



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 du diplôme de

## Master

Filière : Industries Pétrochimiques

Spécialité : Génie Pétrochimique

**Thème :**

Évaluation expérimentale et théorique de l'efficacité  
inhibitrice de la corrosion de l'acier C1020 en milieu  
HCl 1M par une molécule organique.

**Réalisé par:**

- BOUSIREB Fella
- KASSAH Amani
- AGGOUN Aya

**Encadré par :**

Pr. SOBHI Chafia

Année universitaire 2025/2026

# Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à **Dieu** Tout-Puissant pour nous avoir donné la force, la patience et la persévérance nécessaires afin de mener à bien ce travail.

Nous souhaitons adresser nos sincères remerciements à notre encadrante, **Pr. SOBHI Chafia**, pour son accompagnement, ses précieux conseils, sa disponibilité ainsi que son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous exprimons également notre reconnaissance à **la responsable du laboratoire**, ainsi qu'à **l'ensemble du personnel du laboratoire n°3**, pour leur aide, leur collaboration et les moyens mis à notre disposition afin de mener à bien la partie expérimentale de ce travail.

Nous remercions chaleureusement **le département de Pétrochimie, spécialité Génie pétrochimique**, pour la qualité de la formation et les connaissances précieuses qui nous ont été transmises tout au long de notre cursus universitaire.

Nous exprimons également notre reconnaissance aux membres du **jury** qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Enfin, nous adressons nos remerciements à **nos familles, nos amis, nos collègues et à toute personne** ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

**Dédicace:**



Avec tout mon amour et ma reconnaissance . je dédie ce travail

**À moi-même, et à mes chères binômes, Amani et Aya**

À notre collaboration , notre courage et notre persévérance tout au long de ce parcours universitaire

**À ma chère mère,**

source infinie d'amour, de patience et de tendresse, qui a toujours cru en moi et n'a jamais cessé de m'encourager dans les moments difficiles.

**À mon cher père,**

symbole de force, de sacrifice et de sagesse, qui a tout donné pour que je puisse poursuivre mes études dans les meilleures conditions.

**À mon frère mohamed et sœurs amina et zahra,**

pour leur présence, leur soutien et leur affection qui m'ont accompagnée tout au long de mon parcours, et plus particulièrement **à ma grande sœur Amina**, pour son encouragement, sa présence et son soutien constant.

**À mon encadrante Pr. SOBHI Chafia,**

pour son accompagnement, ses conseils précieux, sa disponibilité et son aide tout au long de la réalisation de ce travail.

**À mes amis de vie**

pour leur soutien, leur compréhension et leur fidélité.

**À mes camarades et collègues,**

avec qui j'ai partagé les efforts, les moments de stress, mais aussi les beaux souvenirs de ces années universitaires.

**Bousireb Fella**

**Dédicace:**



Avec tout mon amour et ma reconnaissance . je dédie ce travail

**À moi-même, et à mes chères binômes, Fella et Aya**

À notre collaboration , notre courage et notre persévérance tout an long de ce parcours universitaire

Je nous souhaite un avenir plein de réussite , de bonheur et de succès

**À ma chère mère**

pour son amour infini, ses prières et sa tendresse qui m'ont toujours guidée.

**À mon cher père**

pour son soutien inébranlable, ses sacrifices et sa confiance en mes capacités.

**À mes chères sœurs Selma , Maroua et Oumaima**

pour leur complicité, leur soutien, leur écoute et présence tout au long de ce parcours.

**À mon fiancé**

pour sa patience, ses encouragements de chaque instant et sa présence rassurante à mes côtés.

**À mes magnifiques neveu et nièce, sajed sibel**

qui apportent tant de joie et d'amour dans ma vie.

**À mes chers amis**

Merci d'être ma deuxieme famille .votre présence . votre gentillesse. vos encouragements et vos mots bienveillants ont rendu ce chemin plus doux . merci du fond du cœur.

**Kassah Amani**

**Dédicace:**



Avec tout mon amour, ma gratitude et ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail

**À moi-même et à mes chères binômes, Amani et Fella,**

pour notre collaboration, notre détermination et tous les efforts partagés tout au long de ce parcours universitaire. Que notre avenir soit rempli de réussite, de bonheur et de succès.

**À ma très chère mère,**

pour son amour inconditionnel, sa tendresse, ses sacrifices et ses prières qui m'ont toujours guidée et soutenue

**À mon cher père,**

pour son soutien indéfectible, sa confiance en moi, ses conseils précieux et tous les sacrifices consentis pour mon éducation

**À mes chers frères Mansour, Islam et ma petite sœur Ritadje**

pour leur affection, leur présence, leurs encouragements et leur soutien constant durant toutes ces années.

**À mon cher fiancé,**

pour sa patience, sa compréhension, ses encouragements permanents et sa présence rassurante à mes côtés dans les moments les plus importants.

À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Je dédie ce mémoire avec toute ma reconnaissance et mon profond respect.

**Aggoun Aya**

## Résumé

Ce travail a pour objectif d'étudier l'inhibition de la corrosion de l'acier dans un milieu acide chlorhydrique (HCl) en présence d'un inhibiteur de corrosion organique, à savoir la molécule organique MBP. L'étude a été réalisée par méthode gravimétrique (perte de masse) afin d'évaluer l'efficacité de l'inhibiteur dans la protection du métal. Les essais ont été effectués à différentes températures comprises entre 25 et 40 °C et pour différentes concentrations de l'inhibiteur. Les résultats obtenus montrent que l'inhibiteur étudié réduit significativement la perte de masse de l'acier, ce qui confirme son efficacité contre la corrosion. L'efficacité inhibitrice dépend de la concentration de l'inhibiteur ainsi que de la température du milieu. L'augmentation de la température entraîne une augmentation de la vitesse de corrosion et peut diminuer légèrement l'efficacité inhibitrice.

**Mots clés :** corrosion, acier, méthode gravimétrique, molécule organique MBP, HCl, température, concentration.

## المخلص

يهدف هذا العمل إلى دراسة تثبيط تآكل الفولاذ في وسط حمض الهيدروكلوريك (HCl) في وجود مثبط تآكل عضوي وهو (MBP) ثم إجراء الدراسة باستعمال الطريقة الوزنية (فقدان الكتلة) من أجل تقييم فعالية المثبط في حماية المعدن. تمت التجارب عند درجات حرارة مختلفة تتراوح بين 25 و40 درجة مئوية وبتراكيز مختلفة للمثبط. أظهرت النتائج أن المثبط يقلل بشكل ملحوظ من فقدان الكتلة، مما يدل على فعاليته في مقاومة التآكل. تعتمد فعالية التثبيط على تركيز المثبط وعلى درجة حرارة الوسط. حيث يؤدي ارتفاع درجة الحرارة إلى زيادة سرعة التآكل وقد يقلل بشكل طفيف من كفاءة المثبط.

**الكلمات المفتاحية:** التآكل، الفولاذ، الطريقة الوزنية، عضوي، MBP، حمض HCl، درجة الحرارة،

التركيز.

## Abstract

This work aims to study the corrosion inhibition of steel in hydrochloric acid (HCl) medium in the presence of a single organic corrosion inhibitor, namely (MBP). The study was carried out using the gravimetric method (weight loss) in order to evaluate the efficiency of the inhibitor in protecting the metal. The experiments were performed at different temperatures ranging from 25 to 40 °C and at different inhibitor concentrations. The obtained results show that the inhibitor significantly reduces the mass loss of steel, confirming its effectiveness against corrosion. The inhibition efficiency depends on both inhibitor concentration and temperature. An increase in temperature leads to an increase in corrosion rate and may slightly decrease the inhibition efficiency.

**Keywords:** corrosion, steel, gravimetric method, MBP, organic, HCl, temperature, concentration.

## Liste des symboles et abréviations

### Symboles

pH : Potentiel hydrogène.

$\pi$  : Électrons  $\pi$ .

M : Molaire ( $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ).

$\theta$  : Degré de recouvrement de la surface.

K : Constante d'adsorption.

C : Concentration de l'inhibiteur.

$\Delta m$  : Perte de masse.

W : Vitesse de corrosion.

S : Surface exposée.

t : Temps d'immersion.

EI (%) : Efficacité d'inhibition.

I : Potentiel d'ionisation.

A : Affinité électronique.

$\Delta E$  : Énergie du gap (HOMO–LUMO).

$\mu$  : Potentiel chimique.

$\chi$  : Électronégativité.

$\eta$  : Dureté chimique.

$\sigma$  : Mollesse chimique.

$\omega$  : Indice d'électrophilie.

### Abréviations

C1020 : Acier au carbone AISI 1020.

HCl : Acide chlorhydrique.

MBP : 4-[5-(4-methylphenyl)-3-(trifluoromethyl)pyrazol-1-yl]benzenesulfonamide.

NACE : National Association of Corrosion Engineers.

PIB : Produit Intérieur Brut.

CEFRACOR : Centre Français de l'Anticorrosion.

DFT : Density Functional Theory.

LUMO : Lowest Unoccupied Molecular Orbital.

HOMO : Highest Occupied Molecular Orbital

# Sommaire

Remerciement .....	I
Dédicace.....	II
Résumé.....	V
Liste des symboles et abréviations.....	VIII
Introduction générale .....	1
Références.....	3
<b>Chapitre I : Généralités sur la corrosion</b>	
I.1 Introduction .....	4
I.2 Définition de la corrosion .....	4
I.3 Impact économique de la corrosion.....	4
I.4 Classification des principaux types decorrosion .....	5
I.4.1 Classification selon le mécanismes dedégradation .....	5
I.4.1.1 Corrosion chimique .....	5
I.4.1.2 Corrosion électrochimique .....	5
I.4.1.3 Corrosion bactérienne .....	7
I.4.2 Classification selon la morphologie de l'attaque .....	7
I.4.2.1 Corrosion généralisée ou uniforme .....	7
I.4.2.2 Corrosion localisée .....	7
I.5 Facteurs influençant le processus de corrosion .....	10
I.5.1 Facteurs environnementaux .....	10
I.5.2 Facteurs liés à l'état de surface et au métal lui-même .....	10
I.6 Méthodes de protection contre la corrosion .....	11
I.6.1 Prévention par le choix de la forme .....	11
I.6.2 Protection active contre la corrosion .....	12
I.6.3 Protection passive contre la corrosion .....	14
I.6.4 Classification selon la durée de protection .....	15
I.7 Conclusion .....	15
Références.....	16
<b>Chapitre II : les molécules organiques et l'inhibiteur de corrosion</b>	
II.1 Introduction .....	19
II.2 Inhibiteurs de corrosion.....	19
II.2.1 Définition.....	19
II.2.2 Propriété d'inhibiteurs .....	19
II.2.3 Classification d'inhibiteurs .....	20
II.2.3.1 Classes d'inhibiteurs .....	20
II.2.3.2 Classification selon la composition chimique.....	21
II.2.3.3 Classification selon la nature électrochimique du processus .....	22
II.2.3.4 Classification selon le mode d'action .....	24
II.2.4 Utilisation des inhibiteurs.....	25
II.3 Les molécules organiques comme inhibiteurs de la corrosion de l'acier au carbone ..	25
II.3.1 Mécanisme d'inhibition de la corrosion .....	25
II.3.2 Performances des inhibiteurs organiques .....	27
II.3.3 Défis et limitations .....	27
II.4 Types d'adsorption.....	28
II.5 Isothermes d'adsorption .....	29
II.6 Courbe de tafel .....	30

II.7 Conclusion.....	30
Références.....	31
<b>Chapitre III : Matériels et Méthodes</b>	
III.1 Introduction .....	35
III.2 Objectif .....	35
III.3 Matériaux .....	35
III.3.1 Matériaux métallique (C1020) .....	35
III.3.2 équivalents internationaux de l'acier au carbone 1020 .....	36
III.3.3 Composition chimique de l'acier au carbone 1020.....	37
III.3.4 Propriétés mécaniques de l'acier au carbone 1020 .....	38
III.4 Milieu corrosif .....	38
III.5 Inhibiteur de corrosion.....	39
III.6 Mécanisme d'Adsorption .....	40
III.7 Interaction dans le milieu HCl .....	41
III.8 Appareillage utilisé .....	41
III.9Préparation expérimentale .....	42
III.9.1 Préparation des échantillons.....	42
III.9.2 Préparation des solutions.....	43
III.10 Méthode d'étude de la corrosion.....	44
III.10.1 Méthode gravimétrique.....	44
III.11 Évaluation de l'efficacité inhibitrice.....	45
III.11.1 Rendement d'inhibition (%).....	45
III.11.2 Degré de recouvrement ( $\theta$ ).....	45
III.12 Etude théorique .....	46
Références.....	47
<b>Chapitre IV : Résultatset discussions</b>	
IV.1 Introduction.....	49
IV.2 Étude du comportement à la corrosion de l'acier au carbone C1020 dansun milieu corrosif HCl .....	49
IV.2.1 Effet de la concentration de l'inhibiteur .....	49
IV.2.2 Effet du temps d'immersion.....	52
IV.2.3 Effet de la température .....	55
IV.3 Isothermes d'adsorption.....	57
IV.4 Courbe Tafel .....	60
IV.5 étude théorique des propriétés électronique de la molécule MBP .....	60
IV.6 Conclusion .....	63
Références.....	64
<b>Conclusion générale</b> .....	65

## LISTE DES FIGURES

Figure	Titres	Page
Figure I.1	Schéma de principe du processus de corrosion électrochimique et des réactions cathodique et anodique associées	6
Figure I.2	Schéma illustrant le processus de biocorrosion sur une surface métallique	7
Figure I.3	Classement électrochimique des métaux	8
Figure I.4	Les différents types de corrosion	9
Figure I.5	Exemples de conceptions de joints soudés optimisés pour minimiser les risques de corrosion	11
Figure I.6	Schéma de principe de la protection cathodique par anode sacrificielle	12
Figure I.7	Schéma de principe de la protection cathodique par courant imposé	13
Figure I.8	Schéma illustrant le phénomène de corrosion et de polarisation dû au courant de fuite	13
Figure I.9	Illustration des mécanismes de protection passive contre la corrosion : galvanisation à chaud et protection barrière simple	14
Figure II.1	Classement des inhibiteurs de corrosion	20
Figure II.2	Formation des couches barrières cathodiques (A) et anodiques (B), en milieu acide	23
Figure II.3	Diagrammes d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur de corrosion	23
Figure II.4	Mode d'adsorption physique et chimique du médicament metformine en milieu HCl sur la surface de l'acier doux	26
Figure II.5	Adsorption d'un inhibiteur organique sur une surface métallique en milieu aqueux	28
Figure II.6	Courbe de Tafel	30
Figure III.1	Métal C1020	36
Figure III.2	structure moléculaire MBP	40
Figure III.3	(a) bain marie (b)Échantillons métalliques C1020 (c) papier abrasif (d)Balance analytique (mesure des masses)	42
Figure III.4	métal après le polissage et après polissage	43
Figure III.5	les solution d' inhibiteur diluées dans l'HCl 1M (en PPM	43
Figure III.6	mesure de la masse la pièce métallique à l'aide d'une balance électronique	44
Figure IV.1	Courbe des variations de la perte de masse en fonction de la concentration de l'inhibiteur.	50

Figure IV.2	Courbe de variation de vitesse de corrosion en fonction de la concentration de l'inhibiteur.	50
Figure IV.3	Courbe de variation de l'efficacité inhibitrice en fonction de la concentration de l'inhibiteur	51
Figure IV.4	Courbe de variation de la vitesse de fonction du temps d'immersion en absence et en présence de l'inhibiteur.	52
Figure IV.5	Courbe de variation de l'efficacité inhibitrice en fonction de temps.	53
Figure IV.6	Courbe de variation de la perte de masse en fonction du temps	54
Figure IV.7	Courbe de variation de la perte de masse en fonction du température	55
Figure IV.8	Courbe de variation en de l'efficacité inhibitrice fonction de la température.	56
Figure IV.9	Isotherme d'adsorption de Langmuir de l'acier C1020 en présence de différentes concentrations des inhibiteurs	57
Figure IV.10	Isotherme d'adsorption de Temkin de l'acier C1020 en présence de différentes concentrations des inhibiteurs	58
Figure IV.11	Isotherme d'adsorption de freundlich de l'acier C1020 en présence de différentes concentrations des inhibiteurs	58
Figure IV.12	Les courbes de polarisation dans HCl 1M en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur	60
Figure IV.13	(a) et (b) les orbitales moléculaires frontières (LUMO et HOMO), (c) de la La structure moléculaire de la MBP Optimisée par DFT/B3LYP/6-31G (d,p) en phase gaz et (d) Surface de potentiel électrostatique moléculaire (MESP).	61

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Tableau III.1	Composition chimique de l'acier au carbone	37
Tableau III.2	Propriétés mécaniques de l'acier au carbone	38
Tableau IV.1	Résultats de la corrosion de l'acier au carbone C1020 dans HCl 1 M en présence de différentes concentrations d'inhibiteur après 24 h à température ambiante	49
Tableau IV.2	Effet du temps d'immersion sur la corrosion de l'acier C1020	52
Tableau IV.3	Comparaison des coefficients de corrélation des isothermes d'adsorption étudié.	59
Tableau IV.4	Les Paramètres de chimie quantique calculés à la base de B3LYP/6-31G (d, p) de la molécule de MBP en phase gazeuse en eV	62

# *Introduction générale*



## Introduction générale

La corrosion des matériaux métalliques constitue un problème majeur dans de nombreux secteurs industriels en raison de ses impacts économiques, environnementaux et sécuritaires. Elle correspond à la dégradation progressive des métaux résultant de réactions chimiques ou électrochimiques avec le milieu environnant, notamment les solutions acides largement utilisées dans les procédés industriels tels que le décapage, le nettoyage et le traitement de surface [1,2]. Malgré les progrès réalisés dans ce domaine, le contrôle de la corrosion reste complexe en raison de la multiplicité des paramètres influents, tels que la température, la nature du milieu corrosif et la composition du matériau.

Afin de limiter ces phénomènes de dégradation, plusieurs méthodes de protection ont été développées, notamment les revêtements protecteurs, la protection cathodique et l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion. Ces derniers représentent une solution particulièrement efficace en raison de leur facilité d'application et de leur coût relativement faible [3]. Parmi eux, les inhibiteurs organiques occupent une place importante grâce à leur capacité à s'adsorber sur la surface métallique et à former une couche protectrice limitant les réactions de dissolution anodique et cathodique [4,5].

Dans ce contexte, la présente étude porte sur la corrosion de l'acier au carbone C1020 en milieu acide chlorhydrique (HCl), un environnement fortement agressif et couramment utilisé dans l'industrie pétrochimique. Le choix de cet acier est justifié par son utilisation répandue et sa sensibilité à la corrosion dans de telles conditions.

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'efficacité inhibitrice d'une molécule organique (MBP), utilisée comme inhibiteur de corrosion en milieu acide. L'intérêt croissant pour ces molécules organiques dans le domaine de la corrosion repose sur leur structure chimique riche en hétéroatomes (N, O, S) et en systèmes  $\pi$ , favorisant leur adsorption sur la surface métallique et la formation d'un film protecteur. [6,7].

L'utilisation de ces molécules organiques comme inhibiteurs de corrosion s'inscrit également dans une approche innovante de valorisation de composés chimiques, contribuant à la réduction de leur impact environnemental tout en offrant une alternative potentielle aux inhibiteurs synthétiques classiques. [8].

Cette étude vise également à analyser l'influence de certains paramètres expérimentaux, notamment la concentration de l'inhibiteur et la température, sur la vitesse de corrosion. Une

attention particulière est accordée au mécanisme d'adsorption, souvent interprété à l'aide des modèles d'isothermes d'adsorption.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres : le premier chapitre présente des généralités sur la corrosion et ses différentes formes. Le deuxième chapitre traite des méthodes de protection contre la corrosion, en mettant l'accent sur les inhibiteurs et leurs mécanismes d'action. Le troisième chapitre décrit les matériaux et les méthodes expérimentales utilisées. Enfin, le quatrième chapitre est consacré à la présentation, l'analyse et la discussion des résultats obtenus.

## Références

1. Jones, D. A. (2017). Principles and prevention of corrosion (2nd ed.). Pearson.
2. Revie, R. W., & Uhlig, H. H. (2011). Corrosion and corrosion control (4th ed.). Wiley.
3. Verma, C., Ebenso, E. E., & Quraishi, M. A. (2020). Corrosion inhibitors derived from organic compounds: A review. *Materials Today Sustainability*, 7–8, 100028.

**<https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2020.100028>**

4. Bentiss, F., Traisnel, M., & Lagrenée, M. (2000). The substituted triazole as corrosion inhibitors of mild steel in acidic media. *Corrosion Science*, 42(1), 127–146.
5. Sastri, V. S. (2011). Green corrosion inhibitors: Theory and practice. Wiley.
6. Quraishi, M. A., & Sardar, R. (2002). Corrosion inhibition of mild steel in acidic solutions by some pharmaceutical compounds. *Journal of Applied Electrochemistry*, 32, 425–430.
7. Fouda, A. S., et al. (2014). Some pharmaceutical compounds as corrosion inhibitors for steel in acidic media. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53, 1471–1480.
8. Singh, A., & Ebenso, E. E. (2012). Waste pharmaceutical drugs as corrosion inhibitors: Environmental approach. *International Journal of Corrosion*, Article ID 947645.

# *Chapitre I :*



## *Généralités sur la corrosion*

### I.1 Introduction

La corrosion est un phénomène naturel responsable de la dégradation progressive des matériaux métalliques sous l'effet de leur interaction avec leur environnement[1].

Ce processus, principalement de nature électrochimique, constitue un problème majeur dans plusieurs domaines industriels en raison des pertes économiques et des risques qu'il engendre[2].

Afin de limiter ces effets, diverses méthodes de protection ont été développées, parmi lesquelles l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion, notamment les molécules organiques. Ces dernières agissent généralement par adsorption à la surface du métal, formant une barrière protectrice contre les agents corrosifs[3].

### I.2 Définition de la corrosion

Le terme « corrosion » trouve son origine étymologique dans le latin corroder, qui signifie « ronger » ou « attaquer » [4]. Elle se manifeste comme une dégradation progressive des matériaux – principalement les métaux – ou de leurs propriétés physicochimiques et mécaniques, résultant d'une interaction chimique ou électrochimique avec le milieu environnant[5]. Ce processus de détérioration se produit généralement en plusieurs étapes et conduit à la formation de composés tels que des oxydes, des hydroxydes ou d'autres substances similaires, ce qui a pour effet d'endommager ou de détruire la structure d'origine du matériau [6].

### I.3 Impact économique de la corrosion

Selon une étude menée par l'Association Nationale des Ingénieurs en Corrosion (NACE), le phénomène de corrosion génère un coût annuel estimé à environ 3,4 % du Produit Intérieur Brut (PIB) mondial. Cette charge financière considérable se répartit entre des dépenses directes et indirectes, qui comprennent notamment[7] :

- Les pertes financières résultant des arrêts de production ;
- La diminution de l'efficacité des infrastructures ;
- Les frais liés à l'entretien des structures métalliques ;
- Le coût de remplacement des ouvrages et équipements corrodés ;
- Les dépenses engendrées par les accidents ;
- Le coût des inspections régulières ;

- Les conséquences financières des impacts environnementaux ;
- La dépréciation de la valeur des actifs.

Certains secteurs industriels sont particulièrement exposés à ces coûts. Dans l'industrie pétrolière et gazière, les charges annuelles consacrées à l'entretien, à la prévention et au remplacement des infrastructures corrodées peuvent dépasser 60 milliards de dollars à l'échelle internationale. Le secteur automobile supporte quant à lui un coût évalué à 16 milliards de dollars par an[8]. Les secteurs de l'énergie, des infrastructures publiques (ponts, bâtiments, réseaux d'eau), de l'industrie alimentaire et chimique sont également lourdement affectés[7].

Face à cette situation, la mise en place de stratégies de prévention efficaces représente un enjeu économique majeur. L'adoption de meilleures pratiques en matière de lutte contre la corrosion permettrait de réaliser des économies substantielles, estimées entre 375 et 875 milliards de dollars par an à l'échelle mondiale, soit une réduction potentielle de 15 à 35 % des coûts totaux liés à ce phénomène[7].

### **I.4 Classification des principaux types de corrosion**

La corrosion peut être classée selon différents critères, notamment le mécanisme réactionnel impliqué, la morphologie de l'attaque ou les conditions environnementales spécifiques. On distingue ainsi plusieurs grandes catégories.

#### **I.4.1 Classification selon le mécanisme de dégradation**

##### **I.4.1.1 Corrosion chimique**

La corrosion chimique résulte d'une réaction hétérogène entre une phase solide (le métal) et une phase gazeuse ou liquide, sans circulation de courant électrique. Lorsque le réactif est un gaz, comme l'oxygène, on parle de corrosion sèche. Si le réactif est un liquide, l'attaque du métal entraîne la formation d'un produit de corrosion directement à sa surface[9].

##### **I.4.1.2 Corrosion électrochimique**

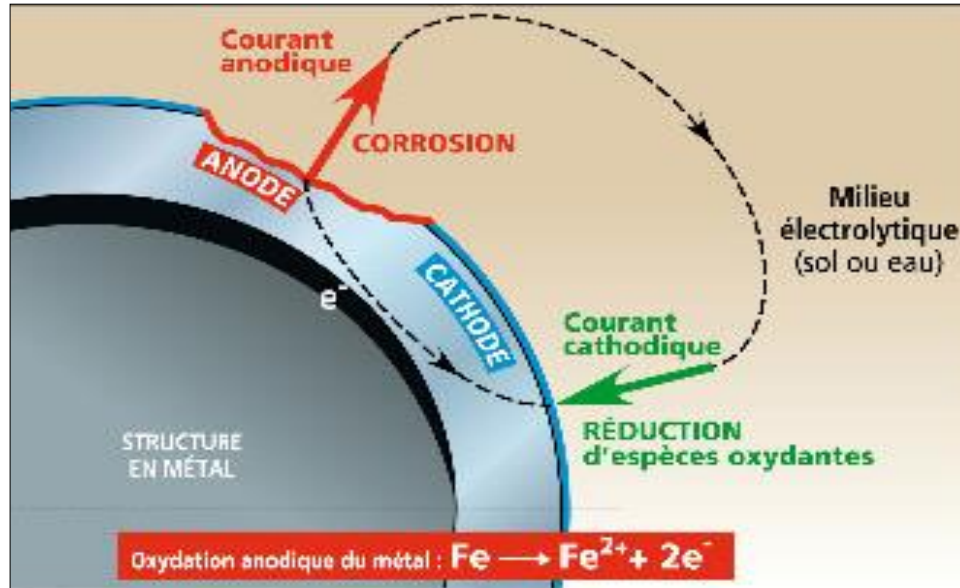
La corrosion électrochimique constitue le processus de dégradation le plus répandu. Elle se caractérise par la circulation d'un courant électrique entre des zones anodiques, qui sont attaquées, et des zones cathodiques[9]. Ce phénomène résulte de

réactions chimiques ou électrochimiques entre un métal et son environnement, généralement en milieu aqueux[10].

Lorsqu'un métal est immergé dans un milieu aqueux, des ions métalliques sont libérés, modifiant l'interface métal/solution et conduisant à la formation de produits de corrosion, parfois accompagnée d'un dégagement gazeux. Pour le fer, la réaction fondamentale s'écrit :

- Zone anodique (oxydation) :  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ .
- Zone cathodique (réduction) :  $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ .

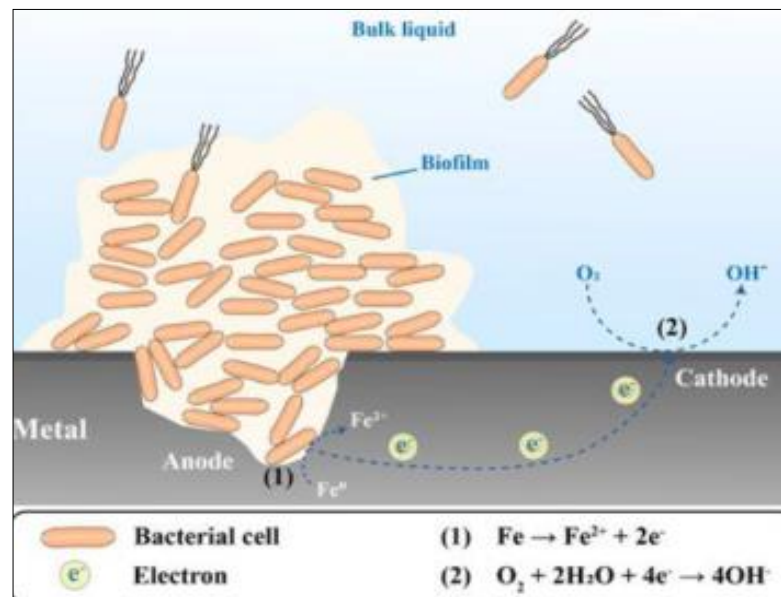
Ce type de corrosion est principalement provoqué par des hétérogénéités, qu'elles se situent dans le métal (les alliages ne sont généralement pas monophasés) ou dans le milieu environnant. Ces différences entraînent la formation de piles électriques locales. Plusieurs facteurs accélèrent ce processus, notamment l'hétérogénéité du matériau, le pH, la composition chimique de la solution et la température [10]



**Figure I.1.** Schéma de principe du processus de corrosion électrochimique et des réactions cathodique et anodique associées [27].

### I.4.1.3 Corrosion bactérienne (biocorrosion)

La corrosion bactérienne, également appelée biocorrosion, désigne l'ensemble des phénomènes corrosifs dont la cinétique est accélérée par la présence et l'activité de micro-organismes, sans que le mécanisme électrochimique fondamental soit modifié. La plupart de ces processus se développent sous les biofilms et peuvent revêtir différentes formes selon les matériaux et les micro-organismes impliqués [9].



**Figure I.2.** Schéma illustrant le processus de biocorrosion sur une surface métallique [28].

## I.4.2 Classification selon la morphologie de l'attaque

### I.4.2.1 Corrosion généralisée ou uniforme

Ce type de corrosion se produit avec une vitesse identique sur l'ensemble de la surface métallique. Il se traduit soit par une réduction progressive de l'épaisseur du matériau, soit par une altération de sa coloration, communément appelée ternissement[11].

### I.4.2.2 Corrosion localisée

Cette catégorie regroupe différentes formes d'attaques qui ne concernent que des zones spécifiques du matériau :

- **Corrosion par piqûres** : Elle affecte les métaux protégés par un film passif. Lorsque ce film se rompt localement, une attaque ponctuelle se produit. Les piqûres se développent de manière auto-entretenu : au fond de la cavité, l'hydrolyse des ions métalliques dissous augmente l'acidité, ce qui accélère le phénomène[12].
- **Corrosion intergranulaire** : Il s'agit d'une attaque sélective au niveau des joints de grains, causée par des hétérogénéités locales (appauvrissement ou enrichissement d'un constituant suite à un traitement thermique). Ces différences créent des piles locales, entraînant la dissolution des zones anodiques[13].
- **Corrosion par crevasse** : Également appelée corrosion cavernueuse, elle résulte d'une différence d'accessibilité à l'oxygène entre deux zones d'une même structure. Les parties les moins accessibles à l'oxygène deviennent anodiques et sont attaquées préférentiellement[14].
- **Corrosion galvanique**: Ce phénomène se produit lorsque deux matériaux métalliques différents sont placés dans un même environnement, formant une pile électrochimique. La phase la moins noble (anode) est attaquée préférentiellement. Plus les métaux sont éloignés sur l'échelle galvanique, plus la corrosion est intense. Le rapport de surface entre l'anode et la cathode est crucial : plus l'anode est petite, plus sa vitesse de dissolution est élevée[13].

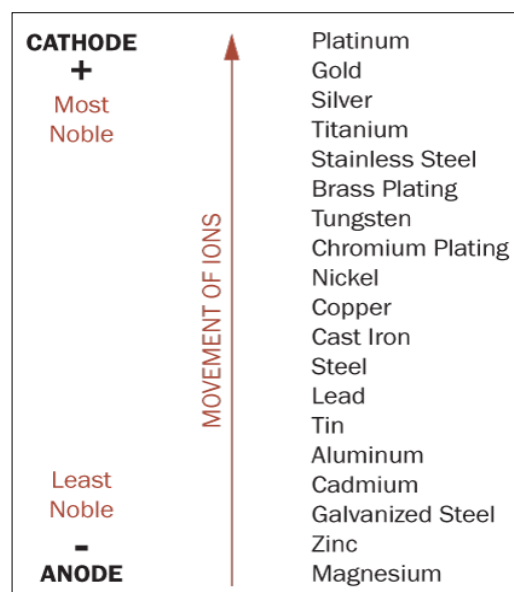


Figure I.3. Classement électrochimique des métaux [29].

- **Corrosion par dissolution sélective** : Elle correspond à l'oxydation préférentielle d'un composant spécifique de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse[9].
- **Corrosion par frottement** : Il s'agit d'une détérioration à l'interface de deux surfaces en contact, résultant de la combinaison d'un phénomène de corrosion et d'un faible mouvement de glissement réciproque[15].
- **Corrosion sous contrainte et fatigue-corrosion** :
  - \_ Corrosion sous contrainte : Fissuration du métal due à l'action simultanée d'une contrainte mécanique (notamment une force de traction) et d'une réaction électrochimique.
  - \_ Fatigue-corrosion : Provoquée par l'application répétée de contraintes mécaniques en milieu corrosif[15].

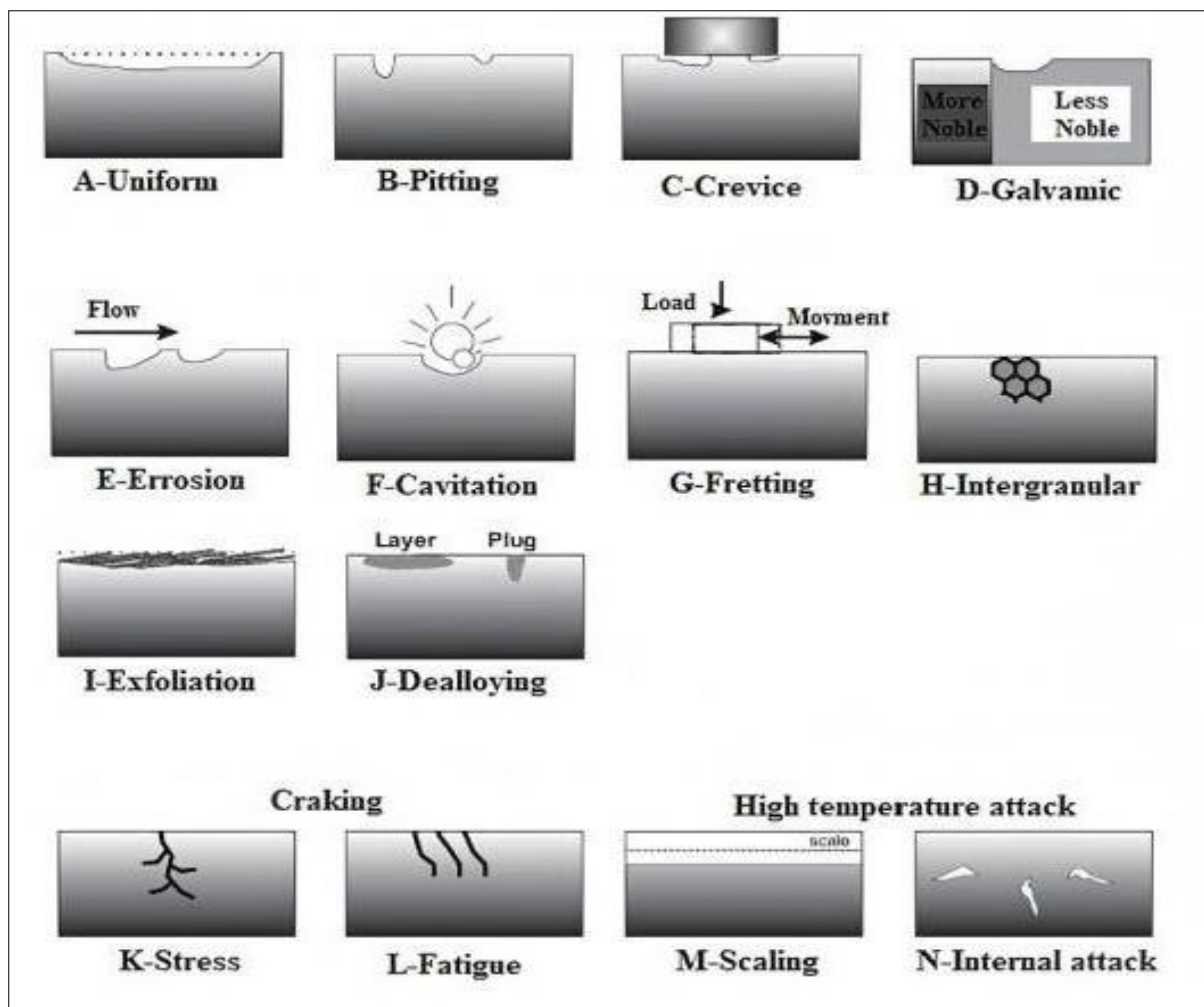


Figure I.4. Les différents types de corrosion [30].

## I.5 Facteurs influençant le processus de corrosion

Il y a plusieurs paramètres liés à l'environnement et aux propriétés intrinsèques des métaux conditionnent la vitesse et l'intensité de la corrosion. Ces facteurs peuvent être regroupés comme suit :

### I.5.1 Facteurs environnementaux

- **Humidité relative** : Le taux de corrosion augmente proportionnellement avec l'humidité relative de l'air ou du milieu. Il atteint son niveau maximal lorsque l'humidité relative est de 100 %[16].
- **Température** : L'élévation de la température accélère généralement le processus de corrosion, car celui-ci repose sur des réactions chimiques dont la cinétique est favorisée par la chaleur[17].
- **Concentration en oxygène** : Une présence plus importante d'oxygène dans l'environnement tend à augmenter la vitesse de corrosion. L'oxygène réagit avec les métaux pour former des oxydes, ce qui constitue une forme courante de dégradation[18].
- **pH du milieu** : L'acidité ou l'alcalinité de l'environnement joue un rôle déterminant. Un pH bas (milieu acide) accélère la corrosion, tandis qu'un pH élevé (milieu alcalin) tend à la ralentir[17].

### I.5.2 Facteurs liés à l'état de surface et au métal lui-même

- **Présence d'impuretés** : La présence de particules étrangères à la surface du métal (telles que poussières, graisses ou résidus) peut initier une corrosion prématurée en créant des zones propices aux réactions[17].
- **Nature du métal** : La composition et la réactivité intrinsèque du métal sont essentielles. Certains métaux se corrodent facilement, tandis que d'autres possèdent une résistance naturelle. Par exemple, l'aluminium forme spontanément une couche protectrice d'oxyde qui stoppe la progression de la corrosion[19].
- **Nature de la couche d'oxyde** : Lorsque la corrosion produit une couche d'oxyde, ses caractéristiques sont cruciales. Si cette couche est compacte et adhérente, elle protège le métal sous-jacent. En revanche, si elle est poreuse ou fissurée, elle ne constitue pas une barrière efficace et permet à la corrosion de se poursuivre [20].

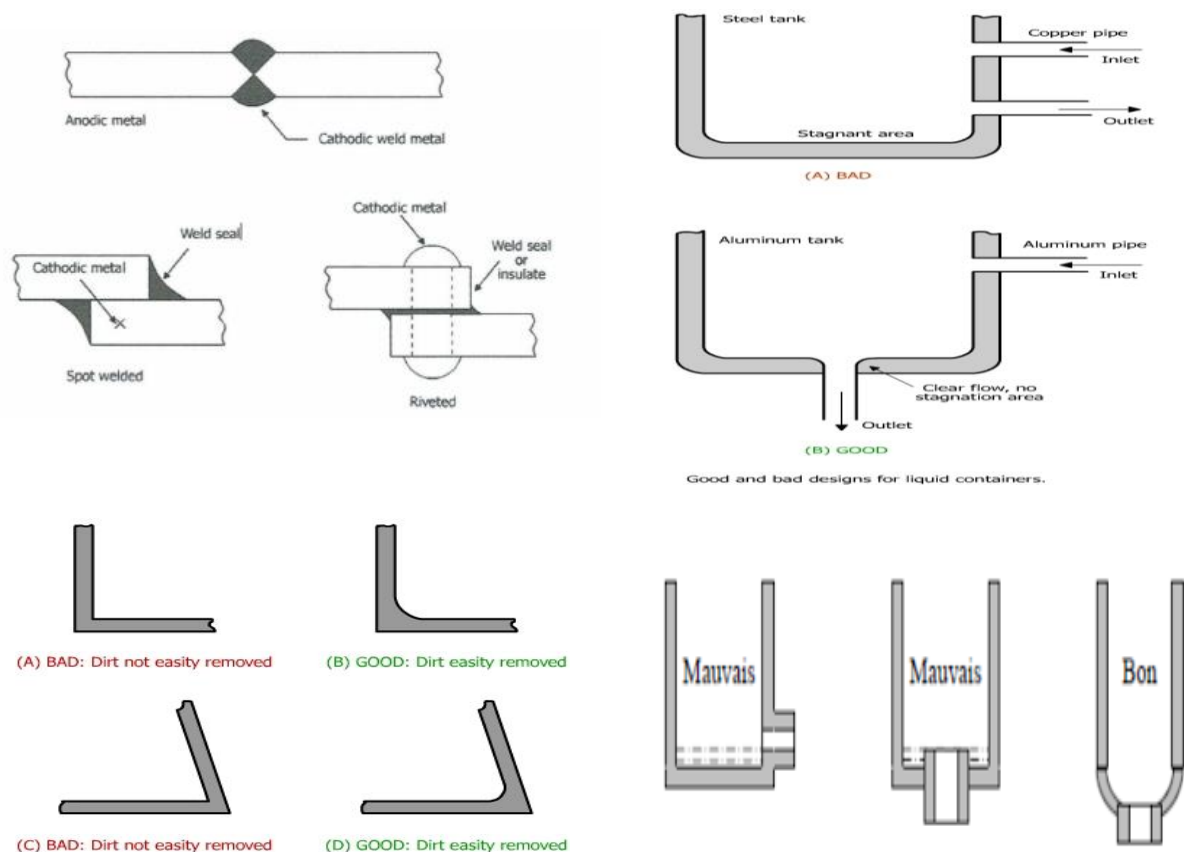
## I.6 Méthodes de protection contre la corrosion

La protection contre la corrosion désigne l'ensemble des mesures visant à prévenir les dommages causés par ce phénomène sur les composants métalliques, en réduisant la vitesse de l'attaque corrosive ou en l'évitant totalement pour préserver l'intégrité du matériau durant sa durée de vie.

On distingue généralement deux grandes catégories de méthodes de protection, auxquelles s'ajoute une classification selon la durée de protection visée.

### 1.6.1 Prévention par le choix de la forme

La conception géométrique adaptée est une méthode préventive clé contre la corrosion, visant à minimiser les zones de rétention d'eau, d'impuretés ou de contraintes. Une forme bien conçue évite les coins vifs, favorise le drainage, et réduit les couplages galvaniques, prolongeant ainsi considérablement la durée de vie des structures.



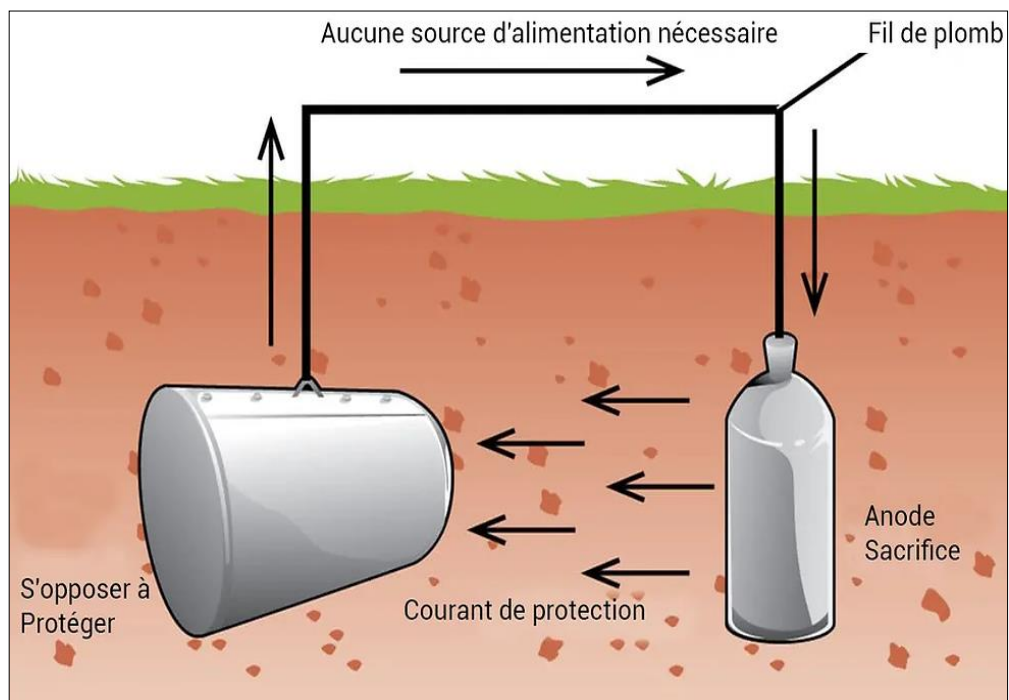
**Figure I.5.** Exemples de conceptions de joints soudés optimisés pour minimiser les risques de corrosion [31,32,33].

### I.6.2 Protection active contre la corrosion

La protection active regroupe les procédés qui influencent directement le processus électrochimique ou chimique de la corrosion par des mesures techniques. Une séparation physique complète entre le métal et l'environnement corrosif n'est pas obligatoire dans ce cas. Les principales méthodes sont :

- **Protection cathodique**

1. **Anode sacrificielle** : Un métal moins noble (comme le zinc ou le magnésium) est connecté intentionnellement au métal à protéger. Ce métal "sacrifié" se corrode préférentiellement en libérant des électrons, ce qui empêche l'oxydation du métal principal[21].



**Figure I.6.** Schéma de principe de la protection cathodique par anode sacrificielle [34].

2. **Courant imposé** : Un générateur force le métal à se comporter en cathode pour empêcher l'oxydation[21].

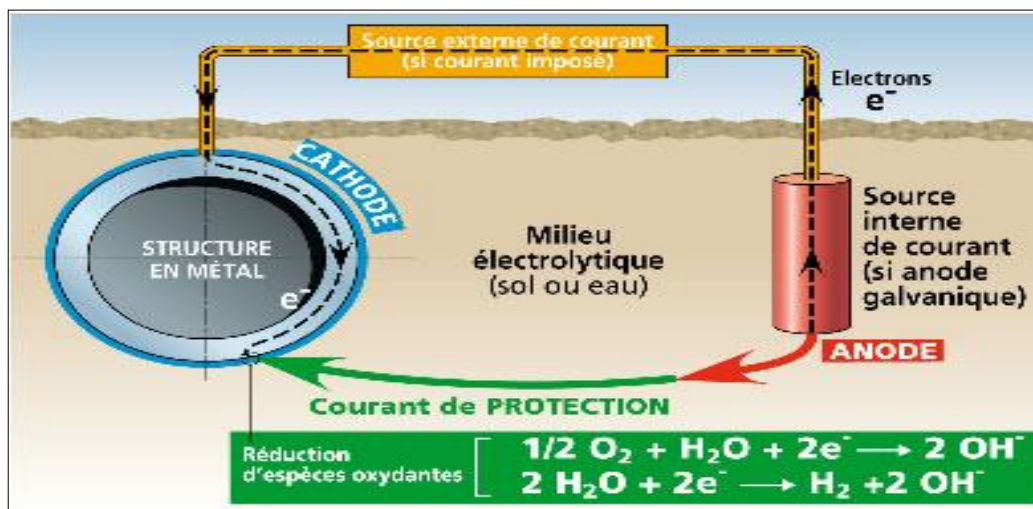


Figure I.7. Schéma de principe de la protection cathodique par courant imposé [35].

- **Drainage des Courants** : Liaison directe ou unidirectionnelle (avec diodes) entre la structure affectée et la source de courant (ex: rails de tramway) pour forcer le retour du courant sans causer de corrosion.

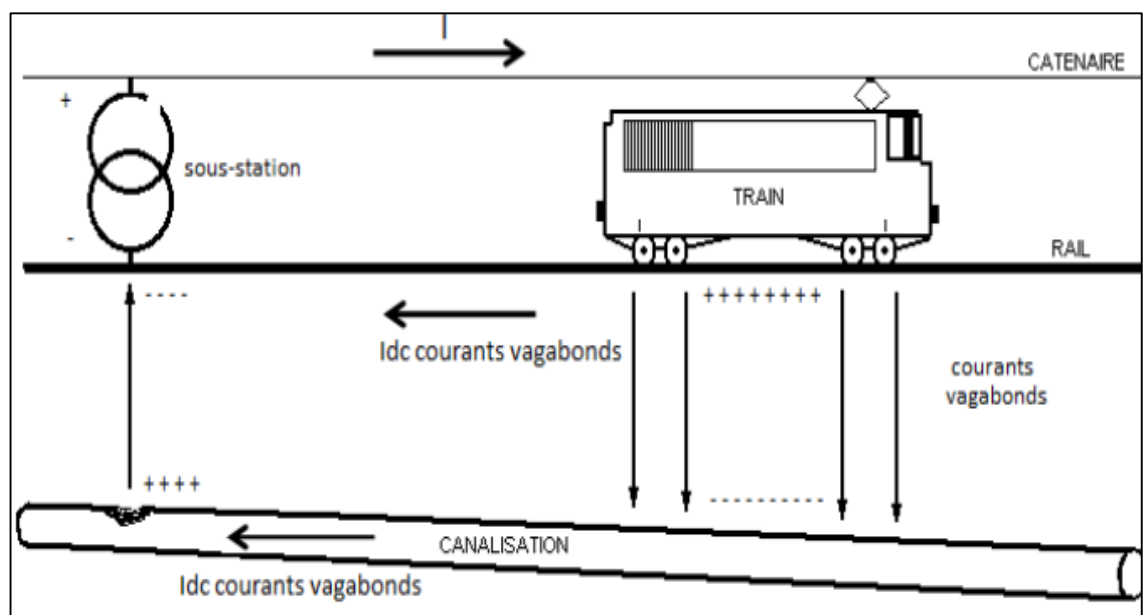
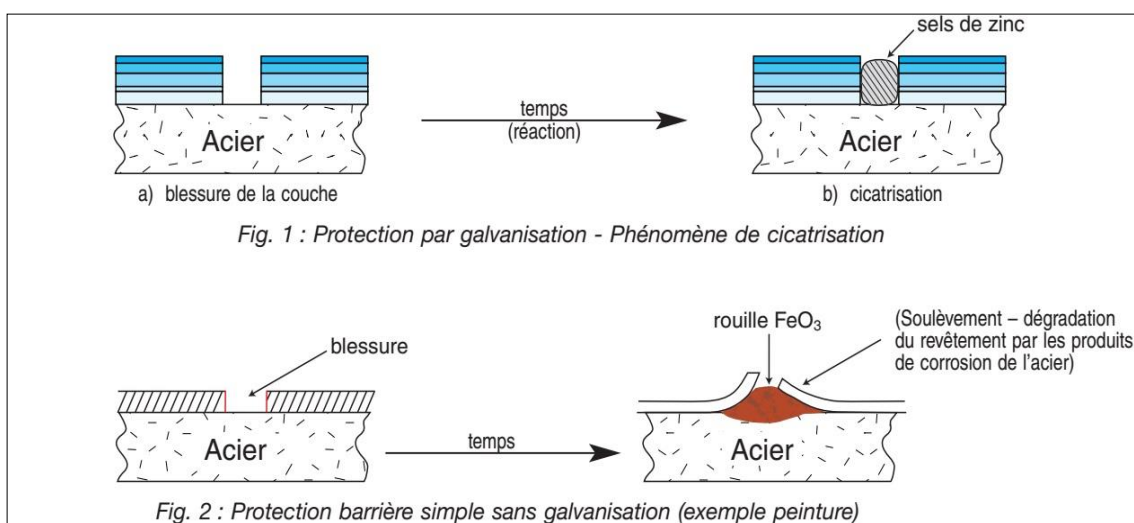


Figure I.8. Schéma illustrant le phénomène de corrosion et de polarisation dû au courant de fuite [36].

- **Inhibiteurs de corrosion** : Ces substances chimiques ralentissent ou inhibent la corrosion. Elles agissent soit en se fixant à la surface du métal pour former une barrière protectrice, soit en réduisant la corrosivité de l'environnement par réaction chimique[22].
- **Galvanisation à chaud** : Ce procédé consiste à tremper l'acier ou le fer dans du zinc liquide (vers 450°C). La couche de zinc ainsi formée protège le métal de deux manières : comme barrière physique et comme anode sacrificielle[23].



**Figure I.9.** Illustration des mécanismes de protection passive contre la corrosion : galvanisation à chaud et protection barrière simple [37].

### I.6.3 Protection passive contre la corrosion

La protection passive vise à isoler complètement le matériau de son environnement corrosif en appliquant une couche protectrice qui fait barrière. Le métal n'est alors plus en contact direct avec les agents corrosifs. Les méthodes courantes incluent :

- **Peintures et revêtements de protection** : Appliqués sur la surface métallique, ils forment une barrière physique qui tient à distance l'humidité, l'oxygène et autres substances agressives[24].
- **Graisses, cires et huiles** : Ces substances créent un film protecteur en surface. Elles pénètrent les micro-fissures et pores, empêchant le contact direct avec l'air et l'humidité[24].
- **Passivation** : Ce procédé naturel ou provoqué conduit à la formation d'une fine couche d'oxyde résistante et adhérente en surface (comme pour l'acier inoxydable ou l'aluminium), qui réduit fortement la réactivité du métal[25].

- **Protection par un métal (zinc, aluminium) :** Une couche d'un métal plus résistant ou formant une barrière est appliquée sur le métal de base pour le protéger[25].
- **Galvanisation à chaud :** Comme mentionné, la couche de zinc joue aussi le rôle de barrière physique, ce qui lui confère une double action[23].

#### I.6.4 Classification selon la durée de protection

Dans la pratique industrielle, on distingue également la protection selon son objectif dedurée :

- **Protection temporaire :** Elle est conçue pour protéger les composants pendant une durée limitée, de quelques jours à deux ans maximum. Souvent de type passif (huiles, cires), elle est utilisée pour le transport ou le stockage et est éliminée avant l'utilisation ou le traitement final des pièces[26].
- **Protection permanente :** Elle vise à protéger les composants sur le long terme (plusieurs années ou décennies). Elle est généralement constituée de plusieurs couches : une première couche active (ex : peinture riche en zinc pour une protection cathodique), recouverte de couches passives supplémentaires. Une fois appliquée, cette protection ne peut plus être enlevée[26].

#### I.7 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les notions fondamentales relatives au phénomène de corrosion, ses principaux mécanismes, ses différentes formes ainsi que les facteurs influençant son évolution. Les diverses méthodes de protection contre la corrosion ont également été abordées, en mettant l'accent sur l'utilisation des inhibiteurs de corrosion. Ces connaissances constituent une base théorique indispensable pour l'étude expérimentale développée dans les chapitres suivants.

**Références :**

1. Jones, D. A. (1996). Principles and prevention of corrosion (2nd ed.). Prentice Hall.
2. Revie, R. W., & Uhlig, H. H. (2008). Corrosion and corrosion control: An introduction to corrosion science and engineering (4th ed.). Wiley
3. Bentiss, F., Traisnel, M., & Lagrenée, M. (2000). The substituted 1,3,4-oxadiazoles: A new class of corrosion inhibitors of mild steel in acidic media. *Corrosion Science*, 42(1), 127–146
4. Omar Y, Lamine AM, Samira C (2022) Etude de l'efficacité de l'inhibiteur de corrosion NORUST IG 514 dans les installations pétrolières du champ rhoud baguel
5. Faustin M (2024) Étude de l'effet des alcaloïdes sur la corrosion de l'acier C38 en milieu acide chlorhydrique 1M: application à *Aspidosperma album* et *Geissospermum laeve* (Apocynacées)
6. Dieter Landolt (2003). Corrosion et chimie de surfaces des métaux. Presses polytechniques et universitaires romandes.
7. NACE International (2016) International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study (IMPACT). Consulté sur <https://impact.nace.org/documents/Nace-International-Report.pdf>
8. Xiong, Y., Wiley, B., Chen, J., Li, Z.-Y., Yin, Y., & Xia, Y. (2005). Corrosion-based synthesis of single-crystal Pd nanoboxes and nanocages and their surface plasmon properties. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(48), 7913–7917. <https://doi.org/10.1002/anie.200502722>
9. Lachachi S. (2020). Etude de l'efficacité inhibitrice de corrosion dans l'acide sulfurique par lapovidone iodée. Consulté sur <https://dspace.univ-tlemcen.dz/>
10. MAHCENE, Y., GUETTAI, A. M. E (2023) Etude d'amélioration de protection de l'unité topping RHM2 contre le phénomène de corrosion
11. Clinton C. (2018). Propriétés inhibitrices de l'huile de cade sur la corrosion de l'aluminium consulté sur <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2018/09/Chinogurei-Clinton.pdf>
12. Grimault B (2011) Evaluation vis-à-vis de la corrosion sous contrainte et de la fragilisation par hydrogène de l'emploi de câbles de précontrainte en acier inoxydable
13. Youcef R, Youcef O (2019) Etude de la corrosion par CO<sub>2</sub> au niveau du champs (Rhourd Nouss)
14. Marcelin SJ (2023) Etude de la corrosion cavernueuse d'un acier inoxydable martensitique: utilisation d'une cellule à couche mince
15. Jian L (2003) Fatigue des alliages ferreux - Facteurs d'influence. In: Techniques de l'Ingénieur. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique->

- th7/duree-de-vie-et-tenue-en-fatigue-des-systemes-et-composants-mecaniques-42180210/fatigue-des-alliages-ferreux-bm5043/corrosion-bm5043niv10007.html. Accessed 6 Mar 2026
16. Eliane S (2010) Principaux paramètres impliqués dans la corrosion atmosphérique des métaux et alliages. In: Techniques de l'Ingénieur. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-corrosion-vieillessement-tiaco/archive-1/corrosion-atmospherique-cor50/principaux-parametres-impliques-dans-la-corrosion-atmospherique-des-metaux-et-alliages-cor50niv10001.html>. Accessed 7 Mar 2026
  17. Deghamna M , Boumellit Z (2019) Développement d'un revêtement anti-corrosion à base de TMOS sur l'acier doux A9 et l'acier inoxydable C0400-08 via le procédé sol-gel consulté sur: <https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/4135/1/2%دغامنةBبومليطه.pdf>
  18. Saad M , Abdellaoui A (2022) Etude de l'influence de la corrosion sur le comportement mécanique de l'acier
  19. Elkhoutfi Y (2020) Contribution à l'inhibition de la corrosion de l'acier ordinaire en milieu acide HCl 1M et en milieu neutre par des dérivés de triazole. optimisation par la méthodologie de la recherche expérimentale
  20. Laid S (2023) ETUDE DU TRAITEMENT DE SURFACE PAR BORURATION SUR L'ACIER ALLIÉ Z80
  21. Mesrouri S, Bendjbel M (2021) suivi de corrosion de l'acier par la méthode gravimétrique
  22. Ghezal H (2019) Etude gravimétrique de l'inhibition de la corrosion de l'acier A 52 en milieu acide par l'huile essentielle de l'Artémisia herba
  23. HACHACHNIA Feriel, BENTABANE Billel Abderraouf (2020) Étude des caractéristiques des couches galvanisées à chaud au niveau de SIDER EL-HAD
  24. Oussama D, Mehdi BG (2019) Application du thiocyanate de potassium dans l'inhibition de la corrosion des armatures dans le béton
  25. Issad D (2003) Optimisation des paramètres d'une protection cathodique par anodes sacrificielles à base de zin
  26. SETTOU K, Manaa S (2019) La synergie des sels phosphonim contre la corrosion
  27. CEFRACOR. (2011). la\_pille\_de\_corrosion. Protection Cathodique. [https://protectioncathodique.net/principes-et-applications/generalites/la-corrosion-aqueuse/la\\_pille\\_de\\_corrosion/](https://protectioncathodique.net/principes-et-applications/generalites/la-corrosion-aqueuse/la_pille_de_corrosion/)
  28. Li, Y., Zhang, D., & Xu, D. (2024). The interaction mechanisms of sulfate-reducing bacteria with other corrosive microorganisms and synergistic corrosion prevention strategies. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 40(5), 142. doi.org

29. Hover, K. C. (2018). Corrosion of Reinforcing Steel: Why Does Rebar Corrode in Concrete?. International Concrete Repair Institute (ICRI). Cornell University.
30. Kruger, J. (2001). Corrosion of Metals: Overview. Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Elsevier.
31. Bouzeghaia, N. (s. d.). Cours corrosion : M1 Génie des procédés. Université de Batna 2. [https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/bouzeghaia-nora/files/cours\\_corrosion\\_m1\\_gp.pdf](https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/bouzeghaia-nora/files/cours_corrosion_m1_gp.pdf)
32. University of Babylon. (n.d.). Corrosion control by design. [https://www.uobabylon.edu.iq/eprints/publication\\_12\\_18403\\_228.pdf](https://www.uobabylon.edu.iq/eprints/publication_12_18403_228.pdf)
33. Hussaini. (s. d.). Prevention by design: Design for liquid containers. King Fahd University of Petroleum and Minerals. <https://faculty.kfupm.edu.sa/me/hussaini/corrosion%20engineering/08.07.01.htm>
34. Young, R., et al. (2023). Corrosion. In: The Molecular World. Pressbooks. Available at: <https://pressbooks.pub/molecularworld/>
35. CEFRACOR. (2011). La protection cathodique. Protection Cathodique. <https://protectioncathodique.net/principes-et-applications/generalites/la-protection-cathodique/>
36. CEFRACOR. (2016). Méthodes de mesures électriques pouvant être effectuées sur les ouvrages dans le domaine de la protection cathodique en complément des standards existants (Recommandation PCRA 011). Centre Français de l'Anticorrosion. Consulté sur [cefracor.org](http://cefracor.org)
37. Boureneb, B. (2018). Étude du comportement tribologique et électrochimique d'un revêtement de galvanisation à chaud en continu (Mémoire de Master). Université Badji Mokhtar - Annaba, Algérie. Consulté sur [univ-annaba.dz](http://univ-annaba.dz)

## *Chapitre II :*



# *Les molécules organiques et l'inhibiteur de corrosion*

## II.1 Introduction

Face aux dégâts économiques causés par la corrosion des métaux, la recherche de solutions efficaces s'est imposée comme une priorité industrielle. C'est dans ce contexte que les inhibiteurs de corrosion ont émergé comme l'une des approches les plus pratiques et les moins coûteuses [1].

Parmi ces solutions, les inhibiteurs organiques ont retenu une attention particulière grâce à leur efficacité et leur faible toxicité. Leur action repose sur l'adsorption sur la surface métallique, formant une couche protectrice qui bloque les réactions de dissolution [2,3].

Dans ce travail, la molécule organique utilisée est (le MBP) 4-[5-(4-méthylphényl)-3-(trifluorométhyl) pyrazol-1-yl]benzenesulfonamide, un composé organique contenant plusieurs hétéroatomes (N, O, S et F) ainsi que des systèmes aromatiques conjugués, ce qui en fait un candidat potentiel comme inhibiteur de corrosion.[4]

Ce chapitre est consacré à la présentation des molécules organiques utilisées comme inhibiteurs de corrosion, leurs mécanismes d'action et les facteurs qui gouvernent leur efficacité.

## II.2 inhibiteur de corrosion

### II.2.1 Définition

Un inhibiteur de corrosion est une substance chimique ajoutée en faible concentration à un milieu corrosif afin de réduire la vitesse de corrosion d'un métal ou d'un alliage. Son action ne consiste pas à supprimer totalement la corrosion, mais à en diminuer l'intensité en modifiant l'interface métal/milieu agressif. En pratique, l'inhibiteur peut former un film protecteur à la surface du métal, s'adsorber sur les sites actifs, ou encore limiter les réactions électrochimiques responsables de la dissolution du métal[5,6].

### II.2.2 Propriété d'inhibiteurs

D'une manière générale, un inhibiteur de corrosion doit [5]:

- réduire la vitesse de corrosion du métal tout en préservant ses caractéristiques physico-chimiques ;
- être stable en présence des autres constituants du milieu corrosif ;
- conserver sa stabilité aux températures d'utilisation ;
- être efficace même à de faibles concentrations ;

- respecter les exigences de non-toxicité et les normes de protection de l'environnement ;
- être peu coûteux et présenter un intérêt économique pour une application à grande échelle.

### II.2.3 Classification d'inhibiteurs

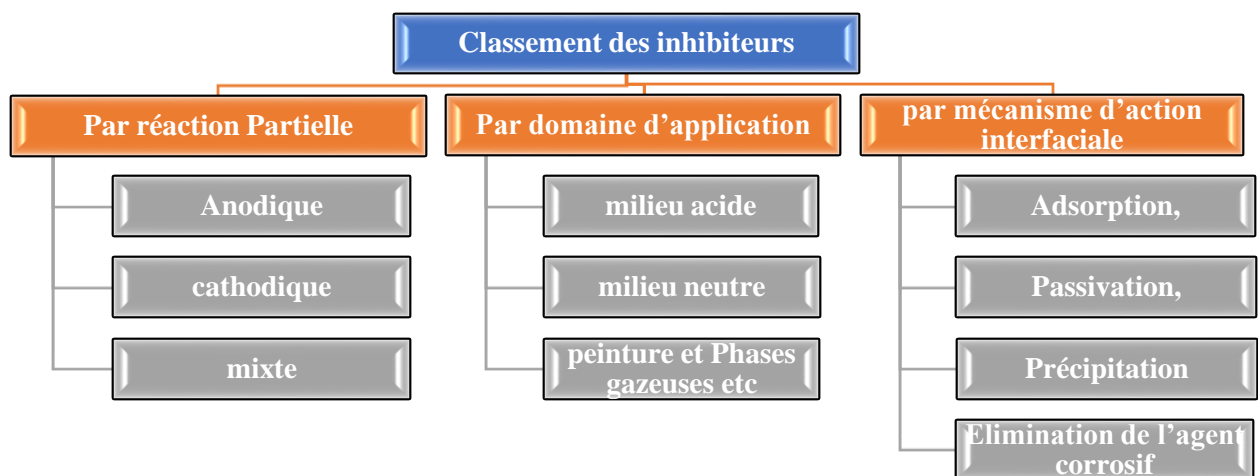
#### II.2.3.1 Classes d'inhibiteurs

Il existe plusieurs façons de classer les inhibiteurs de corrosion, qui se distinguent selon différents critères [7] :

- Selon la formulation des produits : inhibiteurs organiques ou minéraux ;
- Selon leur mécanisme d'action électrochimique : inhibiteurs anodiques, cathodiques ou mixtes ;
- Selon leurs mécanismes d'interface et principes d'action : adsorption sur la surface du métal et/ou formation d'un film protecteur.

De manière plus générale, les inhibiteurs de corrosion peuvent être classés selon [7] :

- la réaction partielle ;
- le mécanisme réactionnel ;
- le domaine d'application.



**Figure II.1.** Classement des inhibiteurs de corrosion [7].

### II.2.3.2 Classification selon la composition chimique

#### a. Les inhibiteurs organiques

Les molécules organiques sont de plus en plus utilisées comme inhibiteurs de corrosion, avec une tendance claire à leur développement futur. Leur utilisation est généralement privilégiée par rapport aux inhibiteurs inorganiques, principalement en raison de leur meilleure compatibilité environnementale et de leur moindre toxicité.

Ces composés sont souvent issus de dérivés de l'industrie pétrolière et possèdent des centres actifs capables d'interagir avec la surface métallique par échange d'électrons. Ces sites réactifs sont généralement associés à des hétéroatomes tels que l'azote, l'oxygène, le phosphore ou le soufre [8].

L'ancrage de ces molécules sur la surface du métal est facilité par la présence de certains groupes fonctionnels, notamment :

- le groupe amine ( $-NH_2$ ) ;
- le groupe mercapto ( $-SH$ ) ;
- le groupe hydroxyle ( $-OH$ ) ;
- le groupe carboxyle ( $-COOH$ ).

#### ➤ Inhibiteurs organophosphonés

Les phosphonates représentent une famille importante d'inhibiteurs organiques utilisés dans les milieux aqueux pour réduire la corrosion. Ils comprennent divers composés (HEDP, AMP, ATMP, PBTC, etc.) caractérisés par une grande stabilité chimique grâce aux liaisons C-P. Leur action repose principalement sur leur adsorption à la surface métallique et la formation de liaisons de type métal-phosphonate, conduisant à la création d'un film protecteur.

Leur efficacité dépend de la concentration : à faibles doses, ils forment une couche protectrice efficace, tandis qu'à fortes concentrations, ils peuvent générer des complexes solubles réduisant leur performance. Leur efficacité peut être améliorée par un effet synergique avec des ions métalliques comme  $Ca^{2+}$  ou  $Zn^{2+}$ , permettant la formation de films plus stables et protecteurs [9].

### ➤ Inhibiteurs hétérocycliques

Les inhibiteurs hétérocycliques sont des composés organiques contenant des cycles avec des hétéroatomes (N, O, S, P). Leur efficacité est liée à la présence de doublets électroniques libres qui favorisent leur adsorption sur la surface métallique et la formation de complexes protecteurs.

Leur performance dépend du type d'hétéroatomes, avec une efficacité générale croissante selon l'ordre  $O < N < S < P$ . Ils peuvent agir sous forme protonée ou neutre selon le milieu, ce qui influence leur interaction avec le métal.

Les groupes donneurs d'électrons ( $-OH$ ,  $-NH_2$ ,  $-OCH_3$ ) améliorent l'efficacité inhibitrice, tandis que les groupes attracteurs ( $-NO_2$ ,  $-CN$ ,  $-COOH$ ) la réduisent. Globalement, leur efficacité dépend de la structure moléculaire, de la densité électronique et de la capacité d'adsorption[9].

#### b. Les inhibiteurs inorganiques

Les inhibiteurs inorganiques sont principalement utilisés en milieu alcalin et rarement en milieu acide. Ils se dissocient en solution et leur action est assurée par les ions formés.

Les plus courants sont les chromates, molybdates, silicates et phosphates. Cependant, leur usage est de plus en plus limité en raison des réglementations environnementales liées à leur toxicité [8].

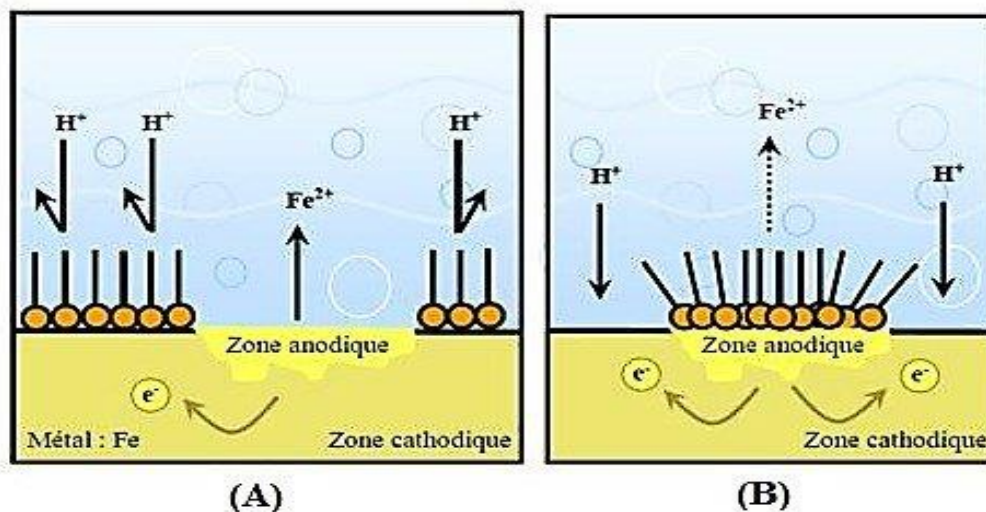
### II.2.3.3 Classification selon la nature électrochimique du processus

#### a. Inhibiteurs anodiques

L'anion de l'inhibiteur forme sur les anodes locales avec les cations provenant de l'oxydation du métal un composé insoluble. Ces inhibiteurs doivent être employés dans le cas d'une corrosion à contrôle anodique : nitrite, chromate, phosphate...[7,10].

#### b. Inhibiteurs cathodiques

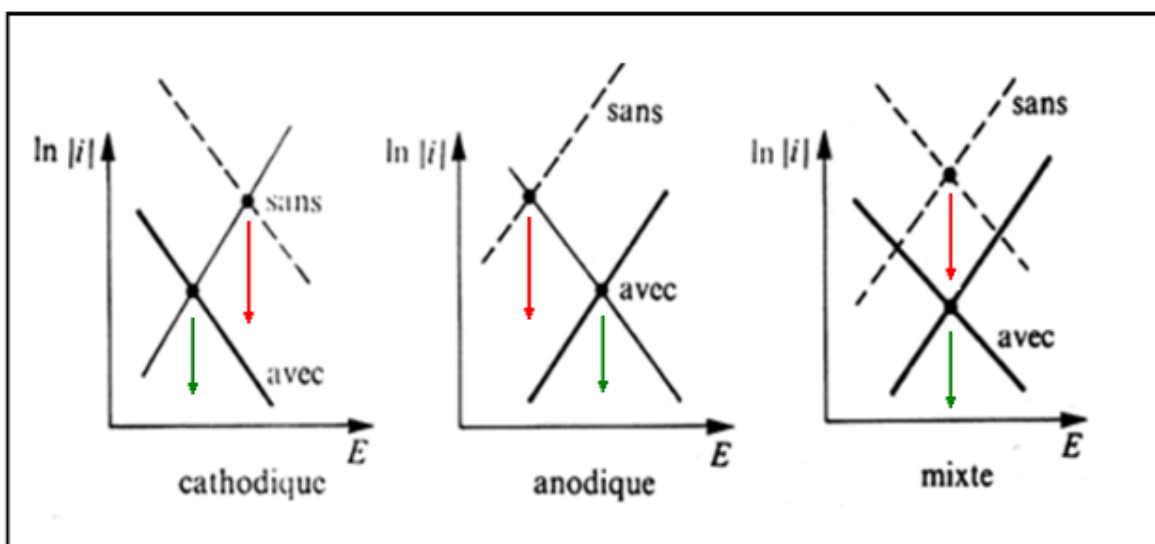
Dans ce cas, le cation de l'inhibiteur forme un hydroxyde insoluble sur des cathodes locales où le pH est plus basique que dans le reste de la solution. Ces inhibiteurs doivent être employés dans le cas d'une corrosion à contrôle cathodique, car ils augmentent en valeur absolue la polarisation cathodique et diminuent l'intensité maximale [11].



**Figure II.2.** Formation des couches barrières cathodiques (A) et anodiques (B), en milieu acide[13].

**c. Inhibiteurs mixtes**

Ces inhibiteurs agissent à la fois sur les anodes et les cathodes. Dans le cas du bicarbonate de calcium qui forme le bicarbonate de fer qui agit sur les anodes et l'hydroxyde de calcium qui agit sur les cathodes. Il faut signaler que, quel que soit la corrosion par la réaction anodique (cas le plus général), une quantité très faible d'inhibiteurs anodiques favorise la corrosion par piqûre [6].



**Figure II.3.** Diagrammes d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur de corrosion [12].

#### II.2.3.4 Classification selon le mode d'action

##### a. Inhibiteurs d'adsorption

Ces inhibiteurs agissent par fixation à la surface métallique. L'adsorption peut être de nature physique ou chimique.

- La physisorption repose sur des interactions faibles (forces de Van der Waals, interactions polaires, liaisons hydrogène).
- La chimisorption implique la formation de liaisons chimiques fortes entre les atomes donneurs de l'inhibiteur et la surface métallique.

Ce mécanisme permet de bloquer les sites actifs sans modifier significativement les réactions électrochimiques sur les zones non couvertes [14].

##### b. Inhibiteurs de passivation

Ces inhibiteurs favorisent la formation d'un film passif protecteur à la surface du métal, assurant ainsi une protection durable contre la corrosion [7].

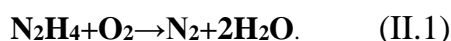
##### c. Inhibition par précipitation

Dans ce mécanisme, les inhibiteurs agissent en formant des films protecteurs insolubles à la surface du métal, résultant de la précipitation de sels minéraux ou de complexes organiques peu solubles. Ces dépôts limitent la diffusion de l'oxygène vers la surface et réduisent également la dissolution anodique [7].

##### d. Inhibition par élimination de l'agent corrosif

Ce type d'inhibition est utilisé essentiellement dans les systèmes fermés, comme les circuits d'eau chaude industriels. Il consiste à éliminer les espèces responsables de la corrosion, notamment l'oxygène dissous, par l'ajout de petites quantités de réducteurs tels que le sulfite de sodium ou l'hydrazine dans une eau préalablement désoxygénée et d'ionisée [15].

À titre d'exemple, l'hydrazine réagit avec l'oxygène selon la réaction suivante :



### II.2.4 Utilisation des inhibiteurs:

Les inhibiteurs de corrosion sont largement utilisés pour protéger les matériaux métalliques contre les attaques des milieux agressifs. Ils permettent de diminuer la vitesse de dégradation des métaux et d'augmenter la durée de vie des installations industrielles[16].

- traitement des eaux domestiques, industrielles et des chaudières afin de limiter les phénomènes de corrosion ;
- secteur pétrolier durant les opérations de forage, d'extraction, de raffinage, de stockage et de transport des hydrocarbures pour assurer la protection des équipements métalliques ;
- fabrication des revêtements et peintures anticorrosion où ils sont incorporés comme additifs protecteurs ;
- protection provisoire des métaux lors du décapage acide, du nettoyage industriel ou pendant le stockage à l'air libre, notamment par ajout dans les huiles, les graisses ou sous forme d'inhibiteurs volatils.

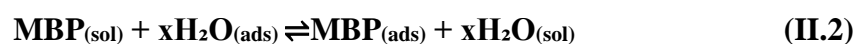
### II.3 Les molécules organiques comme inhibiteurs de la corrosion de l'acier au carbone

L'acier au carbone est constitué principalement de fer, avec une teneur en carbone pouvant atteindre environ 1,5 % en masse, ainsi que de faibles quantités d'autres éléments tels que le manganèse (Mn), le silicium (Si), le phosphore (P) et le soufre (S). Grâce à ses bonnes propriétés mécaniques, son faible coût et sa disponibilité élevée, il est largement utilisé dans la fabrication de nombreux équipements et structures industriels. Cependant, cet acier est particulièrement sensible à la corrosion, notamment en milieu acide, un phénomène qui peut être efficacement limité par l'ajout d'inhibiteurs de type pharmaceutique appropriés[17].

#### II.3.1 Mécanisme d'inhibition de la corrosion

En milieu acide, l'inhibition de la corrosion par des molécules organiques est essentiellement attribuée à leur adsorption à l'interface métal-solution.

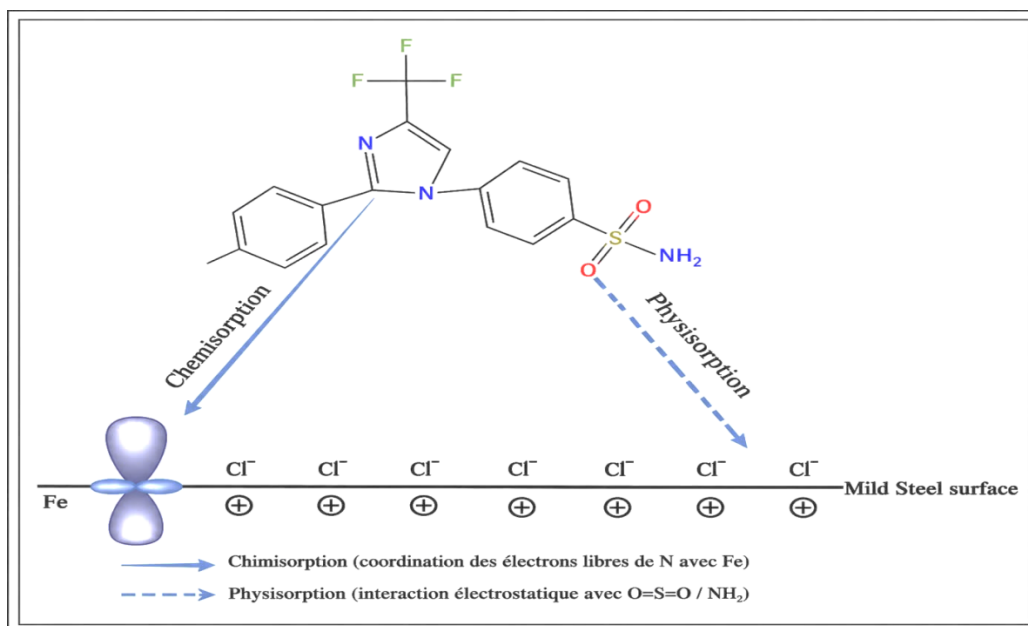
Dans un premier temps, un échange peut avoir lieu entre les molécules d'inhibiteur et les molécules d'eau initialement adsorbées à la surface métallique, selon l'équilibre suivant :



Par la suite, plusieurs mécanismes d'interaction peuvent intervenir :

- les espèces métalliques chargées peuvent interagir électrostatiquement avec les molécules organiques protonées, conduisant ainsi à une adsorption physique (physisorption) ;
- les molécules organiques peuvent également établir des interactions avec la surface du fer par donation des doublets non liants ou des électrons  $\pi$  vers les orbitales d vacantes, ce qui correspond à une adsorption chimique (chimisorption) ;
- ces deux mécanismes peuvent se produire simultanément et contribuer conjointement à l'efficacité inhibitrice.

En milieu acide, les molécules organiques se protonent facilement. À titre d'exemple, le MBP subit une protonation rapide, initiant un mécanisme d'adsorption mixte sur le métal. La physisorption est assurée par le groupement sulfonamide protoné  $[-SO_2NH_3]^+$  via une attraction électrostatique avec la surface négative du métal, renforcée par l'effet dipolaire du groupement terminal  $-CF_3$ . Simultanément, la chimisorption se produit par le partage des électrons  $\pi$  des cycles aromatiques (benzéniques et pyrazole) et des paires libres des hétéroatomes (N, O, S) avec les orbitales vides du métal. Cette synergie permet au MBP de former un film protecteur dense bloquant l'attaque acide[18].



**Figure II.4.** Mode d'adsorption physique et chimique de MBP en milieu HCl sur la surface de l'acier doux[18].

### II.3.2 Performances des inhibiteurs organiques

Plusieurs études ont démontré l'efficacité remarquable des molécules organiques comme inhibiteurs de corrosion pour l'acier au carbone et l'acier doux en milieu acide. En effet, ces composés présentent des rendements d'inhibition élevés, généralement compris entre 95 % et 99 %, dans différents environnements corrosifs.

Cette efficacité élevée est souvent attribuée à la structure chimique des molécules utilisées. Par exemple, la céfazoline possède plusieurs groupes fonctionnels actifs ( $-NH_2$ ,  $-OH$ ,  $>C=O$ ) ainsi que des hétéroatomes (N, O, S), ce qui favorise une forte adsorption sur la surface métallique. De plus, sa taille moléculaire relativement importante permet une meilleure couverture de la surface de l'acier, contribuant ainsi à la formation d'un film protecteur efficace[19].

De manière similaire, l'éthambutol présente également une efficacité proche de 99,60 % en milieu acide, ce qui est lié à la présence de groupes fonctionnels actifs tels que  $-OH$ , ainsi qu'à des hétéroatomes (N, O) et une structure plane favorisant l'adsorption sur la surface du métal[20].

D'autres molécules rapportés dans la littérature montrent également des performances inhibitrices élevées ( $\geq 95$  %). Cette efficacité est généralement associée à plusieurs facteurs structuraux, notamment la présence de groupes fonctionnels actifs, la richesse en hétéroatomes, la planéité moléculaire ainsi que la grande taille des molécules, qui favorisent tous une adsorption forte et la formation d'une couche protectrice sur la surface métallique [18].

### II.3.3 Défis et limitations

Malgré leur efficacité, l'utilisation des molécules organiques comme inhibiteurs de corrosion présente certaines limitations .

- La plupart de ces composés sont peu solubles en milieu alcalin, ce qui limite leur utilisation dans certains environnements corrosifs, contrairement aux milieux acides où leur solubilité est généralement meilleure.
- Lorsque les molécules organiques contiennent plusieurs principes actifs, il devient difficile d'identifier précisément la molécule responsable principale de l'effet inhibiteur.

- La stabilité et l'efficacité doivent être évaluées sur différentes durées (1 mois, 6 mois, 1 an ou 2 ans après la date de péremption) afin de confirmer leur comportement chimique et leur sécurité d'utilisation.

En effet, une modification de la structure chimique peut influencer directement les performances inhibitrices et, dans certains cas, engendrer des risques environnementaux si des produits toxiques se forment [21].

#### II.4 Types d'adsorption

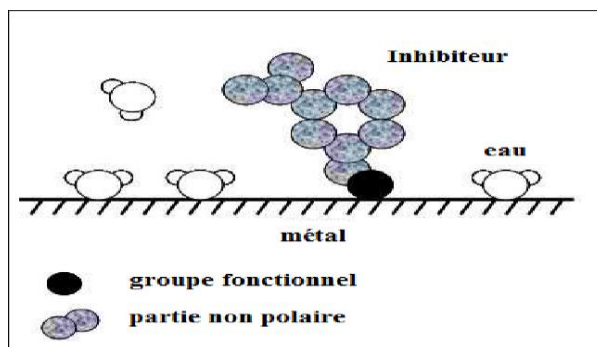
Lors du processus d'adsorption, les molécules inhibitrices se fixent à la surface métallique en formant une couche mono- ou multimoléculaire qui agit comme une barrière protectrice contre les espèces agressives présentes dans le milieu corrosif. Deux principaux types d'adsorption peuvent être distingués[22] :

##### • Adsorption physique

L'adsorption physique, appelée également physisorption, résulte essentiellement des interactions électrostatiques entre les charges portées par les molécules inhibitrices et celles présentes à la surface du métal. Ce type d'adsorption dépend principalement de la nature des charges et des conditions du milieu [23].

##### • Adsorption chimique

L'adsorption chimique, ou chimisorption, implique la formation de liaisons chimiques entre les molécules inhibitrices et la surface métallique par partage ou transfert d'électrons. Ce mécanisme conduit généralement à une adsorption plus stable et à une meilleure efficacité inhibitrice [23].



**Figure II.5.** Adsorption d'un inhibiteur organique sur une surface métallique en milieu aqueux [24].

## II.5 Isothermes d'adsorption

Les isothermes d'adsorption sont largement utilisées pour décrire le mécanisme d'interaction entre les molécules inhibitrices et la surface métallique. Parmi les modèles les plus employés dans les études de corrosion figurent les isothermes de Langmuir, de Temkin et de Freundlich.

### • Isotherme de Langmuir

Le modèle de Langmuir repose sur l'hypothèse selon laquelle la surface du métal possède un nombre limité de sites actifs homogènes. Chaque site ne peut adsorber qu'une seule molécule, sans interaction entre les espèces adsorbées. L'expression mathématique de cette isotherme est donnée par :

$$\frac{\theta}{1-\theta} = KC \quad (\text{II.1})$$

- $\theta$  représente le taux de recouvrement de la surface métallique,
- $C$  la concentration de l'inhibiteur,
- $K$  la constante d'équilibre d'adsorption [25].

### • Isotherme de Temkin

L'isotherme de Temkin tient compte des interactions pouvant exister entre les espèces adsorbées à la surface du métal. Ce modèle considère que l'énergie libre d'adsorption varie linéairement avec le degré de recouvrement de la surface. L'équation de Temkin peut être exprimée comme suit :

$$\theta = -\frac{1}{2\alpha} \ln(KC) \quad (\text{II.2})$$

- $K$  la constante d'adsorption ,
- $C$  la concentration de l'inhibiteur dans la solution [26].

### • Isotherme de Freundlich

Le modèle de Freundlich est généralement appliqué aux surfaces hétérogènes caractérisées par des sites d'adsorption possédant des énergies différentes. Ce modèle suppose que le phénomène d'adsorption est complexe et que la chaleur d'adsorption varie en fonction de la nature des sites actifs présents à la surface. L'équation de Freundlich s'écrit :

$$\ln \theta = \ln K + n \ln C_{\text{inh}} \quad (\text{II.3})$$

- K représente la constante d'adsorption,
- C la concentration de l'inhibiteur
- n une constante caractéristique du système étudié [27].

## II.6 Courbe de tafel

### Définition

Une courbe de Tafel (ou courbe de polarisation) est un graphique représentant le logarithme de l'intensité du courant en fonction du potentiel de l'électrode. Elle permet d'étudier la cinétique électrochimique et de déterminer avec précision la vitesse de corrosion d'un métal dans un environnement corrosif [28].

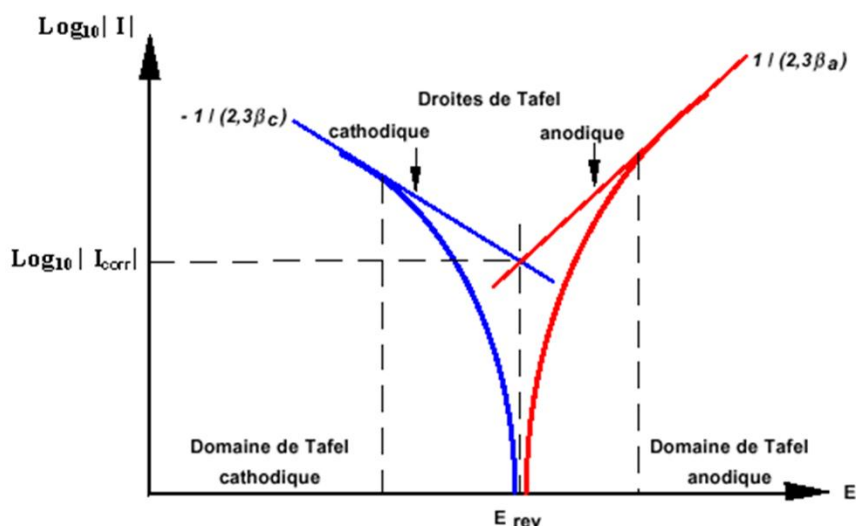


Figure II.6. courbe de tafel [29].

## II.7 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les généralités sur les inhibiteurs de corrosion, leurs principales caractéristiques, leurs domaines d'application ainsi que leurs mécanismes d'action. Une attention particulière a été accordée aux inhibiteurs organiques et à leur mode d'adsorption sur les surfaces métalliques.

Les différents types d'adsorption ainsi que les principales isothermes d'adsorption ont également été abordés afin de mieux comprendre les interactions entre l'inhibiteur et le métal.

## Références

1. Waldrip, G. (1948). Corrosion inhibition in oil wells. *Journal of Petroleum Technology*, 1(2), 43–47.
2. Rbaa, M., & Zarrouk, A. (2024). Current and emerging trends of inorganic, organic and eco-friendly corrosion inhibitors. *RSC Advances*, 14, 32892.  
<https://doi.org/10.1039/D4RA05662K>
3. Verma, C., Ebenso, E. E., & Quraishi, M. A. (2021). Organic corrosion inhibitors. In *Corrosion Inhibitors (Chapter 5)*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99>
4. National Center for Biotechnology Information (2026). PubChem Compound Summary for CID 2662, Celecoxib. Retrieved June 1, 2026 from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Celecoxib>.
5. Addala, A. (2007). *Synthèse et application de nouvelles bases de Schiff dans la protection contre la corrosion des aciers destinés à la construction* (Thèse de magister). Université Ferhat Abbas de Sétif, Algérie.
6. Fiaud, C. (1990). *Inhibiteurs de corrosion*. Techniques de l'Ingénieur, COR1005.  
Techniques de l'Ingénieur – Inhibiteurs de corrosion
7. Mansouri, M. E. M. (2020). Étude de corrosion en utilisant les inhibiteurs [Mémoire de master, Université Mohamed Khider – Biskra]. [univ-biskra.dz](http://univ-biskra.dz)
8. Constantin, F. (2011). *Étude de l'efficacité d'inhibiteurs de corrosion utilisés dans les liquides de refroidissement* (Thèse de doctorat en cotutelle, INSA de Lyon & Université de Pitești). HAL Thèses. <https://theses.hal.science/tel-00690792>
9. Ahmed, M. A., Amin, S., & Mohamed, A. A. (2024). Current and emerging trends of inorganic, organic and eco-friendly corrosion inhibitors. *RSC Advances*, 14(41), 29845–29871. [doi.org](https://doi.org)
10. Madora, N. (2011). Étude de l'effet d'inhibition des composés dithioéthionés et son seldérivé dans le milieu H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> [Mémoire de magister, Université Kasdi Merbah - Ouargla]. DSpace. [univ-ouargla.dz](http://univ-ouargla.dz)

11. Hajjaji, N. (2021). *Vers de nouveaux inhibiteurs de corrosion pour la protection du patrimoine métallique en bronze au Maroc*. Université Ibn Tofail, Faculté des Sciences de Kénitra. <https://fs.uit.ac.ma/wp-content/uploads/2022/03/Ouvrage-Hajjaji-FSK-UIT.pdf>
12. Labbaci, N. E. H., & Mokhneche, Y. (2020). *Évaluation de l'efficacité d'un inhibiteur de corrosion "MEDACHAUD" vis-à-vis de la corrosion de l'Aluminium* [Mémoire de master, Université Badji Mokhtar - Annaba]. Bibliothèque de la Faculté des Sciences de l'Ingénieur. <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2022/03/LABBACI-Nour-el-Houda.pdf>
13. Le Bozec, N. (2000). *Étude de la réduction de l'oxygène sur métaux passivables en milieux marins : influence des biofilms et de la température* (Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale). ResearchGate. researchgate.net
14. Khaled, K. F., & Al-Qahtani, M. M. (2009). The inhibitive effect of some tetrazole derivatives towards Al corrosion in acid solution: Chemical, electrochemical and theoretical studies. *Materials Chemistry and Physics*, 113(1), 150–158. doi.org
15. Fiaud, C., Lemaitre, C., & Pébère, N. (2002). Inhibiteurs de corrosion. Dans G. Béranger & H. Mazille (dir.), *Corrosion et anticorrosion : Pratique industrielle* (p. 245-274). Hermès Science Publications.
16. Mezhoud, B. (2011). *Synthèse des inhibiteurs contre la corrosion des aciers* [Thèse de magister]. Université Mentouri-Constantine.
17. Geethamani, P., Narmatha, M., Dhanalakshmi, R., Aejitha, S., & Kasthuri, P. K. (2018). Corrosion inhibition and adsorption properties of mild steel in 1 M hydrochloric acid medium by expired Ambroxol drug. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 5(1), 11. doi.org
18. Shetty, P. (2026). An assessment of expired drugs' potential as effective inhibitors to combat carbon steel and mild steel corrosion. *Corrosion Reviews*, 44(1), 20240102.
19. Shukla, S. K., & Quraishi, M. A. (2010). Cephazolin: A novel and efficient corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid solution. *Corrosion Science*, 52(1), 152-160. Consulter sur ScienceDirect.

20. Kumar, A. (2016). Ethambutol: A new and effective corrosion inhibitor of mild steel in acidic medium. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 89(7), 1158-1163. doi.org
21. Vaszilcsin, N., Kellenberger, A., Dan, M. L., Duca, D. A., & Ordodi, V. L. (2023). Efficiency of expired drugs used as corrosion inhibitors: A review. *Materials*, 16 (16), 5555. <https://doi.org/10.3390/ma16165555> .
22. Antropov, L. I. (1962). *Proceedings of the 1st International Congress on Metallic Corrosion*. Butterworths.
23. Boussaid, M. (2020). *Etude de l'adsorption du diclofénac sur divers adsorbants en eau distillée. Effet des paramètres opératoires* [Mémoire de Master, Université Mohamed Khider – Biskra]. Archives de l'Université de Biskra. [http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/18217/1/Boussaid\\_Mejda.pdf](http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/18217/1/Boussaid_Mejda.pdf)
24. Zaabar, A. (2015). *Electrodéposition, par voltampérométrie et cémentation, des métaux cuivre et zinc en présence d'extrait de la plante d'ortie (Urtica dioica L.). Application de l'extrait à la corrosion* [Thèse de doctorat, Université A. Mira - Béjaïa]. Dépôt institutionnel de l'Université de Béjaïa.
25. Brahim Laidouni, H. (2011). *Inhibition de la corrosion du cuivre en milieu acide par les dérivés de dithioacétal de cétène* [Mémoire de magister]. Université Mentouri de Constantine.
26. Benarioua, M. (2019). *Etude de l'inhibition de la corrosion d'un acier doux en milieu acide par l'emploi d'inhibiteur à base de plantes* [Thèse de doctorat]. Université de Batna 2 - Mostefa Ben Boulaid.
27. Mehtoure, N., & Lebied, M. (2021). *Étude de l'effet inhibiteur de deux inhibiteurs verts contre la corrosion du Monel 400 dans l'acide sulfurique 1N* [Mémoire de master]. Université du 20 août 1955 - Skikda.
28. BENATMANE RADHIA, E. A. I. (2020). *Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier en milieu acide par les méthodes électrochimiques* (Doctoral dissertation, Faculté des Sciences et Technologies).

29. Nouicer, E. (2004). Comportement électrochimique des alliages à base de titane dans un milieu aqueux [Mémoire de master, Université de Constantine]. ResearchGate. doi.org.

# *Chapitre III :*



# *Matériels et Méthodes*

### **III.1 Introduction**

Ce chapitre présente les matériaux utilisés ainsi que la méthodologie expérimentale adoptée pour étudier la corrosion de l'acier au carbone C1020 en milieu acide (HCl 1 M) en présence de la molécule organique (MBP) 4-[5-(4-méthylphényl)-3-(trifluorométhyl)pyrazol-1-yl]benzenesulfonamide comme inhibiteur de corrosion. Les essais expérimentaux ont été réalisés afin d'évaluer le comportement corrosif du métal et l'effet protecteur de cette molécule sous différentes conditions opératoires.

### **III.2 Objectif**

L'objectif de ce travail est d'étudier l'inhibition de la corrosion de l'acier C1020 dans une solution d'acide chlorhydrique par la molécule organique MBP en tant qu'inhibiteur de corrosion. Cette étude vise à évaluer l'influence de la concentration de l'inhibiteur et de la température sur l'efficacité inhibitrice, ainsi qu'à analyser le mécanisme d'adsorption responsable de la protection de la surface métallique.

### **III.3 Matériaux**

#### **III.3.1 Matériaux métallique (C1020)**

L'acier au carbone 1020 est un acier faiblement allié contenant environ 0,20 % de carbone. Cette faible teneur en carbone lui confère une bonne souplesse, une grande facilité de formage et une excellente aptitude à l'usinage. Comparé aux aciers à plus forte teneur en carbone, il présente une résistance mécanique moindre, mais une ductilité et une soudabilité supérieures.

Ces caractéristiques font de l'acier 1020 un matériau couramment utilisé pour des applications nécessitant pliage, formage à froid et des pièces structurelles légères, comme les supports, tubes ou composants automobiles.

Bien que sa dureté et sa résistance à l'usure soient limitées, cet acier peut bénéficier de traitements thermo-chimiques tels que la cémentation ou la trempe pour obtenir une surface plus dure [1].



**Figure III. 1.** Métal C1020 [1].

### III.3.2 équivalents internationaux de l'acier au carbone 1020

L'acier au carbone 1020, caractérisé par sa faible teneur en carbone, est largement utilisé pour des applications générales en raison de ses propriétés mécaniques équilibrées. Ce type d'acier est reconnu et standardisé sous différentes appellations selon les normes internationales. Ainsi, ses équivalents sont les suivants [2]

Selon la norme

- Américaine AISI/ASTM, il porte la désignation 1020 .
- au Japon, il est référencé sous la norme JIS comme S20C .
- en Corée, la norme KS le désigne SS20.
- en Chine, il est connu sous le nom de 20#.
- en Europe, la norme correspondante est C20.
- en Inde, il est identifié par la norme IS 226/1020.
- enfin, en Russie, selon la norme GOST, il est référencé sous le numéro 20.

Cette diversité d'appellations reflète l'adoption mondiale de cet acier standardisé, facilitant ainsi son utilisation et son échange dans les industries à l'échelle internationale [3].

### III.3.3 Composition chimique de l'acier au carbone 1020

La composition chimique de l'acier au carbone 1020 peut légèrement varier selon les normes, mais elle se situe généralement dans des plages définies par les principales spécifications industrielles. L'équilibre entre les différents éléments constitutifs permet d'obtenir un matériau combinant une résistance mécanique modérée et une excellente formabilité. Ces caractéristiques rendent cet acier particulièrement adapté à un large éventail d'applications industrielles, et voici une gamme de compositions chimiques selon quelques normes courantes

**Tableau III.1.** Composition chimique de l'acier au carbone [4].

Élément	Contenu
Carbone (C)	0.18%~0.23%
Cuivre (Cu)	≤0.25%
Manganèse (Mn)	0.30%~0.60%
Soufre (S)	≤0.050%
Phosphore (P)	≤0.040%
Silicium (Si)	0.15%~0.35%
Chrome (Cr)	≤0.25%
Nickel (Ni)	≤0.25%
Le fer (Fe)	≤98 %

### III.3.4 Propriétés mécaniques de l'acier au carbone 1020

L'acier 1020 présente une bonne résistance aux chocs, bien que les valeurs précises dépendent des procédés de fabrication, de l'état du traitement thermique et d'autres paramètres. Dans le cadre de la construction mécanique générale, sa ténacité répond généralement aux exigences de résistance aux chocs pour la majorité des pièces utilisées en conditions normales [5].

**Tableau III.2.** Propriétés mécaniques de l'acier au carbone [5].

Propriétés	Valeurs
Résistance à la traction	$\geq 600 \text{ MPa}$
Limite d'élasticité	$\geq 355 \text{ MPa}$
Élongation	$\delta_5 \geq 16\%$
Rétrécissement de la section	$\psi \geq 40\%$

En ce qui concerne la résistance mécanique, l'acier 1020 laminé à froid affiche des caractéristiques supérieures par rapport à sa version laminée à chaud. En effet, sa résistance à la traction atteint environ 460 MPa avec une limite d'élasticité de 380 MPa, tandis que l'acier laminé à chaud présente une résistance à la traction aux alentours de 430 MPa et une limite d'élasticité d'environ 240 MPa.

Pour ce qui est de la dureté, l'acier laminé à froid est relativement plus dur. Cette augmentation est attribuable à l'écrouissage, qui affine la structure du grain et accroît la densité des dislocations, renforçant ainsi la dureté du matériau. À l'inverse, l'acier laminé à chaud montre une dureté plus faible [6].

### III.4 Milieu corrosif:

Les solutions aqueuses d'**acide chlorhydrique** sont commercialisées à diverses concentrations selon leurs utilisations. Les plus concentrées sont à 37% en masse. C'est un acide fort totalement dissocié dans l'eau [7].



### ➤ Préparation l'acide chlorhydrique à 1 mol/L

Préparation de la solution corrosive (HCl 1M) La solution corrosive utilisée dans cette étude est une solution d'acide chlorhydrique de concentration 1 M, préparée par dilution d'une solution commerciale d'HCl concentré (37 %). La préparation à été effectuée selon les étapes suivantes:

- Calcul du volume nécessaire d'acide concentré à l'aide de la relation de dilution  $C_1.V_1=C_2.V_2$ , donnant 82,8 ml pour 1 L de solution.
- Introduction d'une quantité suffisante d'eau distillée dans une fiole jaugée de 1 L.
- Ajout progressif de l'acide chlorhydrique concentré dans l'eau, en respectant les règles de sécurité.
- Ajustement du volume final jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée. Homogénéisation de la solution avant son utilisation dans les essais expérimentaux [8].

### III.5. Inhibiteur de corrosion MBP

Le composé étudié comme inhibiteur de corrosion est le MBP (4-[5-(4-méthylphényl)-3-(trifluorométhyl)pyrazol-1-yl]benzenesulfonamide), une molécule organique azoté appartenant à la famille des dérivés pyrazoliques sulfonamidés. Grâce à sa structure riche en hétéroatomes et en systèmes aromatiques conjugués, cette molécule présente un fort potentiel d'adsorption sur les surfaces métalliques, ce qui en fait un candidat intéressant pour la protection contre la corrosion en milieu acide [9].

#### Structure de l'inhibiteur

Le MBP est un composé organique riche en électrons, contenant plusieurs hétéroatomes (N, O, S et F) ainsi que des noyaux aromatiques. Ces caractéristiques structurales favorisent son adsorption sur la surface de l'acier et contribuent à la formation d'un film protecteur limitant les réactions de corrosion.

- **Hétéroatomes (N, O, S et F)** : possèdent des doublets électroniques libres capables d'interagir avec les orbitales vacantes du fer (Fe), favorisant ainsi l'adsorption de la molécule sur la surface métallique.

- **Noyau pyrazole** : contient deux atomes d'azote pouvant participer aux interactions avec le métal et renforcer la stabilité de la couche adsorbée.
- **Cycles aromatiques (benzène et toluène substitué)** : permettent des interactions  $\pi$  avec la surface métallique et améliorent la couverture de la surface.
- **Groupement sulfonamide (-SO<sub>2</sub>NH<sub>2</sub>)** : constitue un centre actif supplémentaire favorisant les interactions avec le métal et augmentant l'efficacité inhibitrice.

Ces différents sites actifs permettent au MBP de s'adsorber efficacement sur la surface de l'acier, réduisant ainsi la dissolution du métal et ralentissant les processus de corrosion en milieu acide [10].

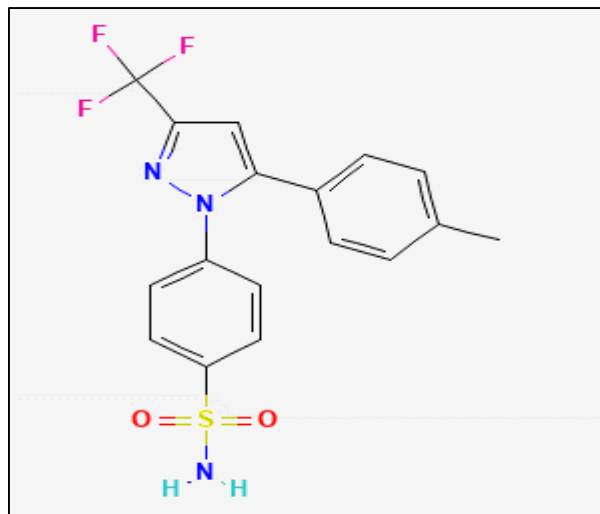


Figure III. 2. structure moléculaire de MBP[9].

### III.6 Mécanisme d'Adsorption (Formation du Film)

En milieu HCl 1 M, les molécules de MBP s'adsorbent spontanément à la surface du métal, formant une couche protectrice qui limite le contact entre la surface métallique et le milieu corrosif. Cette couche agit comme une barrière empêchant l'accès des espèces agressives aux sites actifs anodiques et cathodiques.

- **Physisorption (adsorption physique)** : dans le milieu acide, les molécules de MBP peuvent être protonées et interagir électrostatiquement avec la surface métallique préalablement recouverte d'ions adsorbés. Ces interactions favorisent l'accumulation des molécules inhibitrices à l'interface métal/solution.

- **Chimisorption (adsorption chimique) :** les hétéroatomes présents dans la molécule (N, O et S) ainsi que les électrons  $\pi$  des cycles aromatiques peuvent former des liaisons de coordination avec les orbitales vacantes des atomes de fer situés à la surface du métal. Cette adsorption renforce la stabilité et l'efficacité du film protecteur [11].

### III.7 Interaction dans le milieu HCl

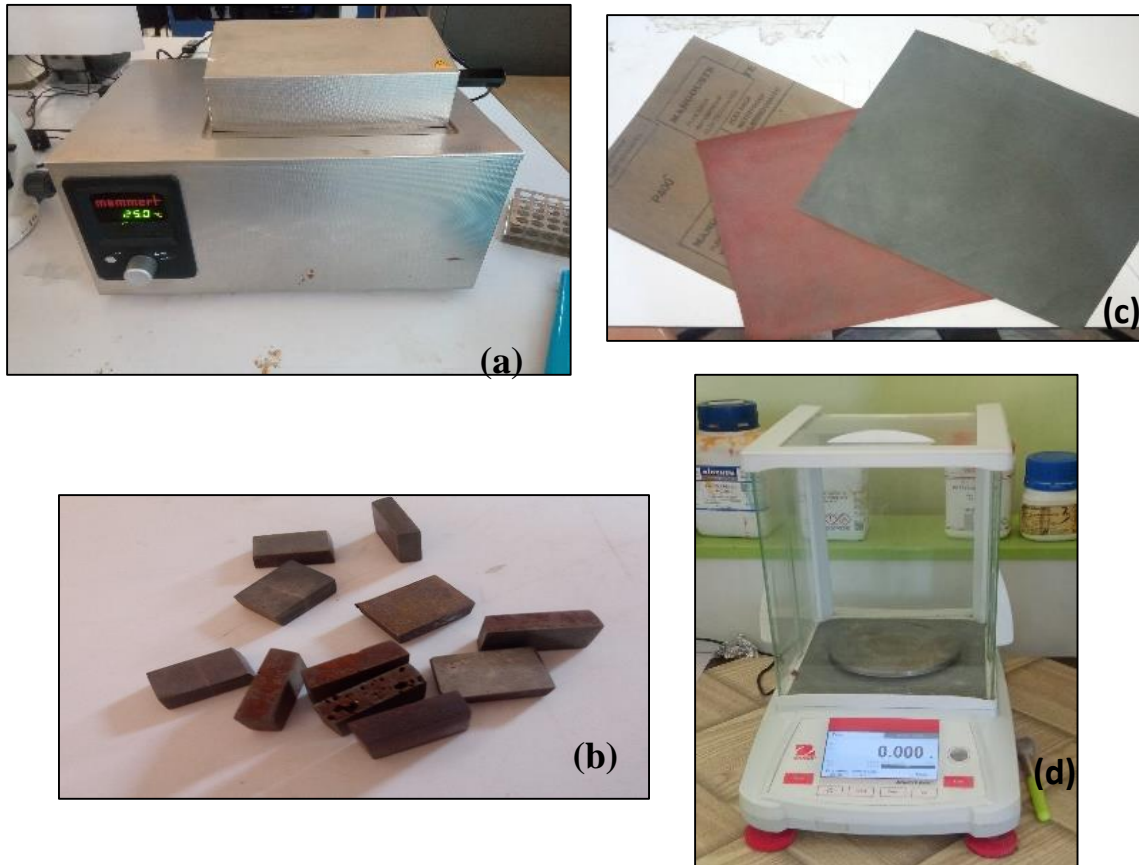
Le milieu HCl 1 M est fortement agressif pour l'acier au carbone en raison de la présence des ions  $H^+$  et  $Cl^-$ . Les ions  $H^+$  favorisent les réactions cathodiques, tandis que les ions  $Cl^-$  pénètrent facilement la surface métallique et accélèrent la dissolution du fer, augmentant ainsi la vitesse de corrosion.

Dans ce milieu acide, les molécules de MBP s'adsorbent à la surface de l'acier grâce à leurs hétéroatomes (N, O et S) et à leurs systèmes  $\pi$  aromatiques. Les ions  $Cl^-$  adsorbés sur la surface facilitent l'attraction des molécules protonées de MBP, tandis que les doublets électroniques des hétéroatomes peuvent établir des interactions de coordination avec les atomes de fer.

Cette adsorption conduit à la formation d'un film protecteur qui isole partiellement la surface métallique du milieu corrosif, limitant l'action des ions  $H^+$  et  $Cl^-$  et réduisant ainsi la vitesse de corrosion [12].

### III.8 Appareillage utilisé

- Échantillons métalliques C1020
- Balance analytique (mesure des masses)
- Papier abrasif (polissage)
- Bêchers et verrerie (préparation solutions)
- Chronomètre (temps d'immersion)
- Bain marie (température)
- Étuvage ou séchage (séchage des échantillons)



**Figure III.3.** (a) bain marie (b) Échantillons métalliques C1020 (c) papier abrasif (d) Balance analytique (mesure des masses)

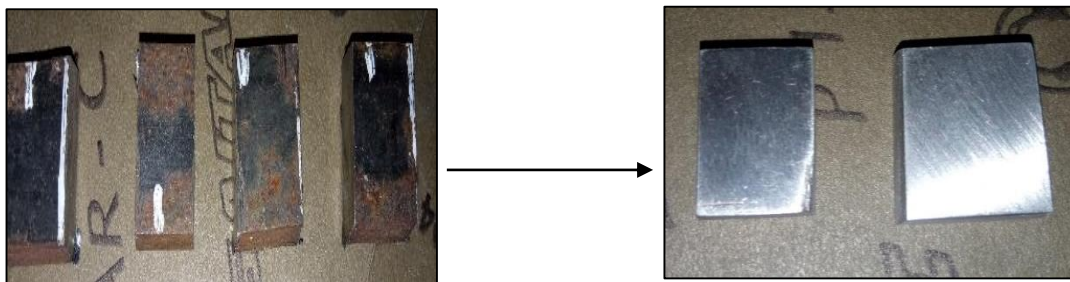
### III.9 Préparation expérimentale

#### III.9.1 Préparation des échantillons

Avant la réalisation des essais de corrosion, les échantillons en acier C1020 ont subi une préparation rigoureuse afin d'assurer la reproductibilité et la fiabilité des résultats expérimentaux.

- **Polissage (Polissage mécanique) :** Les surfaces des échantillons ont été polies à l'aide de papiers abrasifs de granulométrie progressive (du plus grossier au plus fin). Cette étape permet d'éliminer les irrégularités superficielles, les couches d'oxydes et les impuretés, tout en obtenant une surface homogène et reproductible.
- **Lavage (Nettoyage à l'eau distillée) :** Après le polissage, les échantillons ont été soigneusement lavés à l'eau distillée afin d'éliminer les particules résiduelles issues du polissage.

- **Dégraissage (Nettoyage chimique) :** Les échantillons ont ensuite été dégraissés à l'aide d'un solvant organique (tel que l'acétone ou l'éthanol) pour éliminer toute trace de graisse ou de contaminants organiques susceptibles d'influencer les résultats
- **Séchage :** Enfin, les échantillons ont été séchés à l'air libre ou dans une étuve à température contrôlée, puis conservés dans un dessiccateur afin d'éviter toute contamination avant les mesures de masse.



**Figure III.4.** Métal avant polissage et après polissage

### III.9.2 Préparation des solutions

Les solutions utilisées dans cette étude ont été préparées avec soin afin de garantir des conditions expérimentales contrôlées. Solution témoin (sans inhibiteur) : Une solution d'acide chlorhydrique (HCl) a été préparée à une concentration donnée (par exemple  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ), utilisée comme milieu corrosif de référence.

- **Solution avec inhibiteur :** Une autre série de solutions a été préparée en ajoutant l'inhibiteur à la solution d'HCl.

**Concentrations :** Différentes concentrations d'inhibiteur ont été utilisées afin d'étudier son effet sur la vitesse de corrosion. Les solutions ont été préparées par dilution à partir de solutions mères, en respectant les règles de sécurité .



**Figure III.5.** les solution d' inhibiteur diluées dans l'HCl 1M (en PPM).

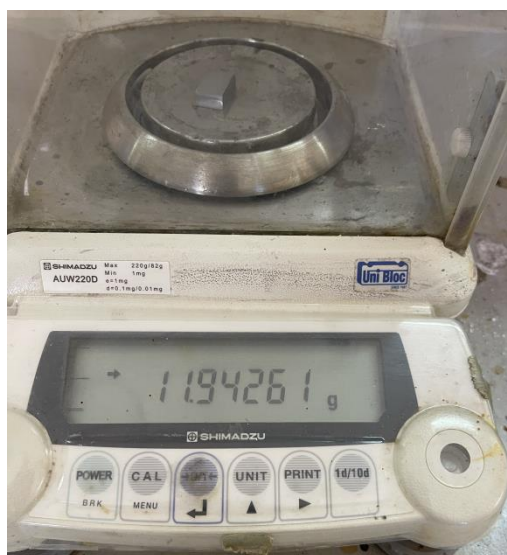
### III.10 Méthode d'étude de la corrosion

#### III.10.1 Méthode gravimétrique (Perte de masse)

La méthode gravimétrique est une technique classique largement utilisée pour évaluer la corrosion des métaux. Elle consiste à mesurer la perte de masse d'un échantillon après immersion dans un milieu corrosif.

##### Procédure expérimentale :

1. Les échantillons préparés sont pesés avec une balance analytique pour obtenir la masse initiale ( $m_i$ ).
2. Les échantillons sont ensuite immergés dans les solutions corrosives (avec ou sans inhibiteur).
3. L'immersion est maintenue pendant une durée déterminée (temps d'exposition).
4. Après immersion, les échantillons sont retirés, nettoyés pour éliminer les produits de corrosion (sans attaquer le métal sain).
5. Les échantillons sont séchés puis pesés à nouveau pour obtenir la masse finale ( $m_f$ ).



**Figure III.6.** Mesure de la masse la pièce métallique à l'aide d'une balance électronique.

**Calcul de la perte de masse**

$$\Delta m = m_i - m_f \quad (\text{III.1})$$

**Calcul de la vitesse de corrosion**

$$W = \Delta m / (S \times t) \quad (\text{III.2})$$

Avec :

- $\Delta m$  : perte de masse (g)
- $S$  : surface exposée (cm<sup>2</sup>)
- $t$  : temps d'immersion (h)

**Interprétation**

La perte de masse est directement proportionnelle à l'intensité de la corrosion. Une valeur élevée de  $\Delta m$  indique une corrosion importante, tandis qu'une faible valeur traduit une bonne résistance du matériau ou une efficacité de l'inhibiteur.

**III.11 Évaluation de l'efficacité inhibitrice****III.11.1 Rendement d'inhibition (%)**

L'efficacité de l'inhibiteur est évaluée en comparant la perte de masse en absence et en présence de celui-ci.

$$EI(\%) = ((m_0 - m) / m_0) \times 100 \quad (\text{III.3})$$

- $m_0$  : perte de masse sans inhibiteur.
- $m$  : perte de masse avec inhibiteur.

**Interprétation**

Le rendement d'inhibition représente la capacité de l'inhibiteur à réduire la corrosion.

Plus la valeur de  $\eta$  est élevée, plus l'inhibiteur est efficace.

**III.11.2 Degré de recouvrement ( $\theta$ )**

Le degré de recouvrement correspond à la fraction de la surface métallique couverte par les molécules de l'inhibiteur.

$$\theta = (m_0 - m) / m_0 \quad (\text{III.4})$$

**Interprétation**

- $\theta = 0$  : aucune protection
- $\theta = 1$  : surface totalement protégée

Ce paramètre est essentiel pour comprendre le mécanisme d'adsorption de l'inhibiteur sur la surface du métal.

### III.12 Etude théorique

Dans cette étude, des calculs de la théorie de densité fonctionnel (DFT) ont été effectués sur la structure chimique de la molécule MBP afin d'élucider la corrélation entre son efficacité d'inhibition de la corrosion et ses propriétés moléculaire et structurale, [13]on utilisant le logiciel de chimie quantique Gaussian 9. La structure géométrique de **MBP** a été optimisée par DFT au niveau de la base théorique B3LYP/6-31G(d,p) [14] en phase gazeuse. La visualisation a été réalisée à l'aide Gauss View 6.03. Les paramètres de chimie quantique, notamment les énergies des orbitales moléculaire LUMO et HOMO ( $\epsilon_{LUMO}$ ,  $\epsilon_{HOMO}$ ), l'énergie de GAP ( $\Delta E$ ) [15] la dureté globale ( $\eta$ ), [16] l'électronégativité ( $\chi$ ), la mollesse ( $\sigma$ ), l'affinité électronique (A), le potentiel d'ionisation (I),[17] le moment dipolaire ( $\mu$ ) [16]et l'indice d'électrophile ( $\omega$ ), ont été déterminés à l'aide de la formule suivante

$$I = -E_{HOMO} \quad \text{(III.5)}$$

$$A = -E_{LUMO} \quad \text{(III.6)}$$

$$\Delta E = E_{LUMO} - E_{HOMO} \quad \text{(III.7)}$$

$$\mu = -\frac{(I + A)}{2} \quad \text{(III.8)}$$

$$\chi = \frac{(I + A)}{2} \quad \text{(III.9)}$$

$$\eta = \frac{(I - A)}{2} \quad \text{(III.10)}$$

$$\sigma = \frac{1}{\eta} \quad \text{(III.11)}$$

$$\omega = \frac{\mu^2}{2\eta} \quad \text{(III.12)}$$

**Références :**

1. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). **Science et génie des matériaux**. (Édition adaptée aux normes européennes).
2. MatWeb. (s. d.). AISI 1020 Steel, cold rolled. MatWeb Material Property Data. Consulté le 10 mai 2026 à l'adresse <https://www.matweb.com>
3. ASM International. (1993). ASM Metals Reference Book (3e éd.). ASM International.
4. ASTM International. (2021). Standard Specification for Carbon Structural Steel (ASTM A36/A36M-19). <https://www.astm.org>
5. Barralis, J., & Maeder, G. (2005). Précis de métallurgie : Élaboration, structures-propriétés, normalisation (an. éd.). AFNOR/Nathan.
6. Ashby, M. F., & Jones, D. R. (2013). Matériaux : 1. Propriétés, applications et conception (4e éd.; Y. Bréchet, Trad.). Dunod.
7. Atkins, P. W., & Jones, L. (2017). Principes de chimie (4e éd.; A. Pousse, Trad.). De Boeck Supérieur.
8. Fosset, B., Baudin, J.-B., & Lahitète, F. (2017). Chimie physique expérimentale (2e éd.). Dunod.
9. National Center for Biotechnology Information (2026). PubChem Compound Summary for CID 2662, Celecoxib. Retrieved June 1, 2026 from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Celecoxib>.
10. Naqvi, I., Saleemi, A. R., & Naveed, S. (2011). Cefixime: A drug as efficient corrosion inhibitor for mild steel in acidic media. Electrochemical and thermodynamic studies. International Journal of Electrochemical Science, 6(1), 10–14. [researchgate.net](http://researchgate.net) .
11. Rekkab, S. (2016). Étude de l'inhibition de la corrosion d'un acier au carbone en milieu acide par des composés organiques de type pyrazole [Thèse de doctorat, Université de Tlemcen]. Dépôt institutionnel.

12. Rekkab, S., Zarrok, H., Salghi, R., Zarrouk, A., Hammouti, B., Taleb, M., ... & Warad, I. (2015). Green corrosion inhibitor from pharmaceutical compounds for carbon steel in hydrochloric acid solution. *Der Pharma Chemica*, 7(5), 156-161.
13. N. Ahmia <sup>a</sup>, M. Benamira <sup>a,\*</sup>, L. Messaadia <sup>b</sup>, M. Colmont <sup>c</sup>, H. Boulahbel <sup>a,d</sup>, H. Lahmar <sup>e</sup>, A. Souici <sup>f</sup>, M. Trari Photocatalytic activity of ZnMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> heterostructure under solar light irradiation: Experimental and theoretical study
14. a) C. Lee, W. Yang and R.G. Parr, *Phys. Rev.* **37**,785(1988); b) A. D. Becke, *J. Chem. Phys.* **98**, 1372(1993).
15. Li, Y., Zhang, Y., Niu, H., Wang, C., Qin, C., Bai, X., and Wang, W., *New J. Chem.*,(2016), vol. 40, no. 6, p. 5245.<https://doi.org/10.1039/C6NJ00321D>
16. a) R. G. Parr and R. G. Pearson, *J. Am. Chem. Soc.* **105**, 7512 (1983); b) R. G. Parr and W. Yang, *Density Functional Theory of Atoms and Molecules*(Oxford Science Publications, New York, 1989).
17. T. Koopmans, « Über die Zuordnung von Wellenfunktionen und Eigenwerten zu den Einzelnen Elektronen Eines Atoms », *Physica*, vol. 1, no 1-6, p. 104-113, janv. 1934, doi: 10.1016/S0031-8914(34)90011-2.

# *Chapitre IV :*



## *Résultats et discussion*

## IV.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus lors de l'étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier au carbone C1020 dans une solution corrosive en présence de la molécule organique MBP. Les essais ont été réalisés par la méthode gravimétrique afin d'évaluer l'effet de la concentration, du temps d'immersion et de la température sur la vitesse de corrosion ainsi que sur l'efficacité inhibitrice de cette molécule.

## IV.2 Étude du comportement à la corrosion de l'acier au carbone C1020 dans un milieu corrosif HCl

### IV.2.1 Effet de la concentration de l'inhibiteur

Les paramètres de corrosion obtenus par la méthode gravimétrique ont été calculés à l'aide des équations suivantes :

$$W = \frac{m1 - m2}{s.t} \quad (\text{IV.1})$$

$$EI\% = \frac{\Delta m_{HCl} - \Delta m}{\Delta m_{HCl}} \times 100 \quad (\text{IV.2})$$

$$\theta = \frac{\Delta m_{HCl} - \Delta m}{\Delta m_{HCl}} \quad (\text{IV.3})$$

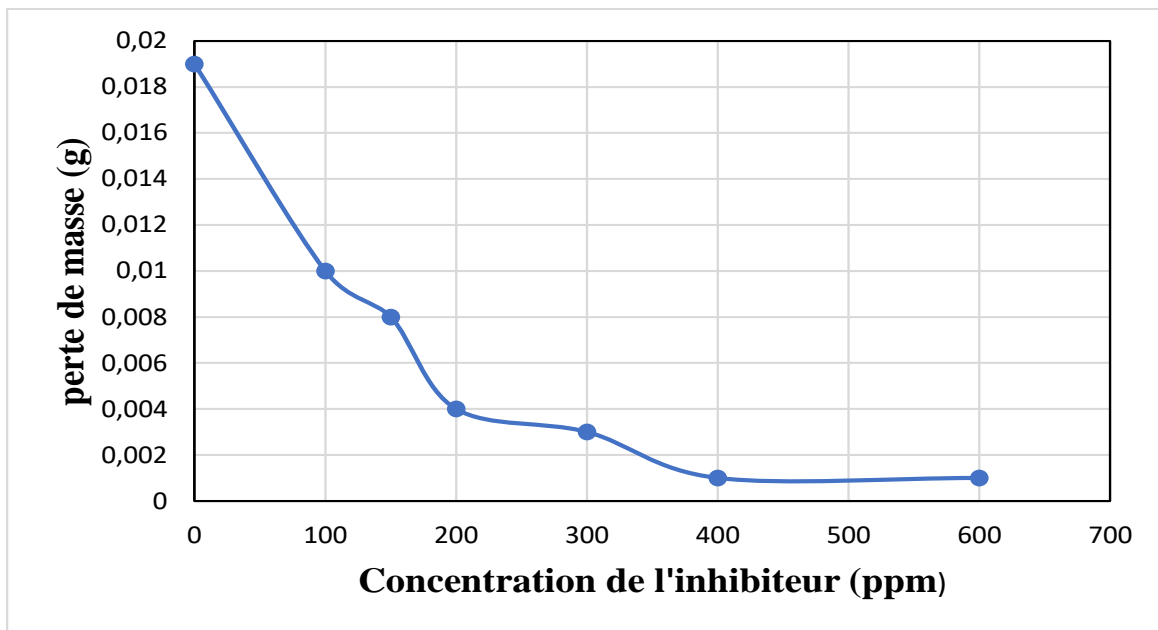
Où

- **m1**: masse initiale de l'échantillon.
- **m2**: masse finale après immersion.
- **Δm**: perte de masse en présence d'inhibiteur.
- **Δm<sub>HCl</sub>**: perte de masse dans la solution de HCl sans inhibiteur.

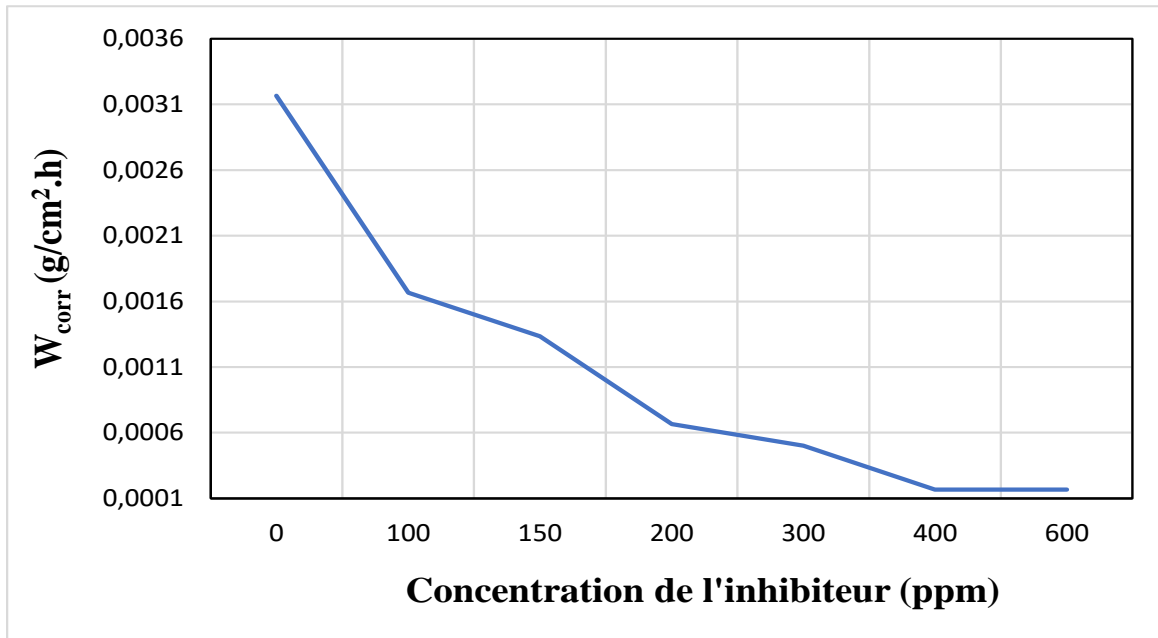
**Tableau IV.1.** Résultats de la corrosion de l'acier au carbone C1020 dans HCl 1 M en présence de différentes concentrations d'inhibiteur (MBP) après 24 h à température ambiante.

	<b>m<sub>in</sub></b>	<b>m<sub>f</sub></b>	<b>Δm</b>	<b>Wcorr(g/cm<sup>2</sup>.h)</b>	<b>θ</b>	<b>EI%</b>
<b>HCl</b>	6,957	6,938	0,019	0,003166667	/	/
<b>600 ppm</b>	7,481	7,48	0,001	0,000166667	0,9473684	94,73684
<b>400 ppm</b>	7,7	7,699	0,001	0,001666667	0,947368	94,7368
<b>300 ppm</b>	7,216	7,213	0,003	0,0005	0,8421053	84,21053
<b>200 ppm</b>	7,016	7,012	0,004	0,000666667	0,7894737	78,94737
<b>150 ppm</b>	7,415	7,407	0,008	0,001333333	0,5789474	57,89474
<b>100 ppm</b>	7,065	7,055	0,01	0,001666667	0,4736842	47,36842

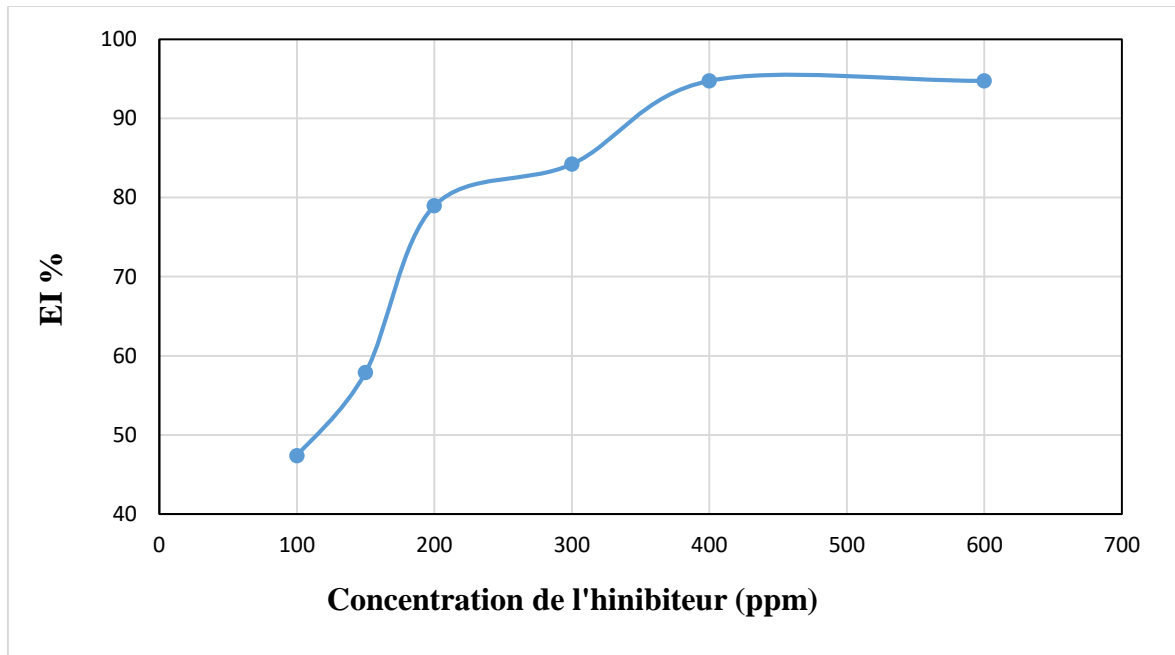
À partir de nos résultats, nous avons tracé la courbe montrant l'effet de la concentration de l'inhibiteur de corrosion sur la perte de masse et l'efficacité inhibitrice.



**Figure IV.1.** Courbe des variations de la perte de masse en fonction de la concentration de l'inhibiteur.



**Figure IV.2.** Courbe de variation de vitesse de corrosion en fonction de la concentration de l'inhibiteur.



**Figure IV.3.** Courbe de variation de l'efficacité inhibitrice en fonction de la concentration de l'inhibiteur.

Les résultats obtenus concernant la perte de masse, représentés sur la figure (IV.1), montrent une diminution progressive avec l'augmentation de la concentration du MBP. À faibles concentrations, la perte de masse reste relativement élevée, traduisant une faible protection de la surface métallique. En revanche, à partir de 400 ppm et particulièrement à 600 ppm, une diminution importante de la perte de masse est observée, indiquant une meilleure résistance de l'acier à la corrosion. Cette diminution peut être attribuée à la formation d'un film protecteur adsorbé à la surface de l'acier C1020, limitant le contact entre le métal et le milieu corrosif.

Concernant la courbe de la vitesse de corrosion représentée sur la figure (IV.2), les résultats montrent une diminution progressive de la vitesse de corrosion avec l'augmentation de la concentration du MBP. La vitesse de corrosion est plus élevée dans le milieu sans inhibiteur, puis elle diminue aux fortes concentrations, ce qui confirme l'effet protecteur de la molécule organique sur la surface métallique.

Concernant la courbe de l'efficacité inhibitrice (IV.3), les résultats montrent une augmentation progressive de l'efficacité avec l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur. Aux faibles concentrations, l'efficacité reste limitée en raison d'une adsorption insuffisante des molécules inhibitrices. En revanche, à partir de 400 ppm et surtout à 600 ppm, une amélioration nette de l'efficacité inhibitrice est observée, confirmant une protection plus

importante de la surface métallique. Cette amélioration est liée à l'adsorption des molécules organiques contenant des hétéroatomes tels que l'oxygène, l'azote et le soufre, favorisant la formation d'une couche protectrice plus stable et plus compacte.

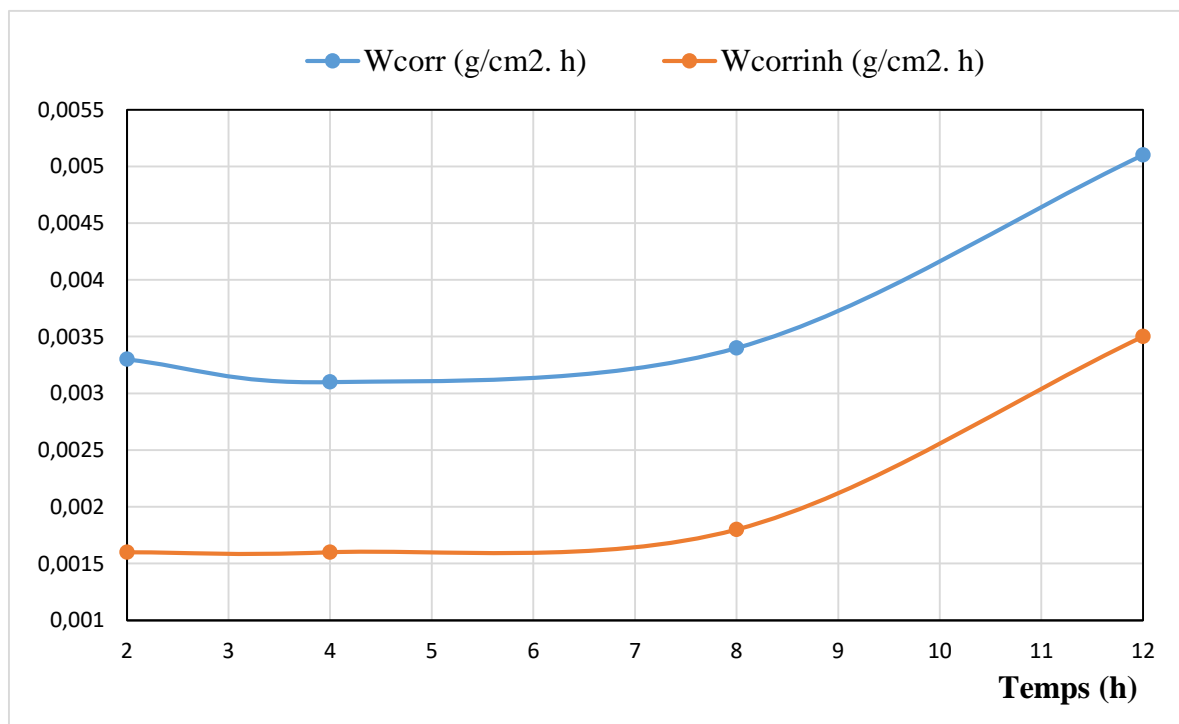
#### IV.2.2 Effet du temps d'immersion

Afin d'étudier l'effet du temps d'immersion sur le comportement à la corrosion de l'acier C1020, des essais gravimétriques ont été réalisés dans une solution de HCl 1 M en absence et en présence de l'inhibiteur, pour différentes durées d'immersion (2 h, 4 h, 8 h et 12 h). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant

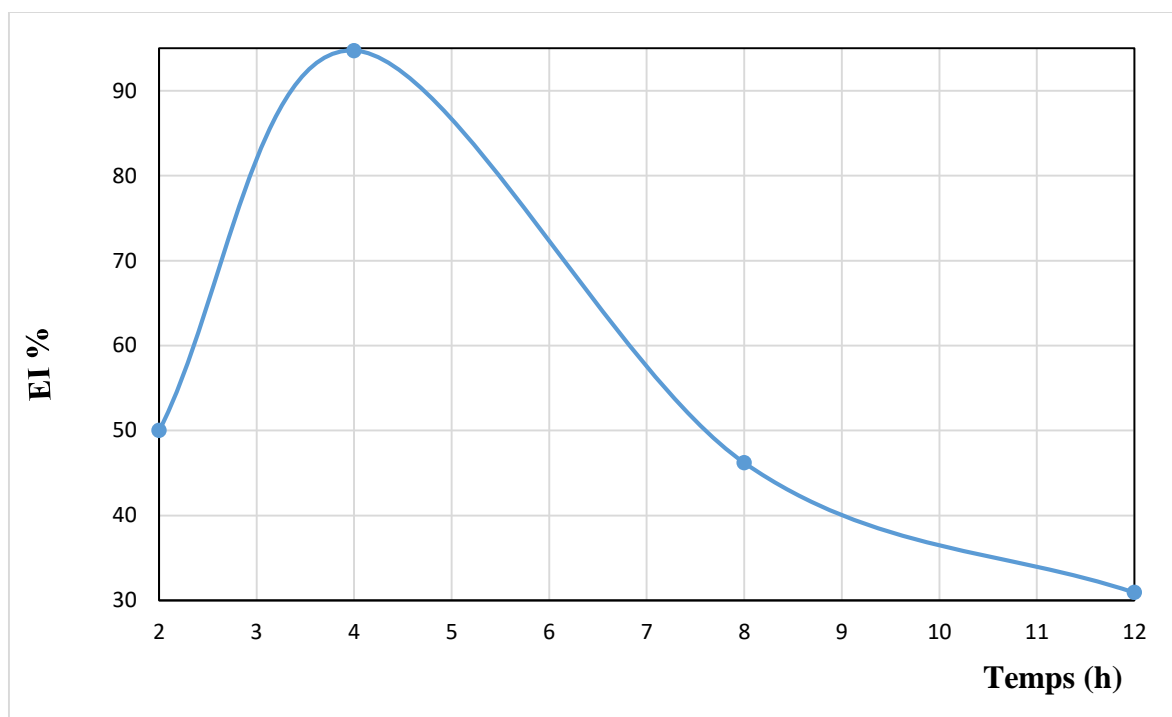
**Tableau IV.2.** Effet du temps d'immersion sur la corrosion de l'acier C1020.

Temps (h)	$W_{\text{corr}}$ (g/cm <sup>2</sup> . h)	$W_{\text{corr}}^{\text{inh}}$ (g/cm <sup>2</sup> . h)	EI %
2	0,0033	0,0016	50
4	0,0031	0,0016	94,73
8	0,0034	0,0018	46,21
12	0,0051	0,0035	30,93

Les résultats obtenus ont permis de tracer la courbe suivante (IV.4)



**Figure IV.4.** Courbe de variation de la vitesse de fonction du temps d'immersion en absence et en présence de l'inhibiteur.



**Figure IV.5.** Courbe de variation de l'efficacité inhibitrice en fonction de temps.

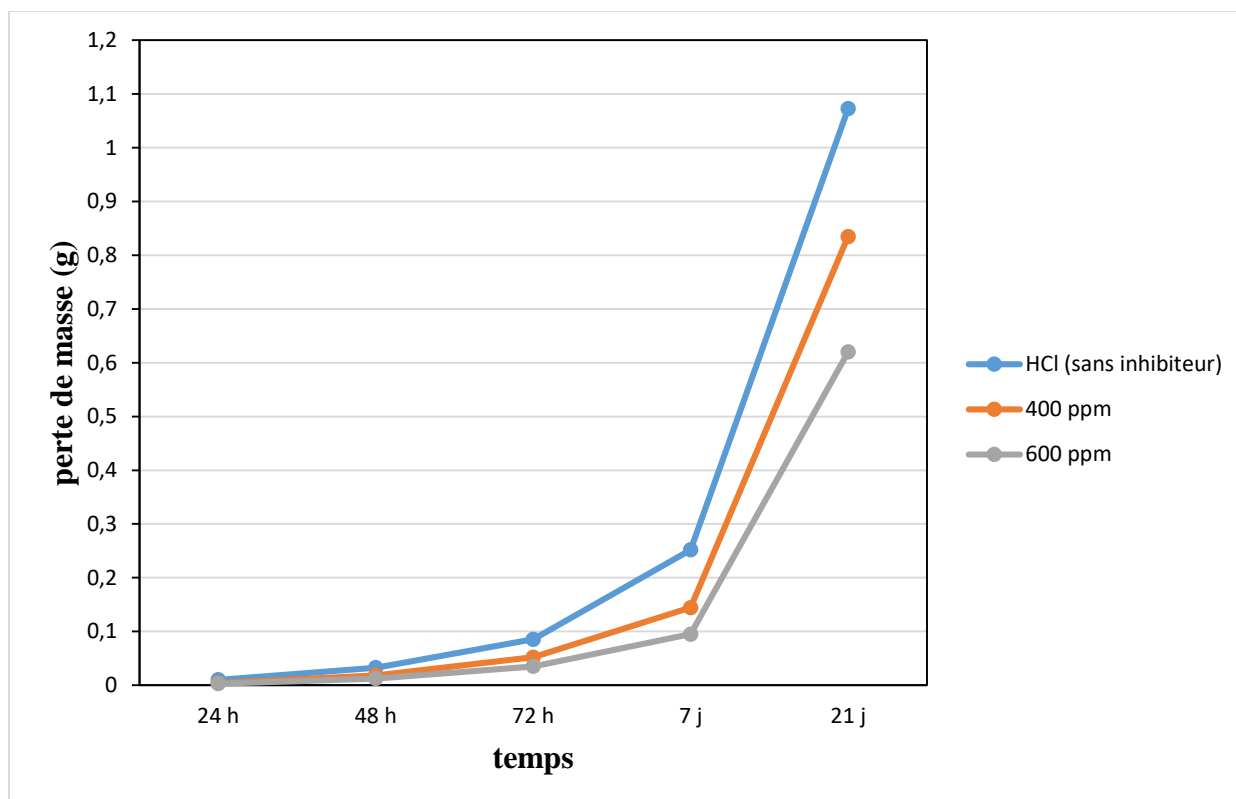
La figure IV.4 montre que la vitesse de corrosion de l'acier C1020 augmente progressivement avec le temps d'immersion en absence d'inhibiteur. En présence de l'inhibiteur, les valeurs restent systématiquement plus faibles, ce qui met en évidence son effet protecteur contre la corrosion en milieu acide.

On observe également que l'écart entre les deux courbes diminue aux temps d'immersion plus longs, ce qui suggère une réduction progressive de l'efficacité du film inhibiteur formé à la surface du métal.

La figure IV.5 montre que l'efficacité inhibitrice varie en fonction du temps d'immersion. Elle atteint une valeur élevée au début, ce qui traduit une bonne adsorption des molécules inhibitrices sur la surface de l'acier et une protection efficace contre la corrosion.

Par la suite, une diminution progressive de l'efficacité est observée avec l'augmentation du temps d'immersion, ce qui peut être attribué à une désorption partielle des molécules inhibitrices ou à une dégradation du film protecteur formé à la surface métallique, réduisant ainsi son pouvoir protecteur au cours du temps.

Une étude sur des périodes d'immersion prolongées allant jusqu'à 21 jours a été réalisée afin d'évaluer le comportement de l'acier C1020 dans le milieu corrosif. Les résultats expérimentaux obtenus ont permis de tracer la courbe suivante(IV.6)



**Figure IV.6.** Courbe de variation de la perte de masse en fonction du temps

L'analyse de la courbe (IV.6) de variation de la perte de masse en fonction du temps d'immersion dans une solution de HCl 1 M, en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur (400 ppm et 600 ppm), met en évidence une augmentation progressive de la perte de masse pour tous les milieux étudiés.

En absence d'inhibiteur, la corrosion devient très importante avec l'augmentation du temps d'immersion, notamment après 7 jours et 21 jours, ce qui traduit l'agressivité élevée du milieu corrosif et la dissolution continue de l'acier C1020.

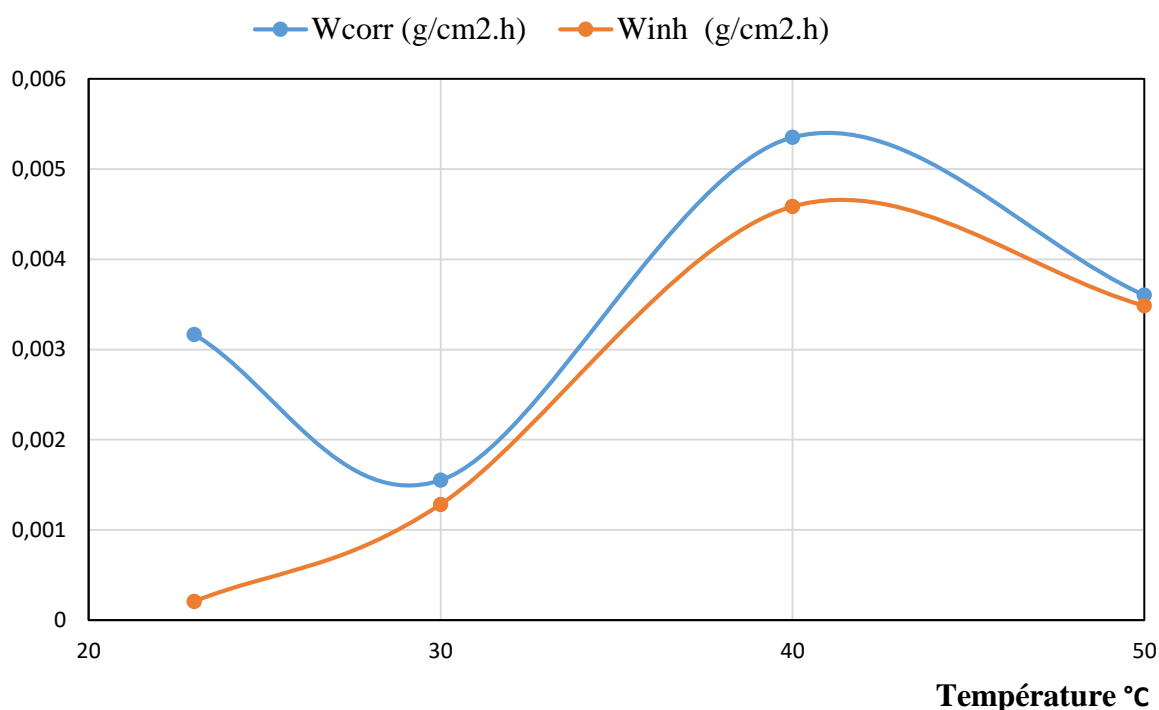
En présence de l'inhibiteur, une diminution notable de la perte de masse est observée, particulièrement à 600 ppm, ce qui indique une meilleure protection de la surface métallique par rapport à 400 ppm. Cette amélioration est attribuée à la formation progressive d'un film protecteur adsorbé à la surface du métal, limitant ainsi le contact direct entre l'acier et le milieu corrosif.

Cependant, après 21 jours, une légère diminution de l'efficacité protectrice est observée. Ce phénomène peut être expliqué par la dégradation progressive du film adsorbé ou par la désorption des molécules de MBP dans le milieu acide, entraînant une réduction de sa capacité inhibitrice.

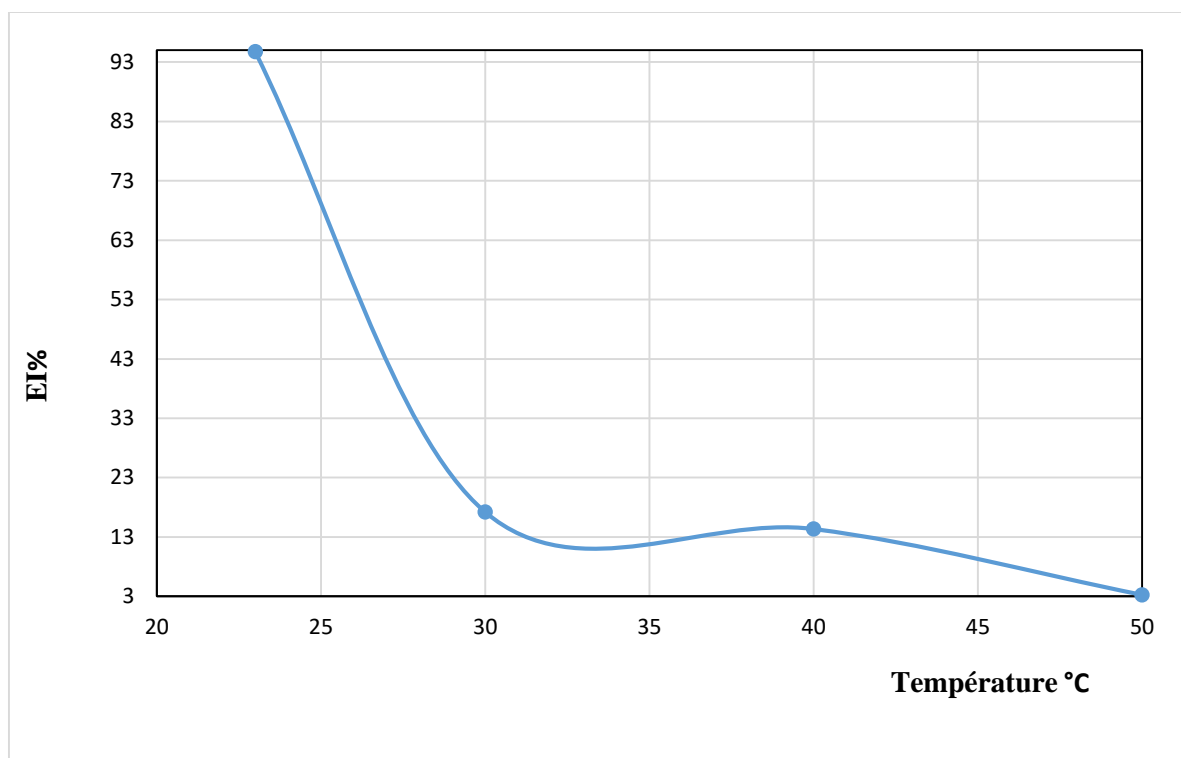
Globalement, les résultats confirment que l'efficacité de l'inhibiteur dépend à la fois de sa concentration et du temps d'immersion, avec une protection plus efficace à 600 ppm aux temps courts et intermédiaires.

### IV.2.3 Effet de la température

À partir des résultats obtenus après immersion des échantillons au bain-marie pendant 4 heures à différentes températures (ambiante, 25 °C, 30 °C et 40 °C) et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur, la courbe suivante a été tracée.



**Figure IV.7.** Courbe de variation de la vitesse de corrosion en fonction de la température.



**Figure IV.8.** Courbe de variation en de l'efficacité inhibitrice fonction de la température.

L'analyse de la courbe (IV.7) montre que la vitesse de corrosion augmente globalement avec l'élévation de la température, aussi bien en absence qu'en présence de l'inhibiteur MBP. En milieu non inhibé, la vitesse de corrosion atteint sa valeur la plus élevée à 40 °C, traduisant une accélération du processus de dissolution du métal. En présence de l'inhibiteur, les valeurs demeurent inférieures à celles du milieu non inhibé, ce qui confirme son effet protecteur. Cependant, l'écart entre les deux courbes diminue aux températures élevées, indiquant une réduction progressive de l'efficacité de l'inhibiteur.

Par ailleurs, la courbe (IV.8) montre que l'efficacité inhibitrice passe d'une valeur très élevée à température ambiante (94,73 %) à une valeur très faible à 50 °C (3,24 %). Cette diminution importante suggère une désorption progressive des molécules de MBP et une perte de stabilité du film protecteur formé à la surface de l'acier lorsque la température augmente.

Ainsi, l'augmentation de la température favorise la corrosion tout en réduisant considérablement l'efficacité inhibitrice du MBP.

### IV.3 Isothermes d'adsorption

Le pouvoir inhibiteur des composés organiques peut être expliqué par leur adsorption sur la surface métallique. Afin de vérifier ce mécanisme et d'identifier l'isotherme d'adsorption la plus appropriée, les modèles de Langmuir, Temkin et Freundlich ont été étudiés. Dans ces modèles, le taux de recouvrement de surface ( $\theta$ ) est relié à la concentration de l'inhibiteur ( $C_{inh}$ ) par les relations suivantes

- Isotherme de Langmuir :  $C_{inh} / \theta = 1/k + C_{inh}$ . (IV.4)

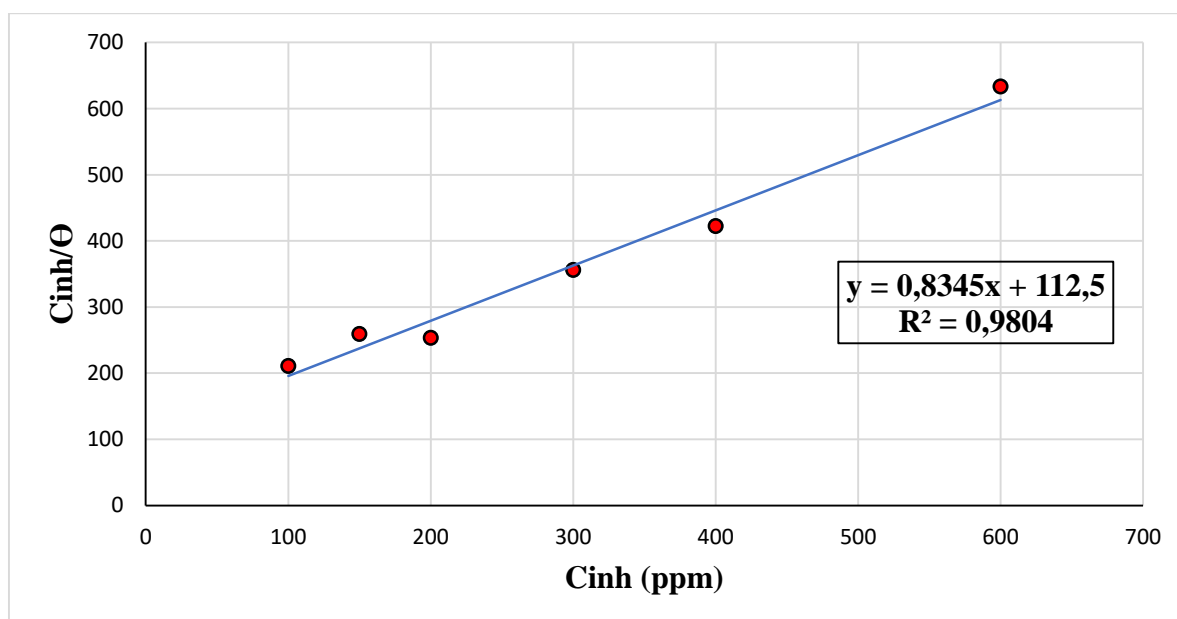
- Isotherme de Temkin :  $\theta = 1/n \ln k C_{inh}$ . (IV.5)

- Isotherme de Freundlich :  $\ln \theta = \ln k + n \ln c_{inh}$ . (IV.6)

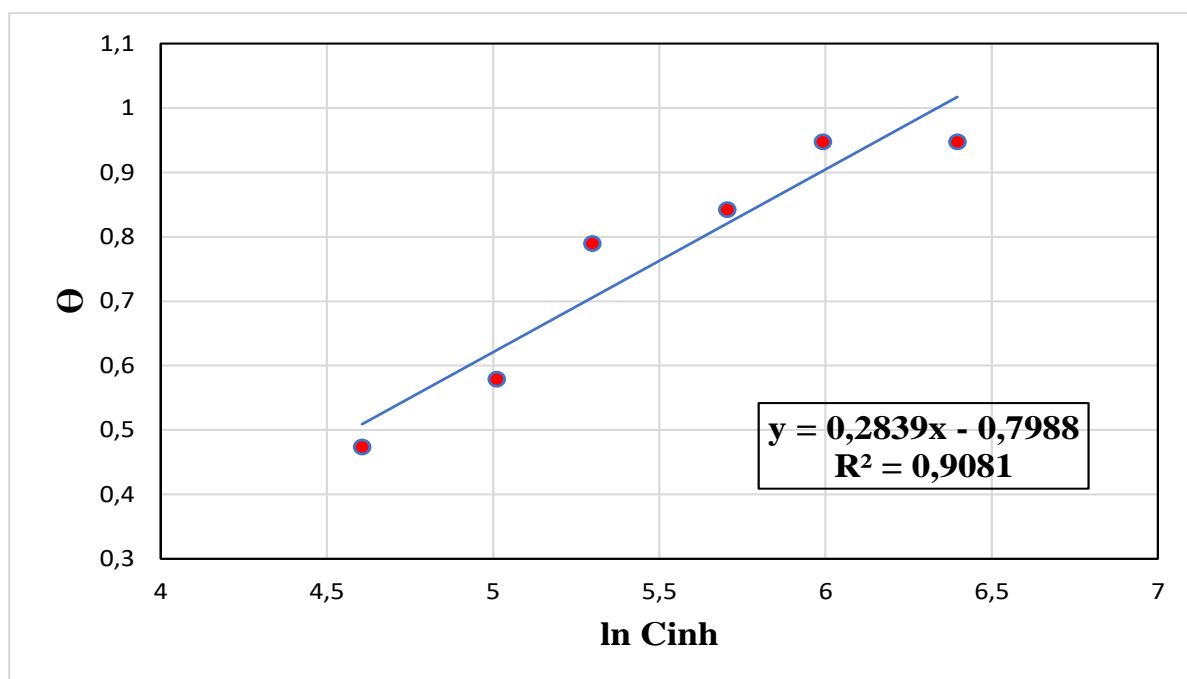
Pour tracer ces isothermes, le taux de recouvrement de la surface métallique est déterminé à partir de la relation suivante

$$\theta = \frac{\Delta m_{HCl} - \Delta m}{\Delta m_{HCl}} \quad (IV.3)$$

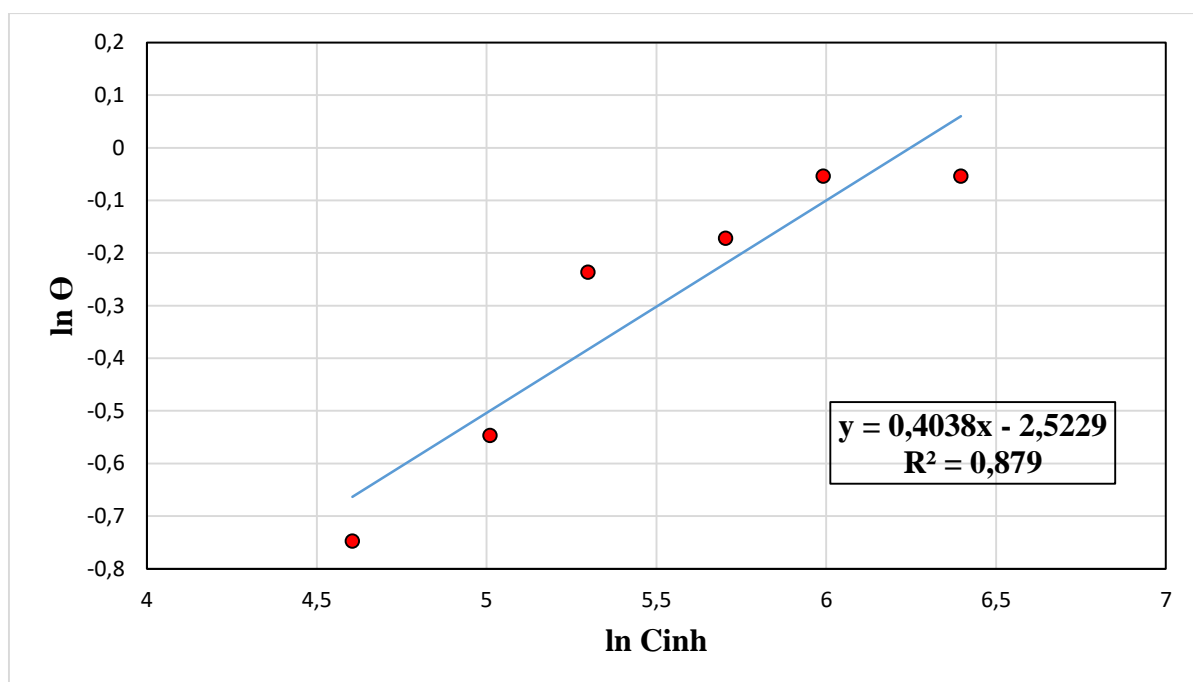
Les isothermes d'adsorption obtenues pour l'acier au carbone C1020 dans le milieu corrosif en présence des différentes concentrations de l'inhibiteur sont présentées dans les figures (IV.9, IV.10, IV.11).



**Figure IV.9.** Isotherme d'adsorption de Langmuir de l'acier C1020 en présence de différentes concentrations d'inhibiteur.



**Figure IV.10.** Isotherme d'adsorption de Temkin de l'acier C1020 en présence de Différentes concentrations des inhibiteurs.



**Figure IV.11.** Isotherme d'adsorption de freundlich de l'acier C1020 en présence de Différentes concentrations des inhibiteurs.

**Tableau IV.3.** Comparaison des coefficients de corrélation des isothermes d'adsorption étudié.

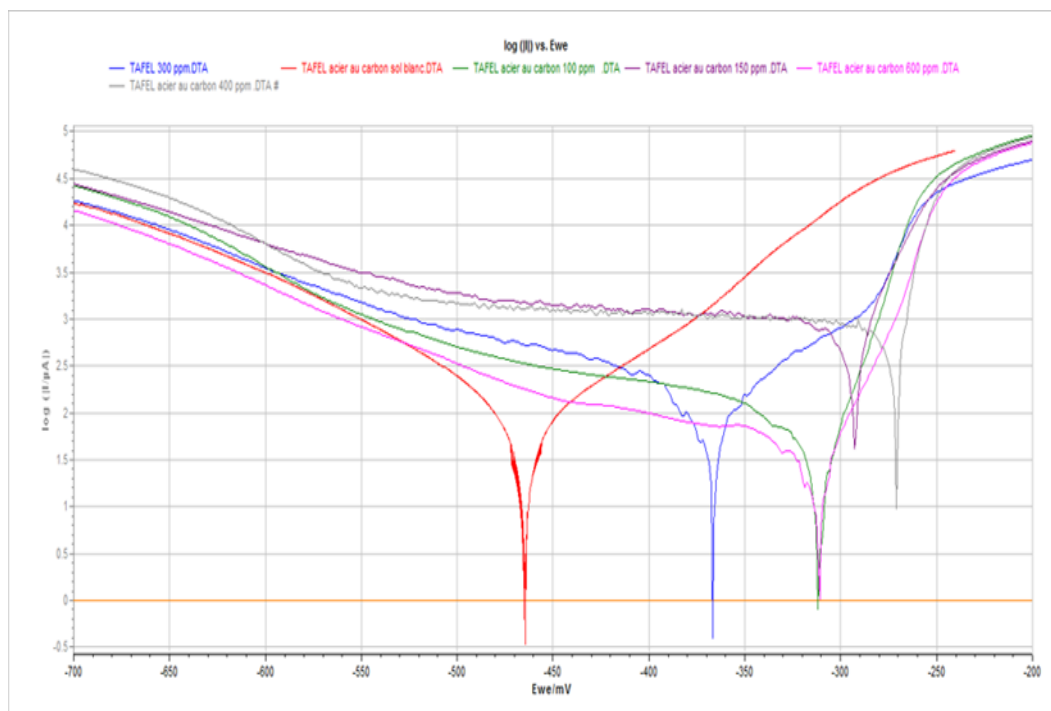
Les isothermes d'adsorption	R <sup>2</sup>
Langmuir	0.9804
Temkin	0.9081
Freundlich	0.879

L'analyse des isothermes d'adsorption obtenues (IV.9, IV.10 et IV.11) montre que le modèle de Langmuir présente la meilleure corrélation avec les résultats expérimentaux, avec un coefficient de corrélation  $R^2 = 0,9804$ , suivi du modèle de Temkin ( $R^2 = 0,9081$ ) et du modèle de Freundlich ( $R^2 = 0,879$ ).

Ces résultats indiquent que l'adsorption de l'inhibiteur MBP sur la surface de l'acier C1020 suit principalement le modèle de Langmuir. Ce comportement suggère la formation d'une couche monomoléculaire d'inhibiteur sur des sites d'adsorption homogènes de la surface métallique. La valeur élevée du coefficient de corrélation obtenue pour ce modèle confirme sa bonne adéquation avec les données expérimentales.

Ainsi, parmi les isothermes étudiées, le modèle de Langmuir apparaît comme le plus approprié pour décrire le mécanisme d'adsorption du MBP sur l'acier C1020 dans le milieu acide étudié.

## IV.4 courbe de Tafel



**Figure IV.12.** Les courbes de polarisation dans HCl 1M en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur.

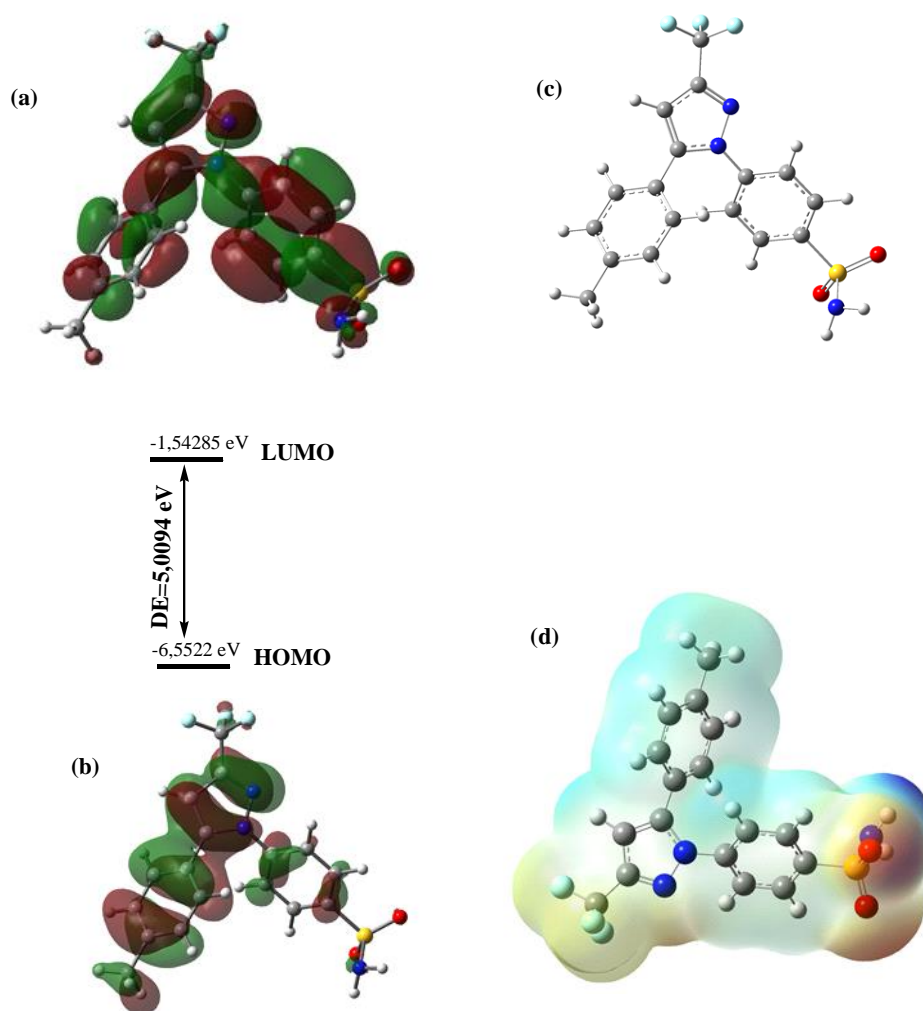
La Figure IV.12 présente les courbes de polarisation de l'acier au carbone dans une solution de HCl 1 M en absence et en présence de différentes concentrations de MBP. L'ajout de MBP entraîne une diminution de la densité de courant de corrosion, ce qui indique une réduction de la vitesse de corrosion. Cette diminution devient plus marquée avec l'augmentation de la concentration de MBP, traduisant une amélioration de son efficacité inhibitrice. Le faible déplacement du potentiel de corrosion suggère que MBP agit comme un inhibiteur de type mixte, en ralentissant simultanément les réactions anodiques et cathodiques.

## IV.5 Étude théorique des propriétés électroniques de la molécule MBP

La structure géométrique optimisée de la molécule de MBP au niveau B3LYP/6-31G(d,p) est illustrée dans la **Figure IV.13**. Les calculs de la chimie quantique occupent une place de plus en plus importante dans divers domaines de la physique et de la chimie. Ces calculs s'avèrent particulièrement précieux pour déterminer le comportement moléculaire, et éclaircir les résultats expérimentaux obtenus dans plusieurs réactions de corrosion. La théorie des orbitales frontières (FMO) est l'une des théories les plus connues pour comprendre les propriétés moléculaires et la réactivité des orbitales [2]. Elle consiste à analyser les orbitales

moléculaires frontières (FMO) de ces composés, à savoir l'orbitale moléculaire occupée la plus haute (HOMO) et l'orbitale moléculaire vacante la plus basse (LUMO). Par conséquent, Comme différence essentielle entre HOMO et LUMO, on peut dire que le HOMO peut donner des électrons alors que le LUMO peut en recevoir. De plus, la présence de HOMO est caractéristique des nucléophiles, tandis que la présence de LUMO est caractéristique des électrophiles.

Les **Figure IV.13** b et c présentent les représentations 3D des orbitales moléculaires frontières (HOMO, LUMO) de la molécule étudiée en phase gazeuse. Comme le montre la **Figure IV.13**, l'orbitale HOMO de la MBP est répartie sur le cycle benzénique liée trifluoro et l'hétérocycle Pyrazolinique tandis que le fragment -benzenesulfonamide est partiellement recouverte. D'autre part l'orbitale LUMO est répartie sur la quasi-totalité de la molécule.



**Figure IV.13.** (a) et (b) les orbitales moléculaires frontières (LUMO et HOMO), (c) de la La structure moléculaire de la MBP Optimisée par DFT/B3LYP/6-31G (d,p) en phase gaz et (d) Surface de potentiel électrostatique moléculaire (MESP).

L'énergie de GAP et les descripteurs de réactivité [ jouent un rôle crucial dans la détermination de la stabilité et de la réactivité de la molécule à l'état fondamental. Selon la classification de l'énergie de GAP, un composé avec une faible valeur de gap (inférieure à 3,1 eV) peut être qualifié de « mou », c'est-à-dire présentant une réactivité accrue [4]. Et contrairement, une bande interdite importante correspond à une réactivité réduite. D'après **Tableau IV.4**, en phase gazeuse ( $\Delta E = 5.0094\text{eV}$ ) cette valeur forte de GAP peut classée notre molécule parmi les molécules « dure ». De plus, la dureté chimique,  $\eta$ , représente la résistance d'un système moléculaire au transfert d'électrons avec son environnement. Elle peut également être exprimée par la variation du potentiel chimique du système en fonction du nombre d'électrons  $N$  à un potentiel externe  $v(r)$  fixe ( Voir le **Tableau IV.4**). D'après les valeurs de dureté et de potentiel chimique, nous pouvons confirmer que la molécule de malachite possède une certaine stabilité, qui pourrait être due à la présence de l'effet de résonance des cycles aromatiques. Dans notre étude actuelle, la molécule présentant une faible dureté (2,2047 eV), parquencequence, l'inhibiteur ayant la plus faible dureté globale (donc la plus grande souplesse globale) est censé avoir l'efficacité d'inhibition la plus élevée.

**Tableau IV.4.** Les Paramètres de chimie quantique calculés à la base de B3LYP/6-31G (d, p) de lamolécule de MBP en phase gazeuse en eV

HOMO	LUMO	$\Delta E$	A	I	$\chi$	$\eta$	$\omega$	$\mu$
-6,5522	-1,5428	5,0094	1,5428	6,5522	4,0475	2,5047	0,3993	7.2657

### Potentiel électrostatique de surface moléculaire

De nos jours, l'analyse du potentiel électrostatique de surface moléculaire (PESM) s'est imposée comme une technique visuelle de choix pour déterminer les sites de réactivité chimique (atomes). [5] Ce procédé repose sur le spectre riche de couleurs permettant de caractériser les variations de potentiel électrostatique en différents points des surfaces de densité électronique. Ainsi, la couleur bleue distingue les régions de potentiel électrostatique positif le plus élevé, la zone rouge correspond aux régions les plus négatives, tandis que la couleur verte désigne une zone de potentiel neutre [3]. La **Figure IV.12** représente le PESH du composé organique MBP. Le potentiel augmente dans l'ordre suivant : rouge < orange < jaune < vert < bleu. Les résultats indiquent que la région riche en électrons est principalement localisée sur les site actifs tel que : l'oxygene le soufre et le fluor. En revanche, les atomes d'azote (N) et d'hydrogène (H) présentent un signe positif (couleur bleue), ce qui favorise les attaques nucléophiles.

## IV.6 Conclusion

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que le MBP présente une activité inhibitrice vis-à-vis de la corrosion de l'acier dans une solution de HCl 1 M. Son efficacité est influencée par plusieurs paramètres, notamment la concentration de l'inhibiteur, le temps d'immersion et la température du milieu corrosif.

L'étude de l'effet de la concentration a révélé une amélioration de la protection de l'acier avec l'augmentation de la concentration du MBP, traduisant une meilleure couverture de la surface métallique par les molécules inhibitrices. L'étude du temps d'immersion a montré que l'efficacité inhibitrice diminue progressivement aux temps prolongés, ce qui peut être attribué à une dégradation partielle du film protecteur ou à la désorption des molécules adsorbées.

Par ailleurs, l'augmentation de la température favorise le processus de corrosion et entraîne une diminution de l'efficacité inhibitrice, indiquant une stabilité limitée du film protecteur à haute température.

L'étude des isothermes d'adsorption a montré que le modèle de Langmuir présente la meilleure corrélation avec les résultats expérimentaux, suggérant une adsorption principalement monomoléculaire des molécules de MBP sur la surface de l'acier.

Les courbes de Tafel confirment l'efficacité du MBP comme inhibiteur mixte de corrosion et L'étude DFT confirme la réactivité électronique du MBP via les orbitales HOMO/LUMO.

Globalement, les résultats obtenus confirment que le MBP agit comme un inhibiteur de corrosion efficace grâce à son adsorption sur la surface métallique et à la formation d'un film protecteur limitant l'attaque du milieu corrosif.

**Références :**

- [1] BENATMANE RADHIA, E. A. I. (2020). Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier en milieu acide par les méthodes électrochimiques (Doctoral dissertation, Faculté des Sciences et Technologies).
1. N. Ahmia a, M. Benamira a,\* , L. Messaadia b, M. Colmont c, H. Boulahbel a,d, H. Lahmar e, A. Souici f, M. Trari Photocatalytic activity of ZnMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> heterostructure under solar light irradiation: Experimental and theoretical study
  2. R. G. Parr, L. von Szentpaly and S. Liu, J. Am. Chem. Soc. **121**, 1922(1999).
  3. C.V. Paz, S.R. Vázquez, N. Flores, L. Garcia, J.L. Rico, Reactive sites influence in PMMA oligomers reactivity: a DFT study, Mater. Res. Express 5 (1) (2018) 015314, <https://doi.org/10.1088/2053-1591/AAA679>. Jan.
  4. J.S. Murray, P. Politzer, The electrostatic potential: an overview, Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Mol. Sci. 1 (2) (2011) 153–163, <https://doi.org/10.1002/WCMS.19>. Mar.
  5. P. Sjoberg, P. Politzer, Use of the electrostatic potential at the molecular surface to interpret and predict nucleophilic processes, J. Phys. Chem. 94 (10) (1990) 3959–3961, [https://doi.org/10.1021/J100373A017/ASSET/J100373A017.FP.PNG\\_V03](https://doi.org/10.1021/J100373A017/ASSET/J100373A017.FP.PNG_V03)

# *Conclusion général*



## Conclusion générale

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet inhibiteur de la molécule MBP sur la corrosion de l'acier C1020 dans un milieu acide HCl en utilisant différentes méthodes expérimentales et théoriques. Les résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes

- La molécule MBP présente une activité inhibitrice satisfaisante vis-à-vis de la corrosion de l'acier C1020 dans le milieu acide étudié.
- Les résultats de perte de masse montrent que la corrosion de l'acier diminue avec l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur.
- L'efficacité inhibitrice augmente progressivement avec l'augmentation de la concentration du MBP.
- La diminution de la perte de masse en présence de l'inhibiteur est attribuée à la formation d'un film protecteur adsorbé sur la surface métallique.
- L'étude des isothermes d'adsorption montre que l'adsorption des molécules inhibitrices sur la surface de l'acier suit principalement l'isotherme de Langmuir.
- L'augmentation de la température entraîne une augmentation de la vitesse de corrosion et une diminution de l'efficacité inhibitrice.
- Les courbes de Tafel confirment l'efficacité du MBP comme inhibiteur mixte de corrosion.
- L'étude théorique DFT confirme la réactivité électronique du MBP à travers les orbitales frontières HOMO et LUMO, expliquant sa capacité d'adsorption sur la surface métallique.
- Les résultats obtenus par différentes méthodes expérimentales et théoriques sont en bon accord et confirment que la molécule MBP est un inhibiteur de corrosion efficace pour l'acier C1020 dans le milieu acide HCl.