2006.
- [59] M. Bendahou, M. Benabdellah ET B. Hammouti, A study of rosemary oil as a green corrosion inhibitor for steel in 2 M H₃PO₄, *Pigment , Resin Technology*, vol 35, p 95-100, 2006.
- [60] A. A.Rahim, E.Rocca, J.Steinmetz ET M. Kassim, Inhibitive action of mangrove tannins and phosphoric acid on pre-rusted steel via electrochemical methods, *Corrosion Science*, vol 50, p 1546-1550, 2008.
- [61] M. Sivaraju ET K. Kannan, Eco-friendly inhibitor (*Tributes terrestris L*) for mild steel corrosion in 1N Phosphoric acid, *Asian Journal of Chemistry*, vol22, p 233-244, 2010.
- [62] M.Sivaraju ET K. Kannan, Inhibitive properties of plant extract (*Acalypha indica L.*) on mild steel corrosion in 1N Phosphoric acid, *International Journal of ChemTech Research*, vol 2, p 1243-1253, 2010.
- [63] L. Xianghong, D. Shuduan, F. Hui ET X. Xiaoguang, Synergistic inhibition effects of bamboo leaf extract/major components and iodide ion on the corrosion of steel in H₃PO₄ solution, *Corrosion Science*, vol78, p 29-42, 2014.
- [64] A. E. bribri, H. E. attari, M. SINIT ET M. Tabyaoui, Temperature effects on the corrosion inhibition of carbon steel in 1N H₃PO₄ solution by methanolic extract of *Euphorbia Falcata.L*, *Journal of Chemistry*, vol 3, p 286-297, 2015.
- [65] N. Gunavathy ET S.C.Murugavel, Thermodynamic Properties and Inhibitor Adsorption Behaviour of *Musa acuminata* Flower Extract on Mild Steel in Phosphate Environment, *Chemical Science Review and Letters*, vol4, p 711-718, 2015.
- [66] A. Ehteram, A. E. Moubaraki, A. A. Zahrani ET M. Hubani, Testing and Comparing the Inhibitory Action of Red Onion Seeds and Peels Extracts on the Corrosion of Steel in Phosphoric Acid, *International Journal of Electrochemical science*, vol 11, p 6523-6539, 2016.

- [67] W.Belmaghraoui, A. Mazkour, M. Harir et S. ElHajjaji, Investigation of corrosion inhibition of C38 steel in 5.5 M H₃PO₄ solution using Ziziphus lotus oil extract, an application model, *Anti-Corrosion Methods and Materials*, p 1-6, 2018.
- [68] A. A. Moubaraki, potential of borage flowers aqueous extract, *Borago officinalis L*, against the corrosion of mild steel in phosphoric acid, *Anti-Corrosion Methods and Materials*, vol 65, p 53-65, 2018.
- [69] F.Beldjilali, Essais sur l'inhibition de corrosion de l'acier XC 38 en milieu acide HClO₄ 1M, *Projet de fin d'étude en chimie et génie des procédés*, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2006.
- [70] F. Touhami, A. Aouniti and all, Corrosion inhibition of armco iron in 1 M HCl media by new bipyrazolic derivatives, *Corrosion Science* 42, p 929-940, 2000.
- [71] A.Barroug, Propriétés de surface des apatites et adsorption de protéines, *Thèse d'Etat*, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, 1989 .
- [72] C.Rill, G.Kickelbick, and all, Kinetics and thermodynamics of adsorption on hydroxyapatite of the [160Tb] Terbium complexes of the bone-targeting ligands DOTP and BPPED", *Langmuir*, 25(4), p 2294-2301, 2009.
- [73] L.Touafri. Emploi d'acides aminés dans la lutte contre la corrosion d'un acier au carbone en milieux aqueux de Na Cl 3% et d'acide H₂ So₄ 1Mol .L-1, *Thèse de doctorat*, université de mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2009.
- [74] H.Elbakouri, Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier doux au carbone en milieu acide ortho phosphorique par un antibiotique organique, *thèse de doctorat*, université de Maroc, 2000.
- [75] M.Sahin, S.Bilgic, H.Yılmaz, The inhibition effects of some cyclic nitrogen compounds on the corrosion of the steel in NaCl mediums, *Applied Surface Science*195, 2002.

Chapitre III

Etude expérimentale

III.1. Technique expérimental

Ce chapitre expérimental pour l'objectif de présenter la technique utilisée afin d'étudier l'efficacité inhibitrice des extraits organiques à différentes concentrations et d'évaluer la corrosion de l'acier au carbone en milieu acide par gravimétrie. Sans et avec l'ajout d'inhibiteur.

III.1.1. Méthodes gravimétrie d'étude

La mesure gravimétrique est une technique chimique simple et facile à mettre en œuvre, ne pas nécessiter un appareillage important, elle base sur des essais de perte de poids Δm utilisés dans l'étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier en solution électrolytique [1].

III.2. Matériaux et matériels utilisés

Pour effectuer des mesures de perte de masse, nous avons besoin de l'équipement suivant :

- Balance (SHIMADZU AUW220D) ;
- Plaque chauffante ;
- Agitateur magnétique ;
- Bêchers (500 ml) ;
- Eprouvettes graduées (100 ml) ;
- Fioles jaugées (1L) ;
- Entonnoir ;
- Barreau aimante ;
- Verre de montre ;
- Spatule ;
- Polisseuse ;
- Acier (X70) ;
- Deux inhibiteurs verts (R) et (B) ;

- HCl ;
- Eau distillée ;
- Acétone.

III.3. Description des matériaux d'étude

III.3.1. Présentation de l'acier (X70)

Pour notre étude, nous avons utilisé un type d'acier : L'acier (API5L X70), utilisé pour le transport des hydrocarbures, et répondant à la spécification imposée par la norme (API5L). Et plus précisément des coupes d'acier au carbone du manifold d'entrée (le collecteur d'entrée) de la brute coupée lors des inspections de corrosion du champ Hbns « Hassi Berkine nord et sud –Groupement Berkine » situé au sud de l'Algérie à 1100 KM d'Alger et à 300 KM d'Hassi Messaoud. Il est limité par les frontières tunisiennes (114 km) et libyennes (160 km) le bassin d'Illizi au sud dôme de Dahra au nord et Hassi Messaoud à l'ouest [2]. L'acier (X70) contient une faible teneur en carbone. Il présente une faible teneur en soufre et phosphore. La présence du manganèse en quantité relativement importante compense la faible teneur en carbone et permet de préserver une bonne soudabilité. La composition chimique est détaillée au tableau ci-dessous :

Tableau III.1 : Composition chimique des aciers (X70) [3].

Grade d'acier	Composition chimique(%)							
	C	Si	Mn	Cr	S	Mo	Ti	Al
(X70)	0,12	0,45	1,70	0.30	0.015	0.10	0.06	0.06

III.3.2. Milieu d'étude

- Milieux corrosifs (électrolyte) : dans notre travail, nous avons utilisé une solution d'acide chlorhydrique (HCl 0.5M) préparée en diluant une solution HCl d'une pureté de 35%.

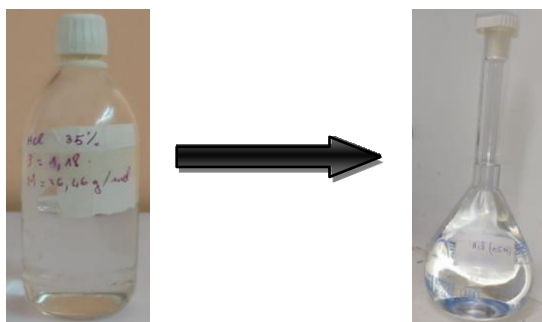


Figure III.1 : Préparation d'un litre de solution (HCl 0.5M).

Tableau III.2 : Propriété de la solution mère.

Solution	Acid chlorhydrique
Formule	HCl
Masse molaire	36.46 g/mol
Densité	1.18
Pureté	35 %

On utilise la loi de dilution :

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad \text{(III.1)}$$

III.3.3. Préparation d'Inhibiteurs

Pour préparer l'inhibiteur, nous avons suivi les étapes suivantes :

- Nettoyage des feuilles des deux plantes vertes (R) et (B) ensuite les trancher et laissez-les sécher à l'air pendant quelques jours ;
- Broyage des morceaux sécher avec un hachoir ou un Blender, la séparation du poudre obtenus à l'aide d'un tamis 0.5 mm ;
- Mettre la poudre fine dans la solution n-hexane ;
- Transférer de l'échantillon dans plusieurs fioles coniques contient de volumes del'éthanol ou le méthanol ;
- L'agitation de tous les flacons contenant les solutions sur un agitateur pendant 24h ;

- Mettre les échantillons dans un évaporateur rotatif (Rota vap) ;
- Les extraits obtenus seront utilisés comme des inhibiteurs verts de corrosion.

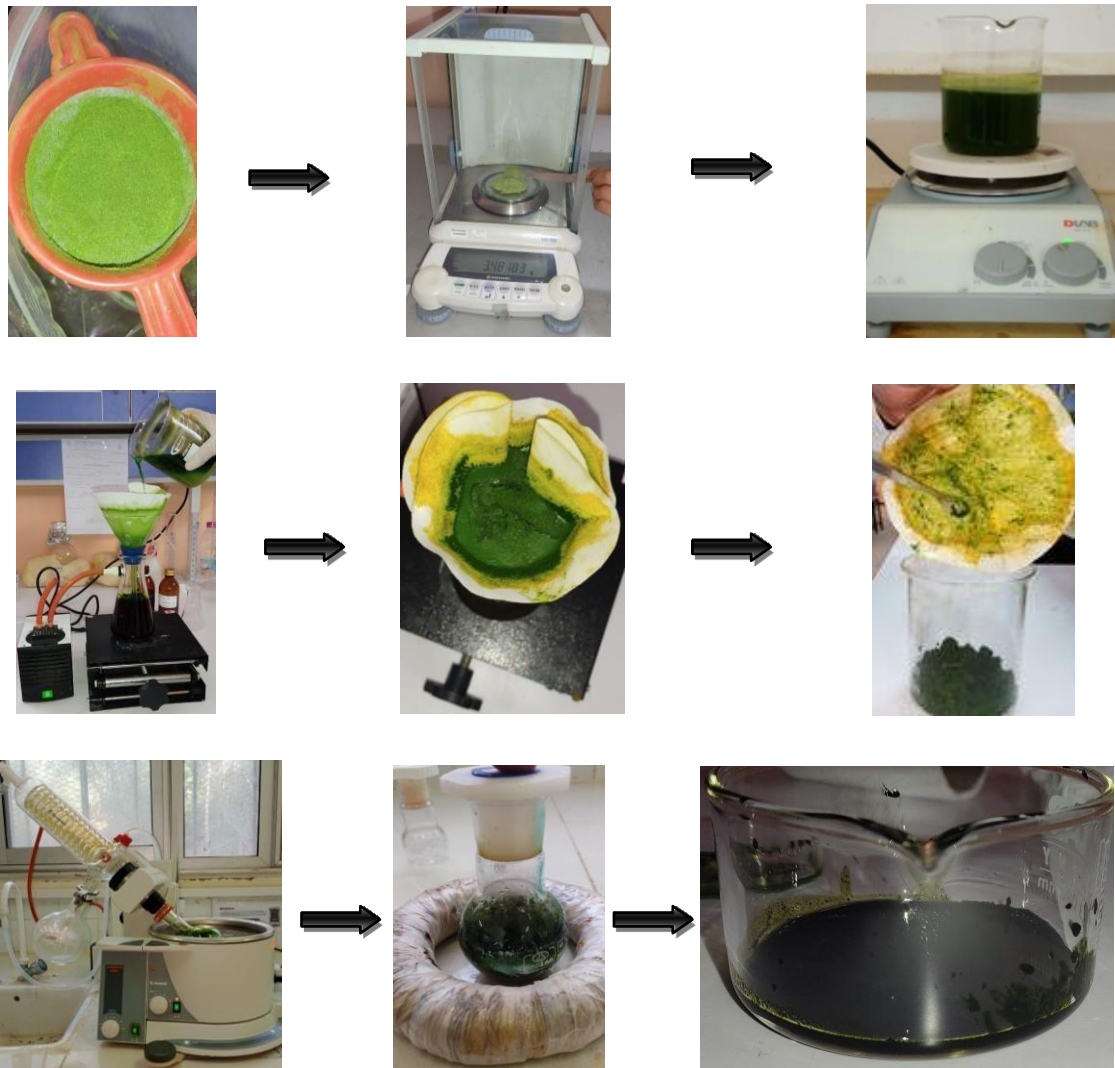


Figure III.2 : Les étapes de préparation d'inhibiteurs.

III.4. Préparation des échantillons

L'état de surface joue un rôle très important dans le comportement du métal vis-à-vis de la corrosion. La préparation des surfaces des échantillons a été effectuée en utilisant le matériel suivant :

- Une polisseuse mécanique ;
- papier abrasif.

- Échantillon d'acier au carbone : le matériau utilisé dans notre travail est l'acier (X70) ce dernier a été obtenu sous forme de plaquettes rectangulaires de dimensions (S1 x S2 x S3) cm².



Figure III.3 : Un échantillon brut avant polissage.

- Polissage mécanique : les échantillons d'acier subissent à un polissage au papier abrasif sec de granulométrie décroissante (80/ 100 /120 / 180 / 240 /1000/ 1200/2400) pour rendre la surface plane, lisse et brillante à l'état de miroir et supprimer les fissures et les aspérités.



Figure III.4 : La polisseuse (département de mécanique - université de Skikda).

- Nettoyage et séchage : les échantillons sont ensuite rincés à l'eau distillée, dégraissés par l'acétone et séchés.

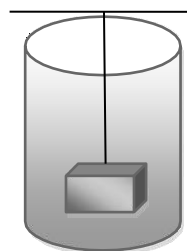


Figure III.5 : L'acier (A) avant et (B) après le polissage.

III.5. Mode opératoire

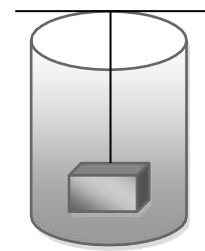
- Après avoir préparé les pièces pour les mesures de masse initiale m_0 , on procède à la pesée soit m_t ensuite à la préparation des solutions électrolytiques avec les concentrations choisies des inhibiteurs ;
- Les pièces sont lavées, séchées et enfin pesées. La figure (III.6) montre le dispositif utilisé pour les mesures gravimétriques.
- Le principe repose sur la mesure de la perte de masse ($m_0 - m_t$) subie par un échantillon métallique de surface (S), lorsque celui-ci est immergé pendant le temps.

Sans inhibiteur



T ambiante=17 C°

Sans inhibiteur



T=40 C°

Figure III.6 : Effet de la température du milieu corrosif (sans inhibition).

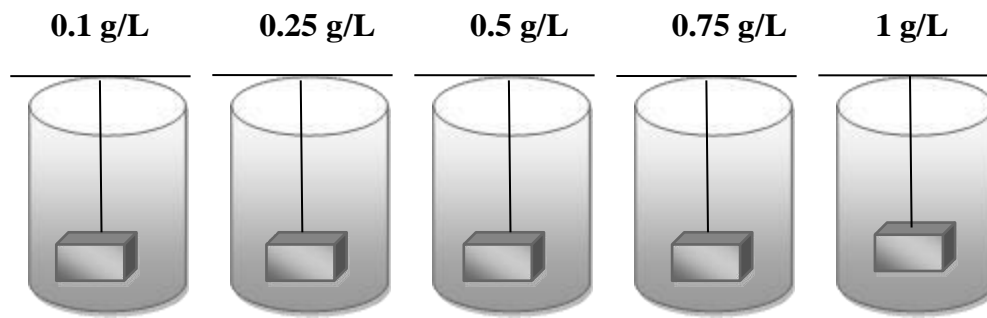


Figure III.7 : Diapositive expérimental de corrosion en présence de différentes concentrations d'inhibiteur.

III.6. Résultats et discussion

Cette partie présente les résultats du comportement des deux inhibiteurs en fonction du temps et leur concentration en solution acide (HCl 0.5 M).

III.6.1. Variation de la vitesse de corrosion de l'acier

La vitesse de corrosion de l'acier au carbone sans et avec l'inhibiteurs (R) et (B), est calculée à partir des mesures de perte de masse avant et après dans un temps d'immersion au milieu d'acide (HCl, 0.5M). Les mesures de perte de masse sont répétées trois fois pour un même échantillon pour une meilleure précision des résultats.

Tableau III.3 : Vitesse de corrosion de l'acier sans inhibiteur à différentes température ambiante=17C° et à température 40 C ° en fonction du temps d'immersions dans la solution de(HCl 0.5M).

17 C°		40 C °	
t(h)	V (mg/cm ² .h)	t(h)	V (mg/cm ² .h)
0	0	0	0
1	1.97	1	2.03
2	1.99	2	2.45
3	2.06	3	2.82
4	2.07	4	2.91
6	2.34	6	3.74
24	2.57	24	4.09
48	2.71	48	4.64
72	3.51	72	5.17

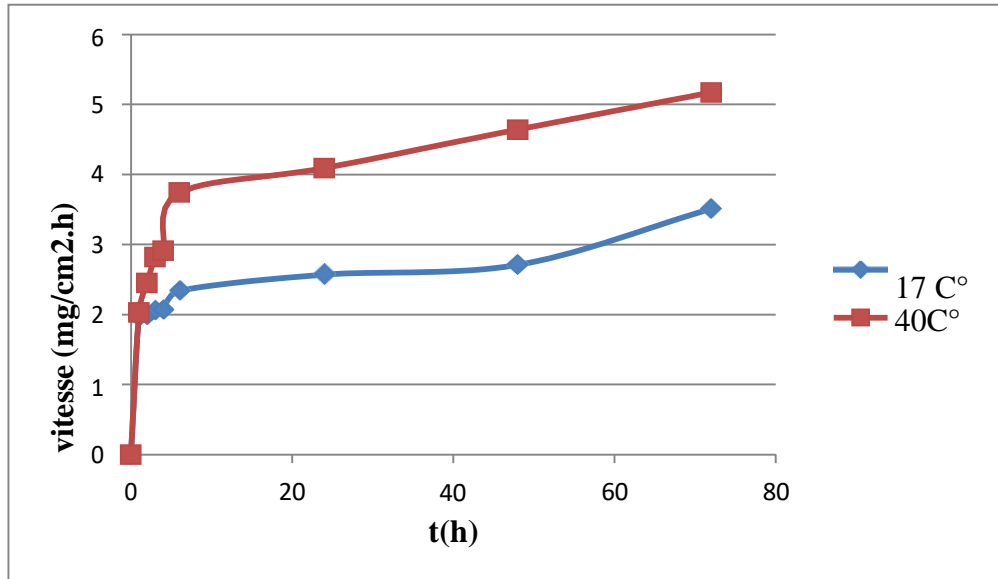


Figure III.8: Évolution de la vitesse de corrosion de l'acier sans inhibiteur à $T=17\text{ C}^\circ$ & $T=40\text{ C}^\circ$ en fonction du temps d'immersion dans (HCl 0.5M).

➤ Discussion

L'analyse des résultats du tableau montre clairement que la vitesse de corrosion de l'acier (X70) dans (HCl 0,5 M) à 40 °C est supérieure à la vitesse de corrosion à température 17 °C avant l'application des inhibiteurs. Cette dernière augmente avec le temps.

Tableau III.4 : Variation de la vitesse inhibitrice de corrosion avec inhibiteur (R) de l'acier en fonction de différentes concentrations et différents temps d'immersion dans (HCl 0.5M).

temps(h) c (g/L)	1h	2h	3h	4h	6h	24h	48h	72h
Vitesse (mg/cm².h)								
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1	1,93	1,21	0,54	0,74	0,09	0,11	0,06	0,05
0,25	1,9	1,12	0,64	1,47	0,28	0,13	0,04	0,03
0,5	1,86	0,69	0,47	0,33	0,5	0,13	0,05	0,02
0,75	1,42	0,63	0,09	0,09	0,18	0,07	0,02	0,03
1	1,4	0,31	0,07	0,08	0,07	0,03	0,04	0,03

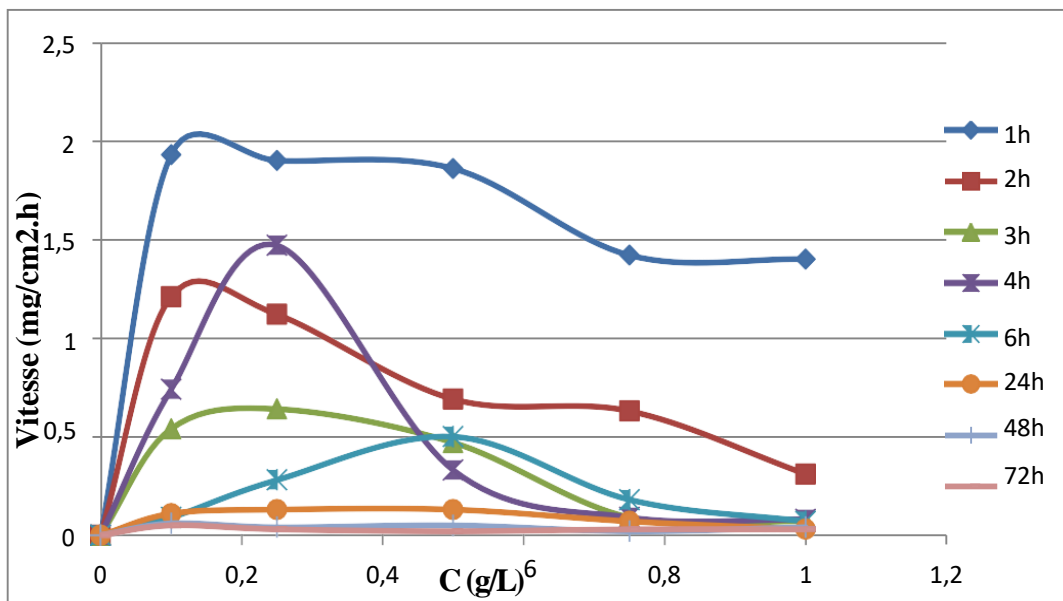


Figure III.9 : Evaluation de la vitesse inhibitrice de corrosion avec l'inhibiteur (R) de l'acier en fonction de différentes concentrations et différents temps d'immersion dans (HCl 0.5M).

Tableau III.5 : Variation de l'efficacité inhibitrice de corrosion de l'acier à différentes concentrations et différents temps d'immersion de l'inhibiteur (R) dans (HCl 0.5M).

Temps (h)	1h	2h	3h	4h	6h	24h	48h	72h
C (g/L)	E%							
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1	2,03	39,19	73,78	64,25	96,15	95,71	97,78	98,57
0,25	3,55	43,71	68,93	28,98	88,03	94,94	98,52	99,14
0,5	5,58	65,32	77,18	84,05	78,63	94,94	98,15	99,43
0,75	27,91	68,34	95,63	95,65	92,3	97,27	99,26	99,14
1	28,93	84,42	96,6	96,13	97	98,83	98,52	99,14

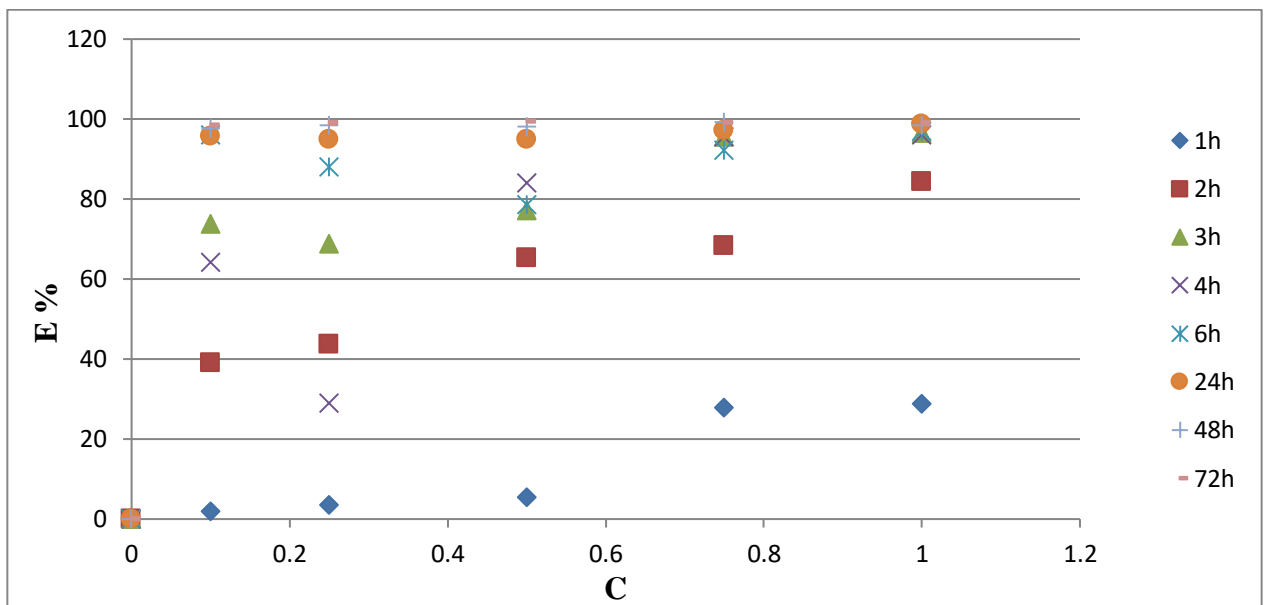


Figure III.10 : Evaluation de l'efficacité inhibitrice de corrosion de l'acier à différentes concentrations de l'inhibiteur (R) en fonction du temps d'immersion dans (HCl 0.5M).

Tableau III.6 : Variation de la vitesse inhibitrice de corrosion avec inhibiteur (B) de l'acier en fonction de différentes concentrations et différents temps d'immersion dans (HCl 0.5M).

temps(h)	1h	2h	3h	4h	6h	24h	48h	72h
c (g/L)								
Vitesse (mg/cm².h)								
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1	1,87	1,24	0,44	0,9	0,42	0,11	0,05	0,04
0,25	1,75	1,14	0,4	0,45	0,2	0,1	0,04	0,04
0,5	1,6	0,97	0,13	0,29	0,17	0,06	0,04	0,01
0,75	1,24	0,58	0,53	0,27	0,13	0,06	0,02	0,01
1	1,17	0,56	0,04	0,14	0,06	0,05	0,05	0,02

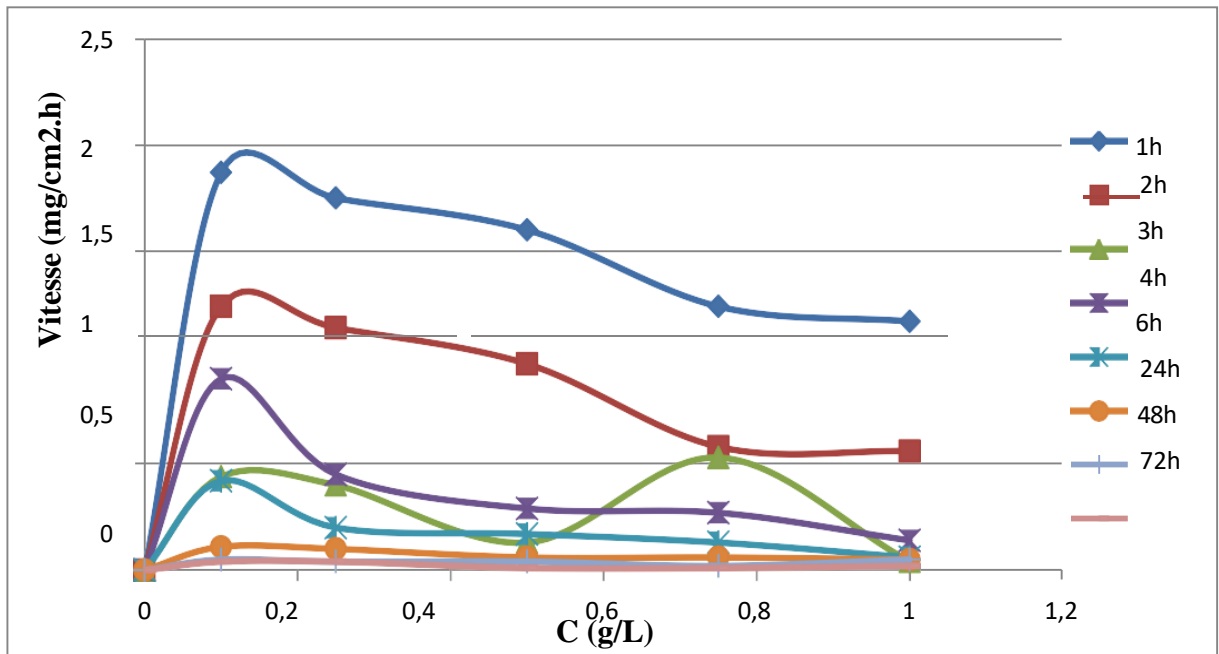


Figure III.11 : Evaluation de la vitesse inhibitrice de corrosion avec inhibiteur (B) de l'acier en fonction de différentes concentrations et différents temps d'immersion dans (HCl 0.5M).

Tableau III.7 : Variation de l'efficacité inhibitrice de corrosion de l'acier à différentes concentrations et différents temps d'immersion de l'inhibiteur (B) dans (HCl 0.5M).

Temps (h)	1h	2h	3h	4h	6h	24h	48h	72h
C (g/L)	E%							
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1	5,07	37,68	78,64	56,52	82,05	95,71	98,15	98,86
0,25	11,16	42,71	80,58	78,26	91,45	96,1	98,52	98,86
0,5	18,78	51,25	93,68	85,99	92,73	97,66	98,52	99,71
0,75	37,05	70,85	74,27	86,95	94,44	97,66	99,26	99,70
1	40,6	71,85	98,05	93,23	97,43	98,05	98,15	99,43

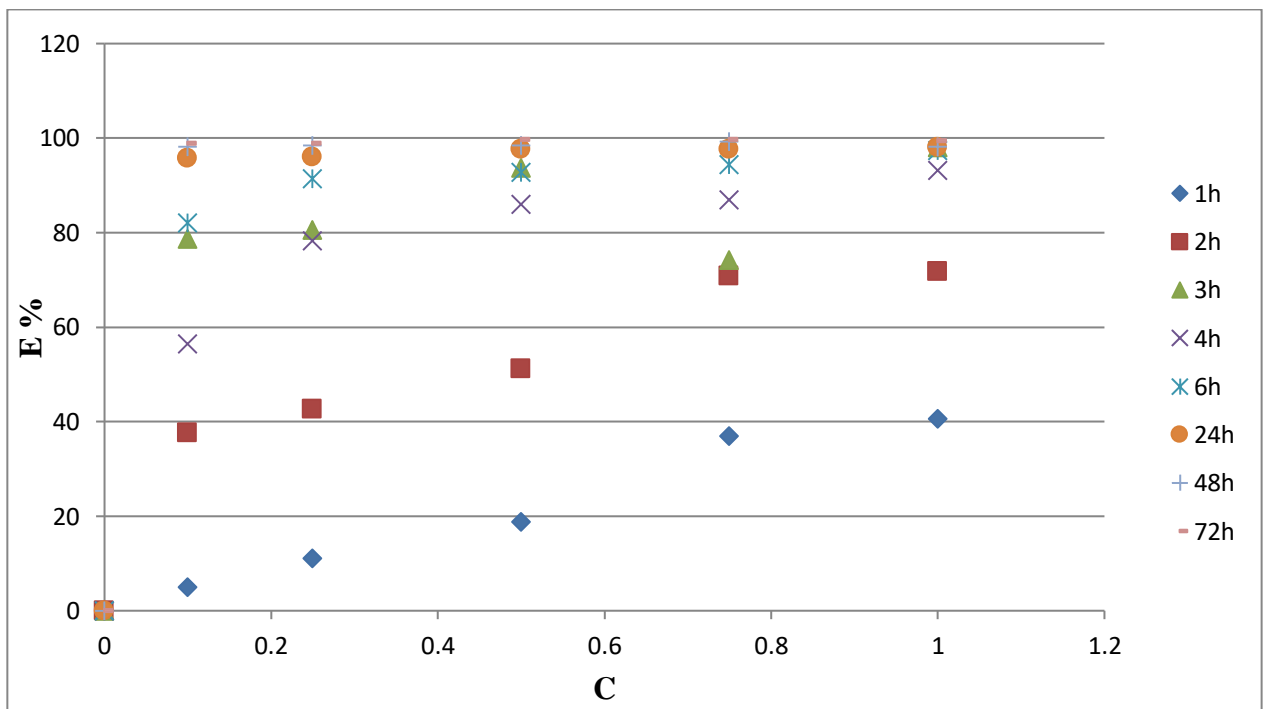


Figure III.12 : Evaluation de l'efficacité inhibitrice de corrosion de l'acier à différentes concentrations de (B) en fonction du temps d'immersion dans (HCl 0.5M).

➤ Discussion

- Les tableaux représentent l'évolution de la vitesse et de l'efficacité inhibitrice au cours du temps d'immersion sur une période de 72 heures.
- Dès que les deux inhibiteurs (R) et (B) sont ajoutés dans le milieu de corrosion à des concentrations différentes, la vitesse de corrosion diminue au fur et à mesure que la concentration augmente jusqu'à la concentration (0.5) g/L, où cette diminution indique que l'adsorption des molécules inhibitrices à la surface de l'acier forme une couche protectrice et empêche la décomposition de l'oxydation de l'acier (X70).
- On note que l'efficacité de corrosion de l'inhibiteur augmente avec l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur, atteignant une valeur maximale de 99.43 pour l'inhibiteur (R) et 99.71 pour l'inhibiteur (B), et on note également que l'augmentation de l'efficacité est liée à l'immersion temps.

III.7. Isotherme d'adsorption d'inhibition par (R) et (B)

Les isothermes d'adsorption sont très importantes pour déterminer :

- Le mécanisme d'adsorption et l'efficacité ;
- Le taux de recouvrement de la surface métallique par les molécules d'inhibiteur ;
- La fixation de la molécule d'inhibiteur sur le métal ;
- La stabilité du complexe qui dépend de l'inhibiteur de la molécule ;
- Les isothermes d'adsorption pour le milieu (HCl 0.5M).

III.7.1. Isotherme d'adsorption d'inhibition par (R)

III.7.1.1. Isotherme d'adsorption de Freundlich

Les résultats de ce type d'isotherme sont représentés dans le tableau (III.8), la figure(III.13).

Tableau III.8 : Paramètre d’isotherme de Freundlich pendant un temps d’immersion 72h en milieu (HCl 0.5M).

ln Θ	-0.0144	-0.0086	-0.0057	-0.0086	-0.0086
ln C	-2.303	-1.386	-0.693	-0.288	0.000

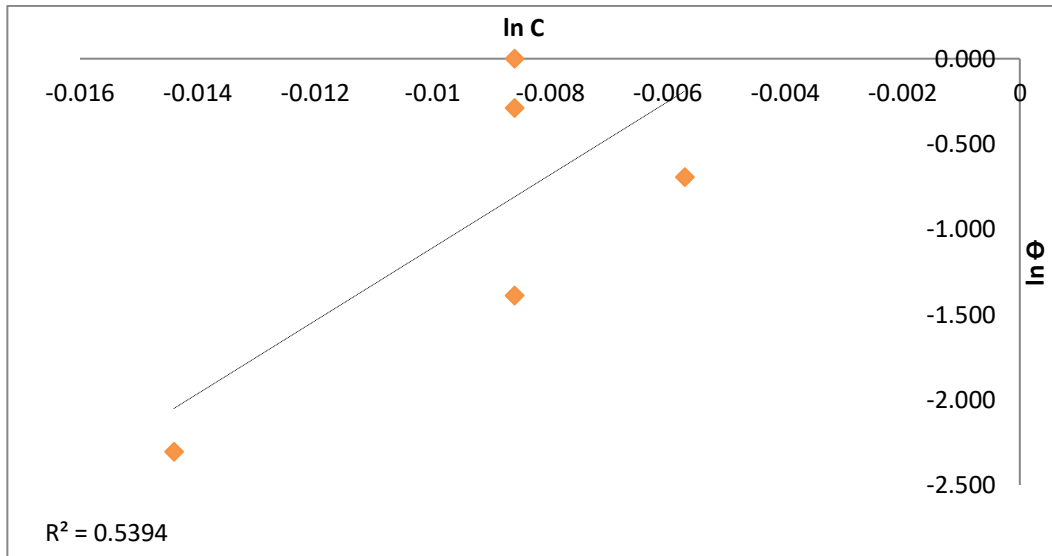


Figure III.13 : Isotherme d’adsorption de Freundlich de l’acier (X70) dans (HCl 0.5M) en présence de l’inhibiteur (R).

III.7.1.2. Isotherme d’adsorption de Temkin

Les résultats obtenus par ce type d’isotherme sont présentés dans le tableau (III.9) et la figure(III.14).

Tableau III.9 : Paramètre d’isotherme de temkin pendant un temps d’immersion 72hen milieu (HCl 0.5M).

Θ	0.9857	0.9914	0.9943	0.9914	0.9914
ln C	-2.303	-1.386	-0.693	-0.288	0.000

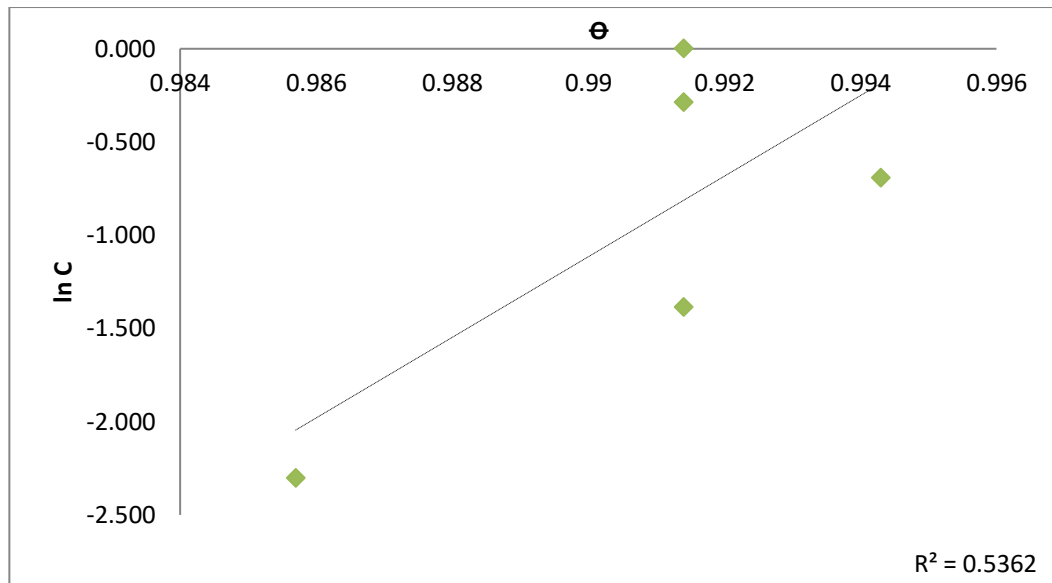


Figure III.14 : Isotherme d'adsorption de Temkin de l'acier (X70) dans (HCl 0.5M) en présence de l'inhibiteur (R).

III.7.1.3. Isotherme d'adsorption de Langmuir

D'après le tableau (III.10) et la figure (III.15) on résume les résultats d'isotherme de Langmuir.

Tableau III.10 : Paramètre d'isotherme de Langmuir pendant un temps d'immersion 72h en milieu (HCl 0.5M).

C/Θ	0.1014	0.2521	0.5028	0.7565	1.0086
C (g/L)	0.1	0.25	0.5	0.75	1

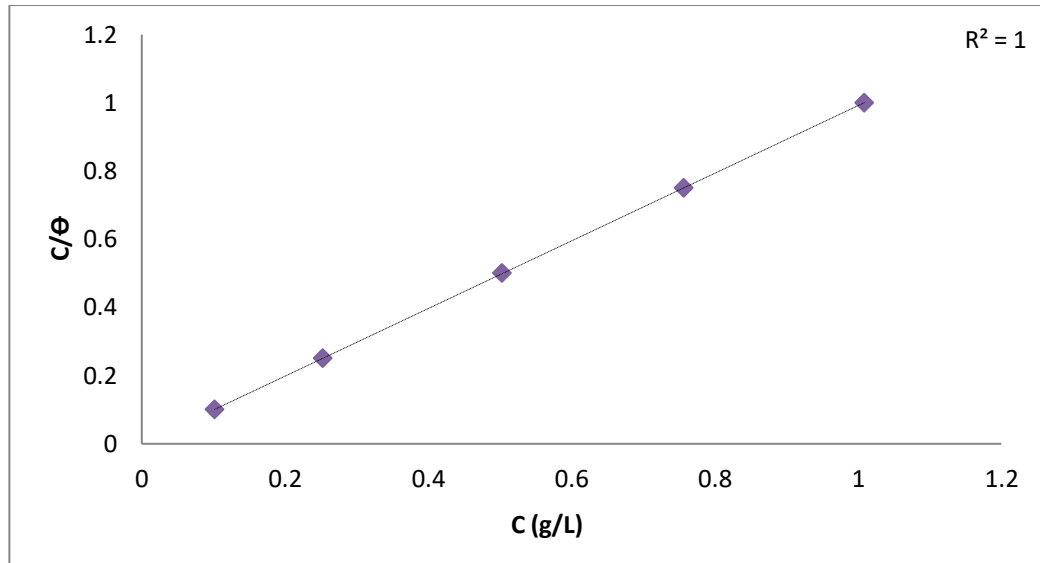


Figure III.15: Isotherme d’adsorption de Langmuir de l’acier (X70) dans (HCl0.5M) en présence de l’inhibiteur (R).

III.7.2. Isotherme d’adsorption d’inhibition par (B)

III.7.2.1. Isotherme d’adsorption de Freundlich

Tableau III.11 : Paramètre d’isotherme de Freundlich pendant un temps d’immersion 72h en milieu (HCl 0.5M).

lnθ	-0.0114	-0.0114	-0.0029	-0.0029	-0.0057
Ln C	-2.303	-1.386	-0.693	-0.288	0.000

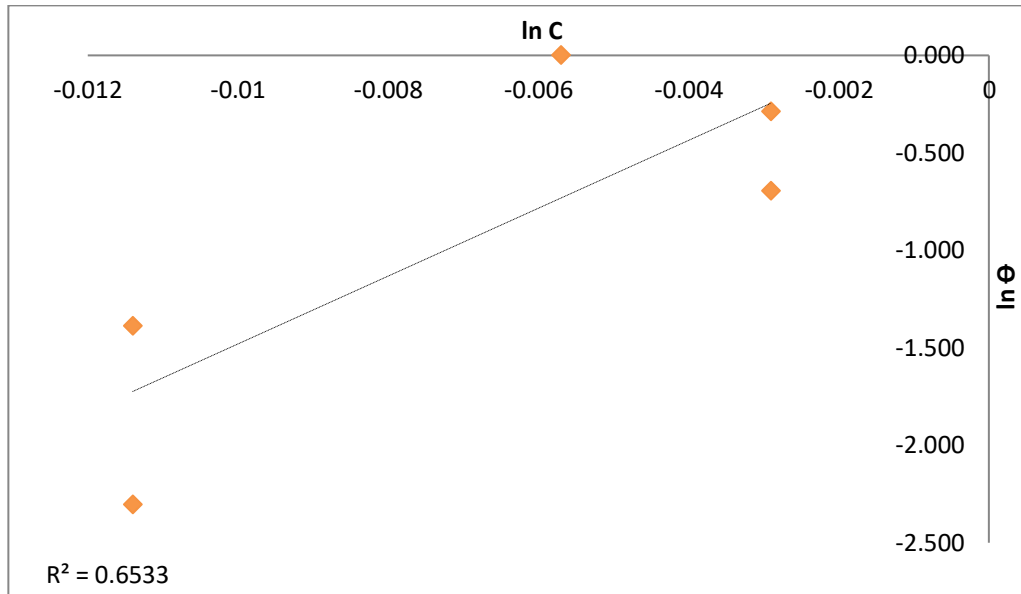


Figure III.16: Isotherme d’adsorption de Freundlich de l’acier (X70) dans (HCl 0.5M) en Présence de l’inhibiteur.

III.7.2.2. Isotherme d’adsorption de Temkin

Tableau III.12 : Paramètre d’isotherme de Temkin pendant un temps d’immersion 72h enmilieu (HCl 0.5M).

θ	0.9886	0.9886	0.9971	0.9971	0.9943
ln C	-2.303	-1.386	-0.693	-0.288	0.000

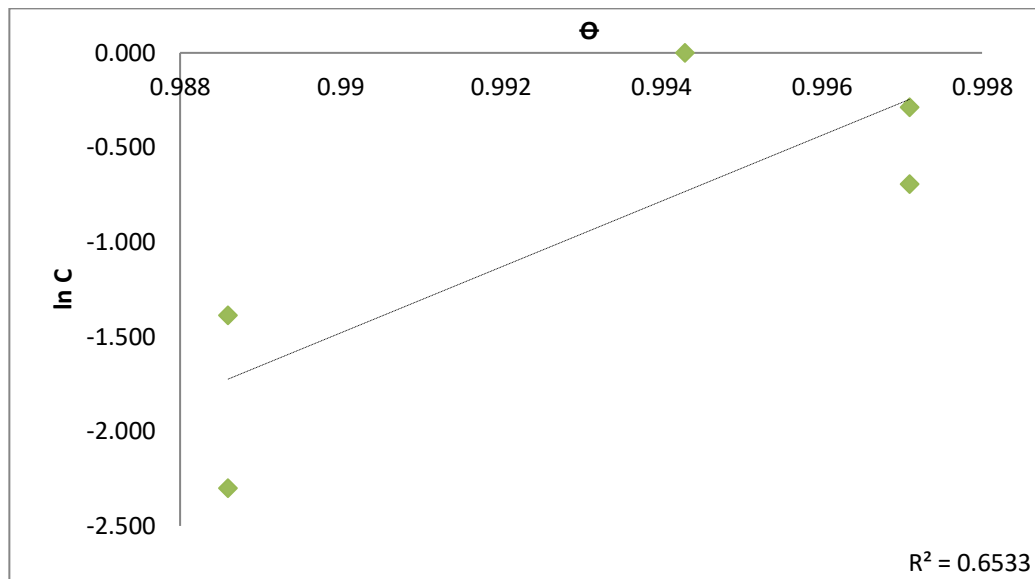


Figure III.17 : Isotherme d’adsorption de Temkin de l’acier (X70) dans (HCl 0.5M) en présence de l’inhibiteur (B).

III.7.2.3. Isotherme d’adsorption de Langmuir

Tableau III.13 : Paramètre d’isotherme de Langmuir pendant un temps d’immersion 72h en milieu (HCl 0.5M).

C/θ	0.1011	0.2528	0.5014	0.7521	1.0057
C (g/L)	0.1	0.25	0.5	0.75	1

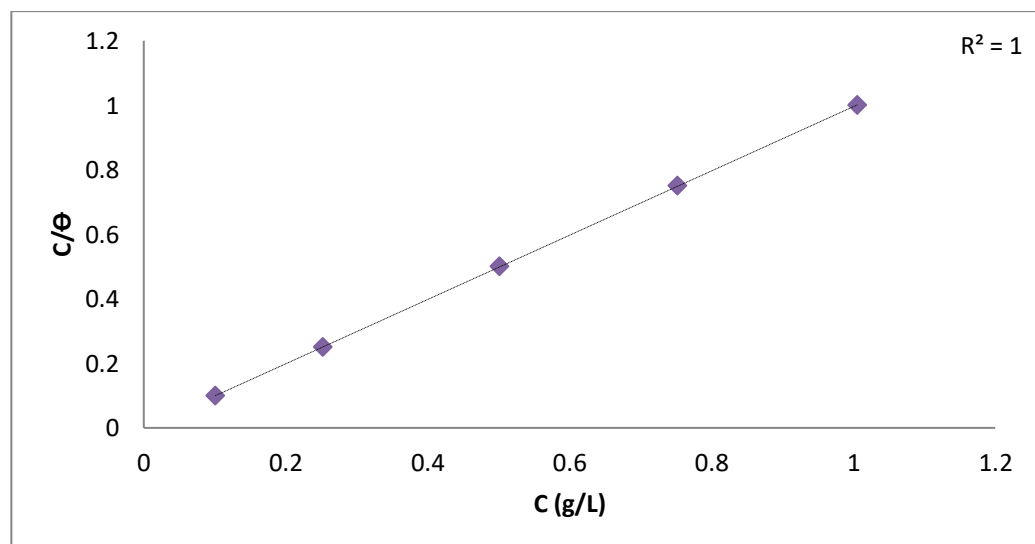


Figure III.18 : Isotherme d’adsorption de Langmuir de l’acier (X70) dans (HCl 0.5M) en présence de l’inhibiteur (B).

➤ **Discussions**

La représentation graphique d'un $[C_{inh}]/\Theta$ en fonction de la concentration inhibitrice pour une période d'immersion 72 heures dans un milieu acide HCl est donne une droite linéaire, cela indique que l'adsorption de l'inhibiteur à la surface de l'acier au milieu de (HCl 0,5M) est soumise à l'isotherme d'adsorption de Langmuir. En fait, nous pouvons dire que l'adsorption de l'inhibiteur sur la surface est monocouche réduite la puissance de l'infiltration de l'électrolyte vers le substrat.

Le coefficient de corrélation R^2 a été utilisé pour choisir correctement notre modèle, et nous voyons que la corrélation linéaire est proche à 1.

Références bibliographies

- [1] L.Sail, Etude de la performance d'inhibiteurs de corrosion à base de phosphate pour les constructions en béton armé, thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2013.
- [2] O. Bouledroua, M. Ouled Mbereick, M. Hadj Meliani. Qualification d'un Acier API 5L X70 : Etude Expérimentale et Validation Numérique, Revue, Nature & Technologie, A- Sciences fondamentales et Engineering, n° 13, p34-39, Juin 2015.
- [3] BOUCHELLIGA Hocine, Identification expérimentale des caractéristiques mécaniques de l'acier (X70) D'ALFAPIPE, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2016.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans notre travail, nous avons basé sur une méthode de prévention à la corrosion de l'acier au carbone, Et remplacer l'utilisation des inhibiteurs industriels contiennent des composés cancérigènes pour l'homme et toxiques pour l'environnement. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'efficacité inhibitrice des inhibiteurs (R) et (B) dans un milieu agressif l'acide chlorhydrique (0,5M) sur l'acier (X70). L'évaluation de la vitesse de corrosion de l'acier sous l'influence de plusieurs facteurs, notamment la température, la concentration en inhibiteurs et le temps d'immersion ; par la méthode gravimétrique.

L'étude de la perte de masse a conduit aux résultats suivants :

- ✓ La vitesse de corrosion de l'acier dans l'acide chlorhydrique (HCl 0,5 M) augmente avec le temps et atteint une valeur maximale en 72 heures ;
- ✓ L'influence de la température du milieu augmente la vitesse de corrosion ;
- ✓ La vitesse de corrosion diminue et l'efficacité d'inhibition augmente avec la concentration des inhibiteurs (R) et (B) ;
- ✓ L'efficacité maximale est de 99,43 %, 99,71 % pour une concentration optimale de 0,5 g/L en inhibiteurs (R) et (B) respectivement ;
- ✓ L'efficacité de l'inhibiteur augmente avec le temps d'immersion jusqu'à ce qu'une certaine concentration de l'inhibiteur soit atteinte ;
- ✓ L'augmentation de l'efficacité inhibitrice indique la présence d'une adsorption des molécules de l'extrait organique (inhibiteurs (R) et (B)) à l'interface métallique solide (X70) en milieu acide ;
- ✓ L'adsorption des inhibiteurs (R) et (B) sur la surface de l'acier au carbone (X70), la variation linéaire de C/Θ avec les concentrations des inhibiteurs, montrent que l'effet des inhibiteurs suit l'isotherme de Langmuir, ce modèle suppose que l'inhibition de la corrosion est causée par la formation d'une monocouche à la surface du métal, ce qui limite l'accès à l'électrolyte et que les interactions entre les particules adsorbées sont négligeables.