



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 20 août 1955 -SKIKDA
Faculté de Technologie
Département de Pétrochimie



Mémoire

En vue de l'obtention de la diplômée

Master

Filière : Industries Pétrochimiques

Spécialité : Raffinage et Pétrochimie

Thème

**Effet de la *Reichardia picroides* sur l'inhibition
de la corrosion du bac de stockage à base de
l'acier A283 Gr C**

Réalisé par :

- ZETAREN Aya

Devent les jury :

Présidente	N. RAMDANE	MCA	Univ.20 Aout 1955
Examinatrice	A. CHELGHAM	Magister	Univ.20 Aout 1955
Encadreur	Z. HOUÏENE	MCA	Univ.20 Aout 1955
Co-encadreur	Z. MARSA	MCA	Univ.20 Aout 1955

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciements

Je remercie avant tout **Allah**, l'Omniscient et le Sage, car c'est par Sa volonté et sa bénédiction que nous avons pu achever ce travail.

Je tiens énormément à exprimer ma profonde gratitude à mes encadrantes, **Dr. HOUIENE Zahia** et **Dr. MARSZA Zoubida**, pour leur accompagnement bienveillant, leur patience, ainsi que leurs conseils éclairés tout au long de ce travail. Leur soutien a été d'une valeur inestimable.

J'adresse également mes remerciements les plus sincères aux membres du jury, **Dr. Ramdane Nassima** et **Mme CHELGHAM Amel** pour l'honneur qu'elles m'ont fait en acceptant d'évaluer ce mémoire avec attention et considération.

Je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, au bon déroulement de mon stage au sein de l'entreprise SONATRACH. Leur appui précieux, leurs compétences partagées et leurs encouragements constants ont largement enrichi mon parcours professionnel.

Je voudrais exprimer toutes mes gratitudes aux enseignants du département de pétrochimie université 20 Août 1955 Skikda.

Dédicace

Je dédie ce travail :

À mes parents, ma vie, mon pilier et ma force, pour leur patience, leurs sacrifices et leurs prières qui m'ont portée jusqu'à ce jour.

À ma sœur KHAOULA et mon frère BILEL, mes yeux, pour leur amour et leur soutien inconditionnels.

À mes enseignants, qui m'ont accompagnée, soutenue et guidée tout au long de mon parcours scolaire et universitaire.

Letaren Aya

Titre	Page
Liste des figures	I
Liste des tableaux	III
Liste des abréviations	IV
Résumés	V
Introduction générale	1

Chapitre I : Généralités sur le bac de stockage

I.1. Introduction	3
I.2. La raffinerie de Skikda (RA1K)	3
I.3. Situation géographique	4
I.4. Présentation de l'unité de stockage	4
I.4.1. Bacs de stockage	4
I.4.2. Stockage des hydrocarbures	5
I.4.3. Historique des bacs de stockage	5
I.4.4. Rôle du stockage	5
I.5. Types de réservoirs de stockage	6
I.5.1. Réservoirs cylindriques verticaux	6
I.5.2. Réservoirs cylindriques horizontaux	8
I.5.3. Réservoirs sphériques	9
I.6. Equipements des bacs	10
I.7. Accessoires des réservoirs de stockage	10
I.8. Conclusion	12

Chapitre II : Généralités sur la corrosion

II.1. Introduction	13
II.2. Définition de la corrosion	13
II.3. Tendance de la corrosion (processus)	13
II.4. Aspect économique de la corrosion	14
II.5. Les formes de corrosion	16
II.6. Les facteurs de corrosion	21

II.7. Effets et enjeux de la corrosion	21
II.8. Protection et lutte contre la corrosion	23
II.8.1.1 Méthodes de prévention contre la corrosion	23
II.8.1.2. Protection passive (revêtement)	24
II.8.1.3. par l'utilisation d'inhibiteurs	25
II.9. Conclusion	39

Chapitre III : Partie expérimentale

III.1.Introduction	40
III.2. Produits chimiques utilisés	
III.3. Acier A283 Gr-C (pour le bac de stockage)	40
III.3.1. Préparation du matériau	41
III.4. Préparation des solutions utilisées	43
III.4.1. Préparation de l'acide chlorhydrique (HCl)	43
III.5. Préparation de l'inhibiteur " <i>Reichardia picroides</i> "	44
III.6. Mode opératoire	44
III.6.1. Sans Inhibiteur	44
III.6.2. Avec Inhibiteur	44
III.6.3. Avec Inhibiteur et température égale à 35C°	45
III.6.4. Avec Inhibiteur et température égale à 45C°	45
III.7. Méthodes	46
III.8. Solution de l'acide chlorhydrique (HCl)	48
III.8.1. Sans Inhibiteur	48
III.8.2. Avec Inhibiteur " <i>Reichardia picroides</i> " a 25 °C	50
III.8.3. Avec Inhibiteur " <i>Reichardia picroides</i> " a 35 °C	52
III.8.3. Avec Inhibiteur " <i>Reichardia picroides</i> " a 45 °C	55
III.9. Conclusion	60
Conclusion générale	61
Références bibliographiques	62

N° figure	Titre	Page
Chapitre I		
I.1	Situation géographique de la raffinerie Skikda RA1K	4
I.2	Réservoirs à toit fixe	6
I.3	Réservoirs à toit flottant	7
I.4	Réservoirs horizontaux	8
I.5	Réservoirs sphériques	9
I.6	Protection des bacs contre la corrosion	10
Chapitre II		
II.1	Forme de la corrosion uniforme	16
II.2	Corrosion localisé	17
II.3	Corrosion galvanique	18
II.4	Corrosion galvanique	18
II.5	Corrosion caverneuse des aciers inoxydables	19
II.6	Corrosion sélective	20
II.7	Corrosion sous contrainte dans une structure soudée d'acier allié	20
II.8	Métal au contact d'un milieu agressif	26
II.9	Classement des inhibiteurs de corrosion	29
II.10	Représentation du processus d'inhibition cathodique, (a) sans inhibiteur, (b) avec inhibiteur	33
II.11	Diagrammes d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur de corrosion	34
II.12	Représentation schématique des modes d'adsorption de molécules organiques inhibitrices sur une surface métallique	35
II.13	Mécanisme d'action des inhibiteur organique	35
Chapitre III		
III.1	L'acier A283 Gr-C	41
III.2	Polisseuse	42
III.3	Acier A283 Gr-C préparés pour le travail	42
III.4	Microscope métallographique	42
III.5	Pied à coulisse	43
III.6	Préparation de la solution corrosive HCl	43

III.7	Echantillons d'acier sans l'inhibiteur	44
III.8	Echantillons d'acier avec l'inhibiteur	45
III.9	Echantillon avant et après examen au microscope métallographique	46
III.10	La perte de masse (Δm) en fonction de temps (t)	49
III.11	La vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction de temps (t)	49
III.12	La perte de masse (Δ_m) en fonction du la masse d'inhibiteur (M_i)	51
III.13	La vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction du la masse d'inhibiteur (M_i)	51
III.14	L'efficacité inhibitrice (EI%) en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i)	52
III.15	La perte de masse (Δm) en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i)	53
III.16	La vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i)	
III.17	L'efficacité inhibitrice (EI%) en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i)	55
III.18	La perte de masse (Δm) en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i)	56
III.19	La vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i)	56
III.20	L'efficacité inhibitrice (EI%) en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i)	57
III.21	La perte de masse (Δm) en fonction de la masse d'inhibiteur(M_i)	58
III.22	La vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction de la masse d'inhibiteur(M_i)	59
III.23	L'efficacité inhibitrice (EI%) en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i)	60

N° Tableaux	Titre	Page
Chapitre II		
I.1	Les facteurs de corrosion	21
I.2	Résistance à la corrosion de certains métaux dans les milieux corrosifs	24
Chapitre III		
II.1	Les produits chimiques utilisés et leurs propriétés physicochimiques	40
II.2	Composition chimique de l'acier A283 Gr-C	40
II.3	Propriétés mécaniques de l'acier A283 Gr-C	41
II.4	Variation de la perte de masse (Δm) et la vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction du temps (t)	48
II.5	Variation de la perte de masse (Δm) en fonction de la masse de l'inhibiteur (g) et la vitesse de corrosion (V_{corr}) et L'efficacité inhibitrice (E_i %)	50
II.6	Variation de la perte de masse (Δm) en fonction de la masse de l'inhibiteur (g) et la vitesse de corrosion (V_{corr}) et L'efficacité inhibitrice (E_i %) à la température (35 C°)	53
II.7	Variation de la perte de masse (Δm) en fonction de la masse de l'inhibiteur (g) et la vitesse de corrosion (V_{corr}) et L'efficacité inhibitrice (E_i %) à la température (45 C°)	55
II.8	Variation de la perte de masse (Δm) en fonction de la masse de l'inhibiteur (g) pour les trois températures (25 C°) et (35 C°) et (45 C°)	58
II.9	Variation de la vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction de la masse de l'inhibiteur (g) à les trois températures (25 C°) et (35 C°) et (45 C°)	59
II.10	Variation de L'efficacité inhibitrice (E_i %) en fonction de la masse de l'inhibiteur (g) à de températures (25 C°) et (35 C°) et (45 C°)	60

Symbole et abréviation	Signification
RA1K	La raffinerie de Skikda (RA1K)
H₂O	L'eau
O₂	l'oxygène
H₂	l'hydrogène
SO₂	Le dioxyde de soufre
U.V	Ultraviolet
NACE	National Association of Corrosion Engineers
V	Le volume de solution corrosive utilisée
Δm	La perte de masse
V_{corr}	La vitesse de corrosion
EI %	L'efficacité inhibitrice
m₁	La masse avant l'essai en gramme (g)
m₂	la masse après l'essai en gramme (g)
S	la surface de l'échantillon
t	le temps en heure (h)
V sans	La vitesse de corrosion de l'acier sans inhibiteur
V avec	La vitesse de corrosion de l'acier avec inhibiteur
T	Température

Résumé

Les inhibiteurs sont l'une des méthodes les plus courantes pour protéger les métaux contre la corrosion. Cependant, la plupart d'entre eux contiennent des substances toxiques ou cancérigènes et présentent un risque pour l'environnement. C'est pourquoi de nombreux chercheurs se sont tournés vers le développement de méthodes alternatives à base d'extraits végétaux respectueux de l'environnement pour protéger les métaux. Cette étude vise à étudier l'efficacité d'un inhibiteur dérivé de l'extrait de *reichardia picroides* pour réduire la corrosion de l'acier en milieu acide chlorhydrique (HCl).

La méthode de perte de masse (Δm), l'une des méthodes les plus utilisées dans le domaine industriel, a été adoptée. La corrosion est évaluée en calculant la vitesse de corrosion (V_{corr}) et l'efficacité de l'inhibiteur (EI).

Les résultats obtenus en milieu (HCl) ont montré une nette diminution de la vitesse de corrosion en présence de l'inhibiteur à tous les temps étudiés et pour différentes masses d'inhibiteur. Il a également été observé que l'efficacité de l'inhibiteur augmentait avec la température, démontrant ainsi son efficacité à réduire la corrosion.

Mots-clés : Corrosion, inhibiteurs verts, acier, acide chlorhydrique, perte de masse, efficacité d'inhibition, température .

المخلص

تُعد المثبطات من أكثر الطرق شيوعًا لحماية المعادن من التآكل، إلا أن معظمها يحتوي على مواد سامة أو مسرطنة وتُشكل خطرًا على البيئة. لهذا السبب، اتجه العديد من الباحثين إلى تطوير طرق بديلة تعتمد على مستخلصات نباتية صديقة للبيئة لحماية المعادن. يهدف هذا البحث إلى دراسة فعالية مثبط مشتق من (HCl) مستخلص نبات الحرشة في الحد من تآكل الفولاذ في وسط حمض الهيدروكلوريك.

، وهي من أكثر الطرق استعمالًا في المجال الصناعي، حيث يتم تقييم (Δm) تم اعتماد طريقة فقدان الكتلة (EI) وكفاءة المثبط (V_{corr}) التآكل من خلال حساب سرعة التآكل.

انخفاضًا واضحًا في سرعة التآكل بوجود المثبط في (HCl) أظهرت النتائج المتحصل عليها في وسط جميع الأزمنة المدروسة ومع اختلاف كتلة المثبط. كما لوحظ أن كفاءة التثبيط تزداد مع ارتفاع درجة الحرارة، مما يدل على فعالية المثبط في الحد من التآكل.

الكلمات المفتاحية : التآكل، مثبطات خضراء، الفولاذ، حمض الهيدروكلوريك، فقدان الكتلة، كفاءة التثبيط، درجة الحرارة .

Abstract

Inhibitors are one of the most common methods for protecting metals against corrosion. However, most of them contain toxic or carcinogenic substances and pose a risk to the environment. Therefore, many researchers have turned to developing alternative methods based on environmentally friendly plant extracts to protect metals. This study aimed to investigate the effectiveness of an inhibitor derived from *reichardia picroides* extract in reducing steel corrosion in a hydrochloric acid (HCl) medium.

The mass loss (Δm) method, one of the most widely used methods in the industrial field, was adopted. Corrosion is assessed by calculating the corrosion rate (V_{corr}) and the inhibitor effectiveness (EI).

The results obtained in (HCl) medium showed a significant decrease in the corrosion rate in the presence of the inhibitor at all times studied and for different inhibitor masses. It was also observed that the effectiveness of the inhibitor increased with temperature, thus demonstrating its effectiveness in reducing corrosion.

Keywords : Corrosion, green inhibitors, steel, hydrochloric acid, mass loss, inhibition efficiency, temperature .

Introduction générale

Introduction générale

Les réservoirs de stockage jouent un rôle essentiel dans l'exploitation des champs pétroliers, car ils permettent d'assurer la continuité de la production. Toutefois, un grand nombre de ces réservoirs dépasse la durée de vie prévue pour leur utilisation. Malgré cela, ils demeurent fonctionnels, à condition de faire l'objet d'un suivi rigoureux de leur état ainsi que d'une politique de maintenance appropriée.

En général, les réservoirs ayant plus de dix ans de service commencent à présenter divers types de dégradations, notamment la corrosion et l'apparition de fissures. Ces dernières peuvent évoluer à partir de tailles critiques initiales, entraînant des fuites ou une propagation accélérée, en particulier au niveau des tôles de faible épaisseur.

La corrosion est un phénomène d'altération des métaux sous l'effet de l'environnement. Il s'agit d'un processus spontané se produisant à l'interface métal/milieu, de nature chimique ou électrochimique. Cette altération engendre une dégradation rapide des structures métalliques, occasionnant ainsi des pertes économiques considérables pour l'industrie, liées au remplacement des pièces endommagées. Les coûts directs et indirects associés à la corrosion sont difficiles à quantifier, car ils englobent notamment les dépenses d'entretien accru des structures dégradées et les pertes de production.

Les inhibiteurs de corrosion sont des composés capables d'interférer avec les réactions anodiques et cathodiques, formant une barrière protectrice à la surface du métal face aux agents corrosifs. La structure moléculaire de ces inhibiteurs joue un rôle déterminant dans leur efficacité. Dans le but d'étudier l'effet de la structure des inhibiteurs organiques sur la protection contre la corrosion, notre choix s'est porté sur la plante *Reichardia picroides*, tandis que le milieu corrosif utilisé est une solution d'acide chlorhydrique (HCl).

Le travail présenté dans ce mémoire est structuré en trois chapitres. Le **premier chapitre** est consacré à la présentation de la raffinerie de Skikda (RAIK), ainsi qu'à des généralités sur les bacs de stockage. Le **deuxième chapitre** traite des généralités sur la corrosion, en mettant en évidence ses mécanismes, ses différentes formes et son impact sur les structures métalliques.

Le **troisième chapitre** comporte la partie expérimentale, dans laquelle sont présentés les résultats obtenus, accompagnés de leur analyse et discussion.

Enfin, une conclusion générale clôture ce mémoire.

Chapitre I
Généralités sur le bac de
stockage

I.1. Introduction

La Société Nationale de Raffinage du Pétrole exploite cinq raffineries réparties dans plusieurs villes d'Algérie, avec une capacité totale de raffinage estimée à 28 millions de tonnes par an. Parmi ces raffineries, celle de Skikda se distingue par le traitement de différents types de pétrole brut, notamment du brut importé, transformé en bitume routier et en bitume oxydé. Elle transforme également le naphta en essence et en produits aromatiques, tout en raffinant le pétrole brut de Hassi Messaoud afin de répondre aux besoins du marché local.

Les opérations de la raffinerie reposent sur des technologies avancées telles que la distillation, le craquage et le reformage, qui permettent d'améliorer les propriétés physico-chimiques des produits finis.

I.2. La raffinerie de Skikda (RA1K)

La raffinerie de Skikda est la plus grande raffinerie de pétrole en Algérie. Mise en service en 1979, elle est exploitée actuellement par Sonatrach. Elle dispose d'une capacité de traitement d'environ 16,5 millions de tonnes de pétrole brut par an, ainsi que de 277 000 tonnes de brut importé. La raffinerie s'étend sur une superficie de 190 hectares et emploie près de 1 280 personnes.

L'approvisionnement en pétrole brut algérien s'effectue via un oléoduc de 27 pouces de diamètre, reliant Hassi Messaoud à Skikda sur une distance de 640 kilomètres.

Les principales missions de la raffinerie incluent :

- le raffinage du pétrole brut en provenance de Hassi Messaoud ;
- le traitement du naphta pour la production d'essence et de composés aromatiques ;
- le traitement de brut réduit importé pour la production de bitume oxydé utilisé dans les travaux de voirie.

Elle vise également à satisfaire la demande nationale en produits raffinés, tant sur le plan quantitatif que qualitatif, tout en assurant l'exportation de produits conformes aux normes internationales.

I.3. Situation géographique

La raffinerie de Skikda est située dans la zone industrielle à l'est de la ville de Skikda, à seulement 7 kilomètres du centre-ville et à 2 kilomètres de la mer. Cette localisation stratégique en bord de mer lui offre un accès direct au port de Skikda, facilitant l'accueil de pétroliers de grande capacité et l'exportation des produits finis.

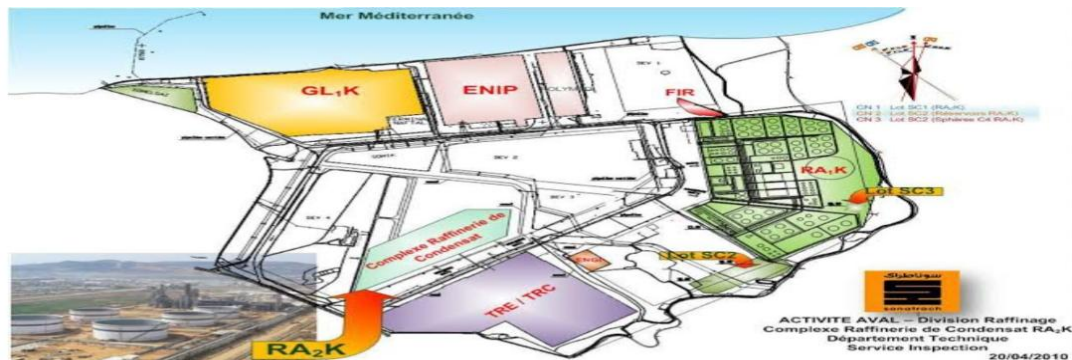


Figure I.1 : Situation géographique de la raffinée Skikda RA1K.

I.4. Présentation de l'unité de stockage

I.4.1. Bacs de stockage

La raffinerie de Skikda compte un total de 124 bacs de stockage, dont 4 sont implantés au niveau des ports. Sa capacité globale de stockage atteint 2,5 millions de tonnes de produits. Elle dispose par ailleurs d'une autonomie de stockage en pétrole brut estimée à environ 1,5 jour.

On distingue cinq types de bacs de stockage :

- Bacs à toit flottant
- Bacs à toit fixe
- Bacs à toit bombé semi-sphérique (utilisés pour le pentane)
- Bacs sphériques (utilisés pour le butane)
- Bacs en forme de cigare (utilisés pour le propane)

I.4.2. Stockage des hydrocarbures

L'industrie pétrolière se caractérise par la production de quantités importantes d'hydrocarbures, disponibles sous forme liquide ou gazeuse, nécessitant des capacités de stockage considérables. À cet effet, on utilise des réservoirs de stockage d'une capacité variant de 30 000 à 50 000 m³, voire jusqu'à 100 000 m³ [1].

I.4.3. Historique des bacs de stockage

Les bacs de stockage d'hydrocarbures existent depuis plusieurs décennies, et les technologies dans ce domaine ont connu des évolutions significatives. Les premiers bacs remontent aux débuts de l'industrie pétrolière, où l'on utilisait des réservoirs en acier ou en béton pour stocker le pétrole brut et d'autres produits pétroliers [2].

Les avancées technologiques ont joué un rôle majeur dans cette évolution : des systèmes de surveillance avancés, des matériaux de construction plus résistants et des techniques de maintenance préventive ont été développés pour renforcer la sécurité et l'efficacité des installations de stockage [3].

Plus récemment, l'introduction de matériaux composites et de revêtements spécifiques a permis de prolonger la durée de vie des bacs et de réduire les risques de fuites ou de défaillances structurelles [4].

I.4.4. Rôle du stockage

En raison de leur fonction essentielle, les réservoirs de stockage sont considérés comme des infrastructures stratégiques et économiquement rentables, générant des revenus à travers les frais appliqués lors du retrait des produits. Cette rentabilité bénéficie aux investisseurs initiaux.

Toutefois, leur utilisation nécessite la mise en œuvre de mesures de sécurité strictes, notamment pour limiter l'évaporation des produits stockés et maintenir la fluidité de certaines substances grâce à un système de réchauffage, lorsque cela s'avère nécessaire.

I.5. Types de réservoirs de stockage

La conception et l'installation des réservoirs reposent principalement sur deux objectifs :

1. Préserver le produit stocké en réduisant ou en empêchant son évaporation, afin d'assurer sa conservation et de limiter les pertes ;
2. Garantir la résistance du réservoir à la pression interne générée par le produit, ou maintenir une pression constante pour faciliter son utilisation ou son transport.

En raison de leur simplicité de fabrication et de leur bonne résistance à la pression interne, les réservoirs cylindriques sont les plus couramment utilisés. Cependant, les réservoirs sphériques, qui supportent mieux les hautes pressions, permettent de réduire l'épaisseur des parois et sont préférés dans certains cas spécifiques [5].

I.5.1. Réservoirs cylindriques verticaux

Ces dispositifs, communément appelés réservoirs verticaux, reposent directement sur le sol ou sur une base, à l'aide d'un fond plat. Ils sont généralement équipés soit :

- d'un toit fixe (conique ou sphérique),
- soit d'un toit flottant, qui suit le niveau du liquide en se déplaçant verticalement à l'intérieur de la paroi du réservoir [5].

I.5.1.1. Réservoir à toit fixe

Les réservoirs à toit fixe sont dotés d'une couverture rigide qui protège les produits stockés, notamment ceux qui sont peu volatils, dangereux ou polluants. Ce type de toit empêche l'infiltration de contaminants extérieurs, assurant ainsi une meilleure conservation du produit. La structure du toit est généralement métallique, soutenue par plusieurs colonnes qui reposent directement sur le fond du réservoir.

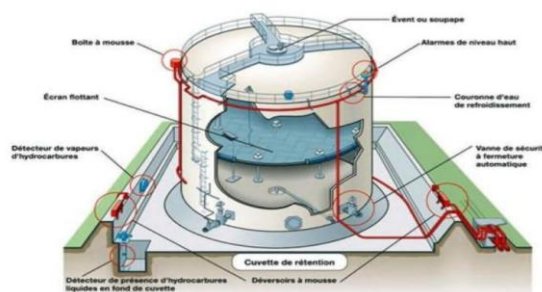


Figure I.2 : Réservoir à toit fixe.

I.5.1.2. Réservoirs à toit flottant

Les réservoirs à toit flottant sont constitués d'une structure mobile qui se déplace verticalement en fonction du niveau du liquide stocké. Grâce à leur grande efficacité dans la réduction des pertes par évaporation, ils sont principalement utilisés pour le stockage de produits très volatils. Leur capacité peut être très élevée, atteignant jusqu'à **500 000 barils**.

On distingue deux principaux types de réservoirs à toit flottant :

•Réservoirs à toit flottant externe :

Dans ce type de réservoir, le toit est exposé à l'air libre et repose directement sur la surface du liquide. Il n'existe pratiquement aucun espace de vapeur entre le liquide et le toit, ce qui permet de réduire de manière significative les pertes par évaporation ainsi que les risques d'inflammation. Ce type est particulièrement adapté aux zones non soumises à des conditions climatiques extrêmes.

•Réservoirs à toit flottant interne :

Ces réservoirs sont dotés d'un toit fixe sous lequel est installé un toit flottant interne, mobile, qui suit le niveau du liquide. Ce système offre une double protection : le toit fixe limite l'exposition aux éléments extérieurs (pluie, vent, poussière), tandis que le toit flottant interne réduit l'évaporation. Ce type est souvent utilisé dans des environnements sensibles, où la protection du produit et la sécurité environnementale sont des priorités.

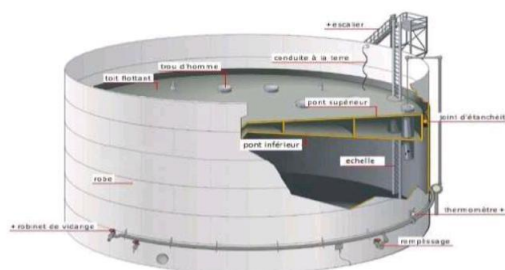


Figure I.3 : Réservoirs à toit flottant .

I.5.2. Réservoirs cylindriques horizontaux

Les réservoirs cylindriques horizontaux, dotés de fonds emboutis de forme hémisphérique ou elliptique et installés sur des supports appelés **berceaux**, sont conçus pour le stockage de fluides sous haute pression. Leur capacité de stockage est généralement plus limitée que celle des réservoirs verticaux.

Ils sont particulièrement efficaces dans les cas où la consommation de fluide est faible et où celui-ci présente un faible poids spécifique. Ces caractéristiques font des réservoirs horizontaux une solution idéale pour des applications spécifiques nécessitant des conditions de stockage sous pression, comme le stockage de certains gaz liquéfiés ou de produits chimiques sensibles.

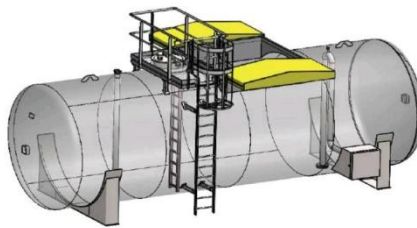


Figure I.4 : Réservoirs horizontaux .

I.5.3. Réservoirs sphériques

Appelés aussi sphère, ils sont principalement utilisés pour le stockage de gaz sous haute pression, notamment les gaz de pétrole liquéfiés (GPL). Ils sont généralement soutenus par des poteaux, mais peuvent aussi reposer sur une base en béton ou une jupe métallique située sous leur partie inférieure.

La forme sphérique est particulièrement adaptée pour résister à des pressions élevées, car elle répartit uniformément les contraintes dans toutes les directions. Cela confère à ces réservoirs une grande capacité de résistance aux pressions extrêmes. De plus, leur conception permet un stockage à grande capacité de manière économique et sécurisée.



Figure I.5 : Réservoirs sphériques .

I.6. Equipements des bacs

I.6.1. La robe : est une paroi verticale fabriquée à partir de tôles cintrées pour s'adapter au diamètre du réservoir.

I.6.2. La virole : C'est un anneau constitué de tôles, dont la succession forme la robe.

I.6.3. La cuvette : C'est un compartiment construit autour d'un bac ou d'un ensemble de bacs afin de contenir leur contenu en cas de fuite accidentelle.

I.6.4. L'assise : Dans ce contexte, l'assise représente la base sur laquelle est construite une structure architecturale ou un bâtiment. Réalisée en béton armé ou en maçonnerie, elle assure un support robuste et garantit la stabilité de l'ensemble.

I.6.5. Le fond : Il s'agit de la base d'un récipient ou d'un réservoir, généralement fabriquée en métal ou en plastique, composée d'un ensemble de tôles, offrant une surface stable et résistante permettant un stockage sécurisé de divers matériaux ou produits.

I.6.6. Le toit : C'est la partie supérieure du réservoir, composée d'un assemblage de tôles. Il peut être fixe ou flottant.

I.7. Accessoires des réservoirs de stockage

I.7.1. Accessoires d'accès

Les escaliers : qu'ils soient de forme hélicoïdale ou verticale, sont conçus pour faciliter l'accès aux opérations de vérification, de contrôle, de réparation et de nettoyage.

L'échelle basculante : est conçue pour changer de position en même temps que le déplacement d'un toit flottant, garantissant ainsi un accès sécurisé.

Trappes d'accès : Ces ouvertures permettent l'accès à l'intérieur du réservoir aux agents chargés de l'entretien, du nettoyage et de la réparation. On distingue deux types d'accès :

- Accès au réservoir à partir du toit.
- Accès à partir de la robe du réservoir.

I.7.2. Accessoires de protection contre la corrosion

-La protection passive du réservoir se fait par application d'une couche de peinture accompagnée d'une protection cathodique par anode.

-La protection extérieure du réservoir est obtenue par soutirage du courant.

-La surface intérieure du fond du réservoir n'est pas protégée par cathode, mais on prévoit une couche de résine époxy contre la corrosion interne due à la composition chimique du produit stocké telle que la teneur en sels et sulfures [6].

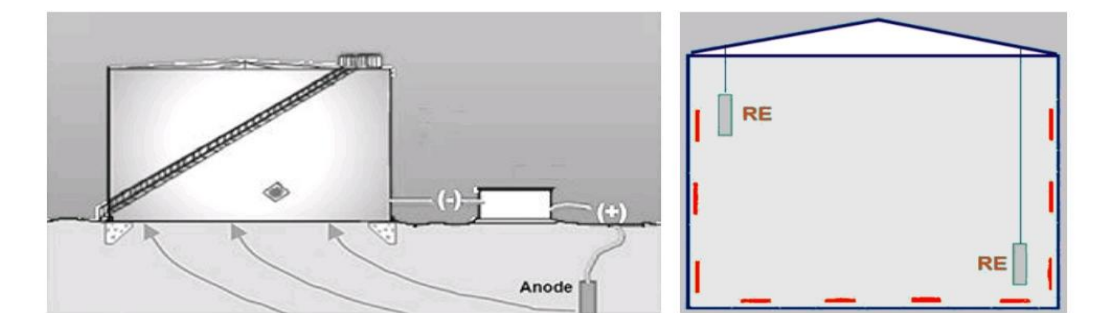


Figure I.6 : Protection des bacs contre la corrosion .

I.7.3. Accessoires de contrôle

I.7.3.1. Manomètre : Le manomètre, ou indicateur de pression, est utilisé pour surveiller et contrôler la pression à l'intérieur du bac, afin de maintenir une pression d'épreuve constante.

I.7.3.2. Dispositif de prise d'échantillon : Le dispositif de prise d'échantillon sert à prélever des échantillons, à mesurer et analyser les caractéristiques du produit, ainsi qu'à relever la température.

I.7.3.3. Le dispositif de purge : Il permet l'évacuation des impuretés accumulées au fond du réservoir avec le produit. Le liquide ainsi drainé est dirigé vers les réseaux d'huiles, puis acheminé vers un séparateur.

I.7.3.4. L'indicateur de niveau : permet de mesurer le niveau du liquide à l'intérieur du réservoir ainsi que le volume du produit lors des opérations de remplissage ou de vidange. Cette mesure peut être réalisée à l'aide d'un indicateur à flotteur, qui suit le niveau du liquide en temps réel. En l'absence de flotteur, une jauge manuelle est utilisée pour déterminer le niveau du produit.

I.7.4. Accessoires de lutte contre la surpression

I.7.4.1. Les événements : sont des ouvertures permanentes placées dans la partie supérieure du réservoir, conçues pour évacuer l'excès de vapeurs d'hydrocarbures, notamment par temps chaud.

I.7.4.2. Les soupapes : sont des dispositifs automatiques conçus pour libérer l'excès de vapeur lorsque la pression de la phase gazeuse à l'intérieur du réservoir atteint une valeur limite, appelée pression de tarage.

I.7.5. Accessoires de sécurité

I.7.5.1. Les vannes de sécurité : sont conçues pour protéger le réservoir contre les surpressions et les dépressions. Elles sont au nombre de deux : une vanne de sécurité située dans la zone annulaire, entre le toit flottant et la robe, et une vanne de décharge automatique.

I.7.5.2. Les dispositifs d'alarme NH et NB : émettent un signal sonore dès que le produit atteint son niveau haut (NH) ou son niveau bas (NB).

I.7.5.3. La cuvette de rétention : est conçue pour recueillir jusqu'à 75 % du contenu du réservoir en cas de fuite. Lorsqu'une cuvette regroupe plusieurs réservoirs, elle doit être subdivisée en compartiments, dont le nombre est déterminé en fonction de la capacité totale des réservoirs qu'elle contient.

I.7.5.4. Le réseau d'incendie : est composé de conduites d'eau et de mousse, alimentées sous pression par un système de pompes pour assurer une couverture efficace en cas d'incendie.

I.8. Conclusion

Les bacs de stockage jouent un rôle essentiel dans la sécurisation des produits et la protection de l'environnement. Ils permettent de limiter les risques d'incendie, d'explosion, ainsi que les risques naturels et liés à la sûreté, garantissant ainsi une gestion sécurisée des substances dangereuses. Leur conception, conforme aux normes en vigueur, contribue également à la réduction des émissions de vapeurs toxiques dans l'atmosphère, participant à la préservation de la santé publique et de l'environnement.

Chapitre II
Généralités sur la
corrosion

II.1. Introduction

Comme tous les matériaux de construction, l'acier tend à se dégrader superficiellement lorsqu'il est exposé à des milieux corrosifs tels que le sol, l'air ou le milieu marin. La corrosion désigne la détérioration des matériaux résultant d'interactions chimiques ou électrochimiques avec leur environnement. Ce phénomène entraîne une altération progressive des propriétés du métal, notamment de ses caractéristiques mécaniques, électriques ou encore structurelles. Les mécanismes mis en jeu sont variés et peuvent conduire à différents types de corrosion, chacun présentant des formes et des effets spécifiques.

II.2. Définition de la corrosion

Selon la définition établie par la norme internationale **ISO 8044** [AFNOR, 2000], la corrosion est une interaction physico-chimique entre un métal et son environnement, entraînant des modifications des propriétés du métal, souvent accompagnées d'une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement, ou du système technique formé par les deux [7].

Comme tout autre phénomène naturel, les processus de corrosion obéissent aux lois de la thermodynamique. Le métal a tendance à revenir à son état d'origine, c'est-à-dire à des formes plus stables telles qu'elles existent dans la nature. Ce comportement s'explique par le fait que, à l'exception des métaux nobles (comme l'or ou le platine) qui se trouvent à l'état natif, la majorité des métaux présents sur Terre se rencontrent sous forme de composés minéraux : oxydes, sulfures, carbonates ou silicates [8].

II.3. Tendance de la corrosion (processus)

Dans la nature, les métaux se trouvent généralement sous forme de minerais, c'est-à-dire d'oxydes métalliques ou de sels. Ces formes représentent l'état énergétique le plus faible, donc le plus stable. Pour obtenir des métaux à partir de ces minerais, un apport d'énergie considérable est nécessaire, ce qui place le métal produit dans un état riche en énergie et thermodynamiquement instable.

C'est pourquoi la plupart des métaux usuels ont naturellement tendance à retourner à leur forme stable — à faible énergie — en se transformant à nouveau en oxydes, en sels ou en minerais, sous l'action de leur environnement [9].

II.4. Aspect économique de la corrosion

La corrosion représente un enjeu majeur à l'échelle mondiale. On estime qu'environ **cinq tonnes d'acier disparaissent chaque seconde** sous l'effet de la corrosion — bien qu'il s'agisse d'une couche très fine, elle affecte une multitude d'objets, d'équipements et de structures en acier répartis dans le monde entier. Ce phénomène constitue donc non seulement un **problème économique** de grande ampleur, mais également un **risque important en matière de sécurité** et de **protection de l'environnement**.

Les conséquences de la corrosion peuvent être particulièrement graves :

- **Risques pour la sécurité** : elle peut provoquer la rupture de pièces critiques, de structures métalliques ou de réservoirs sous pression, menaçant directement l'intégrité des installations industrielles et des infrastructures de transport.
- **Risques environnementaux et sanitaires** : la corrosion peut entraîner des fuites de substances toxiques, contaminant les sols, les nappes phréatiques ou les écosystèmes voisins. La toxicité des oxydes métalliques produits, ainsi que celle des inhibiteurs chimiques utilisés pour lutter contre la corrosion, pose également un problème de santé publique.
- **Pertes de ressources** : les fuites et ruptures engendrent des déversements importants de ressources naturelles (hydrocarbures, gaz, produits chimiques), entraînant des pertes économiques considérables.
- **Accidents graves** : dans certains cas, la corrosion peut provoquer des incidents majeurs, voire mortels, à cause de l'altération progressive des matériaux : diminution d'épaisseur, formation de piqûres (picots), ou apparition de **fissures de corrosion sous contrainte**, notamment au niveau ou à proximité des soudures.

Enfin, il est estimé que **près de 30 % des pertes liées à la corrosion pourraient être évitées** grâce à une meilleure connaissance du phénomène, à un suivi rigoureux des équipements et à l'application de techniques de protection adaptées.

Ces pertes sont de différents types :

► Pertes directes :

- Coût des équipements à remplacer.

- Coût de l'entretien et du contrôle.
- Surcôt dû à l'emploi de matériaux plus nobles.

► Pertes indirectes :

- Arrêt de la production.
- Perte d'énergie.
- Surépaisseur importante .

On distingue trois types de corrosion : la corrosion chimique, la corrosion électrochimique et la corrosion bactérienne.

- Corrosion chimique

La corrosion est une **réaction hétérogène** mettant en jeu une **phase solide**, le métal, et une **phase gazeuse ou liquide**. Lorsque le réactif est gazeux, on parle de **corrosion sèche**, qui se caractérise par une interaction directe entre le métal et le gaz oxydant, généralement à haute température. En revanche, si le réactif est un liquide, il s'agit d'une **corrosion humide**, impliquant une attaque du métal avec formation d'un produit de corrosion à la surface même du matériau.

Il convient de noter que la **corrosion purement chimique** ne fait pas intervenir le passage de courant électrique. Elle se distingue donc des mécanismes électrochimiques observés dans d'autres formes de corrosion, notamment en milieu aqueux [10].

- Corrosion électrochimique

Corrosion électrochimique et corrosion biochimique

La **corrosion électrochimique**, également appelée **corrosion humide**, est le type de corrosion le plus courant et le plus significatif. Elle repose sur l'**oxydation du métal** en ions métalliques ou en oxydes. Ce phénomène met en jeu à la fois une **réaction chimique** et un **transfert de charges électriques**, c'est-à-dire la circulation d'un courant électrique. La présence d'un **agent oxydant** ou **réducteur** tel que l'eau (H_2O), l'oxygène (O_2) ou l'hydrogène (H_2) est indispensable pour que la corrosion puisse se produire [11].

Corrosion biochimique

La **corrosion biochimique** est un processus de détérioration des métaux provoqué par l'**activité d'organismes vivants**. Ces organismes peuvent être :

- **Des micro-organismes**, comme certaines **bactéries** (ex. : *Desulfovibrio*),
- **Des macro-organismes**, tels que **les moules, algues ou lichens**.

Ces êtres vivants sont capables de se développer dans des conditions extrêmes, avec des pH variant de **0 à 11**, des températures allant de **-10 °C à +80 °C**, et sous des pressions de plusieurs centaines de bars [10]. Ils altèrent les surfaces métalliques par des mécanismes biologiques ou biochimiques, contribuant à des formes de corrosion localisée ou accélérée.

II.5. Les formes de corrosion

Le processus de corrosion peut se manifester sous différentes formes, selon la manière dont l'altération se développe à la surface du métal. Ces formes sont généralement classées en fonction de leur **morphologie apparente** et de leur **impact sur l'intégrité structurelle**.

II.5.1. Corrosion généralisée (ou uniforme)

La **corrosion uniforme** est la forme la plus répandue et la plus facile à identifier. Elle affecte **l'ensemble de la surface métallique de manière homogène**, entraînant la formation d'une couche d'**oxyde de fer**, communément appelée **rouille**. Cette attaque généralisée provoque une **diminution progressive de l'épaisseur** du métal, qui peut être quantifiée en **micromètres par an ($\mu\text{m}/\text{an}$)**. Cette mesure permet d'évaluer la **durée de vie estimée** d'un composant ou d'une structure métallique .



Figure II.1 : Forme de la corrosion uniforme

II.5.2. Corrosion localisée (par piqûres)

La **corrosion localisée** désigne une forme de corrosion qui ne se répartit pas de manière uniforme sur la surface métallique, mais se concentre sur de petites zones bien définies. Lorsqu'une attaque localisée présente une **profondeur supérieure à son diamètre**, on parle alors de **corrosion par piqûres**.

Cette forme de corrosion est souvent considérée comme **l'une des plus dangereuses**, car elle engendre des **perforations profondes** susceptibles de s'**auto-entretenir**, entraînant ainsi la **dégradation rapide** et parfois **invisible** des composants métalliques.

Les **métaux et alliages passivés** — comme l'**aluminium**, le **titane** et les **aciers inoxydables** — sont particulièrement vulnérables à ce type de corrosion. En effet, dès que leur **fine couche protectrice d'oxyde** est localement altérée (par des ions chlorure, des contraintes mécaniques ou des défauts de surface), le métal sous-jacent devient exposé à une attaque accélérée.

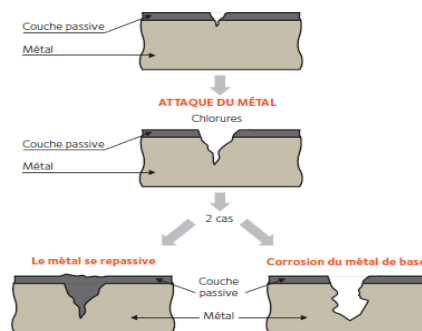


Figure II.2 : Corrosion localisé .

II.5.3. La corrosion galvanique

La **corrosion galvanique** est un phénomène courant dans les structures métalliques, pouvant entraîner des **dommages significatifs**. Ce processus électrochimique se produit lorsque **deux métaux de nature différente** sont mis en contact dans un **milieu conducteur**, tel qu'un liquide, un sol humide ou une atmosphère chargée d'humidité.

Dans ce contexte, l'un des deux métaux — appelé **anode** — se **corrode préférentiellement**, tandis que l'autre — la **cathode** — est protégé. Le métal le plus électropositif (dans la série

électrochimique) joue généralement le rôle d'anode. Ce phénomène est amplifié par des facteurs tels que la différence de potentiel électrochimique entre les métaux, la conductivité du milieu, ou encore le rapport de surface entre les deux métaux.

La corrosion galvanique peut affecter sérieusement la **durabilité des matériaux**, provoquer des **perforations** ou des **faiblesses mécaniques** dans les structures, et compromettre l'intégrité d'équipements sensibles.

Pour limiter ses effets, plusieurs stratégies de **prévention** peuvent être mises en œuvre, notamment :

- L'**isolation électrique** des métaux incompatibles ;
- Le **choix judicieux** de couples métalliques compatibles ;
- L'utilisation de **revêtements protecteurs** ou de **barrières isolantes** ;
- La **protection cathodique**, dans certains cas critiques.



Figure II.3 : Corrosion galvanique .

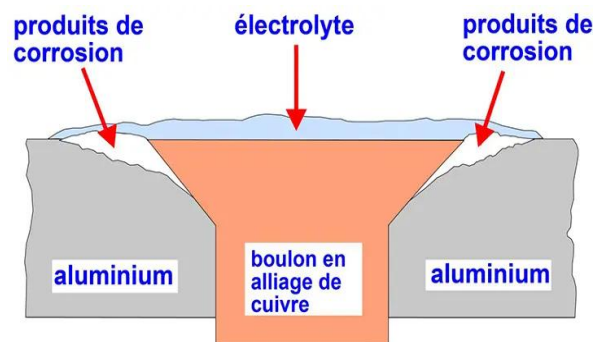


Figure II. 4 : Corrosion galvanique .

II.5.4. Corrosion caverneuse

La **corrosion caverneuse** est une forme de corrosion localisée qui survient généralement dans des zones **difficilement accessibles**, où de **petits volumes de solution stagnant**, comme :

- à l'intérieur de **fissures étroites**,
- sous des **dépôts solides**,
- à l'**interface de brides et de joints**,
- ou encore à l'endroit où un objet est tombé au fond d'un récipient [12].

Cette corrosion résulte d'un **phénomène d'aération différentielle**. En effet, entre les zones bien oxygénées et les zones confinées pauvres en oxygène, un **couple électrochimique** se forme : la partie pauvre en oxygène devient anodique (donc attaquée), tandis que la zone bien oxygénée reste cathodique. Cela déclenche une **attaque électrochimique** qui peut être aggravée par des **réactions secondaires**.

Dans ces zones confinées, où l'échange d'oxygène est limité ou inexistant, la **concentration locale en ions H^+ augmente**, ce qui entraîne une **diminution du pH**. Cette acidification locale provoque la **dissolution de la couche passive** protectrice sur les alliages (comme les aciers inoxydables), accélérant ainsi la corrosion .

Ce type de corrosion est **particulièrement insidieux**, car il est difficile à détecter visuellement et peut progresser sans signes externes apparents, compromettant la sécurité des équipements concernés.



Figure II. 5 : Corrosion caverneuse des aciers inoxydables .

II.5.5. Corrosion sélective

La corrosion sélective est un type de corrosion qui attaque un constituant spécifique d'un alliage, le laissant intact et poreux. Elle se produit lorsque la différence de potentiel électrochimique entre les différents constituants de l'alliage est suffisamment importante pour que l'un d'entre eux se dissolve préférentiellement [13].



Figure II. 6 : Corrosion sélective.

II.5.6. Corrosion sous contrainte (sous tension)

La corrosion sous contrainte résulte de l'action conjuguée d'une contrainte mécanique (résiduelle ou appliquée), et d'un milieu agressif vis-à-vis du matériau, chacun de ces facteurs pris séparément n'étant pas susceptible à lui seul d'endommager la structure. Ce type de corrosion, particulièrement sournois et dangereux pour les installations, se caractérise par l'apparition de fissures intergranulaires ou transgranulaires dont la direction générale de propagation est perpendiculaire à la plus grande contrainte. Cette dernière peut être d'origine résiduelle (cintrage, écrouissage, laminage à froid...), d'origine thermique (dilatation, variation de pression), ou inhérente à la fonction de l'installation (câbles de ponts suspendus, structures de soutènement etc [14].

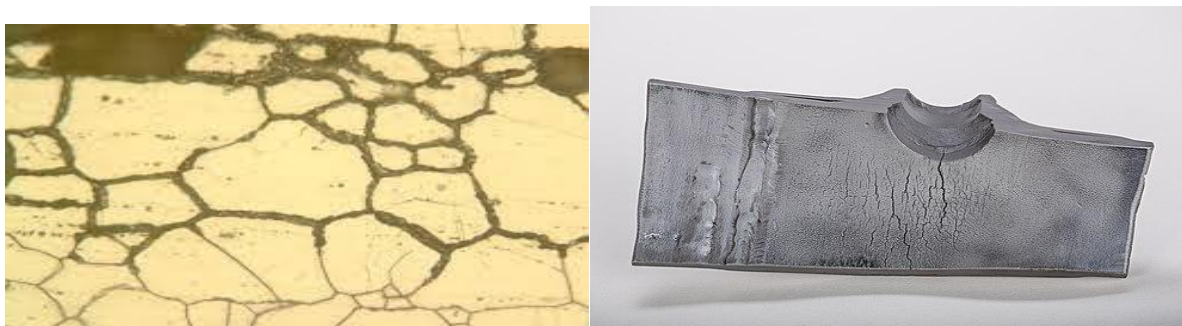


Figure II 7 : Corrosion sous contrainte dans une structure soudée d'acier allié.

II.5.7. Corrosion par érosion

La corrosion par érosion se produit dans un fluide en mouvement. Cette forme de corrosion est liée à la vitesse de passage du fluide, elle se caractérise par un amincissement local du métal qui prend la forme de rayures, de ravinements, d'ondulations, toujours orienté dans une même direction.

Ce type de corrosion étroitement lié à l'hydrodynamique du fluide peut être rencontré dans le cas des circuits de chauffage. Le meilleur moyen de luttés contre ce type d'attaque est de faciliter l'écoulement du flux en jouant sur le profil des tubes.

II.6. Les facteurs de corrosion

Les phénomènes de corrosion dépendent de plusieurs facteurs qui peuvent être classés en quatre groupes principaux tels que les :

- facteurs définissant les modes d'attaque,
- facteurs métallurgiques,
- facteurs définissant les conditions d'emploi,
- facteurs dépendant du temps.

Tous ces facteurs sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau II.1 : Les facteurs de corrosion .

Facteurs définissant les modes d'attaque	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 	<ul style="list-style-type: none"> •Composition de l'alliage •Procédés d'élaboration •Impuretés • Traitement thermique •Traitement mécanique 	<ul style="list-style-type: none"> •État de surface •Forme des pièces •Emploi d'inhibiteur •Procédés d'assemblage 	<ul style="list-style-type: none"> •Vieillessement •Tensions mécaniques •Modification des revêtements protecteurs.

II.7. Effets et enjeux de la corrosion

Les spécialistes de la corrosion ont identifié le dioxyde de soufre (SO₂) produit par les émissions des centrales électriques et les véhicules comme l'un des principaux facteurs de la corrosion.

II.7.1. Sur l'environnement

La corrosion entraîne la libération de métaux lourds dans l'environnement, ce qui accroît la pollution et endommage les écosystèmes. Cette diffusion de substances toxiques affecte la qualité de l'eau et du sol, menaçant la biodiversité et la santé des habitats naturels.

Les fortes concentrations de dioxyde de soufre peuvent nuire aux arbres et aux plantes en détruisant leur feuillage et en entravant leur croissance. Une étude récente de Greenpeace (classement des points chauds de la pollution atmosphérique mondiale par le SO₂) indique également que de fortes concentrations en dioxyde de soufre peut fortement polluer l'air et entraîner des morts prématurées.

II.7.2. Sur les biens

La corrosion n'affecte pas que les monuments construits par l'homme. Elle touche également les objets proches des habitations, tels que les véhicules, les barbecues, le mobilier d'extérieur et les appareils ménagers. De plus, la corrosion peut endommager les centres de données, les installations de contrôle des process industriels, ainsi que les sites de production sensible et les lieux culturels historiques. Pour toutes ces applications, il est nécessaire de mesurer la corrosion.

La corrosion dégrade également des infrastructures importantes telles que les autoroutes en acier renforcé, les pylônes électriques, les parkings et les ponts.

La corrosion, dégradant les biens matériels, augmente les frais de maintenance et diminue la durée de vie des infrastructures. Elle engendre des coûts supplémentaires significatifs et nécessite des interventions fréquentes pour préserver l'intégrité des structures affectées.

« Nous savons que de nombreuses industries commerciales telles que les industries pétrolières et gazières, l'industrie du bâtiment et celle de l'électronique sont vulnérables aux effets de la corrosion », a déclaré le responsable du segment Filtration moléculaire de Camfil USA. « Sans méthodes de contrôle, il y aura probablement une défaillance des équipements et de la structure pouvant avoir des conséquences catastrophiques. C'est pourquoi la filtration

moléculaire est si essentielle pour éliminer les agents corrosifs de l'air et assurer l'intégrité structurelle. » .

II.8. Protection et lutte contre la corrosion

La protection contre la corrosion consiste en des mesures spécifiques visant à prévenir les attaques corrosives (c'est-à-dire la décomposition) sur les composants métalliques. Cela inclut toutes les actions nécessaires pour protéger les matériaux métalliques contre les effets destructeurs de leur environnement.

La prévention contre la corrosion doit être envisagée dès la phase de conception d'une installation. En effet, des mesures préventives prises au bon moment permettent d'éviter de nombreux problèmes lorsqu'il s'agit de garantir une certaine durée de vie à un objet [14].

Il n'existe pas de solution universelle de par la complexité du problème ; il n'existe pas de métal inaltérable [15].

Le choix de moyen de protection est généralement basé sur des considérations économiques, mais dans de nombreux cas, des aspects tels que l'environnement et la sécurité doivent également être pris en compte [16].

II.8.1. Méthodes de prévention contre la corrosion

II.8.1.1. Prévention par choix du matériau

Comme il n'y a pas de métaux et d'alliages qui ont une résistance absolue à la corrosion, les effets indésirables et les conditions de fonctionnement doivent être principalement pris en compte lors de la sélection des matériaux. Néanmoins, le comportement à la corrosion n'est qu'un critère parmi d'autres dans le choix des matériaux, il s'agit d'une propriété du système métal-milieu et non du métal seul [17].

Intégrer des matériaux anticorrosion dès la phase de conception représente une approche préventive essentielle, minimisant ainsi les risques futurs de dégradation et prolongeant la durabilité des structures et équipements [18].

Le tableau ci-après présente la résistance à la corrosion de certains métaux purs dans les différents milieux.

Tableau II.2 : Résistance à la corrosion de certains métaux dans les milieux corrosifs.

Milieu	Fe	Cr	Ni	Cu	Al	Zn	Ti	Ta
Air humide	-	+	+	+	+	m	+	+
Eau froide naturelle aérée	m	+	+	+	-	+	+	+
Eau de mer	-	+	+	m	m	-	+	+
Acide non oxydant	-	m	M	+	-	-	+	+
Acide oxydant	-	+	M	+	+	+	+	+
Acide + Cl⁻	-	+	M	-	-	-	m	+
Base + O₂	+	+	+	+	-	-	+	m
Oxydation à haute température	+	+	+	-	-	-	m	-

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

II.8.1.2. Protection passive (revêtement)

L'utilisation de revêtements est l'une des méthodes les plus couramment adoptées pour protéger le métal contre la corrosion, Ils constituent une barrière physique entre le milieu agressif et le métal à protéger. Ces revêtements peuvent être métalliques ou non métalliques [11].

II.8.1.2.1. Caractéristiques des revêtements anticorrosion

Les principales qualités recherchées pour un revêtement anticorrosion sont

- Une bonne résistance aux acides, aux bases et aux sels.
- Une bonne résistance à l'humidité et aux rayons U.V.
- Une bonne adhérence au support.

- Une application facile.
- Une épaisseur suffisante (au moins 40 micromètres).
- Un séchage rapide pour éviter la détérioration par des agents chimiques.

II.8.1.2.2. Types de revêtements

Il existe deux grandes catégories de revêtements

- Les revêtements métalliques.
- Les revêtements non métalliques [11].

Les revêtements métalliques sont couramment utilisés pour protéger l'acier contre la corrosion atmosphérique. Ils peuvent être classés en deux types en fonction de leur comportement par rapport au métal à protéger :

- Revêtements métalliques

- Revêtements cathodiques (nobles) : Le métal protecteur est plus noble que le métal à protéger. Cela signifie qu'il ne se corrode pas facilement et offre une protection durable.
- Revêtements anodiques (sacrificiels) : Le métal protecteur est moins noble que le métal à protéger. Ce type de revêtement se corrode à la place du métal de base, offrant ainsi une protection sacrificielle [11].

- Revêtements non métalliques

- **Revêtements organiques**

Les revêtements organiques forment une barrière plus ou moins imperméable entre le substrat métallique et l'environnement. Ils se divisent en trois catégories principales :

- ✓ Revêtements en bitume : Utilisés pour les structures enterrées.
- ✓ Revêtements polymériques (caoutchoucs) : Offrent une protection flexible.
- ✓ Revêtements par peintures et vernis : Appliqués sur diverses surfaces pour une protection et une esthétique améliorée [19].

- **Revêtements inorganiques**

- ✓ Couches de conversion : Modifient chimiquement la surface du métal pour le rendre moins susceptible à la corrosion.
- ✓ Couches étrangères au substrat : Par exemple, les revêtements à base de ciment en génie civil qui ajoutent une barrière physique robuste [19].

II.8.1.3. par l'utilisation d'inhibiteurs

II.8.1.3.1. Les inhibiteurs de corrosion

Les inhibiteurs de corrosion constituent un moyen de lutte original contre la corrosion des métaux. L'originalité vient du fait que le traitement anticorrosion ne se fait pas sur le métal lui-même mais par l'intermédiaire du milieu corrosif [20].



Figure II.8 : Métal au contact d'un milieu agressif [21]

Selon la norme ISO 8044, un inhibiteur est une "substance chimique ajoutée au système de corrosion à une concentration choisie pour son efficacité ; celle-ci entraîne une diminution de la vitesse de corrosion du métal sans modifier de manière significative la concentration d'aucun agent corrosif contenu dans le milieu agressif [22].

La définition d'un inhibiteur de corrosion n'est pas unique. Celle retenue par la National Association of Corrosion Engineers (NACE)" est la suivante : "un inhibiteur" est une substance qui retarde la corrosion lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration [23].

Ces inhibiteurs sont choisis suivant les caractéristiques des conduites, de plus certains inhibiteurs peuvent être efficace au point de vue protection avec un métal et au contraire accélérer la corrosion avec un autre métal [21].

On définit habituellement des inhibiteurs selon leur influence sur les courbes de polarisation. On préfère utiliser le plus souvent des inhibiteurs cathodiques ou mixtes car ils ne présentent aucun risque [21].

II.8.1.3.2. Les propriétés des inhibiteurs

Partant de cette définition, un inhibiteur de corrosion doit donc vérifier un certain nombre de propriétés fondamentales :

- ◆ Abaisser la vitesse de corrosion du métal tout en conservant les caractéristiques physicochimiques de ce dernier.
- ◆ Être stable en présence d'autres constituants.
- ◆ Être stable dans le domaine de températures utilisé.
- ◆ Être efficace à faible concentration.
- ◆ Être efficace dans les conditions d'utilisation.
- ◆ Peu onéreux par rapport aux économies qu'il permet de réaliser ; être compatible avec les normes en vigueur de non-toxicité et de protection de l'environnement [24].

II.8.1.3.3. Utilisation industrielles courantes

Bien que leur utilisation puisse être théoriquement envisagée dans la plupart des cas de corrosion (avec, comme principales limitations, un volume trop important du milieu corrosif ou l'impossibilité éventuelle d'y incorporer des additifs), les inhibiteurs ont plusieurs domaines traditionnels 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.
- 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 [25].

II.8.1.3.4. Mode d'action des inhibiteurs de corrosion

Il n'existe pas de mode d'action unique pour les inhibiteurs de corrosion. Un même composé, peut avoir différents mécanismes d'action. Ces derniers sont imposés par le milieu corrosif et la nature du métal à protéger [26].

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

- La corrosion étant un processus essentiellement électrochimique, l'action de l'inhibiteur ne peut se faire qu'à niveau d'une des étapes des réactions élémentaires (transport d'espèces en solution, formation d'intermédiaires superficiels, adsorption des espèces à la surface des phases solides et transfert de charges électroniques). (Figure II .1.)[27].
- L'intervention de l'inhibiteur de corrosion dans le processus de transport des espèces électro actives (oxygène, protons, produits de réactions) au sein de la solution étant peu probable, le mécanisme d'action d'un inhibiteur est le plus souvent à rechercher au voisinage immédiat de la surface du métal (au contact du métal) [28] .

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

- ✓ L'interposition d'une barrière entre le métal et le milieu corrosif ; c'est le cas de milieux acides.
- ✓ Le renforcement d'une barrière préexistante, en général la couche d'oxyde hydroxyde formée naturellement en milieu neutre ou alcalin.
- ✓ La formation d'une barrière par interaction entre l'inhibiteur de corrosion avec une ou plusieurs espèces du milieu corrosif, ce type de mécanisme est également spécifique aux milieux alcalins ou neutres [28]

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

- Un aspect mécanistique (intervention dans les processus fondamentaux de la corrosion).

- Un aspect morphologique (intervention de la molécule de l'inhibiteur de corrosion dans la structure inter faciale). Il est clair que le mécanisme d'action va se différencier fortement en fonction du pH de Milieux [28].

II.8.1.3.5. Les classes d'inhibiteurs

On peut classer les inhibiteurs de différentes façons :

- Par domaine d'application (la formulation des produits : inhibiteurs organiques ou minéraux).
- Par réaction partielle (les mécanismes d'action électrochimique : inhibiteurs cathodiques, anodiques ou mixtes).
- Par mécanisme réactionnel Par mécanisme réactionnel (les mécanismes d'interface et principes d'action (adsorption et / ou formation d'un film) .

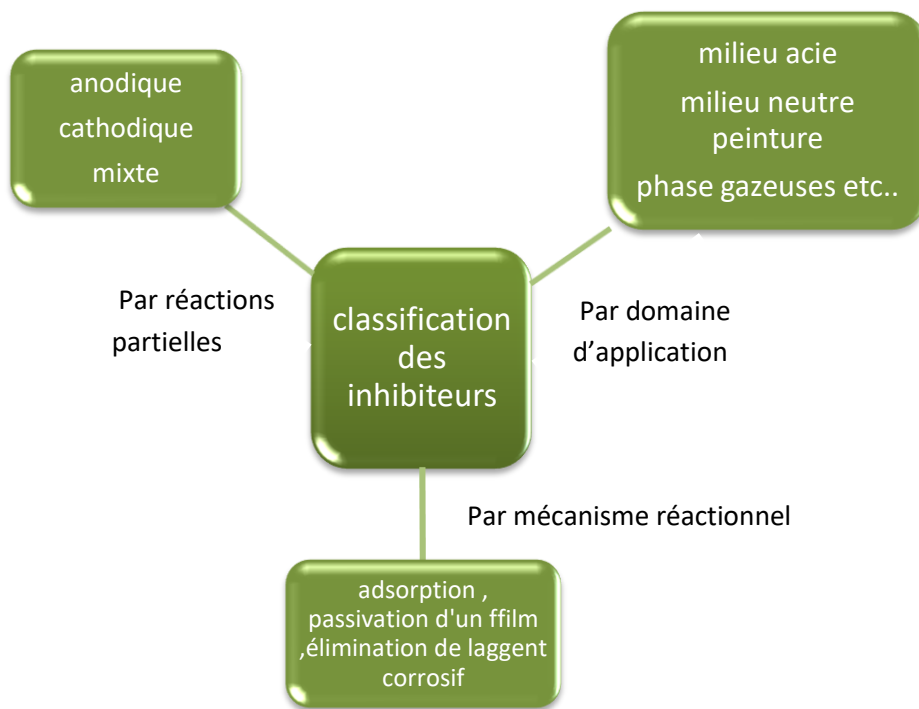


Figure II.9 : Classement des inhibiteurs de corrosion [29].

A. Par domaine d'application (selon leur composition chimique)

Dans la classification relative au domaine d'application, on peut distinguer les inhibiteurs de corrosion utilisés en milieux aqueux, organiques ou gazeux.

Ceux utilisés en milieux aqueux sont choisis en fonction du pH du milieu : en milieu acide, ils sont utilisés afin d'éviter l'attaque chimique de l'acier lors d'une opération de décapage ou de détartrage et en milieu neutre/alcalin, ils sont souvent utilisés pour protéger les conduites des circuits de refroidissement. Les inhibiteurs utilisés en milieu organique sont incorporés dans les lubrifiants pour moteurs, dans l'essence ou dans les peintures. Les inhibiteurs en phase gazeuse sont employés pour protéger les objets métalliques pendant leur transport et stockage. Pour cela, des composés organiques ayant une pression de vapeur élevée sont souvent utilisés [30].

Dans la classification relative à la formulation des produits, on peut distinguer les inhibiteurs organiques et les inhibiteurs minéraux.

➤ Les inhibiteurs organiques

Les inhibiteurs organiques représentent un groupe très important d'inhibiteurs de corrosion. L'efficacité des inhibiteurs organiques est liée à la structure, à la concentration et aux propriétés chimiques de la couche formée sur les conditions précisées. L'action d'un inhibiteur organique est le résultat de son adsorption à la surface du matériau. Après cette adsorption à la surface, ils ont une double action ralentissant simultanément les processus anodique et cathodique.

La plupart de ces inhibiteurs ont dans leur structure principalement des atomes d'azote, de soufre ou d'oxygène. La plupart de ces inhibiteurs ont dans leur structure au moins un centre actif (les atomes N, S, P, O) susceptible d'échanger des électrons avec le métal

Les inhibiteurs qui contiennent du soufre sont plus efficaces que ceux qui contiennent l'azote, car le soufre est un meilleur donneur d'électrons que l'azote.

. Les groupes fonctionnels usuels, permettant leur fixation sur le métal, sont :

- Le radical amine ($-\text{NH}_2$).
- Le radical mercaptan ($-\text{SH}$).
- Le radical hydroxyle ($-\text{OH}$).
- Le radical carboxyle ($-\text{COOH}$).

La principale caractéristique de ces inhibiteurs est leur efficacité élevée, même à faible concentration. L'effet inhibiteur augmente souvent avec le poids moléculaire de l'inhibiteur. L'utilisation d'inhibiteurs organiques est préférée pour des raisons d'écotoxicité [29].

➤ **Les inhibiteurs inorganiques (minéraux)**

Les inhibiteurs minéraux sont utilisés en milieu neutre/alcalin mais rarement en milieu acide. Ce sont souvent leurs produits de dissociation (anion ou cation) qui sont efficaces en tant qu'inhibiteurs de corrosion

Parmi les anions inhibiteurs, on trouve les chromates, les phosphates, les molybdates, les nitrates, les nitrites, les silicates, etc... et parmi, les cations inhibiteurs on trouve essentiellement les ions Ca^{+2} et Zn^{+2} .

Les cations inhibiteurs sont essentiellement ceux qui forment des sels insolubles avec certains anions tels que l'hydroxyle (OH^-) [29].

Les inhibiteurs minéraux sont de moins en moins utilisés en raison de leur toxicité. Leur emploi se limite à certains systèmes en circuit fermé .

Pour la classification relative au domaine d'utilisation, il est possible de faire une distinction entre les inhibiteurs de corrosion utilisés dans les milieux aqueux, gazeux ou organiques (pour les peintures, les lubrifiants et l'essence). Ceux utilisés en milieu aqueux sont choisis selon le pH. La classification est donc la suivante .

1) Inhibition en milieu acide

Les inhibiteurs acides sont utilisés pour empêcher une attaque chimique de l'acier pendant l'opération de décapage ou de détartrage, qui sont tous effectués en milieu acide. On les utilise dans le secteur pétrolier en les ajoutant aux fluides de forage. Pour le milieu acide, ce sont les inhibiteurs organiques qui sont souvent utilisés, et cela est dû à leur capacité exceptionnelle à adsorber sur les surfaces métalliques, ce qui bloque les sites électro-actives . Elles contiennent une partie non polaire, hydrophobe et relativement volumineuse, qui est essentiellement une chaîne de carbone et d'hydrogène, et une partie polaire hydrophile, comprenant un ou des groupes fonctionnels.

2) Inhibition en milieu neutre

Les inhibiteurs de corrosion en milieu neutre ou alcalin servent souvent à protéger les conduites de refroidissement. Étant donné que l'oxydation dans un environnement neutre est essentiellement causée par une attaque par l'oxygène dissous, le métal peut être protégé en réduisant la cinétique du transfert d'oxygène à la surface, et ceci réduira alors la cinétique de réduction cathodique. Il existe d'autres moyens de diminuer la vitesse de corrosion en jouant sur la passivation du métal ou par des molécules capables d'adsorption. L'inhibition par précipitation en milieux neutres, se fait par la création de films superficiels qui présentent une barrière de diffusion aux espèces électro-actives migrant vers les sites cathodiques. Les polyphosphates et les organophosphorés en constituent des exemples. En ce qui concerne l'inhibition par passivation, son avantage pratique consiste à protéger l'acier ou d'autres métaux utilisés dans un système de refroidissement. Les inhibiteurs oxydants et les tampons (assurant le maintien d'un pH élevé) favorisent la formation d'oxydes/hydroxydes peu solubles sont des exemples pour ce cas .

3) Inhibition en phase gazeuse

Ces inhibiteurs servent à protéger temporairement les pièces métalliques pendant le transport et le stockage. Parmi ces pièces métalliques, on peut citer les machines et les pièces électroniques. Pour les applications en phase gazeuse, des composés organiques à haute pression de vapeur sont fréquemment utilisés [31] .

B. Par réaction partielle

Dans la classification relative au mécanisme d'action électrochimique, on peut distinguer les inhibiteurs anodiques, cathodiques ou mixtes. Les inhibiteurs de corrosion forment une couche barrière sur la surface métallique, qui modifie les réactions électrochimiques en bloquant soit les sites anodiques (siège de l'oxydation du métal) soit les sites cathodique (siège de la réduction de l'oxygène en milieu neutre aéré ou siège de la réduction du proton H^+ en milieu acide) [32] .

➤ Les inhibiteurs anodiques

Les inhibiteurs anodiques diminuent la densité de courant de dissolution du métal et déplacent le potentiel de corrosion dans le sens positif. Ce type d'inhibiteurs doit être utilisé en quantité suffisante car dans le cas contraire, ils peuvent accentuer la corrosion des zones non protégées.

➤ Les inhibiteurs cathodiques

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

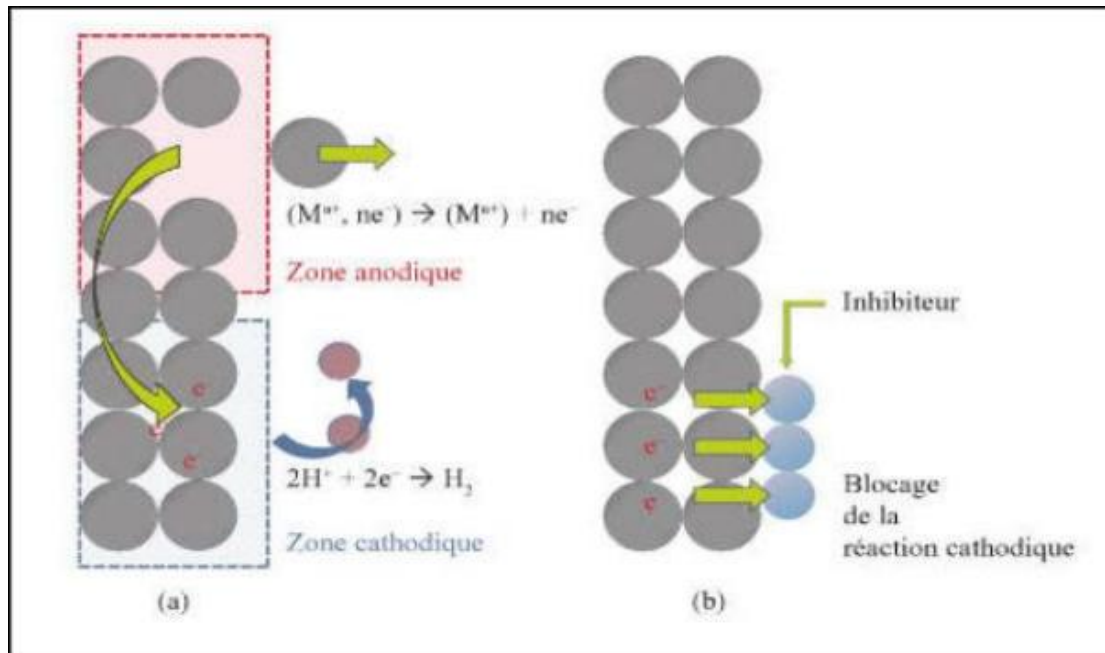


Figure II.10: Représentation du processus d'inhibition cathodique, (a) sans inhibiteur, (b) avec inhibiteur [33].

➤ Les inhibiteurs mixtes

Les inhibiteurs mixtes diminuent la vitesse des deux réactions partielles en modifiant peu le potentiel de corrosion [34].

Les inhibiteurs de corrosion qui augmentent la résistance ohmique de l'électrolyte sont considérés, dans certains cas, comme inhibiteurs filmant (anodique et cathodique). La résistance de la solution augmente suite à la formation d'un film à la surface de corrosion du métal.

Lorsque le film est déposé sélectivement sur la surface anodique, le potentiel de corrosion se déplace vers des valeurs positives. Dans le cas où le film est déposé à la surface cathodique, le potentiel de corrosion balance vers des valeurs négatives

Dans le cas de la formation d'un film sur les surfaces anodiques et cathodiques, le déplacement du potentiel de corrosion est du côté de la tendance prédominante. Les inhibiteurs mixtes diminuent la vitesse des deux réactions partielles mais modifient peu le potentiel de corrosion [35].

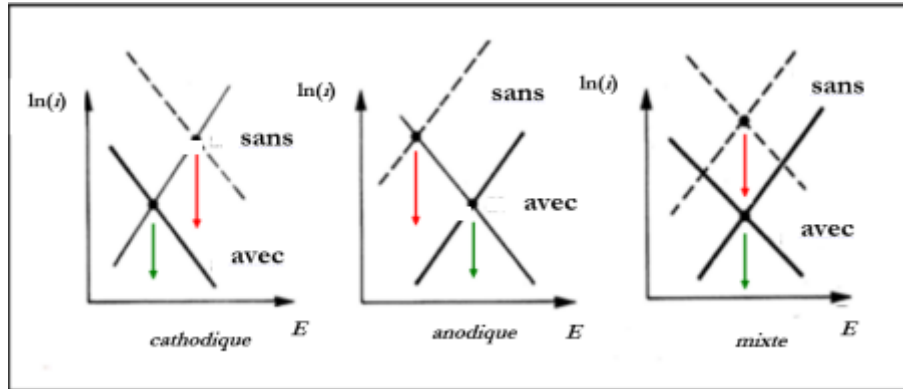


Figure II.11 : Diagrammes d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur de corrosion [34].

C. Par mécanismes réactionnel

Dans la classification liée au mécanisme réactionnel mis en jeu en fonction de leur mode d'action, on peut distinguer différents types d'inhibiteurs : ceux agissant par adsorption, par passivation ou par précipitation.

➤ Les inhibiteurs agissant par adsorption

Sont en général les inhibiteurs organiques. Ils empêchent l'action du milieu agressif en se fixant sur la surface du métal. Leur fixation se fait principalement par la fonction active de l'inhibiteur ; cependant, les parties polaires peuvent être également adsorbées. Ceux qui agissent par adsorption chimique s'avèrent souvent plus efficaces que ceux agissant par adsorption physique, car le partage des électrons renforce la liaison entre le métal et l'inhibiteur. Généralement, en présence d'une chimisorption, la molécule inhibitrice agit comme donneur d'électrons alors que le métal agit comme accepteur d'électrons [36].

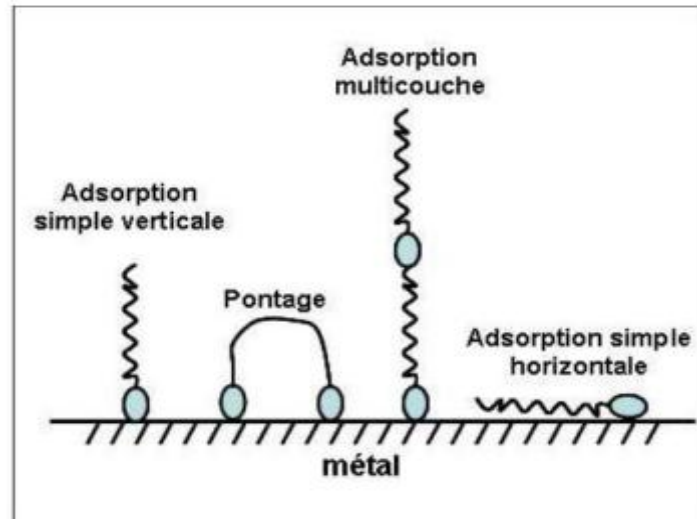


Figure II.12 : Représentation schématique des modes d'adsorption de molécules organiques inhibitrices sur une surface métallique .

➤ Les inhibiteurs agissant par passivation

Sont en général les inhibiteurs minéraux. Ils provoquent la passivation spontanée du métal en renforçant la couche d'oxyde formée naturellement sur la surface du métal. Ils se réduisent sur les pores de la couche d'oxydes/hydroxyde plus ou moins protectrice qui se forme naturellement sur la surface du métal. L'ion chromate est un des inhibiteurs passivant par excellence mais son caractère cancérigène et sa forte toxicité réduisent notablement son utilisation [37].

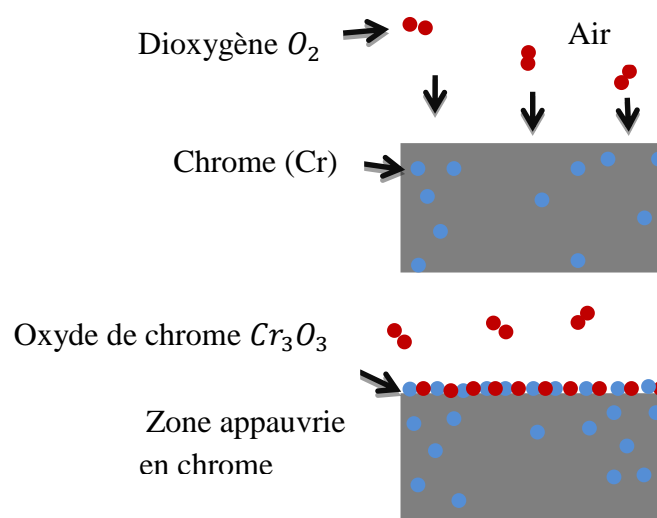


Figure II.13 : Mécanisme d'action des inhibiteurs organiques.

➤ Les inhibiteurs agissant par précipitation

Provoquent la formation d'un film superficiel constitué de sels minéraux ou de complexes organiques peu solubles formé lors de la précipitation des produits de réaction cathodique tout en bloquant la dissolution anodique. Il s'agit généralement de sels d'acide faible et de base forte comme les borates, les silicates, les phosphates, les polyphosphates et les sels de zinc [38].

II.8.1.3.6. Structure d'inhibiteurs

Pour que une espèce chimique quelconque puisse être susceptible d'avoir des caractéristiques inhibiteurs en un milieu corrosif donné, elle doit contenir dans sa structure moléculaire une partie polaire (hydrophile) et une partie non polaire (hydrophobe). La partie polaire d'une structure d'un inhibiteur constituée d'un ou plusieurs hétéroatomes a une paire d'électrons libre tel que oxygène, azote, soufre, phosphore, ...etc. La partie non polaire doit être volumineuse, constituée principalement d'atomes de carbone et d'hydrogène [39].

II.8.1.3.7. Efficacité d'un inhibiteur

Un inhibiteur est efficace si son degré d'inhibiteur R (rendement d'inhibiteur) qui caractérise le ralentissement de la corrosion dû à la présence d'un inhibiteur est maximal.

$$I_{\text{corr}} \% = V_0 - V/V_0 \quad (\text{Equation II.1}).$$

V_0 et V désignent respectivement les vitesses de corrosion en absence et en présence de l'inhibiteur [40].

II.10.1.3.8. Les facteurs affectant la performance des inhibiteurs

- Effet de la température

Avec l'augmentation de la température, la vitesse de corrosion des métaux augmente et l'efficacité de la plupart des inhibiteurs diminue à cause de diminution de recouvrement de la surface de métal par les inhibiteurs adsorbés. Mais, en présence de certains inhibiteurs, par exemple, sulfure de dibenzyle, le dibenzyl-sulfoxyde, l'aniline et la gélatine, la vitesse de corrosion est réduite [41]. Une courbe de type Arrhenius (\ln (vitesse de corrosion) en fonction de $1/T$) est souvent linéaire en présence d'inhibiteurs, comme dans le système désinhibé.

- **Vitesse d'écoulement**

La performance d'inhibiteurs est généralement affectée par une forte agitation. La vitesse de corrosion augmente avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement. Une relation linéaire a été observée entre la vitesse du fluide et la vitesse de corrosion de l'acier au carbone en milieu HCl en présence des inhibiteurs commerciaux [42].

- **La nature de métal**

L'action des inhibiteurs est sélective et dépend de la nature de métal à protéger, sa composition et son traitement métallurgique. Un inhibiteur qui est très efficace pour un métal peut ne pas être satisfaisant pour un autre. De nombreux inhibiteurs pour les métaux ferreux sont inefficaces pour les métaux non ferreux comme le zinc et l'aluminium. Toutefois, certains inhibiteurs ou leurs mélanges protègent plus d'un métal [34].

- **L'électrolyte**

La nature de l'électrolyte a un effet considérable sur la protection des inhibiteurs. Par exemple, la quinoléine et les amines retardent la vitesse de corrosion des aciers en milieu acide chlorhydrique beaucoup plus fortement que dans l'acide sulfurique [34].

- **Le pH**

De nombreux inhibiteurs deviennent satisfaisants à un pH inférieur ou supérieur à pH optimum. Par exemple, le benzoate de sodium n'est pas efficace dans des électrolytes avec pH inférieur à 5,5 [34].

II.10.1.3.9. Les inhibiteurs verts

Sachant que les inhibiteurs verts font l'objet d'une grande attention dans le monde de l'industrie et vue de leurs non toxicité et efficacité dans le domaine de la corrosion.

Un grand nombre, de composés organiques, a été étudié pour examiner leur potentiel d'inhibition de la corrosion. Toutes ces recherches révèlent que les composés organiques, en particulier ceux qui contiennent les atomes N, S et O, ont montré une efficacité d'inhibition significative, 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. De nombreuses substances

écologiques inhibitrices de la corrosion ont été développées, allant des terres rares aux composés organiques [34].

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 [43].

Ces recherches, nous ont 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 phytochimiques pouvant facilement être adsorbés et inhibent la corrosion des aciers ordinaires. 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 corrosifs [44] .

Dans notre étude on a testée l'extrait aqueux des feuilles de nêfle (*Eriobotrya*), *cichorium intybus* et de citron préparés comme inhibiteur vert de corrosion de l'acier dans un milieu corrosif constitué de 1M HCL

- La biodégradabilité des inhibiteurs verts

Un produit est dit biodégradable si après usage, il peut être décomposé naturellement. La biodégradabilité est un des paramètres les plus importants pour caractériser l'impact 37 environnemental d'un produit organique. Elle dépend d'une part de la faculté d'être dégradée et d'autre part de la vitesse de la décomposition du produit dans le milieu biologique. Par exemple, une feuille de plante est biodégradable à 100% en quelques semaines alors qu'une bouteille plastique nécessite environ 4 milles ans.

La biodégradation se traduit chimiquement par un processus de simplification progressive de la structure chimique d'un composé organique avec la minéralisation du carbone (sous forme de dioxyde de carbone) et l'obtention de métabolites de plus faible poids moléculaire. Toutefois, la capacité de l'écosystème à absorber les produits biodégradables est limitée, créant ainsi un risque d'engorgement comme par exemple l'eutrophisation des étangs (pollution aux nitrates en raison d'un excès de matières biodégradables azotées) [45] .

II.9. Conclusion

Le phénomène de la corrosion représente un défi majeur pour de nombreuses industries, notamment celles du pétrole, de la chimie, et du transport, où les équipements métalliques sont exposés à des environnements particulièrement agressifs. Pour limiter les dégradations associées à ce phénomène, le recours aux inhibiteurs de corrosion constitue une solution largement adoptée.

Les inhibiteurs chimiques, traditionnellement utilisés, agissent en formant une barrière protectrice à la surface des métaux, ralentissant ainsi les réactions d'oxydation. Toutefois, leur impact environnemental — notamment leur toxicité et leur faible biodégradabilité — suscite des préoccupations croissantes et limite leur usage à grande échelle.

Dans ce contexte, les inhibiteurs naturels, tels que les extraits de plantes, apparaissent comme une alternative prometteuse, plus respectueuse de l'environnement et conforme aux exigences du développement durable. Ils offrent l'avantage d'être biodégradables, moins toxiques et souvent faciles à extraire, ce qui ouvre la voie à leur valorisation dans des applications industrielles.

Cependant, malgré leur potentiel, ces inhibiteurs d'origine naturelle nécessitent encore des études approfondies pour mieux comprendre :

- leur mécanisme d'action au niveau moléculaire,
- leur stabilité chimique dans divers milieux corrosifs,
- ainsi que leur efficacité à long terme dans des conditions industrielles réelles.

Ces recherches sont essentielles pour valider leur faisabilité technico-économique et leur intégration dans des systèmes de protection anticorrosion à grande échelle.

Chapitre III

Méthodes d'études et résultat

III.1.Introduction :

Dans ce travail, nous avons utilisé la méthode gravimétrique (perte de masse) pour évaluer l'effet de l'inhibiteur sur la corrosion du bac de stockage.

Cette méthode consiste à peser les échantillons avant et après immersion, d'abord sans inhibiteur puis en sa présence.

Elle nécessite une préparation soignée des échantillons, du milieu corrosif et de la solution inhibitrice.

III.2. Produits chimiques utilisés

Dans notre étude nous avons utilisé les produits chimiques dont leurs propriétés physicochimiques sont récapitulées dans le tableau (III.1) :

Tableau III.1 : Les produits chimiques utilisés et leurs propriétés physicochimiques

Produits	Formule chimique	Degré de pureté (%)	Masse molaire (g/mol)	Densité (g/cm ³)
Acide chlorhydrique	HCl	99.99	36.46	1,18
Eau distillée	H ₂ O	Sans sels	18	1
Acétone	CH ₃ COCH ₃	99.5	46	0,79
Méthanol	CH ₃ OH	99.8	32.04	0.787

III.3. Acier A283 Gr-C (pour le bac de stockage)

L'acier utilisé est un matériau largement employé dans divers secteurs industriels, notamment dans l'industrie pétrolière, pour la construction de réservoirs de stockage de grande capacité. Il a été obtenu à partir de la raffinerie RA1K située à Skikda, et il est destiné aux réservoirs de stockage des hydrocarbures pétroliers. Sa composition chimique ainsi que ses propriétés mécaniques sont présentés en détail dans les tableaux (III.2 et III.3).

-Composition chimique :

Tableau III.2 : Composition chimique de l'acier A283 Gr-C.

Élément	C	Si	Mn	P	S
%	0.24	0.4	0.9	0.035	0.04

-Propriétés mécaniques :**Tableau III.3 :** Propriétés mécaniques de l'acier A283 Gr-C

Propriété mécanique	Valeur
Limite d'élasticité	380-5150 MPa
Limite de rupture	205 MPa
Allongement à la rupture	22% min
Réduction de la zone	25% min

III.3.1. Préparation du matériau

Les étapes de préparation de l'acier sont :

- ✓ Découper les échantillons à l'aide d'une tronçonneuse sous formes de plaques rectangulaires.

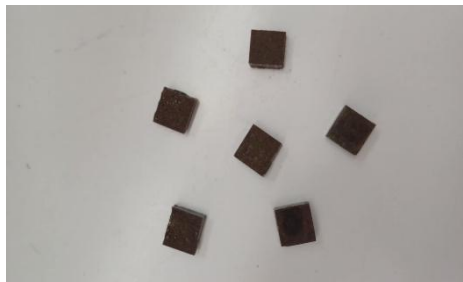


Figure III.1 : L'acier A283 Gr-C

- ✓ Les surfaces des échantillons en acier subissent, avant toute manipulation ultérieure, un traitement préalable consistant en un polissage manuel progressif à l'aide de papiers abrasifs de granulométries croissantes (grades 80, 120, 600, 800, 1200, 2400, 4000), réalisé à l'aide d'une machine de polissage tournant à une vitesse d'environ 300 tours par minute, afin d'obtenir une surface lisse et d'aspect homogène.

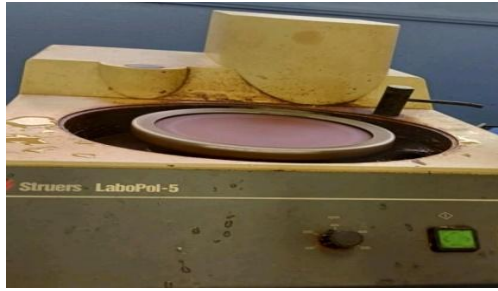


Figure III.2 : Polisseuse

✓ Ensuite, les échantillons sont lavés avec de l'eau distillée, dégraissés par l'acétone puis rincés à l'eau distillée, enfin séchés et stockés.

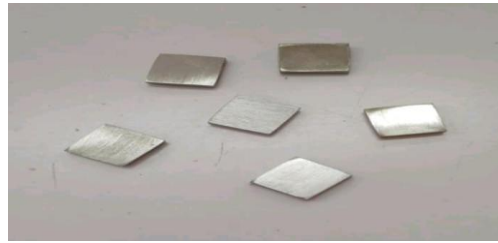


Figure III.3 : Acier A283 Gr-C préparés pour l e travail

✓ Les échantillons ont été examinés au moyen d'un microscope métallographique de la marque « euro max » qui permet l'inspection détaillée des surface des échantillons avec différents agrandissements.



Figure III.4 : Microscope métallographique

✓ La mesure précise des dimensions des échantillons a été effectuée à l'aide d'un pied à coulisse, un instrument de mesure permettant d'obtenir des valeurs exactes avec une grande précision.



Figure III.5: Pied à coulisse

III.4. Préparation des solutions utilisées

III.4.1. Préparation de l'acide chlorhydrique (HCl)

Le milieu corrosif utilisé est constitué d'une solution aqueuse d'acide chlorhydrique à la concentration (1M de HCl) a été obtenue en dilution $V = 82.23$ ml de HCl dans un litre d'eau distillée.

Le volume de solution corrosive utilisée : $V = 0.1$ l = 100 ml.

- La solution corrosive (HCl) est préparée dans une fiole, comme illustré à la figure (III.6)



Figure III.6 : Préparation de la solution corrosive HCl

III .5. Préparation de l'inhibiteur "*Reichardia picroides* "

Nous avons utilisé les feuilles de "*Reichardia picroides*" dont nous avons mélangé 30g dans 100ml de méthanol pendant 24 heures.

III.6. Mode opératoire

III.6.1. Sans Inhibiteur

Nous pesons la masse des échantillons d'acier avant de les placer dans la solution corrosive dans une première étape.

Ensuite, nous les plaçons pendant différents temps : (2h, 4h, 6h, 24h, 48h et 72h) dans un bichet d'une capacité de 100 ml de solution corrosive (HCl). A la fin de l'expérience, une fois le temps spécifié écoulé, on sèche les pièces avec de l'eau distillée, puis de l'acétone et nous repesons à nouveau les pièces pour déterminer les deux paramètres :

- La perte de masse (Δm) .
- La vitesse de corrosion. (V_{corr}) .

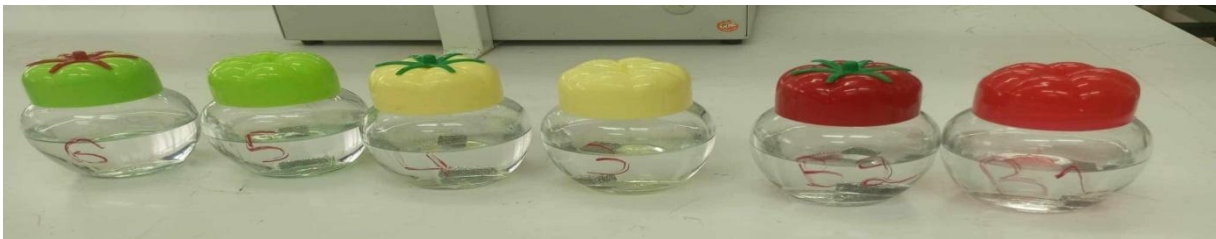


Figure III.7 : Echantillons d'acier sans l'inhibiteur

III.6.2. Avec Inhibiteur

De la même manière que précédemment, le temps est constant (24h) mais la quantité d'inhibiteur change.

Nous plaçons les échantillons d'acier pour différentes quantités de l'inhibiteur : (0g, 0.025g, 0.05g, 0.075g, 0.1g, 0.12g) dans un bichet d'une capacité de 100 ml de solution corrosive (HCl), à la fin de l'expérience, une fois le temps spécifié écoulé, on sèche les pièces avec de l'eau distillée, puis de l'acétone. Ensuite, nous pesons à nouveau les pièces pour déterminer les trois paramètres :

- La perte de masse (Δm) .
- La vitesse de corrosion (V_{corr}) .
- L'efficacité inhibitrice (El %).



Figure III.8 : Echantillons d'acier avec l'inhibiteur

III.6.3. Avec Inhibiteur et température égale à 35C°

De la même manière que précédemment, le temps (2h) et la température (35C°) sont constants mais la quantité d'inhibiteur change.

Nous plaçons les échantillons d'acier pour différentes quantités de l'inhibiteur : (0g, 0.025g, 0.05g, 0.075g, 0.1g, 0.12g) dans un bécher d'une capacité de 100 ml de solution corrosive (HCl), Ensuite, nous le mettons dans un bain-marie à la température spécifiée, A la fin de l'expérience, une fois le temps spécifié écoulé, on sèche les pièces avec de l'eau distillée, puis de l'acétone. Ensuite, nous pesons à nouveau les pièces pour déterminer les trois paramètres :

- La perte de masse(Δm).
- La vitesse de corrosion (V_{corr}) .
- L'efficacité inhibitrice (El %) avec la température (35C°).

III.6.4. Avec Inhibiteur et température égale à 45C°

De la même manière que précédemment, le temps (2h) et la température (45C°) sont constants mais la quantité d'inhibiteur change.

Nous plaçons les échantillons d'acier pour différentes quantités de l'inhibiteur : (0g, 0.025g, 0.05g, 0.075g, 0.1g, 0.12g) dans un bécher d'une capacité de 100 ml de solution corrosive (HCl), Ensuite, nous le mettons dans un bain-marie à la température spécifiée, A la fin de l'expérience, une fois le temps spécifié écoulé, on sèche les pièces avec de l'eau distillée, puis de l'acétone. Ensuite, nous pesons à nouveau les pièces pour déterminer les trois paramètres :

- La perte de masse(Δm).

- La vitesse de corrosion (V_{corr}) .
- L'efficacité inhibitrice (El %) avec la température ($45C^{\circ}$).

III.7. Méthodes

III.7.1. Visuelles des surfaces

L'observation des surfaces des échantillons, est une méthode qualitative qui se fait à l'œil nu ou par microscopie optique. Elle permet de mettre en évidence, soit une dégradation, soit des formes de corrosion telles que : les crevasses ou les piqûres etc. (Figure III.4) c'est-à-dire la morphologie de corrosion (Chapitre II).

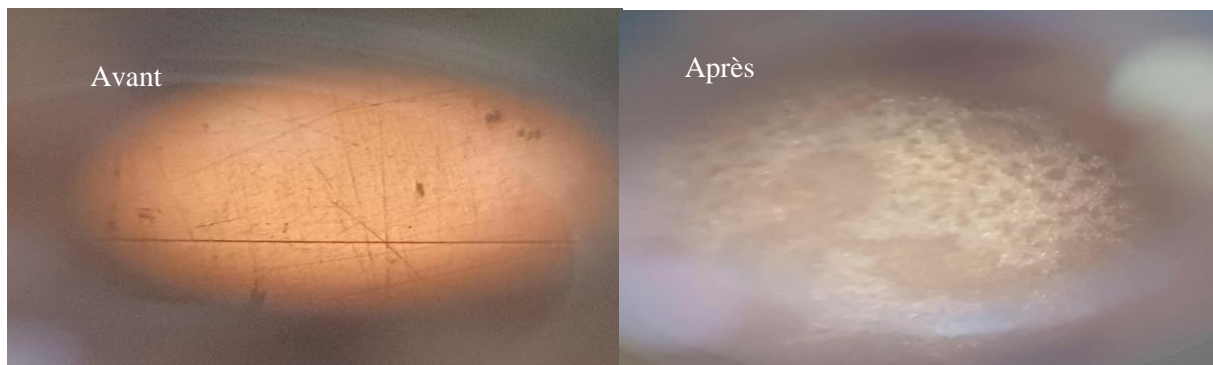


Figure III.9 : Echantillon avant et après examen au microscope métallographique

III.7.2. Méthode par gravimétrie (perte de masse)

Les études de corrosion ont pour but, de façon générale, de déterminer quantitativement la dégradation d'un matériau au cours du temps. La méthode la plus simple, et la moins coûteuse est celle de la perte de masse [46].

Cette technique se base sur l'idée d'immerger l'échantillon de surface (S) dans un milieu corrosif maintenue à température constante pendant un temps (t), et à mesurer la différence de masse des échantillons avant et après chaque essai. L'utilité de l'activité de la masse perdue consiste dans l'analyse de la vitesse de corrosion qui est définie comme une perte de poids par unité d'espace et de temps et est exprimée en ($g/cm^2 \cdot h$) [47].

- La vitesse de corrosion (V_{corr}) est donnée par l'équation (III.1) :

$$V_{\text{corr}} = \frac{\Delta m}{St} \quad (\text{Equation III.1}).$$

$$\Delta m = m_2 - m_1 \quad (\text{Equation III.2}).$$

m_1 et m_2 : désignent respectivement les masses avant et après l'essai en gramme (g) .

S : la surface de l'échantillon, exposée en (cm^2).

t : le temps d'exposition dans la solution en heure (h).

- L'efficacité inhibitrice (El %) d'un composé étudié est calculée, en utilise l'équation (III.3) :

$$\text{El (\%)} = \frac{V_{\text{sans}} - V_{\text{avec}}}{V_{\text{sans}}} \times 100 \quad (\text{Equation III.3}).$$

V_{sans} : La vitesse de corrosion de l'acier sans inhibiteur en ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$).

V_{avec} : La vitesse de corrosion de l'acier avec inhibiteur en ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$).

•Résultats et discussions

Nous présentons les résultats des tests de l'effet de l'inhibiteur vert, "*Reichardia picroides*", sur la corrosion de l'acier A283 Gr-C dans un milieu acide, à savoir l'acide chlorhydrique (HCl).

III.8. Solution de l'acide chlorhydrique (HCl)

III.8.1. Sans Inhibiteur :

Le facteur de temps est un facteur majeur car il montre l'influence du milieu au cours de temps. Dans ce contexte, nous avons étudié ce paramètre avec différentes durées : (2h, 4h, 6h, 24h, 48h, 72h) dans le milieu d'acide chlorhydrique (HCl) sont résumées dans le tableau (III.4) :

Tableau III.4 : Variation de la perte de masse (Δ_m) et la vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction du temps (t).

Tempes (h)	2	4	6	24	48	72
m_1 (g)	5.499	5.870	6.120	5.282	6.115	5.617
m_2 (g)	5.463	5.810	6.005	4.830	5.07	4.267
Δ_m (g)	0.036	0.060	0.115	0.452	1.045	1.351
$V_{\text{corr}} * 10^{-3}$ (g/cm ² .h)	3.87	2.54	2.98	3.01	3.15	2.64

a. La perte de masse (Δm)

Les valeurs expérimentales de la perte de masse (Δm) de l'acier A283 Gr-C en fonction du temps (t) dans un milieu d'acide chlorhydrique (HCl) en l'absence d'inhibiteur à température ambiante ($T=25\text{ C}^\circ$) tableau (III.4).

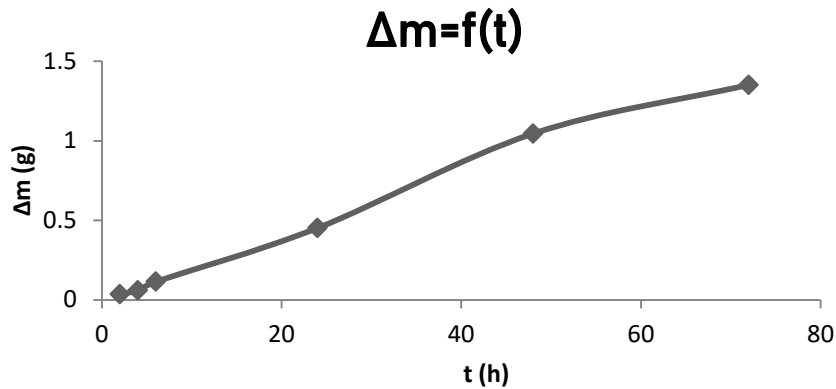


Figure III.10 : La perte de masse (Δm) en fonction de temps (t).

➤ Les valeurs de la perte de masse en fonction du temps d'immersion dans le milieu acide (HCl) en l'absence d'inhibiteur. On observe une augmentation progressive de la perte de masse avec le temps, ce qui indique une intensification du phénomène de corrosion. Cette tendance confirme que l'acier est fortement attaqué par le milieu acide lorsqu'aucune protection n'est appliquée.

b. La vitesse de corrosion (V_{corr})

Les valeurs expérimentales de la vitesse de corrosion (V_{corr}) de l'acier A283 Gr-C en fonction du temps (t) dans un milieu d'acide (HCl) en l'absence de l'inhibiteur à température ambiante ($T=25\text{ C}^\circ$) tableau (III.4).

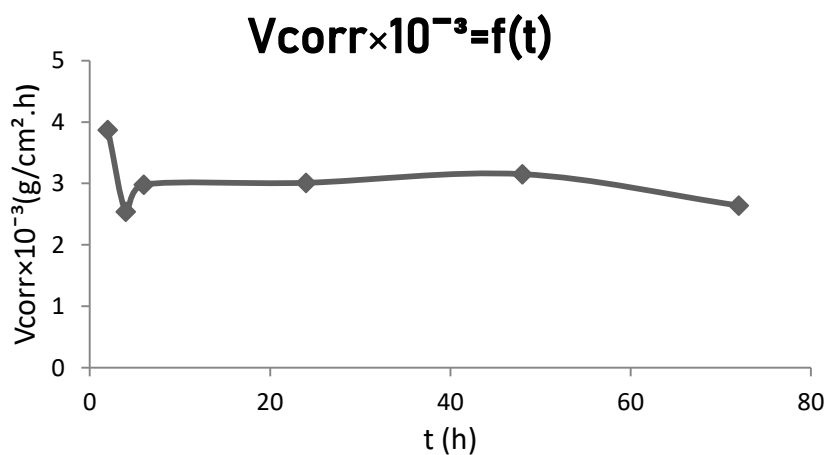


Figure III.11 : La vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction de temps (t).

➤ Les valeurs de La vitesse de corrosion en fonction de temps montrent qu'il y a augmentation de la vitesse de corrosion en milieu l'acide chlorhydrique (HCl). Cela s'explique par la formation d'une couche de produits de corrosion à la surface du métal, qui réduit le contact direct avec l'acide, ce qui ralentit le processus de corrosion au fil du temps.

III.8.2. Avec Inhibiteur "*Reichardia picroides*" a 25 C°:

Dans ce contexte, nous avons étudié l'addition de ce paramètre avec différentes masses : (0g, 0.025g, 0.05g, 0.075g, 0.1g, 0.12g) pour 24h dans l'acide chlorhydrique (HCl) .

➤ Les valeurs expérimentales de la perte de masse de l'acier A283 Gr-C en fonction du temps dans un milieu d'acide (HCl) en présence l'inhibiteur "*Reichardia picroides*" à (T=25 C°) sont résumées dans le tableau (III.5) :

Tableau III.5 : Variation de la perte de masse (Δm) en fonction de La masse de l'inhibiteur (g) et la vitesse de corrosion (V_{corr}) et L'efficacité inhibitrice (El %).

La masse de l'inhibiteur (g)	0	0.025	0.05	0.075	0.1	0.12
m_1 (g)	6.00	5.65	5.40	5.46	6.27	5.76
m_2 (g)	5.50	5.48	5.34	5.39	6.23	5.75
Δm (g)	0.50	0.17	0.06	0.04	0.04	0.01
$V_{\text{corr}} * 10^{-3}$ (g/cm ² .h)	3.81	1.30	0.50	0.33	0.29	0.08
El %	1.55	48.81	83.22	89.04	90.79	96.97

a. La perte de masse (Δm)

Les valeurs expérimentales de la perte de masse (Δm) de l'acier A283 Gr-C en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i) dans un milieu d'acide chlorhydrique (HCl) en présence l'inhibiteur à température ambiante (T=25 C°) tableau (III.5).

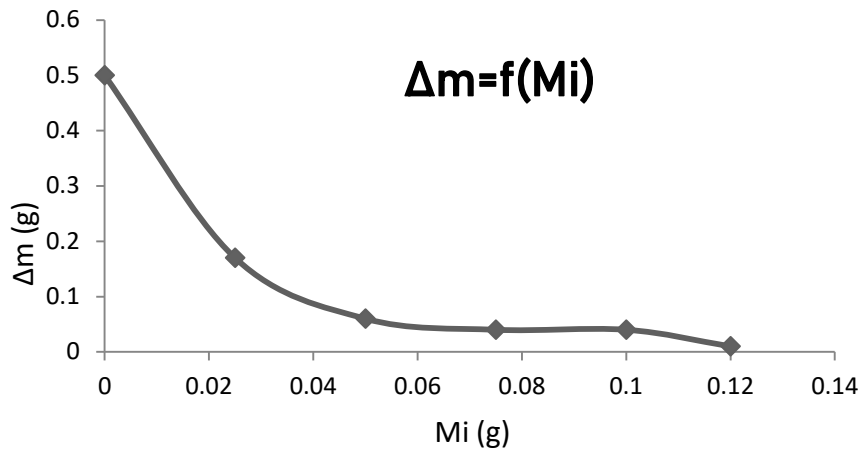


Figure III.12 : La perte de masse (Δm) en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i).

➤ On remarque une diminution relative de la corrosion de la masse d'acier avec l'augmentation de la masse de l'inhibiteur. Cela signifie que plus on ajoute d'inhibiteur, plus la protection devient efficace, car il forme une barrière sur la surface de l'acier qui empêche le contact direct avec l'acide. ce résultat indique l'efficacité de l'inhibiteur pour protéger l'acier de la corrosion dans la solution acide (HCl)

b. La vitesse de corrosion (V_{corr})

Les valeurs expérimentales de la vitesse de corrosion (V_{corr}) de l'acier A283 Gr-C en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i) dans un milieu d'acide (HCl) en présence l'inhibiteur à température ambiante ($T=25\text{ C}^\circ$) tableau (III.5).

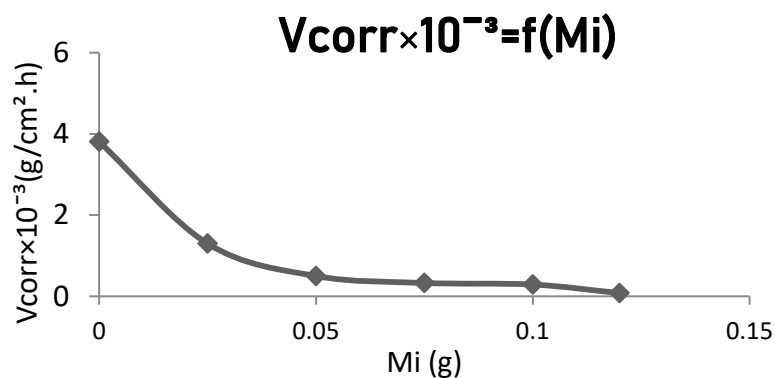


Figure III.13 : La vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction du la masse d'inhibiteur (M_i)

➤ Les résultats montrent que la vitesse de corrosion diminue progressivement avec l'augmentation de la quantité d'inhibiteur. Cette diminution est due à l'action de l'inhibiteur qui forme une couche protectrice sur la surface du métal, réduisant ainsi son interaction avec le milieu corrosif. Cela confirme encore une fois l'efficacité de l'inhibiteur dans le ralentissement du processus de corrosion.

c. L'efficacité inhibitrice (EI %)

Les valeurs expérimentales de l'efficacité inhibitrice (EI %) de l'acier A283 Gr-C en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i) dans un milieu d'acide (HCl) en présence l'inhibiteur à température ambiante ($T=25\text{ C}^\circ$) tableau (III.5).

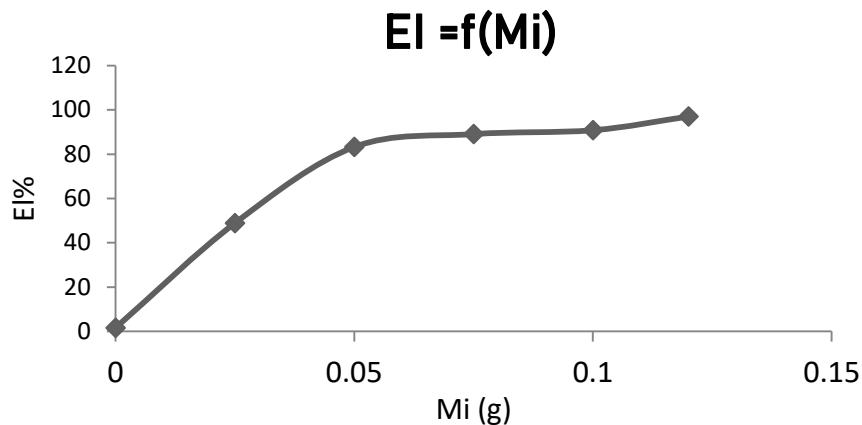


Figure III.14 : L'efficacité inhibitrice (EI%) en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i)

➤ Les résultats obtenus montrent une efficacité inhibitrice maximale qui atteint 96,97 % avec une masse de 0,12 g d'inhibiteur. Cette performance élevée confirme la capacité de l'inhibiteur à protéger efficacement le métal contre la corrosion en milieu acide chlorhydrique.

III.8.3. Avec Inhibiteur *Reichardia picroides* "a 35 C°:

Dans cette optique, nous avons testé l'intégrité de l'inhibiteur à une température de (35 C°) et la durée d'exposition (2h) en maintenant le même milieu acide, les mêmes masses d'inhibiteur, les résultats sont résumés dans le tableau (III.6).

Tableau III.6 : Variation de la perte de masse (Δm) en fonction de la masse de l'inhibiteur (g) et la vitesse de corrosion (V_{corr}) et L'efficacité inhibitrice (EI %) à la température (35 C°).

La masse de l'inhibiteur (g)	0	0.025	0.05	0.075	0.1	0.12
m_1 (g)	6.175	5.362	5.710	5.405	5.854	4.268
m_2 (g)	6.103	5.326	5.688	5.394	5.843	4.260
Δm (g)	0.072	0.036	0.022	0.015	0.011	0.008
$V_{\text{corr}} \cdot 10^{-3}$ (g/cm ² .h)	0.55	0.28	0.18	0.13	0.09	0.06
EI %	85.79	88.98	93.96	95.68	97.14	97.72

a. La perte de masse (Δm)

Les valeurs expérimentales de la perte de masse (Δm) de l'acier A283 Gr-C en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i) dans un milieu d'acide chlorhydrique (HCl) en présence l'inhibiteur à température ($T=35$ C°) tableau (III.6).

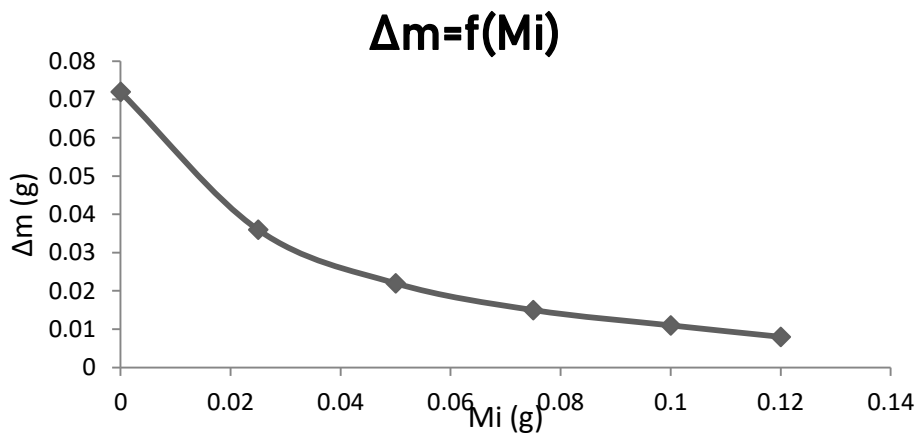


Figure III.15 : La perte de masse (Δm) en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i)

► Une réduction de la corrosion de la masse d'acier est observée lorsque la quantité d'inhibiteur augmente dans la solution acide (HCl) à 35 C°. Ce résultat confirme l'efficacité de l'inhibiteur dans ces conditions.

b. La vitesse de corrosion (V_{corr})

Les valeurs expérimentales de la vitesse de corrosion (V_{corr}) de l'acier A283 Gr-C en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i) dans un milieu d'acide (HCl) en présence l'inhibiteur à température ambiante ($T=35\text{ C}^\circ$) tableau (III.6).

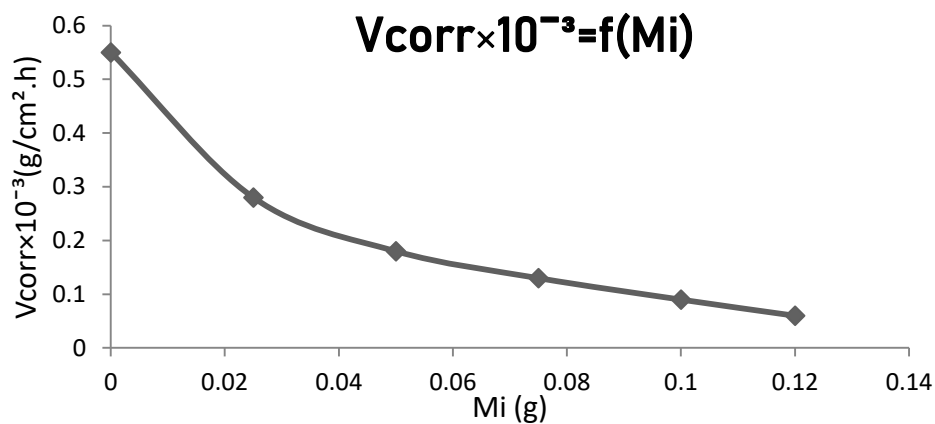


Figure III.16 : La vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i).

► Les résultats montrent que la vitesse de corrosion diminue avec l'augmentation de la quantité d'inhibiteur dans la solution acide (HCl) à une température de 35 C°. Cette diminution est due à l'effet protecteur de l'inhibiteur, qui réduit l'agressivité de l'acide sur le métal dans ces conditions.

c. L'efficacité inhibitrice (El %)

Les valeurs expérimentales de l'efficacité inhibitrice (El %) de l'acier A283 Gr-C en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i) dans un milieu d'acide (HCl) en présence l'inhibiteur à température ($T=35\text{ C}^\circ$) tableau (III.6).

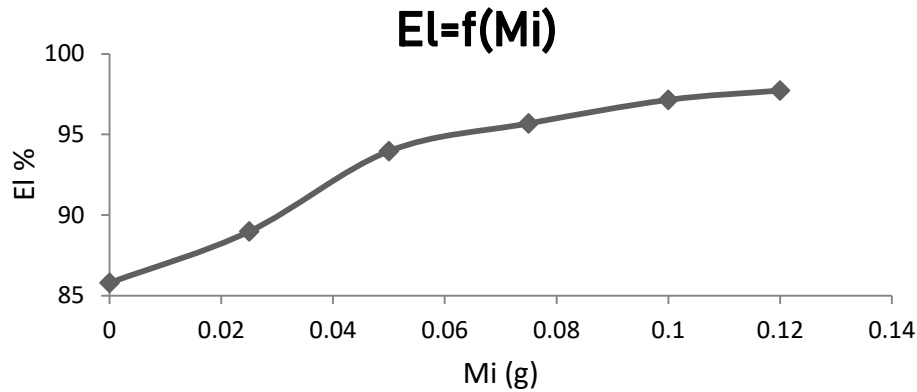


Figure III.17 : L'efficacité inhibitrice (EI%) en fonction de la masse d'inhibiteur (Mi).

➤ L'efficacité inhibitrice maximale atteinte est de 97.72 % avec une masse de 0,12 g d'inhibiteur dans la solution acide (HCl) à 35 C°. Ce résultat met en évidence la performance élevée de l'inhibiteur dans ces conditions.

III.8.4. Avec Inhibiteur *Reichardia picroides* " a 45 C°:

Dans cette optique , nous avons testé l'intégrité de l'inhibiteur à une température de (45 C°) et la durée d'exposition (2h) en maintenant le même milieu acide, les même masses d'inhibiteur, les résultats sont résumées dans le tableau (III.7).

Tableau III.7 : Variation de la perte de masse (Δ_m) en fonction de la masse de l'inhibiteur (g) et la vitesse de corrosion (V_{corr}) et L'efficacité inhibitrice (EI %) à la température (45 C°).

La masse de l'inhibiteur (g)	0	0.025	0.05	0.075	0.1	0.12
m_1 (g)	5.841	5.436	5.113	5.209	4.961	5.576
m_2 (g)	5.906	5.459	5.131	5.221	4.966	5.579
Δm (g)	0.065	0.023	0.018	0.012	0.005	0.003
$V_{corr} \cdot 10^{-3}$ (g/cm ² .h)	1.2	0.26	0.17	0.11	0.08	0.05
EI %	68.99	89.76	94.29	96.34	97.46	98.10

a. La perte de masse (Δm)

Les valeurs expérimentales de la perte de masse (Δm) de l'acier A283 Gr-C en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i) dans un milieu d'acide chlorhydrique (HCl) en présence l'inhibiteur à température ($T=45\text{ C}^\circ$) tableau (III.7).

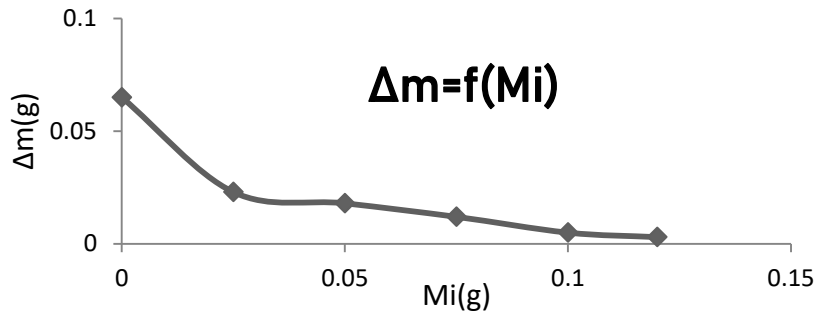


Figure III.18 : La perte de masse (Δm) en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i).

➤ On observe une diminution de la corrosion de l'acier avec l'augmentation de la quantité d'inhibiteur dans la solution acide (HCl) à 45 C° , ce qui confirme l'efficacité de l'inhibiteur dans ces conditions.

b. La vitesse de corrosion (V_{corr})

Les valeurs expérimentales de la vitesse de corrosion (V_{corr}) de l'acier A283 Gr-C en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i) dans un milieu d'acide (HCl) en présence l'inhibiteur à température ambiante ($T=45\text{ C}^\circ$) tableau (III.7).

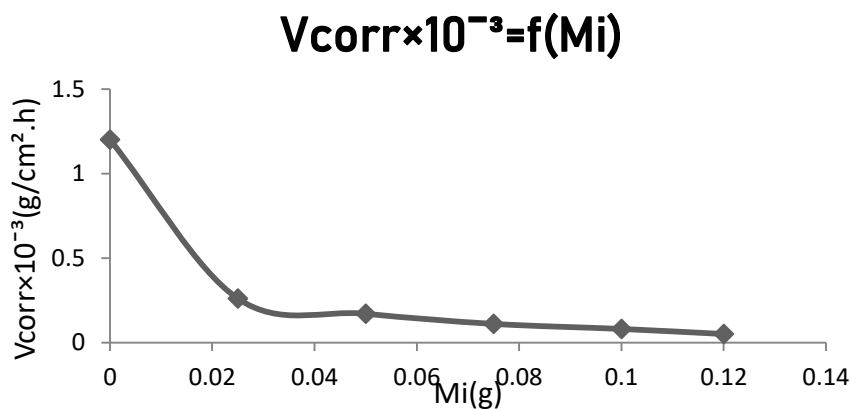


Figure III.19 : La vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i).

➤ Les résultats indiquent que l'augmentation de la quantité d'inhibiteur dans la solution acide (HCl) à 45 C° entraîne une diminution de la vitesse de corrosion. Cette réduction s'explique par l'action protectrice de l'inhibiteur, qui atténue l'effet agressif de l'acide sur le métal dans ces conditions.

c. L'efficacité inhibitrice (EI %)

Les valeurs expérimentales de l'efficacité inhibitrice (EI %) de l'acier A283 Gr-C en fonction de la masse d'inhibiteur (Mi) dans un milieu d'acide (HCl) en présence l'inhibiteur à température (T=45 C°) tableau (III.7).

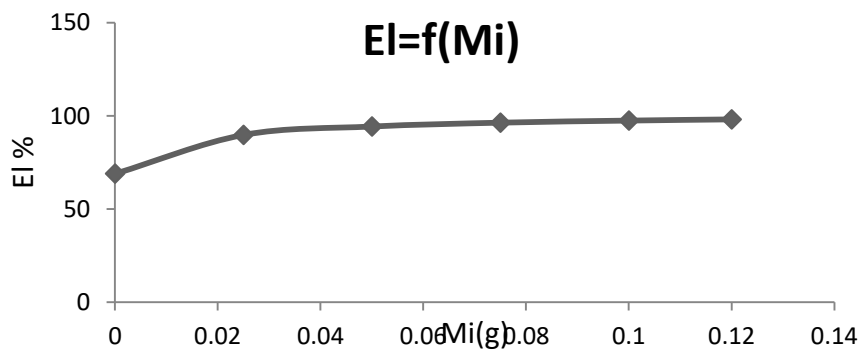


Figure III.20 : L'efficacité inhibitrice (EI%) en fonction de la masse d'inhibiteur (Mi).

➤ L'efficacité inhibitrice maximale atteinte est de 98,10 % avec une masse de 0,12 g d'inhibiteur dans la solution acide (HCl) à 45 C°. Ce résultat met en évidence la performance élevée de l'inhibiteur dans ces conditions.

➤ Comparaison des résultats obtenus à 25C° et 35C° et 45C°

Afin de déduire la température nécessaire pour l'obtention d'une bonne efficacité et par conséquent une protection maximale du matériau, nous avons comparé les résultats obtenus pour ces 3 températures.

- La perte de masse

Tableau III.8 : Variation de la perte de masse (Δ_m) en fonction de La masse de l'inhibiteur (g) à les trois températures (25 C°) et (35C°) et (45C°).

La masse de l'inhibiteur (g)		0	0.025	0.05	0.075	0.1	0.12
Δm	25C°	0.50	0.17	0.06	0.04	0.04	0.01
	35C°	0.072	0.036	0.022	0.015	0.011	0.008
	45C°	0.065	0.023	0.018	0.012	0.005	0.003

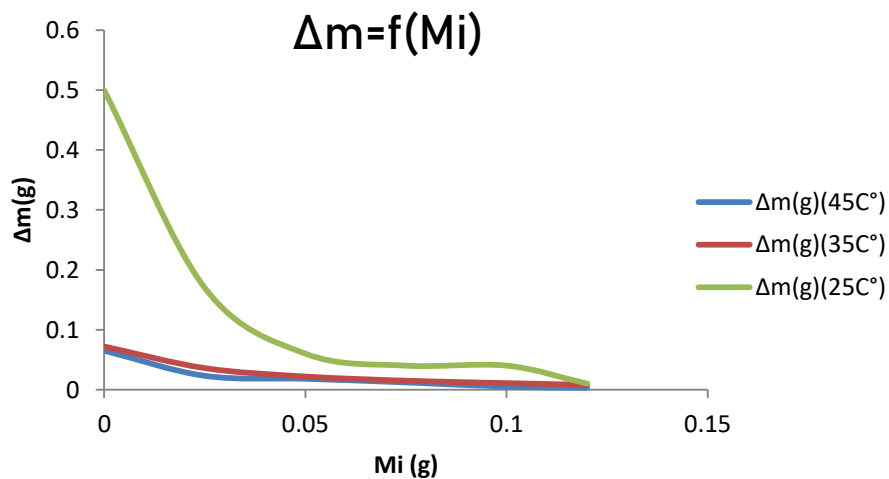


Figure III.21 : La perte de masse (Δm) en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i).

➤ D'après la figure (III.21), la perte de masse est plus faible à 35 C° qu'à 25 C°, et elle diminue encore davantage à 45 C°, ce qui indique que la corrosion diminue avec l'élévation de la température en présence de l'inhibiteur

- La vitesse de corrosion

Tableau III.9 : Variation de la vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction de La masse de l'inhibiteur (g) à les deux températures (25 C°) et (35C°) et (45C°).

La masse de l'inhibiteur (g)		0	0.025	0.05	0.075	0.1	0.12
$V_{\text{corr}} \cdot 10^{-3}$ (g/cm ² .h)	25C°	3.81	1.30	0.50	0.33	0.29	0.08
	35C°	0.55	0.28	0.18	0.13	0.09	0.06
	45C°	1.2	0.26	0.17	0.11	0.08	0.05

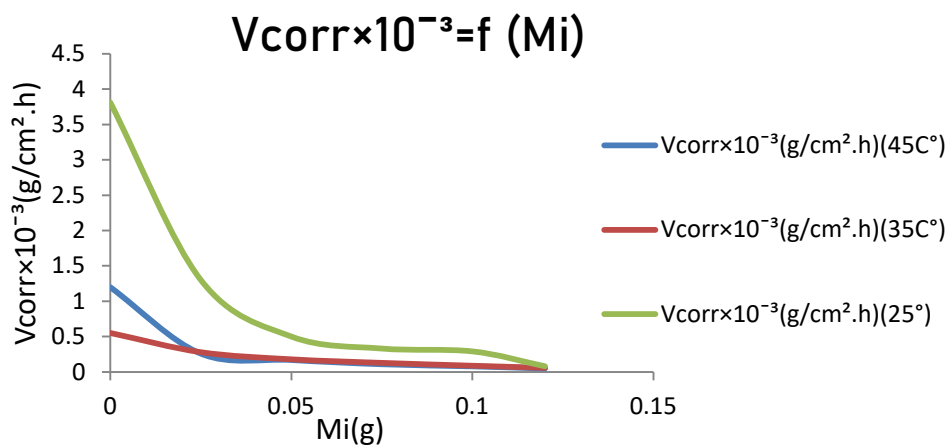


Figure III.22 : La vitesse de corrosion (V_{corr}) en fonction de la masse d'inhibiteur (M_i).

➤ On remarque que la vitesse de corrosion est plus faible à 35 C° qu'à 25 C°, et elle diminue davantage à 45 C°, ce qui montre que l'élévation de la température contribue à réduire la vitesse de corrosion en présence de l'inhibiteur.

c. L'efficacité inhibitrice

Tableau III.10 : Variation de L'efficacité inhibitrice (EI %) en fonction de la masse de l'inhibiteur (g) à de températures (25C°) et (35 C°) et (45C°).

La masse de l'inhibiteur (g)		0	0.025	0.05	0.075	0.1	0.12
EI %	25C°	1.55	48.81	83.22	89.04	90.79	96.97
	35C°	85.79	88.98	93.96	95.68	97.14	97.72
	45C°	68.99	89.76	94.29	96.34	97.46	98.10

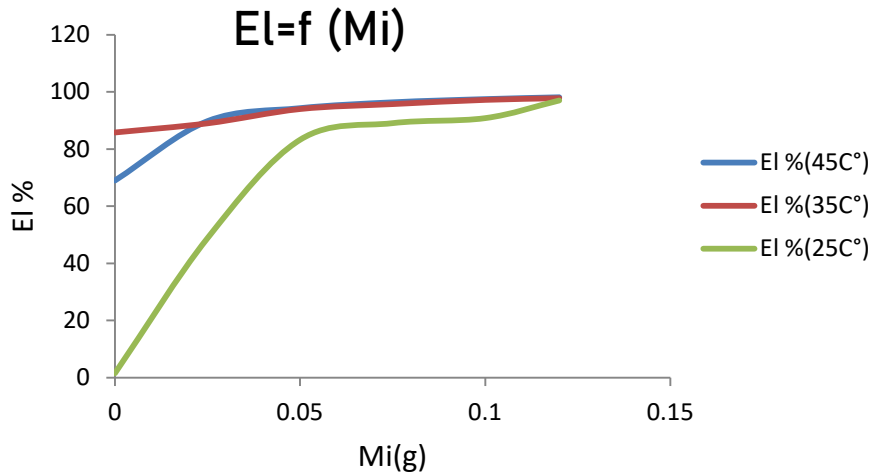


Figure III.23 : L'efficacité inhibitrice (EI%) en fonction de la masse d'inhibiteur (Mi).

➤ On observe que l'efficacité de l'inhibiteur augmente progressivement avec la température, en passant de (EI%=96.97) à 25 C°, à (EI%=97.72) à 35 C°, pour atteindre (EI%=98.10) à 45 C°. Cela montre clairement que la performance de l'inhibiteur s'améliore avec l'élévation de la température.

III.9. Conclusion

Les résultats montrent que l'inhibiteur "*Reichardia picroides*" joue un rôle efficace dans la réduction de la corrosion de l'acier A283 Gr-C en milieu acide chlorhydrique, en diminuant la perte de masse et la vitesse de corrosion, et en augmentant son efficacité. De plus, l'élévation de la température à 45C° renforce cet effet, ce qui signifie que la température améliore la performance de l'inhibiteur et augmente la protection de l'acier contre la corrosion.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est d'étudier l'extraction d'un inhibiteur à partir de la plante *Reichardia picroides* et d'évaluer l'activité inhibitrice de cet inhibiteur sur la corrosion de l'acier au carbone dans un milieu acide (HCl).

Dans un premier temps, nous avons examiné le comportement de l'acier au carbone dans un milieu acide ainsi que les facteurs influençant la corrosion. En particulier, nous avons fait varier le temps d'immersion en l'absence d'inhibiteur, et les résultats obtenus ont révélé une diminution progressive de la vitesse de corrosion avec l'allongement du temps d'exposition.

En étudiant différentes quantités d'inhibiteur (0g, 0.025g, 0.05g, 0.075, 0.1g, 0.12g),

Nous avons constaté que la meilleure quantité est de 0.12g, où la vitesse de corrosion est réduite et le taux d'inhibition a atteint 98.10 % à 45C°.

Les résultats obtenus montrent que l'inhibiteur extrait de *Reichardia picroides* joue un rôle efficace dans la protection de l'acier contre la corrosion.

À partir des résultats obtenus, nous pouvons dire que tourner vers la chimie verte comme solution pour réduire le problème de la corrosion est la meilleure solution, car ces ressources naturelles sont riches en substances actives qui ont la capacité de s'adsorber sur la surface du métal afin de le protéger et par conséquent l'environnement.

Nous espérons également à l'avenir tester d'autres extraits de plantes comme catalyseurs blancs. Le recours aux ces derniers est devenu une nécessité primordial.

Références bibliographiques

- [1] : Dr. AKE. « Cours de stockage, distribution et transport des hydrocarbures (STDH) ». Licence 2, Service Leroini, COTE D'IVOIRE. [En ligne]. Disponible à l'adresse
- [2] : American Petroleum Institute (API) : L'API publie des normes et des recommandations pour la conception, la construction et la maintenance des installations de stockage des hydrocarbures. Leurs documents, tels que les API 650 (réservoirs en acier) et API 653 (inspection, réparation, altération et reconstruction de réservoirs en acier existants) sont des références couramment utilisées dans l'industrie
- [3] : Publications spécialisées: Des revues spécialisées dans l'industrie pétrolière et gazière, telles que Oil & Gas Journal, Offshore Magazine et Petroleum Review, fournissent souvent des articles techniques et des études de cas sur les technologies de stockage des hydrocarbures
- [4] :Rapports gouvernementaux : Les agences gouvernementales chargées de la réglementation de l'industrie pétrolière et gazière, telles que l'Environmental Protection Agency (EPA) aux États-Unis ou l'Agence internationale de l'énergie (AIE), publient des directives et des rapports sur les meilleures pratiques en matière de stockage des hydrocarbures
- [5] :CHAMAYOU, Réais « Réservoirs métalliques stockage des liquides Généralités » Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique BM6590 (1997) : BM6590-1.
- [6] : Département Génie des Transports U.M. Constantine Technologie des parcs de Stockage et terminaux Master 1 TDH S2 (2019-2020).
- [7] : AFNOR «Corrosion des métaux et alliages : terme principaux et définition »NF EN ISO8044, Paris, AFNOR(2000).
- [8] :C.VARGEL «le comportement de l'aluminium et de ses alliages» dunod Technique,1979, 25-105.
- [9] : S , KHERRAF,(2021-2022). Phénomène de corrosion et modes de protection. Université 20 Août 1955 – Skikda.
- [10] : J.BENARD, A.MICHEL, J.PHILBERT, et TALBOT : « Métallurgie générale», édition Masson, 2^{ème} édition, 1984.
- [11] : Dr ; H, BENSABRA, Cours de Corrosion et Protection des Métaux IFP Cours Introduction & théorie de la corrosion
- [12] : JEAU- Jacques lamoureux. precis de corrosion.Edition Beauchemin masson. 1980.
- [13] : R. MEHIBIL. Etude de l'efficacité inhibitrice de quelques nouveaux inhibiteurs, dits non Polluants, sur la corrosion de deux types d'alliages d'aluminium. Université de Skikda,2008
- [14] :M, BOUHADDA (contribution à l'étude de l'utilisation des inhibiteurs dans la lutte contre la corrosion) Université Kasdi Merbah Ouargla , 2016
- [15] : Maurin Fixation. (s.d) .Méthode de lutte contre la corrosion. P.227.228.Disponible à l'adresse
- [16] : N, LAHIANI. R,SAHRAOUI..pdf

- [17] : N, LAHIANI .R, SAHRAOUI. Utilisation de l'extrait de feuilles d'olivier sauvage comme inhibiteur de corrosion de l'acier. Mémoire de Projet de Fin d'Etudes, Département : Génie Chimique Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles,ENP2022
- [18] : Camfil.corrosion : définition, causes, effets et prévention. Disponible à l'adresse
- [19] : N, ABEKHTI &A, BENDAHIR. La corrosion dans les installations pétrolières de surface, causes, effets et remèdes, Thèse de Master, génie chimique, Université Adrar
- [20] : A. POPOVA, E. SOKOLOVA, S. RAICHEVA, M. CHRISTOV, « AC and DC study of the temperature effect on mild steel corrosion in acid media in the presence of benzimidazole derivatives » Corros. Sci. 45(2003) 33.
- [21] : M, BOUTELDJA, CONTRIBUTION a l'étude de l'utilisation des inhibiteurs dans la lutte contre la corrosion 24 / 05 / 2016 Université Kasdi Merbah Ouargla
- [22] : S. PAYAN, « Comportement à la corrosion galvanique de matériaux composites à matrice d'alliage d'aluminium renforcée par des fibres de carbone haut-module », Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, France (2001).
- [23] : C. FIAUD, C. LEMAITRE, N. PEBERE, Corrosion et anticorrosion, chapitre 13. Lavoisier, Paris (2002)
- [24] : NACE Glossary of corrosion Terms. Materials Protection, vol :4, N°1 (1965).
- [25] : G. KREYSA and W. KOCHANNEK, Kinetic Investigations of the Primary Step of Electrochemical Coal Oxidation, Journal of Electrochemical Society 132 (1985) 2084-2089
- [26] : G. TRABANELLI, V. CARASSITI, Corrosion Science and Technology, Plenum Press, New York (1970).
- [27] : K. RAHMOUNI, Thèse de doctorat, Université Pierre et marie curie. paris vi déc (2005).
- [28] : C.FIAUD, « Inhibiteur de corrosion », Université Pierre & Marie curie, ENSC, Paris. Techniques de l'ingénieur, Traité corrosion – Vieillessement, Vol. Cor 1005, pp. 1-14 (2006).
- [29] : D. LANDOLT, « Traité des matériaux, corrosion et chimie des surfaces des matériaux », Ed. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, pp188-200. ISBN2-88074-245-5 (1993).
- [30] : I. FLORINA Constantin, « Étude de l'efficacité d'inhibiteurs de corrosion utilisés dans les liquides de refroidissement», Thèse de doctorat, Université de Pitești-Roumanie, Roumanie(2011).
- [31] : A,FIALA, Synthèses et caractérisation de nouvelles molécules contenant du soufre et de l'azote, études de leur effet inhibiteur sur la corrosion des métaux de transition application a la protection du cuivre en milieux acide, Thèse de Doctorat, université Mentouri, Constantine, (2007).
- [32] : E. SCHASCHL, Methods for evaluation and testing of corrosion inhibitors. In : Ed. By C.C. Nahan, NACE ,Houston, P.28 (1973).
- [33] : F. BENTISS, M. LEBRINI, M. LAGRENEE. Corros. Sci. 47(2005)2915.

- [34] : C ,CAO , On electrochemical techniques for interface inhibitor research, Corros. Sci. 38 2073-2082, (1996).
- [35] : S. BILGIC, N. CAHSKAN, Appl. Surf Sci., 152(1999)107.
- [36] : A. ALDYKIEWICZ, H. ISAACS et A. DAVENPORT, «The investigation of cerium as a cathodic inhibitor for aluminum-copper alloys» Journal of the Electrochemical Society, vol. 142, pp. 3342-3350, 1995.
- [37] : F, CHRISTIAN, Inhibiteurs de corrosion , technique de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques, vol. M-160, (1999-2000).
- [38] : A,MERSELLAB et H ,CHEMANI (Etude du pouvoir inhibiteur du Tryptophane et de la Proline sur la corrosion d'un acier doux.-Effets de température et de synergie.), thèse de master, Université Djilali Bounaâma de Khemis Miliana, 2017.
- [39] : I, GHIABA, A, RAOUDI Etude de l'effet inhibiteur des huiles essentielles de *Anacyclus valentinus* L sur la corrosion de l'acier X70 dans un milieu d'acide H₂SO₄ (0.5M)
- [40] : A. POPOVA, E. SOKOLOVA, S. RAICHEVA, M. CHRISTOV, « AC and DC study of the temperature effect on mild steel corrosion in acid media in the presence of benzimidazole derivatives » Corros. Sci. 45(2003) 33.
- [41] : S, MAROUF. F, LAKEHAL. Etude de l'inhibition de la corrosion d'un acier au carbone par 1,2-diaminophenyl et 1,2-diaminopropane.26 /06/2018
- [42] : G. STEELE, «Filiform Corrosion on Architectural Aluminium» . Anti-corrosion Methods & Materials, vol. 41, pp. 8-12, 1994.
- [43] : ACCOAST, «la corrosion des matériaux métalliques en eau de mer» le spécialiste de la préservation des ouvrages maritimes et fluviaux, 2018. [En ligne].
- [44] : G. KREYSA and W. KOCHANEK, Kinetic Investigations of the Primary Step of Electrochemical Coal Oxidation, Journal of Electrochemical Society 132 (1985) 2084-2089
- [45] : TOUAHRIA, L'effet d'inhibiteur vert OFI (*opuntia ficus indica*) sur la corrosion d'un acier à béton RB14.qMémoire de master, Faculté des Sciences de l'ingénieur, université badji mokhtar-annaba Juillet 2019.
- [46] : M ,MANSOURI, Etude de corrosion en utilisant les inhibiteurs Spécialité construction mécanique, Université Mohamed Khider, Biskra 2020
- [47] : A ,NADJI, Synthèse et étude de l'effet inhibiteur contre la corrosion d'un acier au carbone A283 Gr-C par une molécule organique, Spécialité chimie des produits naturels, Université Larbi Tebssi, Tébessa 2020.