



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ DE 20 AOÛT 1955 - SKIKDA  
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE DES PROCÉDÉS

# Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de :

## Master

**Filière :** Génie des Procédés

**Spécialité :** Génie Chimique

### Evaluation Gravimétrique De La Résistance à La Corrosion Des Revêtement Métalliques à Base De Nickel et Cobalt

Réalisé par : - Bekkouche Ihssene  
- Ghedjadjet Yasmine  
- Drif Dhikra

Soutenu le 21/06/2026, devant le jury suivant :

| N° | Nom et Prénom   | Grade      | Établissement d'affiliation         | Qualité   |
|----|-----------------|------------|-------------------------------------|-----------|
| 1  | Rahal Hassiba   | MCA        | Université de 20 Août 1955 - Skikda | Encadrant |
| 2  | Krid ferial     | Docteur    | Université de 20 Août 1955 – Skikda | Président |
| 3  | El Hadi bossaha | Professeur | Université de 20 Août 1955 – Skikda | Examineur |
| 4  | Guendouz Samira | MCB        | Université de 20 Août 1955 – Skikda | Examineur |

**Année universitaire 2025-2026**

# REMERCIEMENTS

En premier lieu, nous remercions DIEU, Tout\_ puissant, de nous avoir accordé la patience, le courage et la volonté nécessaires durant ces longues années d'étude, afin de mener à bien l'accomplissement de ce mémoire.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur Dr. Rahal, pour ses précieux conseils et son soutien constant qui nous ont guidés tout au long de cette recherche.

Nous adressons également nos sincères remerciements au Pr. Boussaha, pour ses orientations avisées et pour avoir mis à notre disposition les moyens indispensables à la réalisation ce travail. Leur accompagnement respectif a été déterminant dans l'aboutissement de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres du jury pour leur lecture attentive et pour les remarques constructives qu'ils nous formuleront lors de la soutenance, dans le but d'améliorer la qualité de notre travail.

Nous tenons à remercier l'ensemble enseignant de la faculté de technologie, département de génie des procédés, et plus particulièrement ceux de la spécialité de génie chimique de l'université de 20 Aout 1955 de Skikda, pour la qualité de leur enseignement et leur disponibilité.

Enfin, nous exprimons notre gratitude à toutes les personnes qui nous ont aidés dans l'élaboration et la réalisation de ce mémoire, notamment les ingénieurs du laboratoire de notre université ainsi que ceux du RA1K de Skikda, pour leur appui technique, leurs conseils et leur soutien.

Nous remercions également toutes les personnes qui nous ont aidés, de près ou de loin, dans l'accomplissement de ce mémoire.



# وَمَا يَفْقَهُ الْإِنْسَانُ بِإِلَهِ

JE DÉDIE CE TRAVAIL :

À MA CHÈRE MÈRE ET À MON CHER PÈRE,  
POUR LEUR AMOUR INCONDITIONNEL, LEURS ENCOURAGEMENTS  
CONSTANTS, LEURS SACRIFICES ET LEUR SOUTIEN TOUT AU LONG DE MON  
PARCOURS ACADÉMIQUE.

À MES FRÈRES, SOFIANE ET ILYÈS,

À MA SŒUR, IKRAM,

POUR LEUR AFFECTION, LEUR PRÉSENCE RÉCONFORTANTE ET LES  
MOMENTS PRÉCIEUX PARTAGÉS ENSEMBLE.

À MES CHÈRES AMIES : NESRINE, ABDENNOUR, AYA, YASMINE, DHIKRA.

À TOUTE MA FAMILLE,

POUR LEUR CONFIANCE, LEUR ENCOURAGEMENT ET L'AMOUR QU'ILS M'ONT  
TOUJOURS TÉMOIGNÉ.

À TOUTES LES PERSONNES QUI ONT CONTRIBUÉ, DE PRÈS OU DE LOIN, À LA  
RÉALISATION DE CE TRAVAIL.

AVEC TOUTE MA RECONNAISSANCE ET MON AFFECTION.

BEKKOUCHE IHSSENE

2026

2002



2026



# وَمَا يَوْفَيْتِي إِلَّا بِاللَّهِ

JE REMERCIE DIEU DE M'AVOIR DONNÉ LE COURAGE, LA  
FORCE ET LA VOLONTÉ NÉCESSAIRES POUR RÉALISER CE  
TRAVAIL.

JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL :

À MES TRÈS CHERS PARENTS, SOURCE DE VIE, D'AMOUR  
ET D'AFFECTION.

À MA SŒUR NESRINE ET À MES DEUX FRÈRES YAZID  
ET YOUNESSE POUR LEURS ENCOURAGEMENTS.

À MES AMIS DHIKRA, IHSSENE, NACIRA, AINSI QU'À MA  
FAMILLE ET À MES ENSEIGNANTS, POUR LEUR SAVOIR ET  
LEURS PRÉCIEUX CONSEILS.

ENFIN, À TOUS CEUX QUI ONT CONTRIBUÉ, DE PRÈS OU  
DE LOIN, À L'ACHÈVEMENT DE CE TRAVAIL.

GHEDJADJET YASMINE



2026



2003





# وَمَا يَفْقَهُ الْإِلَهِ بِالدِّرِّ

JE DÉDIE CE TRAVAIL :

EN PREMIER LIEU LE DIEU POUR LE COURAGE, LA PATIENCE ET LA  
SANTÉ QUI M'A DONNÉ POUR RÉALISER CE TRAVAIL.

À MA MÈRE, JE TE REMERCIE POUR TOUS LES SACRIFICES QUE TU AS  
FAITS POUR MOI ET POUR LE SOUTIEN QUE TU M'AS APPORTÉ DANS LES  
MOMENTS LES PLUS DIFFICILES DE MA VIE.

À MON PÈRE, HOUCINE MERCI POUR TOUS TES CONSEILS QUI M'ONT  
AIDÉ DANS MA VIE ET POUR TOUS TES SACRIFICES POUR MOI ET DE M'AVOIR  
DONNÉ LE SOUTIEN

CHERS COLLÈGUES, YASMINE ET IHSEN JE TIENS À VOUS ADRESSER  
MES SINCÈRES REMERCIEMENTS POUR VOTRE SOUTIEN ET VOTRE AIDE

JE REMERCIE :

À MES CHÈRES SŒURS : ASMA, FERDOUSE, ISRAA, BASMALA

À MON FRÈRE : OUSSAMA

À MES NEVEUX : TASNIME, LOKMAN, BARAA, MOHAMED

À MON AMIE : IKRAM

DRIF DHIKRA



2003



2026

## **Résumé**

La corrosion des structures métalliques constitue un défi industriel majeurs, à l'origine de lourdes pertes économiques et d'impacts environnementaux critiques. Malgré la diversité des techniques de prévention existantes, l'analyse du comportement des matériaux reste indispensable pour optimiser leur durabilité. Cette étude évalue la résistance à la corrosion de revêtements métalliques à base de nickel et de cobalt (Ni-Co) par la méthode gravimétrique. Des essais d'immersion ont été réalisés dans des milieux acides et salins, sous différentes conditions expérimentales, afin de déterminer les vitesses de corrosion et de mesurer l'efficacité de ces dépôts. Les résultats obtenus ont montré une excellente résistance à la corrosion, confirmant leur efficacité pour prolonger la durée de vie des équipements industriels même dans des environnements sévères caractérisés par des concentrations et des températures élevées.

**Mots-clés :** Corrosion, Méthode gravimétrie, revêtement Ni-Co, vitesse de corrosion, milieu acide, milieu salin.

## ملخص

يشكل التآكل أحد أكبر التحديات في الصناعة الحديثة نظرًا لتداعياته الاقتصادية والبيئية الجسيمة، حيث يتسبب في التدهور التدريجي للمنشآت المعدنية. ورغم تنوع تقنيات الحماية المتاحة، فإن تقييم السلوك التآكلي للمواد يظل خطوة أساسية لرفع كفاءتها. تركز هذه الدراسة على قياس مقاومة التآكل لطلاءات معدنية قائمة على النيكل والكوبالت (Ni-Co) باستخدام طريقة القياس الوزني. وقد أجريت الاختبارات في أوساط حمضية وملحية تحت ظروف تجريبية متنوعة لتحديد معدلات التآكل وتقييم كفاءة الحماية لهذه الطلاءات. أظهرت النتائج المحققة مقاومة ممتازة للتآكل، مما يثبت فعالية هذه الطلاءات في حماية المعدات الصناعية وتمديد عمرها الافتراضي، حتى في البيئات القاسية ذات التراكيز العالية ودرجات الحرارة المرتفعة.

الكلمات المفتاحية: التآكل، (Ni-Co)، القياس الوزني، الأوساط الحمضية، الأوساط الملحية.

## **Abstract**

Corrosion represents one of the major challenges in modern industry due to its significant economic and environmental consequences, as it causes the gradual deterioration of metallic structures. Despite the variety of available protection techniques, assessing the corrosive behavior of materials remains a crucial step to enhance their efficiency. This study focuses on measuring the corrosion resistance of nickel–cobalt (Ni-Co) based metallic coatings using the gravimetric method. The tests were conducted in acidic and saline environments under different experimental conditions to determine corrosion rates and evaluate the protective efficiency of these coatings. The results obtained demonstrated excellent corrosion resistance, confirming the effectiveness of these coatings in protecting industrial equipment and extending its service life, even in harsh environments with high concentrations and elevated temperatures.

**Keywords:** Corrosion, gravimetric method, (Ni-Co), corrosion rate, acidic media, saline media.

## Sommaire

### Remerciements Dédicaces

- Résumés
- Liste des figures
- Liste des tableaux
- Liste des abréviations

## Table des matières

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| Introduction générale                                         |    |
| <b>Chapitre I : Généralités sur le phénomène de corrosion</b> |    |
| I.1 Introduction                                              | 02 |
| I.2 Définition de la corrosion                                | 02 |
| I.3 Causes de la corrosion                                    | 02 |
| I.4 Réaction de corrosion                                     | 03 |
| I.5 Types de corrosion                                        | 03 |
| I.5.1 Corrosion chimique (sèche)                              | 03 |
| I.5.2 Corrosion biochimique (bactérienne)                     | 04 |
| I.5.3 Corrosion électrochimique (humide)                      | 04 |
| I.6 Aspect morphologique de la corrosion                      | 05 |
| I.6.1 Corrosion uniforme ou généralisée                       | 05 |
| I.6.2 Corrosion localisée                                     | 06 |
| I.6.2.1 Corrosion macroscopique                               | 06 |
| I.6.2.1.1 Corrosion galvanique (corrosion bimétallique)       | 06 |
| I.6.2.1.2 Corrosion par piqûres                               | 06 |
| I.6.2.1.3 Corrosion par érosion                               | 07 |
| I.6.2.1.4 Corrosion caverneuse                                | 07 |
| I.6.2.1.5 Corrosion par frottement (tribocorrosion)           | 08 |
| I.6.2.1.6 Corrosion par cavitation                            | 08 |
| I.6.2.2 Corrosion microscopique                               | 09 |
| I.6.2.2.1 Corrosion sélective                                 | 09 |

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I.6.2.2.2 Corrosion sous contrainte (CSC)                                             | 10 |
| I.6.2.2.3 Corrosion intergranulaire (intercristalline)                                | 10 |
| I.6.2.2.4 Corrosion par fatigue                                                       | 11 |
| I.6.2.2.5 Fragilisation par l'hydrogène                                               | 11 |
| I.7 Impact de la corrosion sur la production                                          | 12 |
| I.8 Conclusion                                                                        | 13 |
| <b>Chapitre II : Méthodes et stratégies de lutte contre la Corrosion</b>              |    |
| II.1 Introduction                                                                     | 15 |
| II.2. Principes généraux de la prévention et de la lutte contre la corrosion          | 15 |
| II.3. Stratégies générales de protection contre la corrosion                          | 16 |
| II.3.1. Protection naturelle des matériaux                                            | 16 |
| II.3.2. Contrôle et modification du milieu corrosif                                   | 17 |
| II.4. Protection physique des matériaux contre la corrosion                           | 17 |
| II.4.1. Prévention par la conception et l'optimisation de la géométrie des structures | 17 |
| II.4.2. Prévention par le choix approprié des matériaux                               | 17 |
| II.4.3. Protection par revêtements protecteurs                                        | 18 |
| II.4.3.1. Revêtements métalliques                                                     | 18 |
| II.4.3.2. Revêtements inorganiques                                                    | 19 |
| II.4.3.3. Revêtements organiques                                                      | 20 |
| II.5. Protection électrochimique contre la corrosion                                  | 23 |
| II.5.1. Principe de la protection électrochimique                                     | 23 |
| II.5.2. Protection cathodique                                                         | 24 |
| II.5.3. Protection anodique                                                           | 26 |
| II.6. Protection contre la corrosion par les inhibiteurs                              | 27 |
| II.6.1. Évolution historique et développement des inhibiteurs de corrosion            | 27 |
| II.6.2. Définition et concepts fondamentaux des inhibiteurs de corrosion              | 27 |
| II.6.3. Propriétés et caractéristiques des inhibiteurs de corrosion                   | 29 |
| II.6.4. Domaines d'application des inhibiteurs de corrosion                           | 29 |
| II.6.5. Critères de sélection d'un inhibiteur de corrosion                            | 30 |

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.6.6. Classification des inhibiteurs de corrosion                                   | 30 |
| II.6.6.1. Classification selon la nature chimique des molécules inhibitrices          | 30 |
| II.6.6.2. Classification selon le mécanisme d'action électrochimique                  | 31 |
| II.6.6.3. Classification selon le mécanisme d'adsorption à l'interface métal/solution | 33 |
| II.6.7. Inhibiteurs de corrosions spécifiques aux métaux ferreux                      | 34 |
| II.7 Conclusion                                                                       | 34 |
| <b>Chapitre III : Partie expérimentale</b>                                            |    |
| III.1. Introduction                                                                   | 36 |
| III.2. Objectif de l'étude                                                            | 36 |
| III.3. Méthode de corrosion                                                           | 36 |
| III.3.1. Méthode gravimétrique                                                        | 36 |
| III.4. Matériel utilisé dans l'étude                                                  | 37 |
| III.4.1. Préparation des échantillons                                                 | 38 |
| III.4.2 Milieux choisis                                                               | 40 |
| III.4.3 Dispositifs utilisés                                                          | 41 |
| III.4.4 Préparation des solutions                                                     | 42 |
| III.5 Procédé expérimental                                                            | 43 |
| III.5.1 Sans Revêtement                                                               | 44 |
| III.5.2 Avec revêtement                                                               | 52 |
| III.6 Conclusion                                                                      | 66 |
| Conclusion générale                                                                   | 67 |
| Références bibliographiques                                                           | 69 |

# Liste des figures

| <b>Chapitre I : Généralités sur le phénomène de corrosion</b>            |                                                                                                                   |    |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure I.1</b>                                                        | La réaction de corrosion de fer                                                                                   | 03 |
| <b>Figure I.2</b>                                                        | Corrosion chimique                                                                                                | 04 |
| <b>Figure I.3</b>                                                        | Schéma du mécanisme de la biocorrosion d'un fer                                                                   | 04 |
| <b>Figure I.4</b>                                                        | Schéma du mécanisme de la corrosion électrochimique                                                               | 05 |
| <b>Figure I.5</b>                                                        | Corrosion uniforme                                                                                                | 05 |
| <b>Figure I.6</b>                                                        | Corrosion galvanique (corrosion bimétallique)                                                                     | 06 |
| <b>Figure I.7</b>                                                        | Corrosion par érosion                                                                                             | 07 |
| <b>Figure I.8</b>                                                        | Corrosion caverneuse                                                                                              | 08 |
| <b>Figure I.9</b>                                                        | Corrosion par frottement                                                                                          | 08 |
| <b>Figure I.10</b>                                                       | Corrosion par cavitation                                                                                          | 09 |
| <b>Figure I.11</b>                                                       | Corrosion sélective                                                                                               | 09 |
| <b>Figure I.12</b>                                                       | Corrosion sous contrainte                                                                                         | 10 |
| <b>Figure I.13</b>                                                       | Corrosion intergranulaire                                                                                         | 11 |
| <b>Figure I.14</b>                                                       | Corrosion par fatigue                                                                                             | 11 |
| <b>Figure I.15</b>                                                       | Mécanismes de la fragilisation par l'hydrogène                                                                    | 12 |
| <b>Chapitre II : Méthodes et stratégies de lutte contre la Corrosion</b> |                                                                                                                   |    |
| <b>Figure II.1</b>                                                       | La couche protectrice de cuivre (patine verte)                                                                    | 16 |
| <b>Figure II.2</b>                                                       | Revêtements sacrificiels (anodique)                                                                               | 19 |
| <b>Figure II.3</b>                                                       | Revêtements cathodique                                                                                            | 19 |
| <b>Figure II.4</b>                                                       | Revêtements inorganique                                                                                           | 20 |
| <b>Figure II.5</b>                                                       | Application des revêtements en bitume                                                                             | 21 |
| <b>Figure II.6</b>                                                       | Les revêtements polymériques                                                                                      | 22 |
| <b>Figure II.7</b>                                                       | Les couches de peinture                                                                                           | 23 |
| <b>Figure II.8</b>                                                       | Protection cathodique                                                                                             | 25 |
| <b>Figure II.9</b>                                                       | Système de protection par anode galvanique                                                                        | 26 |
| <b>Figure II.10</b>                                                      | Mécanisme des inhibiteurs organiques                                                                              | 31 |
| <b>Figure II.11</b>                                                      | Représentation schématique des modes d'adsorption de molécules organiques inhibitrices sur une surface métallique | 33 |
| <b>Chapitre III : Partie expérimentale</b>                               |                                                                                                                   |    |
| <b>Figure III.1</b>                                                      | Dispositif expérimental de la technique de la masse perdue.                                                       | 37 |
| <b>Figure III.2</b>                                                      | Forme d'échantillon utilisé dans l'étude.                                                                         | 38 |

|                      |                                                                                                                                           |    |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure III.3</b>  | Découpage d'échantillon acier ou carbone                                                                                                  | 38 |
| <b>Figure III.4</b>  | Appareil de polissage.                                                                                                                    | 39 |
| <b>Figure III.5</b>  | Masse pesée par une balance électronique.                                                                                                 | 39 |
| <b>Figure III.6</b>  | Revêtement à base de Cobalt                                                                                                               | 40 |
| <b>Figure III.7</b>  | Revêtement à base de Nickel.                                                                                                              | 40 |
| <b>Figure III.8</b>  | Préparation de la solution $H_2SO_4$                                                                                                      | 42 |
| <b>Figure III.9</b>  | Préparation de la solution NaCl                                                                                                           | 43 |
| <b>Figure III.10</b> | Masse pesée par une balance électronique                                                                                                  | 43 |
| <b>Figure III.11</b> | Immersion des échantillons no revêtus dans la solution de NaCl après                                                                      | 44 |
| <b>Figure III.12</b> | Immersion des échantillons no revêtus dans la solution de $H_2SO_4$ après 24 Heure                                                        | 44 |
| <b>Figure III.13</b> | Echantillons avant et après l'étude.                                                                                                      | 45 |
| <b>Figure III.14</b> | Evaluation de la vitesse de corrosion en fonction de la concentration des solutions $H_2SO_4$ et NaCl                                     | 47 |
| <b>Figure III.15</b> | Immersion des échantillons no revêtus dans la solution de NaCl et $H_2SO_4$ a déférent température et temps.                              | 48 |
| <b>Figure III.16</b> | Evaluation de la vitesse de corrosion en fonction du Temps des solutions $H_2SO_4$ et NaCl à $T= 30^{\circ}C$                             | 49 |
| <b>Figure III.17</b> | Evaluation de la vitesse de corrosion en fonction du Temps des solutions $H_2SO_4$ et NaCl à $T= 60^{\circ}C$                             | 50 |
| <b>Figure III.18</b> | Evaluation de la vitesse de corrosion en fonction du Temps des solutions $H_2SO_4$ et NaCl à $T= 80^{\circ}C$ .                           | 51 |
| <b>Figure III.19</b> | Echantillons non revêtu après l'attaque chimique.                                                                                         | 51 |
| <b>Figure III.20</b> | Immersion des échantillons revêtus dans la solution de NaCl et $H_2SO_4$ a différentes concentrations et temps.                           | 52 |
| <b>Figure III.21</b> | Echantillons revêtus après l'immersion.                                                                                                   | 53 |
| <b>Figure III.22</b> | Evaluation de la vitesse de corrosion d'acier au carbone avec revêtement en fonction de temps dans le milieu acide.                       | 55 |
| <b>Figure III.23</b> | Evaluation de la vitesse de corrosion d'acier au carbone avec revêtement en fonction de temps dans le milieu salin.                       | 57 |
| <b>Figure III.24</b> | Immersion des échantillons revêtus dans la solution de NaCl et $H_2SO_4$ a déférent température.                                          | 58 |
| <b>Figure III.25</b> | Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Nickel en fonction du Temps des solutions $H_2SO_4$ et NaCl à $T= 30^{\circ}C$   | 59 |
| <b>Figure III.26</b> | Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Cobalt en fonction du Temps des solutions $H_2SO_4$ et NaCl à $T= 30^{\circ}C$   | 60 |
| <b>Figure III.27</b> | Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Nickel en fonction du Temps des solutions $H_2SO_4$ et NaCl à $T= 60^{\circ}C$ . | 61 |
| <b>Figure III.28</b> | Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Cobalt en fonction du Temps des solutions $H_2SO_4$ et NaCl à $T= 60^{\circ}C$ . | 62 |
| <b>Figure III.29</b> | Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Nickel en fonction du Temps des solutions $H_2SO_4$ et NaCl à $T= 80^{\circ}C$ . | 63 |

|                      |                                                                                                                                                      |    |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure III.30</b> | Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Cobalt en fonction du Temps des solutions H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> et NaCL à T= 80°C. | 64 |
| <b>Figure III.31</b> | Echantillons revêtu au nickel après l'attaque chimique.                                                                                              | 64 |
| <b>Figure III.32</b> | Echantillons revêtu au Cobalt après l'attaque chimique.                                                                                              | 64 |

# Liste des tableaux

|                       |                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau I.1</b>    | Impact de la corrosion                                                                                                                              | 12 |
| <b>Tableau II.2</b>   | Les critères de potentiel des matériaux                                                                                                             | 24 |
| <b>Tableau III.1</b>  | Propriétés Physiquo-chimiques de Nickel et Cobalt                                                                                                   | 40 |
| <b>Tableau III.2</b>  | Propriétés physico-chimiques de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> et NaCl                                                                              | 41 |
| <b>Tableau III.3</b>  | Préparation solution H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                                                                                                 | 42 |
| <b>Tableau III.4</b>  | Préparation solution NaCl                                                                                                                           | 42 |
| <b>Tableau III.5</b>  | Evaluation de la vitesse de corrosion en fonction de la concentration des solutions H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> et NaCl                          | 47 |
| <b>Tableau III.6</b>  | Evaluation de la vitesse de corrosion en fonction du Temps des solutions H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> et NaCl à T= 30°C                           | 49 |
| <b>Tableau III.7</b>  | Evaluation de la vitesse de corrosion en fonction du Temps des solutions H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> et NaCl à T= 60°C                           | 50 |
| <b>Tableau III.8</b>  | Evaluation de la vitesse de corrosion en fonction du Temps des solutions H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> et NaCl à T= 80°C                           | 51 |
| <b>Tableau III.9</b>  | Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement de Nickel en fonction du Temps des solutions H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .                   | 53 |
| <b>Tableau III.10</b> | Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement de Cobalt en fonction du Temps des solutions H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .                   | 54 |
| <b>Tableau III.11</b> | Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement de Nickel en fonction du Temps des solutions NaCl.                                              | 55 |
| <b>Tableau III.12</b> | Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement de Cobalt en fonction du Temps des solutions NaCl.                                              | 56 |
| <b>Tableau III.13</b> | Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Nickel en fonction du Temps des solutions H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> et NaCl à T= 30°C | 58 |
| <b>Tableau III.14</b> | Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Cobalt en fonction du Temps des solutions H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> et NaCl à T= 30°C | 59 |
| <b>Tableau III.15</b> | Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Nickel en fonction du Temps des solutions H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> et NaCl à T= 60°C | 60 |
| <b>Tableau III.16</b> | Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Cobalt en fonction du Temps des solutions H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> et NaCl à T= 60°C | 61 |
| <b>Tableau III.17</b> | Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Nickel en fonction du Temps des solutions H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> et NaCl à T= 80°C | 62 |
| <b>Tableau III.18</b> | Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Cobalt en fonction du Temps des solutions H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> et NaCl à T= 80°C | 63 |

# Liste des abréviations

| Symboles                           | Définition                                           |
|------------------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>Ca</b>                          | Calcium                                              |
| <b>CaCO<sub>3</sub></b>            | Carbonate de Calcium                                 |
| <b>Cl</b>                          | Chlore                                               |
| <b>Cr</b>                          | Crome                                                |
| <b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | trioxyde de Crome                                    |
| <b>CSC</b>                         | Corrosion sous contrainte                            |
| <b>ECS</b>                         | Électrode au Calomels Saturée                        |
| <b>E<sub>corr</sub></b>            | le potentiel de corrosion                            |
| <b>H</b>                           | Efficacité d'inhibition                              |
| <b>F</b>                           | la constante de Faraday                              |
| <b>Fe</b>                          | le fer                                               |
| <b>H<sub>2</sub></b>               | l'hydrogène                                          |
| <b>H<sub>2</sub>S</b>              | hydrogène sulfuré                                    |
| <b>H<sub>3</sub>O<sup>+</sup></b>  | hydronium                                            |
| <b>I</b>                           | le courant                                           |
| <b>i<sub>corr</sub></b>            | le courant de corrosion                              |
| <b>i<sub>a</sub></b>               | la densité de courant anodique                       |
| <b>i<sub>c</sub></b>               | la densité de courant cathodique                     |
| <b>i<sub>pass</sub></b>            | la densité de courant passive en A/cm <sup>2</sup> . |

# *Introduction générale*

### Introduction générale

La corrosion des matériaux métalliques représente l'un des problèmes majeurs dans le domaine industriel. Elle engendre non seulement des pertes économiques considérables, mais provoque également des impacts négatifs sur l'environnement et la sécurité des installations. Les altérations dues à la corrosion, telles que la diminution d'épaisseur, la formation de fissures ou de piqûres, compromettent la fiabilité des équipements et peuvent entraîner des risques graves pour la collectivité.

Face à cette problématique, les méthodes classiques de protection, telles que la galvanisation, la peinture ou la projection thermique, ont montré leurs limites en termes de durabilité et d'efficacité dans des environnements agressifs. C'est pourquoi l'ingénierie des surfaces s'oriente aujourd'hui vers des solutions plus innovantes et performantes.

Parmi ces techniques modernes, l'utilisation de **revêtement métallique** Cette méthode consiste à appliquer une couche métallique de protection sur le substrat. Dans le cadre de ce travail, une couche composée de **nickel et de cobalt** a été déposée, en raison de leur résistance remarquable à la corrosion dans des milieux acides et salins, et ce, à différentes concentrations et même à des températures élevées. Les résultats expérimentaux obtenus démontrent l'efficacité de ces revêtements et confirment leur potentiel pour une utilisation industrielle.

Ce mémoire est composé d'une introduction, de trois chapitres principaux, et d'une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur le phénomène de corrosion, en mettant en évidence ses mécanismes, ses formes et ses impacts sur les matériaux.

Dans le deuxième chapitre, nous proposons, les stratégies et les méthodes de lutte contre la corrosion, où nous exposons les approches classiques et modernes de protection.

## Introduction générale

---

Dans le troisième chapitre nous représentons les techniques expérimentales utilisées notamment la méthode gravimétrique, ainsi que le matériau étudié et les milieux d'essais retenus. Nous y présentons également les **résultats obtenus** et leur **interprétation**.

Enfin, nous présentons une conclusion générale résume l'ensemble des résultats obtenus et des références bibliographiques utilisés.

Ce projet ouvre ainsi des perspectives de développement futur, puisqu'il permet de réduire les coûts de maintenance et d'augmenter la durée de vie des équipements métalliques, tout en garantissant une meilleure durabilité des installations exposées à des environnements sévères.

## ***Chapitre I***

# ***Généralités sur le phénomène de corrosion***

## I.1 Introduction

Dans les installations industrielles et les infrastructures contemporaines, la pérennité des matériaux métalliques représente un défi crucial. La corrosion, phénomène complexe résultant de l'interaction entre le matériau et son environnement, est l'une des principales causes de dégradation.

Ce chapitre introductif vise à fournir une perspective d'ensemble sur la corrosion, en abordant son contexte général, les réactions impliquées et les différentes formes qu'elle peut revêtir.

## I.2 Définition de la corrosion

Le terme « corrosion » provient du latin *corrodere*, signifiant « ronger » ou « attaquer » [1].

La corrosion est un phénomène physico-chimique par lequel les matériaux métalliques subissent une dégradation progressive lorsqu'ils sont exposés à des environnements agressifs (atmosphère, milieux liquides, gaz, sels). Elle traduit la tendance naturelle des métaux à revenir vers leur état le plus stable, généralement sous forme d'oxydes, hydroxydes ou sulfures.

Ce processus altère leurs propriétés mécaniques, électriques, optiques et esthétiques, constituant un enjeu majeur en ingénierie et en protection des matériaux.

## I.3 Causes de la corrosion

Les principales causes sont :

- Nature chimique du métal.
- Composition et microstructure de l'alliage.
- Contraintes mécaniques internes ou appliqués.
- Caractéristiques du milieu corrosif (pH, température, ions chlorure, oxygène dissous).
- Conditions hydrodynamiques (vitesse d'écoulement, turbulence).
- Présence d'électrolytes (eau, sels, acides).

- Différences de potentiel électrochimique entre phases ou matériaux.
- Activité microbiologique.

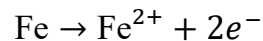
#### I.4 Réaction de corrosion

La corrosion est due à une réaction d'oxydoréduction entre le métal (oxydation) et l'environnement (réduction) :

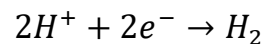


Elle se décompose en deux réactions partielles [2]:

- Réaction anodique :



- Réaction cathodique :



- Réaction globale :

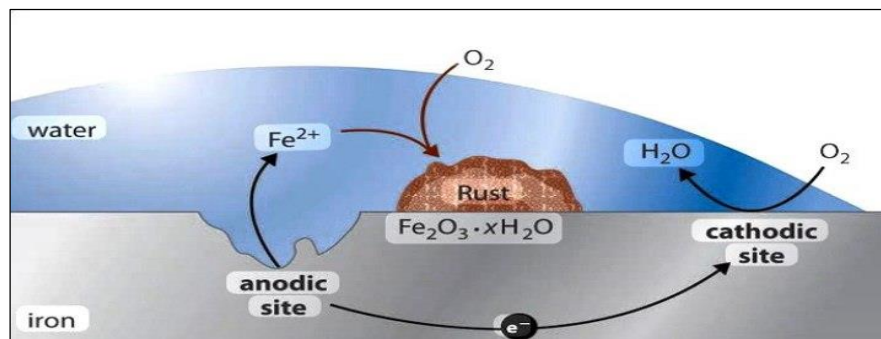
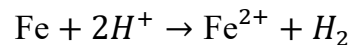


Figure I.1: La réaction de corrosion de fer [3]

#### I.5 Types de corrosion

La corrosion peut être classée selon la nature du milieu et les conditions de réaction :

##### I.5.1 Corrosion chimique (sèche)

- Attaque directe du métal par des gaz ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ) ou à haute température [4].
- Réaction générale :  $A_{(s)} + B_{(g)} \rightarrow AB$
- Formation d'une couche d'oxyde ou sulfure pouvant être protectrice ou poreuse.



Figure I.2: Corrosion chimique [5]

### I.5.2 Corrosion biochimique (bactérienne)

- Due à l'activité de micro-organismes (ex. bactéries sulfato-réductrices).
- Produit localement des composés comme  $H_2S$  favorisant la corrosion.

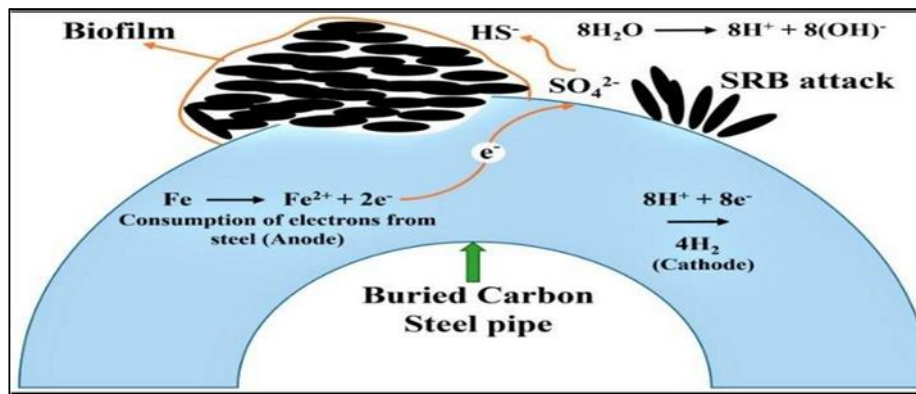
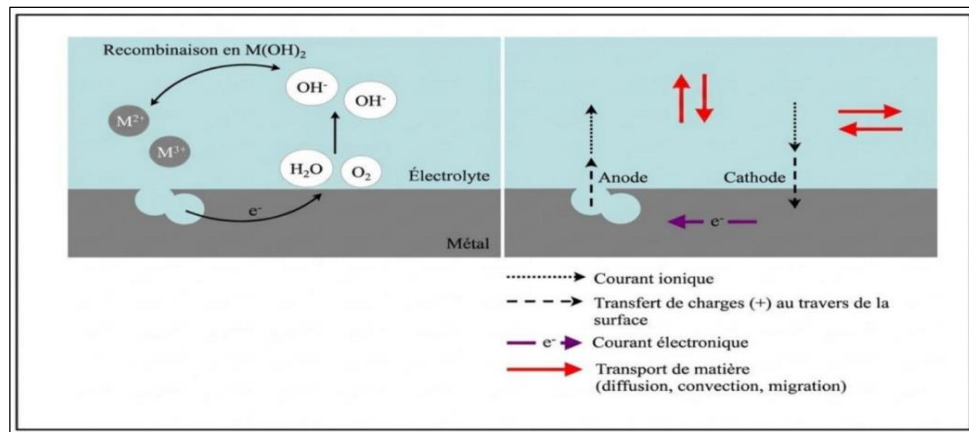


Figure I.3: Schéma du mécanisme de la biocorrosion d'un fer [6].

### I.5.3 Corrosion électrochimique (humide)

- Se manifeste lorsqu'il existe des hétérogénéités dans le métal ou le milieu.
- Affecte particulièrement les alliages métalliques exposés à un électrolyte [7].



**Figure I.4:** Schéma du mécanisme de la corrosion électrochimique [8]

## I.6 Aspect morphologique de la corrosion

### I.6.1 Corrosion uniforme ou généralisée

- Affecte l'ensemble de la surface exposée.
- Vitesse mesurable en mm/an ou  $mg/dm^2/jour$ .
- Facteurs influents : vitesse d'écoulement, pH, température.
- Apparence : perte de masse uniforme, surface rugueuse ou terne [9].



**Figure I.5:** corrosion uniforme [10]

### I.6.2 Corrosion localisée

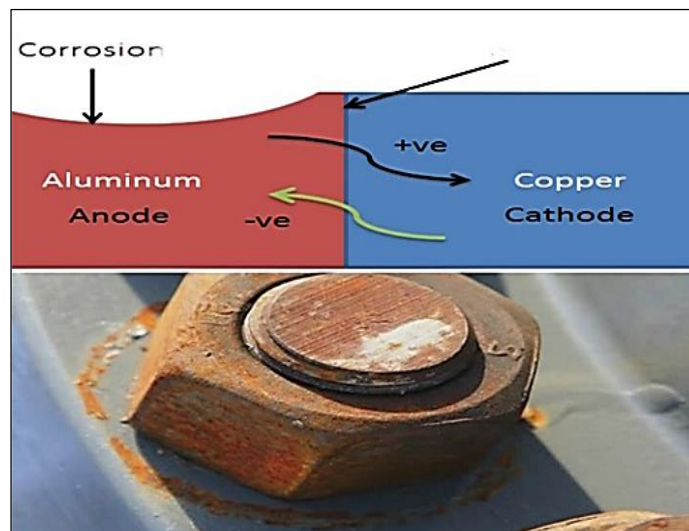
- Attaque limitée à certaines zones en raison de la sélectivité du matériau ou de l'environnement.
- Huit sous-types identifiés

#### I.6.2.1 Corrosion macroscopique

Elle concerne des formes de corrosion visibles à l'échelle macroscopique, souvent liées à des conditions géométriques, mécaniques ou électrochimiques particulières.

##### I.6.2.1.1 Corrosion galvanique (corrosion bimétallique)

C'est l'une des formes les plus courantes de corrosion en milieu aqueux. Elle est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux matériaux dans lesquelles une des électrodes l'anode se consomme ou bénéficie à l'autre cathode qui reste intact.



**Figure I.6:** Corrosion galvanique (corrosion bimétallique) [11]

##### I.6.2.1.2 Corrosion par piqûres

C'est la forme la plus destructive, elle est produite par certains anions, notamment le chlorure, sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince. Elle introduit des cavités de quelques dizaines de micromètres de diamètre à l'intérieur du matériau à partir d'une

ouverture de faible surface. Les aciers inoxydables sont particulièrement sensibles à cette forme de corrosion [12].

#### **I.6.2.1.3 Corrosion par érosion**

La corrosion par érosion affecte de nombreux matériaux (aluminium, acier...), elle est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de la matière, elle apparaît dans les conduites, turbines, pompes et échangeurs de chaleur soumis à des fluides rapides ou turbulents. L'érosion enlève continuellement la couche protectrice d'oxyde ou de produit de corrosion, exposant le métal nu à l'attaque chimique. Elle est souvent favorisée par l'écoulement rapide d'un fluide, turbulence, présence de particules solides ou bulle de gaz, ainsi que le pH et la température du milieu.



**Figure I.7:** Corrosion par érosion [13]

#### **I.6.2.1.4 Corrosion caverneuse**

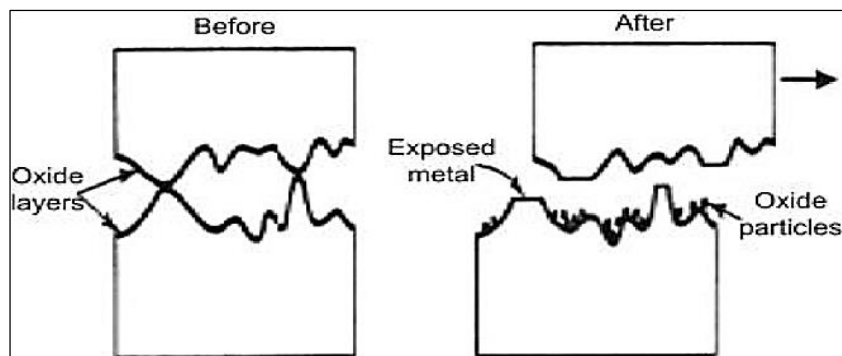
Se développe dans des zones confinées (joints, interstices), où la stagnation du milieu favorise des différences de concentration. Elle est observée lorsqu'il y a une infiltration d'une solution entre deux parties d'un assemblage.



**Figure I.8:** Corrosion caverneuse [14]

#### **I.6.2.1.5 Corrosion par frottement (tribocorrosion)**

Est un phénomène de dégradation accélérée d'un matériau, résultant de l'action combinée d'un contact en mouvement (frottement) et d'un environnement corrosif. L'usure mécanique détruit ou fragilise les films de passivation protecteurs, exposant en permanence le métal frais à l'attaque chimique ou électrochimique, ce qui conduit à une perte de matière supérieure à la somme des effets pris séparément [15].



**Figure I.9:** Corrosion par frottement [16]

#### **I.6.2.1.6 Corrosion par cavitation**

La corrosion par cavitation constitue une forme particulière de dégradation des matériaux. Elle apparaît lorsque des bulles de vapeur ou de gaz se forment dans un liquide en mouvement à la suite d'une baisse de pression, puis s'effondrent brutalement dans des zones de pression élevée. L'implosion de ces bulles génère des micro-jets et

des ondes de choc qui détériorent la surface métallique, enlevant les couches protectrices et exposant le métal nu à l'attaque chimique. Ce phénomène se manifeste notamment dans les systèmes hydrauliques tels que les pompes, les turbines et les hélices, entraînant une perte rapide de matière, une rugosité accrue, des piqûres et des fissures, ce qui réduit considérablement la durée de vie des équipements et accroît le risque de défaillances mécaniques.

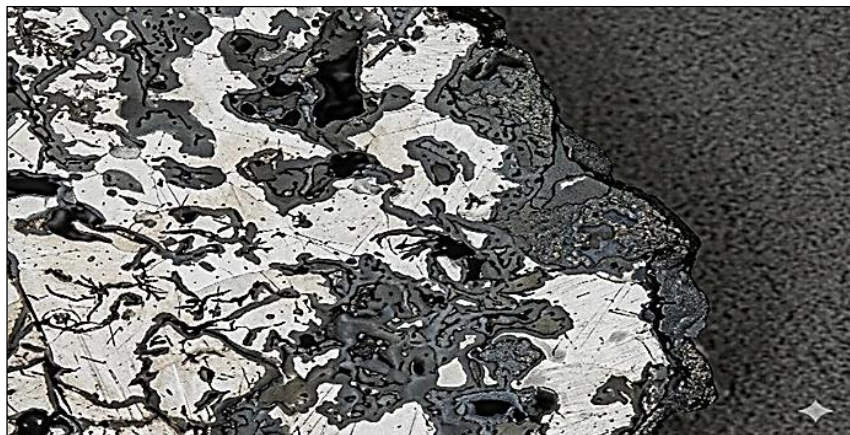


**Figure I.10:** Corrosion par cavitation [17]

### **I.6.2.2 Corrosion microscopique**

#### **I.6.2.2.1 Corrosion sélective**

Cette forme de corrosion est due à l'oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse.



**Figure I.11:** Corrosion sélective [18]

### I.6.2.2.2 Corrosion sous contrainte (CSC)

Également connue sous le nom de corrosion fissurant sous contrainte, elle découle d'une interaction combinée entre la corrosion et une tension statique qui est imposée ou résiduelle. Ce genre de modification ne se produit que lorsque plusieurs critères, qui concernent à la fois les caractéristiques du métal, la tension mécanique ou l'environnement réunis.

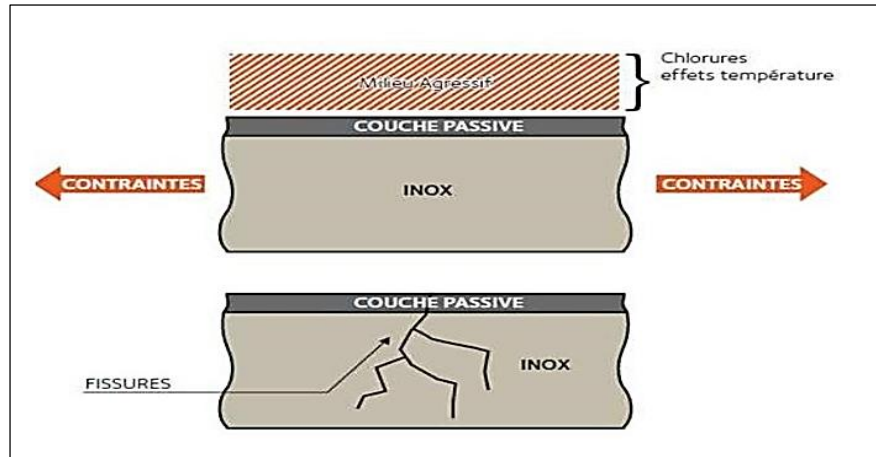
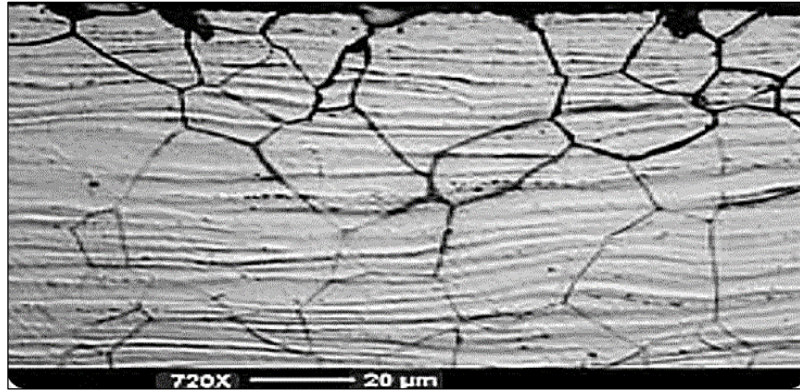


Figure I.12: Corrosion sous contrainte [19]

### I.6.2.2.3 Corrosion intergranulaire (intercristalline)

C'est une forme de corrosion localisée qui s'attaque aux joints de grains, rendant la Structure mécaniquement fragile. Il s'agit de phases qui se sont précipitées lors d'un traitement thermique. C'est un type de corrosion particulièrement dangereux car, bien que la quantité de métal attaqué soit faible, les caractéristiques mécaniques se sont altérées car les fissures ainsi produites affaiblissent le métal. Par exemple ; l'acier inoxydable austénitique sensibilisé à chaud par précipitation du carbure de chrome aux joints des grains [20].



**Figure I.13:** Corrosion intergranulaire [21]

#### **I.6.2.2.4 Corrosion par fatigue**

La corrosion par fatigue est observée lorsque l'effet est alterné, par conséquent l'attaque est en général Trans-granulaire.

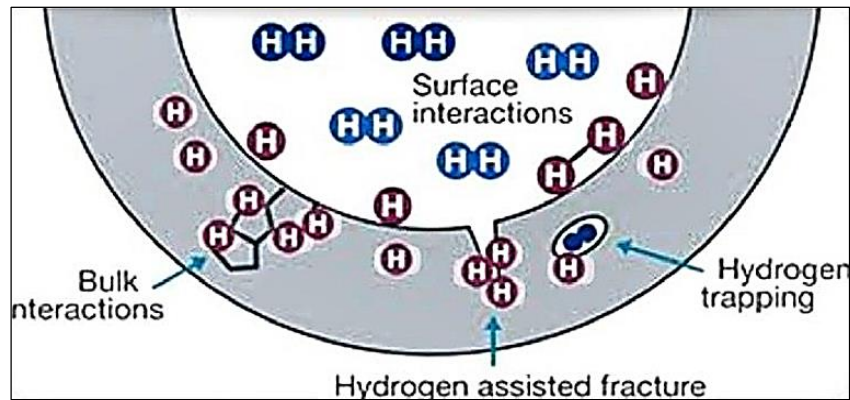


**FigureI.14:** Corrosion par fatigue [22]

#### **I.6.2.2.5 Fragilisation par l'hydrogène**

Désigne une fissuration provoquée par une contrainte de traction et la présence d'hydrogène dissous dans le métal. Parfois, l'hydrogène seul suffit à endommager un métal.

Dans certains cas, la corrosion sous contrainte et la fragilisation par l'hydrogène ont lieu simultanément. Il n'existe alors pas de limite précise qui permette de distinguer les deux phénomènes [23].



**Figure I.15:** Mécanismes de la fragilisation par l'hydrogène [24]

### I.7 Impact de la corrosion sur la production

La corrosion constitue un défi majeur pour la production industrielle en raison de ses effets économiques, techniques et organisationnels. Elle entraîne des pertes financières importantes liées aux coûts de maintenance et de remplacement, réduit la durée de vie des équipements tels que les pompes, turbines et conduites, et diminue l'efficacité des procédés. De plus, elle provoque des arrêts imprévus de la production, affectant la productivité et la compétitivité des entreprises. Sur le plan de la sécurité, la corrosion accroît le risque de fuites et de défaillances mécaniques graves. Ainsi, la maîtrise de la corrosion et la mise en place de stratégies préventives efficaces sont essentielles pour assurer la continuité de la production, réduire les coûts et garantir la fiabilité et la sécurité des installations.

**Tableau I.1:** Impact de la corrosion

| Dimension         | Impact principal                             | Exemple concret                         |
|-------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Économique        | Pertes financières (~3,5% PIB mondial)       | Remplacement coûteux de tuyauteries     |
| Technique         | Réduction de la durée de vie et performances | Défaillance d'un échangeur thermique    |
| Organisationnelle | Arrêts imprévus, baisse de productivité      | Interruption d'une chaîne de production |
| Sécurité          | Risques d'accidents et de fuites             | Rupture d'une conduite sous pression    |

- La corrosion entraîne des pertes financières, réduit l'efficacité des procédés et augmente le risque de défaillance mécanique.
- La maîtrise et la prévention de la corrosion sont essentielles pour assurer la continuité de la production.

### **I.8 Conclusion**

Une compréhension approfondie des mécanismes, causes et formes de corrosion est indispensable pour :

- Développer des stratégies efficaces de protection des matériaux métalliques
- Évaluer la durée de vie des équipements industriels
- Servir de base théorique à l'étude expérimentale de la résistance à la corrosion des revêtements métalliques.

## ***Chapitre II***

# ***Méthodes et stratégies de lutte contre la Corrosion***

## II.1 Introduction

Afin de réduire les problèmes de la corrosion, plusieurs méthodes de lutte contre la corrosion ont été mises au œuvre, comme le choix judicieux des matériaux, la forme adaptée des pièces, l'ajout d'inhibiteurs aux circuits, l'utilisation de revêtements, la protection électrochimique. Ces méthodes ajoutées au milieu agressif pour diminuer la vitesse de corrosion des métaux et permet d'améliorer la durée de vie des substrats métalliques et de garantir la fiabilité des installations sur le long terme.

Dans ce chapitre, on va rappeler certaines notions de base sur les méthodes de protection contre la corrosion.

## II.2. Principes généraux de la prévention et de la lutte contre la corrosion

Cette section présente les approches générales utilisées pour limiter les phénomènes de corrosion dans les systèmes métalliques.

La corrosion étant un phénomène complexe résultant d'interactions électrochimiques à la surface métal/environnement, sa prévention repose essentiellement sur l'interruption ou la diminution des processus électrochimiques ayant lieu. On peut identifier plusieurs approches générales [25] :

- Compréhension du mécanisme corrosif : corrosion anodique par oxydation du métal accompagnée d'une réduction cathodique (ex : réduction de l'oxygène dissous). [26]
- Contrôle des paramètres influençant la corrosion : température, pH, concentration en ions agressifs ( $\text{Cl}^-$ ), oxygène disponible, vitesse d'écoulement etc. [27]
- Modifications des matériaux : choix d'alliages résistants ou amélioration des microstructures à travers des traitements thermiques ou de surface.
- Protection physique : application de revêtements pour isoler la surface métallique du milieu corrosif.
- Protection électrochimique : polarisation électrique pour inhiber les réactions d'oxydation.

- Protection chimique : via l'usage d'inhibiteurs qui modifient les réactions à la surface métal.

Ainsi, une combinaison de ces méthodes permet de concevoir une stratégie adaptée à chaque environnement et matériau. [25]

### II.3. Stratégies générales de protection contre la corrosion

#### II.3.1. Protection naturelle des matériaux

La protection naturelle est la capacité intrinsèque d'un matériau à résister à la corrosion grâce à ses propriétés chimiques ou physiques. Elle repose sur des mécanismes spontanés tels que la passivation par oxydes, carbonates, la formation de patines protectrices ou l'utilisation d'alliages (Cr, Ni) résistants qui adhèrent fortement à la surface et limitent l'accès des agents corrosifs. [28]

En milieu sec ou peu agressif, certains matériaux se protègent naturellement par oxydation superficielle comme l'aluminium qui forme une couche d'alumine, le cuivre une patine verte, et l'acier inoxydable un film de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  auto-régénérant. Ces couches protectrices augmentent le potentiel de corrosion vers des valeurs plus nobles et réduisent la vitesse de dégradation.



**Figure II.1** : La couche protectrice de cuivre (patine verte) [29]

Ce phénomène constitue une première barrière efficace, mais souvent insuffisante, ce qui justifie le recours à des méthodes de protection artificielles complémentaires comme les revêtements, les inhibiteurs ou la galvanisation. [30]

### II.3.2. Contrôle et modification du milieu corrosif

Le contrôle et la modification du milieu corrosif basé sur le changement des paramètres chimiques et physiques d'un environnement agressif tels que l'oxygène dissous.

Lorsque l'oxygène est absent, ou à des teneurs très faibles, l'élément le plus facile à réduire est alors l'ion  $H^+$  (ou  $H_3O^+$ ). La teneur en  $H^+$  est donnée par la mesure du pH ; plus celui-ci est élevé, plus la teneur en  $H^+$  est faible, utilisation d'inhibiteurs de corrosion, ainsi que par la maîtrise de la température et de l'humidité. En agissant directement sur ces facteurs qui conditionnent les réactions électrochimiques, on parvient à limiter la vitesse de dégradation du métal. [31]

## II.4. Protection physique des matériaux contre la corrosion

### II.4.1. Prévention par la conception et l'optimisation de la géométrie des structures

La morphologie et la conception géométrique des pièces impactent fortement la corrosion. Les zones confinées (crevasses, interstices sous joints), les arêtes vives, ou les zones où les fluides stagnent sont particulièrement sensibles à la corrosion localisée (corrosion sous contrainte, piqûres).

L'optimisation de la géométrie vise à :

- Assurer un écoulement laminaire et continu des fluides pour limiter stagnation et dépôts corrosifs.
- Éviter la formation de zones de concentration d'ions agressifs.
- Réduire les contraintes mécaniques et thermiques concentrées qui pourraient fissurer la couche passive. [25]

### II.4.2. Prévention par le choix approprié des matériaux

Le choix approprié des matériaux constitue une étape fondamentale dans la prévention de la corrosion, Aucun métal ou alliage ne possède une résistance absolue à ce phénomène ; leur comportement dépend toujours du milieu et des conditions d'exploitation. Ainsi, la sélection doit prendre en compte plusieurs facteurs essentiels :

- Le domaine d'utilisation : chaque environnement (marin, acide, alcalin, haute température) impose des contraintes spécifiques.
- la nature et niveau des sollicitations mécaniques et thermiques : la résistance du matériau doit être adaptée aux efforts et aux températures rencontrées.
- Les traitements appliqués : traitements thermiques ou de surface influencent fortement le comportement à la corrosion.
- Le prix et la disponibilité : le choix doit rester économiquement viable et réaliste.

La résistance à la corrosion n'est pas une propriété intrinsèque du métal seul, mais résulte de son interaction avec l'environnement. Elle constitue un critère déterminant, mais doit être évaluée en complément d'autres considérations techniques et économiques afin d'assurer une sélection optimale. [32]

### **II.4.3. Protection par revêtements protecteurs**

#### **II.4.3.1. Revêtements métalliques**

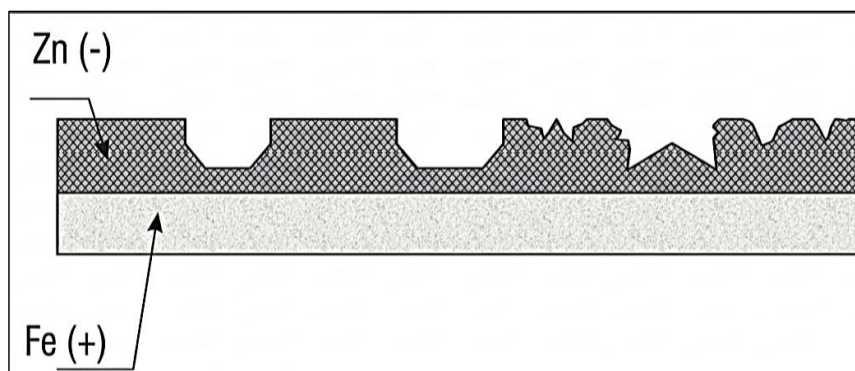
Les revêtements métalliques constituent l'une des méthodes les plus utilisées pour protéger les matériaux métalliques contre la corrosion, correspondent à de fines couches de métal, telles que le nickel ou le zinc, déposées sur un substrat métallique dans le but de former une barrière protectrice contre la corrosion atmosphérique. [33]

Il existe deux types de revêtements métalliques :

##### **❖ Les revêtements sacrificiels**

Dans Les revêtements sacrificiels, tels que le zinc, le cadmium, l'étain et, pour certaines applications l'aluminium, La qualité du substrat est supérieure à celle du revêtement.

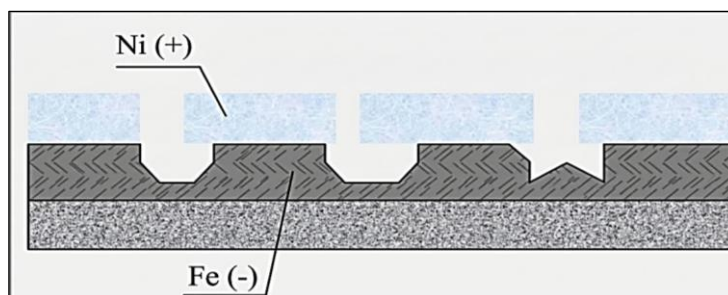
Si des ruptures dans le revêtement se produisent, le revêtement est couplé galvaniquement au métal de base, le dépôt joue un rôle d'anode et se corrode préférentiellement, tandis que le substrat agit comme cathode et reste sécurisé. [34]



**Figure II.2 :** Revêtements sacrificiels (anodique) [35]

#### ❖ Les revêtements cathodiques

Le métal assurant la protection présente un caractère plus noble que celui du substrat, comme c'est le cas pour un dépôt de nickel sur de l'acier. En cas de défaut du revêtement, la pile de corrosion qui se forme peut conduire à une perforation rapide du métal de base, aggravée par le rapport "petite surface anodique" sur "grande surface cathodique". Dans ce cas, la continuité du revêtement est donc le facteur primordial. [36]



**Figure II.3:** Revêtement cathodique [37]

#### II.4.3.2. Revêtements inorganiques

Les revêtements céramiques (oxydes, nitrures, carbures) sont utilisés pour des applications nécessitant une résistance élevée à la corrosion chimique et à l'abrasion. Leur inertie chimique les rend biocompatibles dans des milieux très agressifs, mais leur fragilité mécanique limite parfois leur usage. [38] [39]

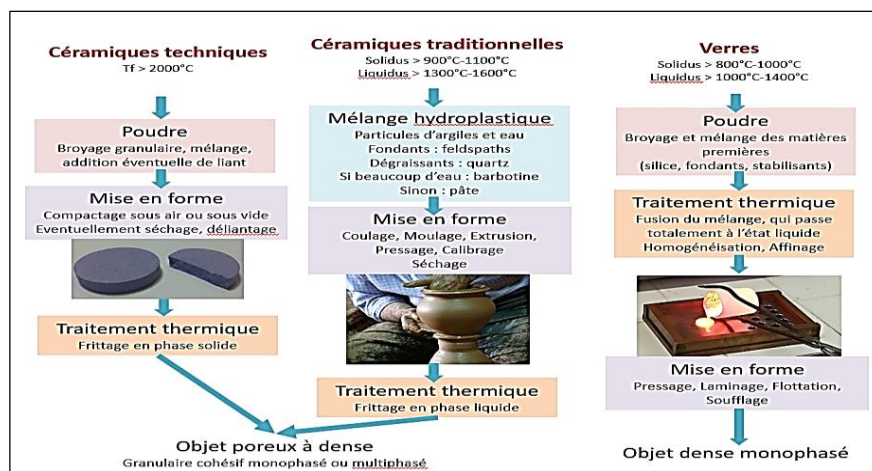


Figure II.4: Revêtements inorganique [40]

### II.4.3.3. Revêtements organiques

Les revêtements organiques constituent une barrière protectrice, plus ou moins imperméable, entre le substrat métallique et son environnement. Il s'agit d'un mode de protection passive, couramment appliqué aux conduites destinées au transport des produits pétroliers et gaziers. Ils se classent généralement en trois grandes catégories [41] :

- Les revêtements en bitume.
- Les revêtements polymériques.
- Les peintures et les vernis.

La réalisation de ce type de revêtement, nécessite plusieurs critères essentiels suivants :

- Une résistance d'isolement suffisamment élevée, permettant de maintenir une performance électrique adéquate sous la couche protectrice appliquée.
- Une adhérence solide au support métallique, indispensable pour limiter la formation et la propagation de défauts de continuité.
- Une étanchéité, une continuité et une homogénéité satisfaisantes pour empêcher toute pénétration de l'environnement extérieur.
- Une résistance notable aux agents biologiques et aux substances transportées, assurant l'efficacité du revêtement dans des conditions d'exploitation variées.

### ❖ Les revêtements en bitume

Ils sont utilisés pour la protection des conduites en acier et en fonte. . Ils se caractérisent généralement par une épaisseur de 5 mm (revêtement épais), grâce à sa plasticité ils permettent de réduire considérablement les risques d'endommagement mécanique provoqué lors de la pose et du transport des tubes.



Figure II.5: Application des revêtements en bitume [42]

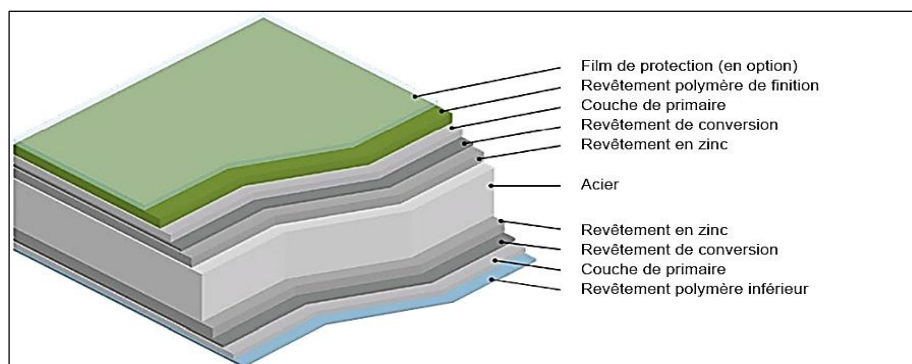
### ❖ Les revêtements polymériques

Il existe une grande variété de revêtements polymériques pour la protection des métaux contre le milieu agressif, On en distingue trois types :

- **Les thermoplastiques** : polyéthylènes, polypropylène, poly vinyle chloré (PVC).
- **Les thermodurcissables** : polyester, époxy.
- **Les élastomères** : caoutchouc et synthétiques.

L'efficacité de la protection polymérique dépend de la résistance chimique intrinsèque dans le milieu et de l'absence de défauts. Son épaisseur est de l'ordre 100 à 500  $\mu\text{m}$ , mais elle varie selon les cas.

Les procédés de réalisation sont nombreux comme la poudre, au pistolet et par immersion. Mais c'est celui à la poudre qui reste le plus répandu car il suffit de plonger le métal dans un lit de poudre agité et la poudre se dépose sur le métal. [43]



**Figure II.6:** Les revêtements polymériques [44]

### ❖ Les peintures et les vernis

Les peintures représentent la méthode de protection la plus répandue pour l'acier et d'autres matériaux. Ils sont distingués par des couches très minces ( $<100\ \mu\text{m}$ ), L'ensemble est organisé en couches fonctionnelles :

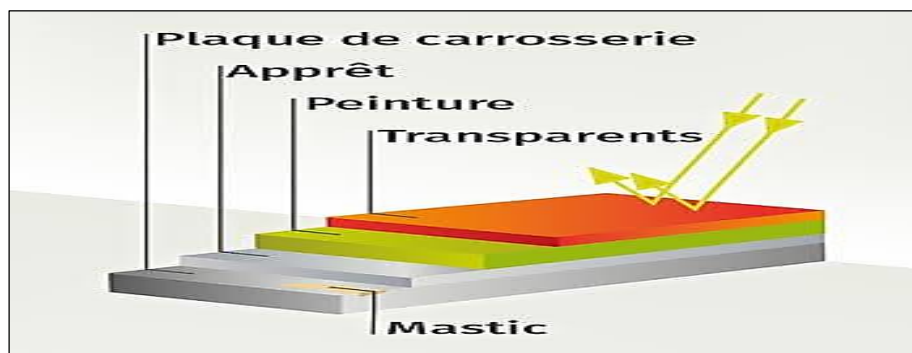
- Une couche d'accrochage fabriquée par phosphatation, ou électrophorèse ;
- Une couche polymérique qui permet d'améliorer la résistance mécanique ;
- Une ou deux couches de finition appliquées au pistolet, suivi d'un recuit au four.

Leurs principaux constituants sont : [45]

- Le liant (la cohésion et l'adhérence).
- Le solvant (l'application liquide du peinture).
- Les pigments qui sont des composés qu'on ajoute aux peintures pour donner une couleur.
- Les additifs et les charges (la modification de certaines propriétés des peintures comme la viscosité, la résistance à l'oxydation ou la tension de surface; et l'amélioration de la résistance).

L'efficacité des peintures organiques repose sur une combinaison de mécanismes complémentaires : elles fomentent une barrière entre le substrat métallique et le milieu ambiant. Elles isolent le métal contre l'eau et les gaz. Inhibent les réactions électrochimiques grâce aux additifs (pigments ou colorations) qui se trouvent dans la

peinture ( $\text{Pb}_3\text{O}_4$ ) favorisant la passivation et assurent une protection électrochimique par métallisation lorsqu'elles contiennent une forte proportion de zinc (90% Zn).



**Figure II.7:** Les couches de peinture [46]

## II.5. Protection électrochimique contre la corrosion

### II.5.1. Principe de la protection électrochimique

La protection électrochimique repose sur le contrôle des réactions électrochimiques à l'interface métal/électrolyte (solution conductrice) afin de prévenir ou de réduire la corrosion.

Elle exploite les principes de la polarisation cathodique et anodique pour imposer un potentiel électrochimique approprié à la structure métallique.

La corrosion électrochimique résulte d'une réaction anodique (oxydation du métal) couplée à une réaction cathodique (réduction d'un oxydant tel que  $\text{O}_2$  ou  $\text{H}^+$ ).

On place ici les notions fondamentales communes aux deux méthodes (couple anodique/cathodique) [47] [48]:

- Polarisation cathodique (principe): Imposition d'un potentiel plus négatif que le potentiel de corrosion naturel ( $E_{\text{corr}}$ ) pour inhiber les sites cathodiques, réduisant ainsi le courant de corrosion ( $i_{\text{corr}}$ ) selon l'équation de Tafel :

$$\eta = a + b \log i$$

Où  $\eta$  est la surtension,  $a$  et  $b$  les coefficients de Tafel.

- Polarisation anodique (principe) : Imposition d'un potentiel plus positif que  $E_{corr}$  pour favoriser la formation d'une couche passive (par exemple, oxyde protecteur sur l'aluminium ou l'acier inoxydable).

Le système entre dans le domaine de passivation où la densité de courant passive ( $i_{pass}$ ) est inférieure à  $10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>.

Limites : risque de piqûres si la couche passive est défectueuse ; non applicable aux métaux actifs tels que le fer doux.

Ce Tableau des critères de potentiel (acier carbone, inox, aluminium vs ECS) – peut être présenté ici car il découle du principe :

**Tableau II.1:** Les critères de potentiel des matériaux

| Matériaux        | Potentiel de protection (V/ECS) |
|------------------|---------------------------------|
| Acier Carbone    | $\leq -0,85$                    |
| Acier inoxydable | $\leq -0,80$                    |
| Aluminium        | $\leq -0,80$                    |

### II.5.2. Protection cathodique

Elle consiste à polariser négativement le métal afin qu'il devienne une cathode dans la cellule de corrosion. La corrosion est alors inversée sur des anodes sacrificielles (métaux plus actifs comme le zinc ou le magnésium) ou par apport de courant continu (protection cathodique par courant imposé). [26]

Cette méthode est couramment utilisée pour les structures enterrées, sous-marines ou soumises à de longues expositions à l'eau.

Anodes sacrificielles (galvaniques) [49]:

- Utilisation d'anodes plus électronégatives que le métal à protéger :
  - \* Zinc (Zn) : potentiel  $-1,10$  V/ECS.
  - \* Magnesium (Mg) :  $-1,50$  V/ECS.
  - \* Aluminum – Zinc – Indium (Al-Zn-In):  $-0,05$  V/ECS.

- Avantages : simplicité, pas d'alimentation externe.
- Inconvénients : durée de vie limitée, calculée par la loi de Faraday :

$$m = (I \times t \times M) / (n \times F)$$

Où  $m$  est la masse consommée,  $I$  le courant,  $t$  le temps,  $M$  la masse atomique,  $n$  la valence,  $F$  la constante de Faraday.

Courant impose [50]:

- Des redresseurs à courant continu appliquent un courant typique de 10 à 100 mA/m<sup>2</sup> en milieu marin.
- Anodes inertes : MMO (oxyde métallique mixte) ou Si-Pb pour les basses fréquences.
- Surveillance : mesure du potentiel selon la norme NACE SP0169.
- Factures influençant l'efficacité [51]:
- Résistivité de l'électrolyte ( $\rho$ ) : atténuation du potentiel selon la loi d'Ohm

$$(\Delta E = I \times R)$$

- pH et composition ionique : alcalinisation locale à pH > 10.
- Température : augmente  $i_{\text{corr}}$  (la vitesse double environ tous les 10 °C).
- Couverture bactérienne : les bactéries sulfato-réductrices (SRB) produisent H<sub>2</sub>S, ce qui complique la protection.
- Uniformité du potentiel : gradient inférieur à 20 mV sur la structure.



Figure II.8 : Protection cathodique [52]

### II.5.3. Protection anodique

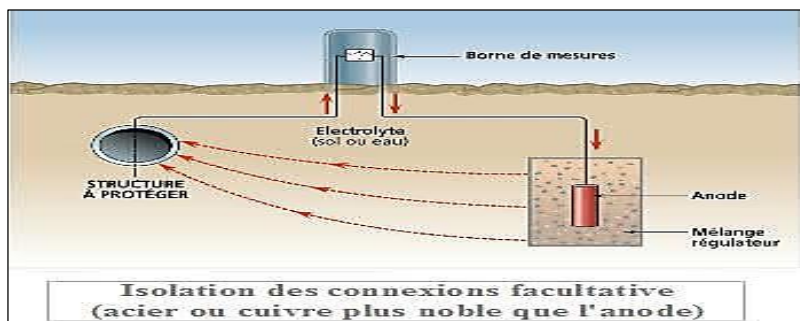
La protection anodique, d'origine plus récente, dépend de la passivation du matériau dans l'environnement concerné. Elle est basée sur la propriété de certains matériaux à passiver en environnement corrosif lorsque leur potentiel est maintenu à une valeur correcte. Une polarisation anodique permet de déplacer le potentiel dans le domaine passif où la densité du courant passif est très faible.

Pour atteindre l'état passif, il faut qu'on applique une densité de courant nettement plus élevée, car elle doit être supérieure à la densité de courant de passivation  $i_{\text{corr}} < i_{\text{pass}}$ . Donc avant d'utiliser cette méthode, il est nécessaire d'avoir recours à des essais préliminaires permettant de déterminer la densité de courant correspondante à la détermination de la passivité ainsi que le domaine de potentiel pour lequel le matériau reste passif, c.à.d. l'étendue du palier de passivité. [53]

Elle consiste à agir de manière contrôlée sur les réactions d'oxydation et de réduction qui se produisent lors du phénomène de corrosion

Parmi les exemples industriels d'utilisation, on peut citer la protection d'une canalisation en acier inoxydable pour le transport de mélange acide.

En effet la protection anodique peut être envisagée dans des environnements comme les acides oxygénés (nitriques ou phosphoriques), les nitrates alcalins, pour des métaux tels que l'acier ordinaire ou inoxydable, le titane et le zirconium. Les alliages à base de cuivre ne sont pas passivés. [54]



**Figure II.9:** Système de protection par anode galvanique [55]

## **II.6. Protection contre la corrosion par les inhibiteurs**

### **II.6.1. Évolution historique et développement des inhibiteurs de corrosion**

L'évolution des inhibiteurs de corrosion au fil du temps illustre le passage progressif de pratiques empiriques vers des approches fondées sur des bases scientifiques solides. Dans le 20<sup>e</sup> siècle, la protection des métaux basée surtout sur l'emploi de substances naturelles, telles que les huiles ou les graisses, utilisées sans réelle compréhension des mécanismes de corrosion.

À partir des années 1940 les premières études scientifiques sur les inhibiteurs de corrosion ont vu le jour, bien que leur nombre soit encore limité et que les mécanismes d'action restent mal compris. Les industriels constataient alors une réduction de la corrosion sans pouvoir expliquer précisément les phénomènes mis en jeu. Depuis les années 1970, l'évaluation des inhibiteurs a connu un développement considérable grâce à la normalisation des méthodes d'essai et à l'utilisation de techniques analytiques modernes, telles que les méthodes électrochimiques et spectroscopiques. Ces avancées ont permis de mieux comprendre les mécanismes d'inhibition à l'échelle moléculaire et de développer des inhibiteurs plus performants et plus respectueux de l'environnement.[56]

Aujourd'hui, la dimension environnementale occupe une place centrale dans la conception des inhibiteurs de corrosion. Malgré cela, certains défis subsistent, notamment l'absence de théories entièrement unifiées, une efficacité parfois limitée en conditions réelles et un écart entre les travaux de recherche et les applications industrielles. Les perspectives futures s'orientent vers le développement d'inhibiteurs écologiques, performants et durables, en s'appuyant sur des approches interdisciplinaires et des innovations issues de la nanotechnologie, des revêtements fonctionnels et de la biotechnologie. [57]

### **II.6.2. Définition et concepts fondamentaux des inhibiteurs de corrosion**

Les inhibiteurs de corrosion sont des substances chimiques ajoutées en faible concentration (généralement  $< 1$  % en masse) à un milieu corrosif pour réduire ou

empêcher les réactions de corrosion d'un métal ou d'un alliage par adsorption à la surface métallique ou par modification de la composition électrolytique du milieu. Ils agissent en formant une barrière protectrice, en modifiant la cinétique des réactions anodiques ou cathodiques, ou en complexant les espèces agressives. [58]

### Concepts fondamentaux

#### ❖ Mécanismes d'inhibition

- **Adsorption physique (physisorption)** : Liaison faible (forces de Van der Waals) entre l'inhibiteur et la surface métallique, réversible et sensible à la température.
- **Adsorption chimique (chémisorption)** : Liaison covalente forte, irréversible, formant une couche monomoléculaire protectrice.
- **Formation de films passifs** : Création d'une couche d'oxyde ou de sel insoluble (ex. : phosphates sur fer).
- **Modification du milieu** : Précipitation de composés protecteurs ou complication des ions agressifs (ex. :  $\text{Ca}^{2+}$  avec  $\text{CO}_3^{2-}$  formant  $\text{CaCO}_3$ ) [59].

#### ❖ Efficacité d'inhibition (EI)

L'efficacité est quantifiée par :

$$\text{EI (\%)} = x = \frac{i_{\text{corr}}^0 - i_{\text{corr}}}{i_{\text{corr}}^0} \times 100$$

Où  $i_{\text{corr}}^0$  et  $i_{\text{corr}}$  sont les densités de courant de corrosion sans et avec inhibiteur, mesurées par polarographie ou impédance électrochimique.

#### ❖ Facteurs influençant l'efficacité :

- **Concentration** : Suit souvent une isotherme d'adsorption (Langmuir, Temkin, Freundlich).
- **pH** : Les inhibiteurs organiques sont efficaces en milieu acide/neutre ; inorganiques en alcalin.
- **Température** : Augmente la désorption physisorbée, diminue l'efficacité.

- Nature du métal : Affinité électrochimique (ex. : amines quaternaires sur acier).

❖ **Types généraux :**

- **Inhibiteurs anodiques** : Polarisation anode (ex. : chromates, nitrites).
- **Inhibiteurs cathodiques** : Polarisation cathode (ex :  $Zn^{2+}$ ,  $As^{3+}$ ).
- **Inhibiteurs mixtes** : Action sur anode et cathode (ex : amines, imidazoles) [60].

### II.6.3. Propriétés et caractéristiques des inhibiteurs de corrosion

Les inhibiteurs de corrosion, en plus de leur fonction principale qui consiste à limiter la corrosion par la réduction des réactions chimiques ou électrochimiques et par la création de films protecteurs sur les métaux, ils possèdent diverses propriétés et caractéristiques contribuant à leur efficacité [61] :

- La nature chimique (organique, inorganique ou hybride).
- Le mode d'action (anodique, cathodique ou mixte).
- La capacité d'adsorption sur la surface métallique.
- La nature physique (liquide, solide ou gazeuse).
- La compatibilité avec l'environnement (inhibiteurs verts).
- L'efficacité électrochimique, évaluée par la diminution du taux de corrosion.
- La stabilité chimique et thermique dans le milieu d'utilisation. [62]

### II.6.4. Domaines d'application des inhibiteurs de corrosion

Les inhibiteurs de corrosion sont utilisés dans de nombreux secteurs industriels :

- Industrie pétrolière et gazière.
- Traitement des eaux et réseaux hydrauliques.
- Industrie chimique et pétrochimique.
- Systèmes de refroidissement et chaudières.
- Industrie maritime.
- Bâtiment et construction.

- Industrie métallurgique.
- Aéronautique et aérospatiale.
- Électronique et microélectronique.

### **II.6.5. Critères de sélection d'un inhibiteur de corrosion**

Le choix repose sur l'efficacité, la solubilité, la stabilité, l'impact environnemental et économique, ainsi que sur la compatibilité avec le milieu et les matériaux. [38]

La sélection repose sur des critères électrochimiques, métallurgiques, opératoires, environnementaux et économiques, validés par tests normalisés (ASTM G31, NACE TM0374). [63]

### **II.6.6. Classification des inhibiteurs de corrosion**

#### **II.6.6.1. Classification selon la nature chimique des molécules inhibitrices**

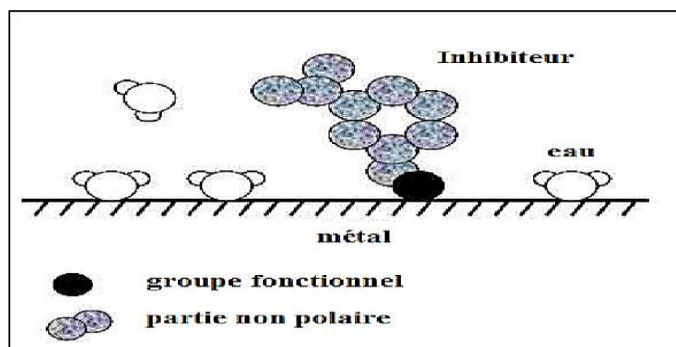
Selon leur nature, on distingue deux types d'inhibiteurs organiques et minéraux :

##### **❖ Les inhibiteurs organiques**

Les inhibiteurs organiques représentent un groupe très important d'inhibiteurs de corrosion ils sont maintenant les plus utilisés en raison d'une faible écotoxicité, À partir d'une molécule « mère » possédant une certaine efficacité, ce sont principalement des sous-produits de l'industrie pétrolière Ils renferment au moins un atome servant de centre actif susceptible d'échanger des électrons pour se fixer sur le métal tel que l'azote, l'oxygène, le soufre ou le phosphore (les inhibiteurs qui contiennent du soufre sont plus efficaces que ceux qui contiennent l'azote, parce que le soufre est un meilleur donneur d'électrons que l'azote). Leur performance est liée à ses propriétés d'adsorption, qui dépend de la nature et de l'état de surface du métal, ainsi que du milieu corrosif, la caractéristique essentielle de ces inhibiteurs est leur efficacité élevée, même à faible concentration. L'effet inhibiteur augmente souvent avec le poids moléculaire de l'inhibiteur [64].

Les groupes fonctionnels usuels, permettant leurs fixations sur le métal ou alliage sont les radicales amines (-NH<sub>2</sub>), mercaptan (-SH), hydroxyle (-OH), carboxyle (-COOH),

L'une des limitations dans l'utilisation de ces produits peut être l'élévation de la température, les molécules organiques étant souvent instables à chaud [65].



**Figure II.11:** Mécanisme des inhibiteurs organiques [66]

#### ❖ Les inhibiteurs minéraux

Les molécules minérales sont utilisées le plus souvent en milieu neutre ou alcalin mais plus rarement en milieu acide. Ce sont généralement des substances oxydantes souvent appelées agents de passivation (anions ou cations). Les produits se dissocient en solution et ce sont souvent leurs produits de dissociation qui passivent le métal et relèvent fortement le potentiel de corrosion vers des valeurs plus nobles, tout en réduisant la vitesse de corrosion.

Les cations inhibiteurs sont essentiellement  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Zn}^{2+}$  et ceux qui forment des sels insolubles avec certains anions tels que l'hydroxyle  $\text{OH}^-$ . Parmi les inhibiteurs anioniques, on trouve les oxo- anions de type X On-tels que les chromates, les molybdates, les phosphates, les silicates,... Mercaptans, Sul oxydes, thiazoles...) ou le phosphore (phosphorâtes) les chromates, les phosphates, les molybdates, les nitrates, les nitrites, les silicates. Malgré leur efficacité, certains de ces inhibiteurs sont maintenant proscrits en raison de leurs toxicités. [67]

#### II.6.6.2. Classification selon le mécanisme d'action électrochimique

La classification électrochimique des inhibiteurs repose sur leur effet sur les réactions :

- anodiques (oxydation du métal :  $\text{M} \rightarrow \text{M}^{n+} + n \text{e}^-$ )
- cathodiques (réduction :  $\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 4 \text{e}^- \rightarrow 4 \text{OH}^-$  ou  $2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ ).

**❖ Inhibiteurs anodiques**

- Mécanisme : Augmentent le potentiel de corrosion ( $E_{\text{corr}}$ ) et réduisent la densité de courant anodique ( $i_a$ ) par formation d'une couche passive insoluble.
- Exemples : Chromates ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ), molybdates ( $\text{MoO}_4^{2-}$ ), nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ), orthophosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ ).
- Domaine d'application : Milieux aérés, aciers doux ; risque de corrosion localisée (pitting) si sous-dosage.

**❖ Inhibiteurs cathodiques**

- Mécanisme : Réduisent la densité de courant cathodique ( $i_c$ ) en bloquant les sites de réduction ( $\text{O}_2$  ou  $\text{H}^+$ ), diminuant  $E_{\text{corr}}$ .
- Exemples : Ions métalliques ( $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ), composés soufrés ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ), polyphosphates.
- Domaine d'application : Milieux acides ou anaérobies ; efficaces contre la corrosion par  $\text{H}_2$ .

**❖ Inhibiteurs mixtes (ou à action bipolaire)**

- Mécanisme : Inhibent simultanément les réactions anodique et cathodique sans modifier significativement  $E_{\text{corr}}$  ( $\pm 30$  mV), réduisant  $i_{\text{corr}}$  globalement.
- Exemples : Amines (cyclohexylamine), imidazoles, dérivés azotés hétérocycliques (benzotriazole), silicates.
- Domaine d'application : Universel (acide, neutre, alcalin) ; pétrole/gaz (couplages).

**❖ Inhibiteurs à action spécifique**

- Inhibiteurs de piqûres : Bloquent l'initiation des anodes locales (ex : tungstates).
- Inhibiteurs de crevasses : Améliorent la conductivité locale (ex : inhibiteurs volatils).

### II.6.6.3. Classification selon le mécanisme d'adsorption à l'interface métal/solution

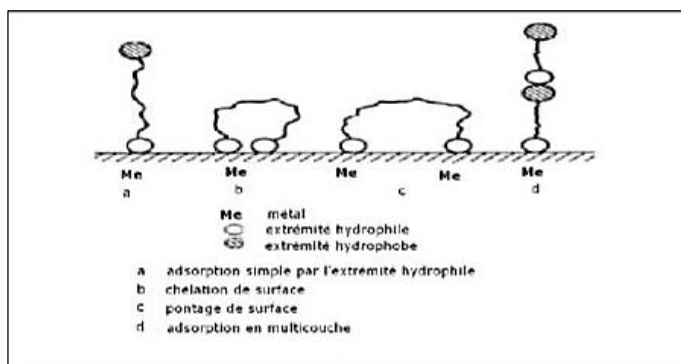
Ils se basent sur deux types d'adsorption (physisorption) et chimique (chimisorption).

#### ❖ Adsorption physique

L'adsorption physique, qui traduit l'interaction entre la surface métallique (adsorbât) et les inhibiteurs (adsorbant), produit lorsque les forces d'attraction secondaires dites de Van Der Waals lient les molécules qui s'adsorbent à la surface du substrat. Ces interactions faibles permettent de préserver l'individualité des espèces en présence. Peu énergétique, ce mode l'adsorption est surtout s'observe principalement aux basses températures, et aboutit à un équilibre réversible rapidement établi.

#### ❖ Adsorption chimique

L'adsorption chimique, ou chimisorption, ou la liaison est assurée par un échange électronique entre les molécules adsorbées et les molécules de la surface adsorbant. La chimisorption dégage une énergie plus élevée (20 à 100 kJ/mole). Dans beaucoup de cas, la chimisorption est lente aux basses températures, et sa vitesse croît, quand les températures augmentent. Elle correspond à la saturation des « valences libres » de la surface du solide. Le processus essentiel implique la formation d'un composé chimique entre l'adsorbé et l'adsorbant.[68]



**Figure II.12:** Représentation schématique des modes d'adsorption de molécules organiques inhibitrices sur une surface métallique [69]

### II.6.7. Inhibiteurs de corrosion spécifiques aux métaux ferreux

Les métaux ferreux, très utilisés dans l'industrie, sont particulièrement sensibles à la corrosion. Les inhibiteurs spécifiques développés se basent souvent sur des composés azotés, phosphorés ou sulfurés qui interagissent fortement avec la surface d'acier, formant un film protecteur stable. [25] [38]

Pour les métaux ferreux, largement utilisés dans l'industrie, les inhibiteurs courants incluent :

- Composés oligomères azotés hétérocycliques (ex : benzotriazole, imidazoles).
- Agents phosphatants qui favorisent la formation d'un film protecteur phosphaté.
- Agents chromatants (de moins en moins utilisés pour raisons environnementales).

Ces inhibiteurs sont préférentiellement employés dans les systèmes aqueux où le fer est exposé, notamment dans les circuits de refroidissement et les canalisations. [70]

## II.7 Conclusion

La corrosion reste un défi majeur, mais les stratégies de protection développées offrent des solutions efficaces.

En définitive, la prévention et la lutte contre la corrosion exigent une approche intégrée, combinant la sélection judicieuse des matériaux, l'optimisation des conceptions, l'utilisation des revêtements adaptés et le recours aux inhibiteurs.

Les recherches actuelles sur les inhibiteurs « verts » et la modélisation moléculaire ouvrent la voie à une nouvelle génération de solutions plus sûres et plus performantes.

## ***Chapitre III***

### ***Partie expérimentale***

### III.1. Introduction

Le stage de mise en situation professionnelle a été effectué au niveau de laboratoire (Labo 03 département séance et Technologie, RA1K). Ce chapitre est consacré à la présentation du dispositif expérimental mis en œuvre au cours de cette étude. Il décrit les différentes procédures expérimentales adoptées pour l'élaboration des revêtements, notamment la préparation des surfaces, la composition des bains utilisés ainsi que les conditions opératoires appliquées. Les produits chimiques employés et les méthodes analytiques mises en œuvre sont également présentés.

### III.2. Objectif de l'étude

Cette étude vise à caractériser le comportement à la corrosion d'un acier au carbone, avec ou sans revêtement, dans divers environnements corrosifs. L'influence de la nature du milieu ( $H_2SO_4$  ou  $NaCl$ ), de sa concentration, de la température et du temps d'immersion sur la vitesse de corrosion est examinée. Deux revêtements métalliques (nickel et cobalt) sont comparés quant à leur capacité à protéger le substrat. La méthode gravimétrique, fondée sur la mesure des pertes de masse, permet de déterminer les vitesses de corrosion et d'identifier le revêtement le plus performant selon les conditions expérimentales.

### III.3. Méthode de corrosion

#### III.3.1. Méthode gravimétrique

La gravimétrie est l'une des méthodes d'analyse quantitative les plus anciennes. C'est l'ensemble des techniques analytiques quantitatives qui se basent sur la mesure de la masse ou de sa variation à milieu donné. Dans le domaine de la corrosion, La méthode de perte de masse est d'une mise en œuvre simple et ne nécessite pas un appareillage important est utilisée pour évaluer la vitesse de corrosion, la vitesse de corrosion est déterminée après certain temps d'immersion à température ambiante.

La vitesse de corrosion est calculée par la formule suivante :

$$V_{\text{corrosion}} = \frac{\Delta M}{S \times t}$$

$V_{\text{corrosion}}$  : peut exprimer en **g/cm<sup>2</sup>.h**.

$\Delta M = m_f - m_0$  : perte de masse exprimée en **g**.

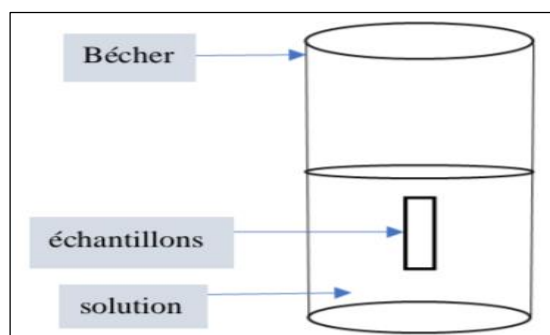
$m_0$  : masse de l'échantillon avant l'essai en **(g)**.

$m_f$  : masse de l'échantillon après l'essai en **(g)**.

$S$  : surface de l'échantillon exposé en **(cm<sup>2</sup>)**.

$t$  : temps d'immersion en heure **(h)**.

Avec  $V_{\text{corrosion}}$  est la vitesse de corrosion après immersion dans La solution respectivement sans et avec peinture.



**Figure III.1:** Dispositif expérimental de la technique de la masse perdue.

#### III.4. Matériel utilisé dans l'étude

L'échantillon que nous avons choisis dans notre étude est :

- **acier au carbone ( $\approx$  XC 75)**

C'est un alliage de fer (Fe) avec du carbone (C) comme principal élément de durcissement. Le pourcentage de carbone peut aller de moins de 0,1 % à un peu plus de 2 % L'acier au carbone est l'un des matériaux les plus utilisés dans l'industrie en raison de son équilibre entre résistance, coût et facilité de traitement.



**Figure III.2:** Forme d'échantillon utilisé dans l'étude.

### III.4.1. Préparation des échantillons

#### ❖ Sans revêtement

- **Découpage**

Le métal est découpé en plusieurs coupons de mêmes dimensions de surface ( $S = 4 \text{ cm}^2$ ) pour réaliser les différentes expériences.



**Figure III.3:** Découpage d'échantillon acier ou carbone

- **Polissage**

Dans cette étape on a utilisé le papier abrasif de numéro (400, 600, 800, 1000, 1200), on a fait le polissage manuel de notre échantillon avec une polisseuse au niveau d'unité de RA1K pour éliminer les impuretés et homogénéiser la surface des plaques, ensuite un nettoyage par l'eau distillée pour se débarrasser totalement des traces des impuretés et ensuite un dégraissage à l'acétone pour éliminer les tresses d'eau, enfin un séchage au dessiccateur.



**Figure III.4:** Appareil de polissage.

- **Pesée initiale**

La masse initiale de chaque échantillon est mesurée à l'aide d'une balance de précision avant l'essai.



**Figure III.5:** Masse pesée par une balance électronique.

- ❖ **Avec revêtement**

Les échantillons sont revêtus par un dépôt de nickel et de cobalt afin d'améliorer leur résistance à la corrosion et leurs propriétés de surface.



Figure III.6: Revêtement à base de Cobalt



Figure III.7: Revêtement à base de Nickel.

Tableau III.1: Propriétés Physico-chimiques de Nickel et Cobalt

| Propriétés                   | Nickel | Cobalt |
|------------------------------|--------|--------|
| Formule chimique             | Ni     | Co     |
| Numéro atomique              | 28     | 27     |
| Masse molaire (g/mol)        | 58.69  | 58.93  |
| Densité (g/cm <sup>3</sup> ) | 8.90   | 8.86   |
| Point de fusion (°C)         | 1455   | 1495   |
| Point d'ébullition (°C)      | 2913   | 2927   |

### III.4.2 Milieux choisis

Nous avons testé les échantillons dans deux milieux différents :

- le milieu 01 : milieu salin préparé à base de chlorure de sodium (NaCl) .
- le milieu 02 : un milieu acide obtenu à partir d'une solution d'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

**Tableau III.2:** Propriétés physico-chimiques de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{NaCl}$ 

| Propriété                    | Acide sulfurique        | Chlorure de sodium |
|------------------------------|-------------------------|--------------------|
| Formule chimique             | $\text{H}_2\text{SO}_4$ | $\text{NaCl}$      |
| Masse molaire (g/mol)        | 98.08                   | 58.44              |
| Densité (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.84                    | 2.16               |
| Point de fusion (°C)         | 10.3                    | 801                |
| Point d'ébullition (°C)      | 337                     | 1413               |

### III.4.3 Dispositifs utilisés

Pour la préparation des solutions nous utilisons les dispositifs suivants.

- Balance électronique
- Papier abrasif
- une spatule
- Des béchers (100-250 ml)
- Acétone ou éthanol
- Eau distillée
- Thermomètre
- Chronomètre
- Des fioles jaugées de 100 ml
- Plaque chauffante
- Verre de montre
- Pipette
- Eprouvette graduée 50 ml
- Dessiccateur

## III.4.4 Préparation des solutions

- **Pour  $\text{H}_2\text{SO}_4$**

À partir d'un  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentré (~98%) :

Tableau III.3: Préparation solution  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 

| solutions                   | concentration |       |       |       |       |
|-----------------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|
| $\text{H}_2\text{SO}_4$ (%) | 1             | 3     | 5     | 7     | 9     |
| Volume (ml)                 | 1,020         | 3,061 | 5,102 | 7,142 | 9,183 |

À titre d'exemple, nous prenons la solution 5 %

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$V = \frac{C_2V_2}{C_1} = \frac{5 \cdot 100}{98} \quad V_1 = 5,102 \text{ ml}$$

Figure III.8: Préparation de la solution  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 

- **Pour  $\text{NaCl}$**

À partir d'une poudre de  $\text{NaCl}$  :

Tableau III.4: Préparation solution  $\text{NaCl}$ 

| solutions         | concentration |   |   |   |   |
|-------------------|---------------|---|---|---|---|
| $\text{NaCl}$ (%) | 1             | 3 | 5 | 7 | 9 |
| Masse (g)         | 1             | 3 | 5 | 7 | 9 |



**Figure III.9:** Préparation de la solution NaCl



**Figure III.10:** Masse pesée par une balance électronique

### III.5 Procédé expérimental

Nous utilisons des échantillons pour réaliser cette expérience et les plaçons dans une solution contenant différentes concentrations (1%, 3%, 5%, 7%, 9%).

L'essai ont été réalisés à des températures variées (30°, 60°, 80°) de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et NaCl dans 100 ml d'eau distillée.

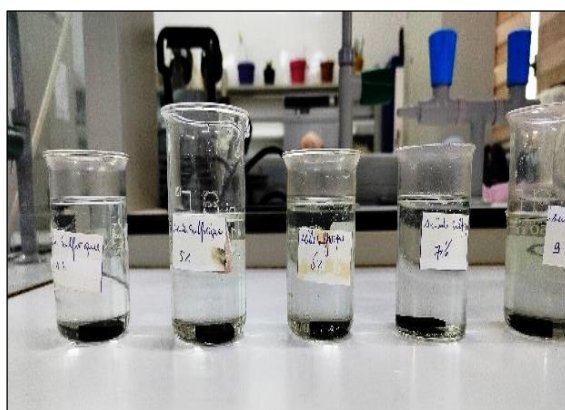
Chaque échantillon a été maintenu dans sa solution respective pendant certain temps afin d'étudier l'influence de la concentration et de la température sur son comportement en milieu corrosif.

### III.5.1 Sans Revêtement

- Étude l'influence de la concentration



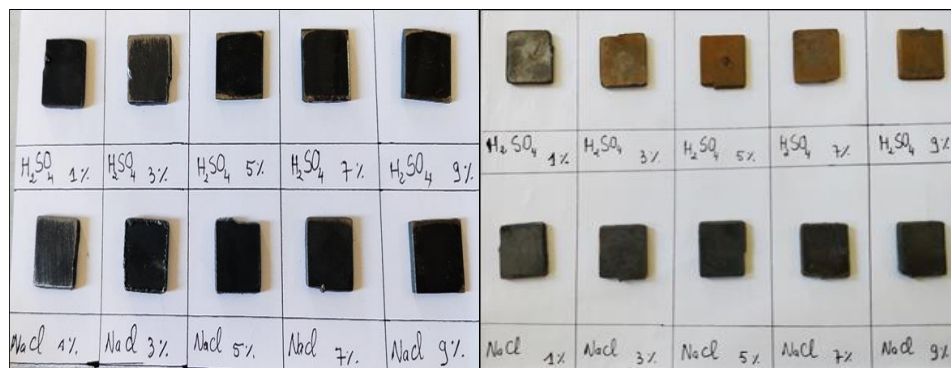
**Figure III.11:** Immersion des échantillons no revêtus dans la solution de NaCl après 24 Heure



**Figure III.12:** Immersion des échantillons no revêtus dans la solution de  $H_2SO_4$  après 24 Heure

Après 24 heures d'immersion, les échantillons sont retirés, rincés à l'eau distillée, puis introduits dans l'acétone afin d'éliminer toute trace d'humidité, ils sont ensuite soumis

à une étape de séchage dans l'étuve, suivie d'un dessiccateur, avant d'être pesés pour déterminer leur masse finale.



**Figure III.13:** Echantillons avant et après l'étude.

- **Calcul de la vitesse de corrosion**

- Perte de masse :

$$\Delta m = m_0 - m_f$$

- ✓ **Solution saline (NaCl) :**

$$\Delta m = m_0 - m_f$$

$$\Delta m = 8.099 - 8.099$$

$$\Delta m = 0$$

- ✓ **Solution d'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) :**

$$\Delta m = m_0 - m_f$$

$$\Delta m = 8.055 - 7.729$$

$$\Delta m = 0.326$$

- Vitesse de corrosion en (g/cm<sup>2</sup>·h):

$$V = \frac{\Delta m}{S \times t}$$

Avec :

- $S = 2 \text{ cm}^2$
- $t = \text{temps (heures ou jours)}$

✓ **Solution saline (NaCl) :**

$$V = \frac{\Delta m}{S \times t}$$

$$V = \frac{0}{4 \times 24}$$

$$V = 0 \text{ (g/cm}^2 \cdot \text{h)}$$

✓ **Solution d'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) :**

$$V = \frac{\Delta m}{S \times t}$$

$$V = \frac{0.326}{4 \times 24}$$

$$V = 3.395 \times 10^{-3} \text{ (g/cm}^2 \cdot \text{h)}$$

Option (en mm/an) :

$$V = \frac{87.6 \times \Delta m}{\rho \times S \times t}$$

Où :

- $\rho$  = densité acier (~7.85 g/cm<sup>3</sup>).

✓ **Solution saline (NaCl) :**

$$V = \frac{87.6 \times \Delta m}{\rho \times S \times t}$$

$$V = \frac{87.6 \times 0}{7.85 \times 4 \times 24}$$

$$V = 0 \text{ (mm/an)}$$

✓ **Solution d'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) :**

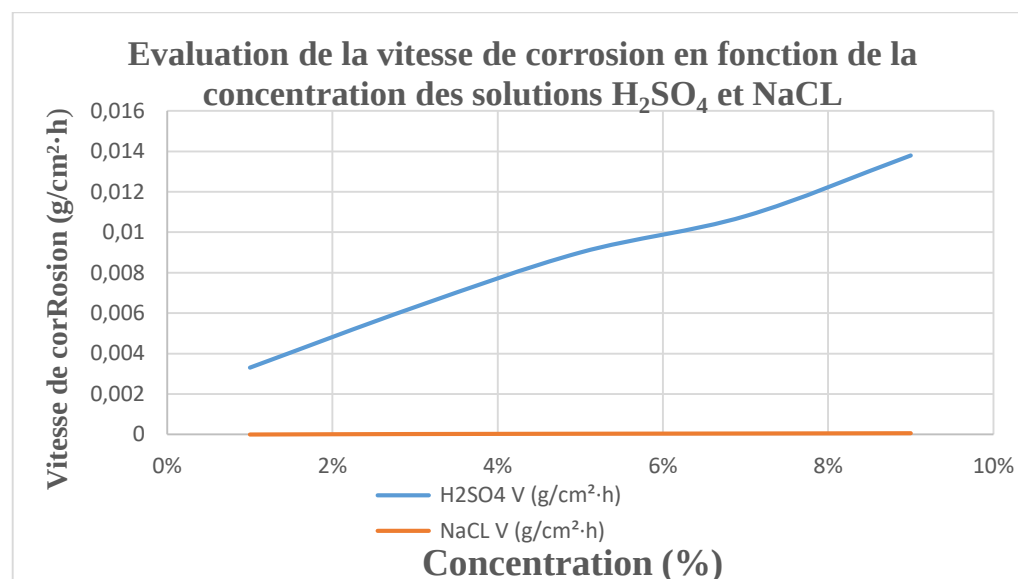
$$V = \frac{87.6 \times \Delta m}{\rho \times S \times t}$$

$$V = \frac{87.6 \times 0.326}{7.85 \times 4 \times 24}$$

$$V = 0.0378 \text{ (mm/an)}$$

**Tableau III.5 :** Evaluation de la vitesse de corrosion en fonction de la concentration des solutions  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{NaCl}$

| Concentration                             | $m_o$ (g) | $m_f$ (g) | $\Delta m$ (g) | $V$ ( $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$ ) | $V$ (mm/an) |
|-------------------------------------------|-----------|-----------|----------------|-----------------------------------------------|-------------|
| <b><math>\text{H}_2\text{SO}_4</math></b> |           |           |                |                                               |             |
| 1%                                        | 8,055     | 7,729     | 0,326          | 0,0033                                        | 0,0757      |
| 3%                                        | 7,968     | 7,354     | 0,614          | 0,0063                                        | 0,1427      |
| 5%                                        | 8,087     | 7,220     | 0,867          | 0,0090                                        | 0,2015      |
| 7%                                        | 7,843     | 6,804     | 1,039          | 0,0108                                        | 0,2415      |
| 9%                                        | 7,699     | 6,372     | 1,327          | 0,0138                                        | 0,3085      |
| <b><math>\text{NaCl}</math></b>           |           |           |                |                                               |             |
| 1%                                        | 8,099     | 8,099     | 0              | 0                                             | 0           |
| 3%                                        | 7,955     | 7,953     | 0,002          | 0,000020                                      | 0,000223    |
| 5%                                        | 7,958     | 7,955     | 0,003          | 0,000031                                      | 0,000345    |
| 7%                                        | 7,884     | 7,880     | 0,004          | 0,000041                                      | 0,000457    |
| 9%                                        | 7,971     | 7,966     | 0,005          | 0,000052                                      | 0,000580    |



**Figure III.14:** Evaluation de la vitesse de corrosion en fonction de la concentration des solutions  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{NaCl}$

### ❖ Discussion

D'après le tableau et la figure au-dessus qui représentent l'évaluation de la vitesse de corrosion en fonction de la concentration des solutions  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{NaCl}$ . On remarque que :

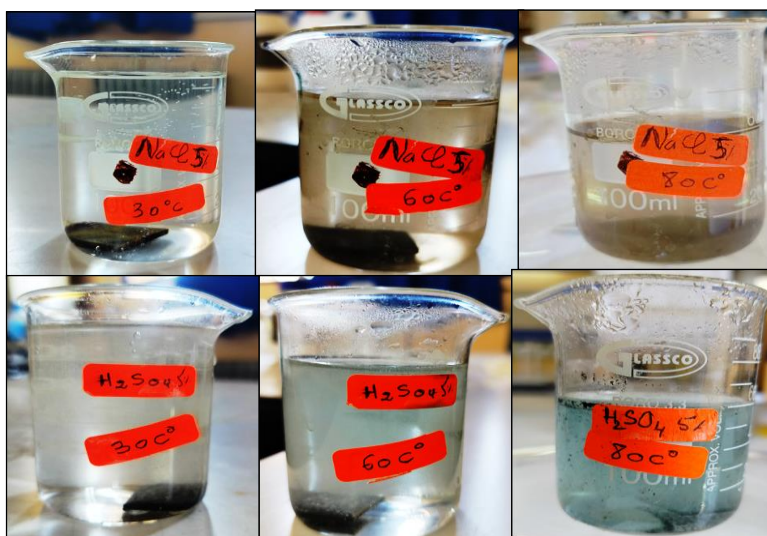
- La vitesse de corrosion augmente régulièrement avec la concentration de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , passant de  $0,0033 \text{ (g/cm}^2\cdot\text{h)}$  à 1% et à  $0,0138 \text{ (g/cm}^2\cdot\text{h)}$  à 9 %.
- Cette tendance linéaire s'explique par une augmentation de la concentration en ions  $\text{H}^+$ , qui accélère la réaction d'oxydation du métal.
- Les vitesses sont extrêmement faibles ( $\leq 0,000020 \text{ g/cm}^2\cdot\text{h}$ ), avec des valeurs nulles à 1 % de NaCl.
- Le sel semble très peu corrosif dans ces conditions (probablement un métal passivable comme l'acier inoxydable ou l'aluminium, où les chlorures ne déclenchent une corrosion significative qu'en présence d'oxygène ou de défauts locaux).

Donc :

À concentration égale, l'acide sulfurique est bien plus corrosif que le sel. En milieu salin, la corrosion reste négligeable, alors qu'en milieu acide, elle devient préoccupante dès 3%.

Cela met en évidence le rôle clé de la nature chimique des ions : les protons ( $\text{H}^+$ ) agressent directement le métal, contrairement aux ions chlorure, qui ne provoquent pas d'attaque directe.

#### ❖ Étude l'influence de la température

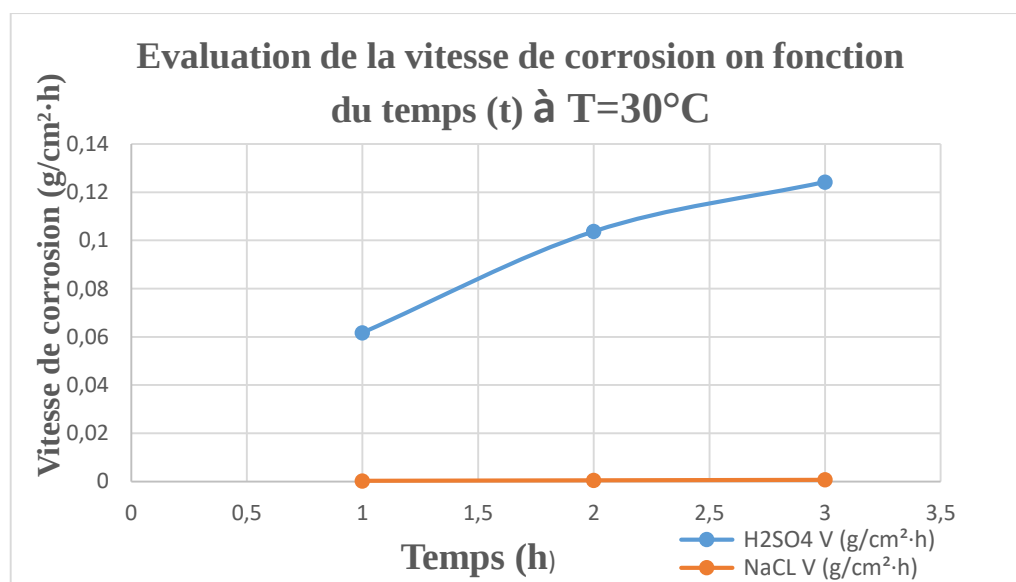


**Figure III.15:** Immersion des échantillons non revêtus dans la solution de NaCl et  $\text{H}_2\text{SO}_4$  à différent température et temps.

- A la température  $T = 30^{\circ}\text{C}$

**Tableau III.6:** Evaluation de la vitesse de corrosion en fonction du Temps des solutions  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{NaCl}$  à  $T = 30^{\circ}\text{C}$

| Temps (h)                      | m <sub>0</sub> (g) | m <sub>f</sub> (g) | Δ m   | V (g /cm <sup>2</sup> .h) | V(mm/an) |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|-------|---------------------------|----------|
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> |                    |                    |       |                           |          |
| 1 h                            | 5 ,672             | 5,425              | 0,247 | 0,0617                    | 0,6885   |
| 2 h                            |                    | 5,257              | 0,415 | 0,1037                    | 1,1572   |
| 3 h                            |                    | 5,175              | 0,497 | 0,1242                    | 1.3859   |
| NaCl                           |                    |                    |       |                           |          |
| 1 h                            | 5,920              | 5 ,919             | 0,001 | 0,00025                   | 0,0027   |
| 2 h                            |                    | 5,918              | 0,002 | 0,00050                   | 0,0055   |
| 3 h                            |                    | 5,917              | 0,003 | 0,00075                   | 0,0083   |

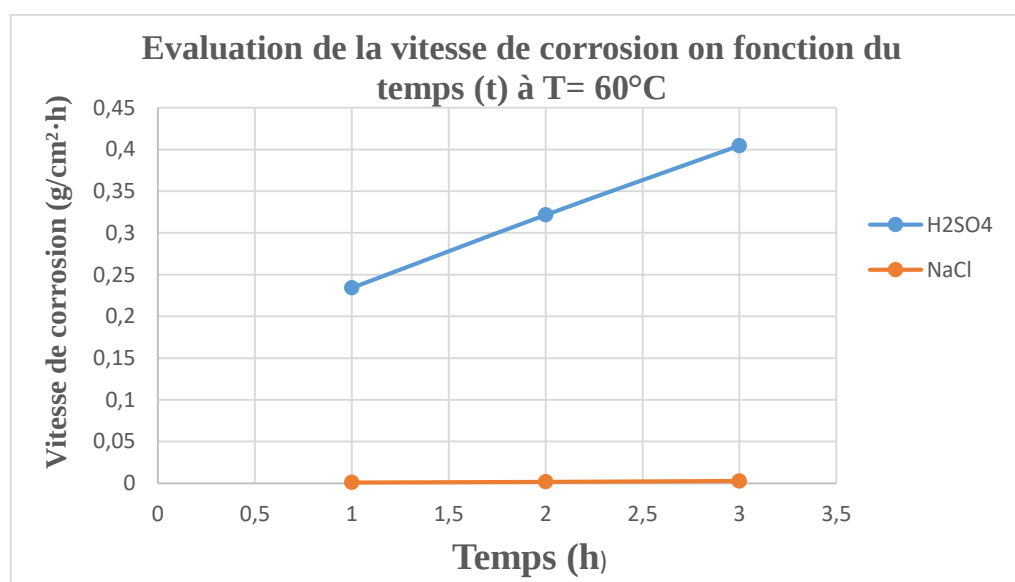


**Figure III.16:** Evaluation de la vitesse de corrosion en fonction du Temps des solutions  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{NaCl}$  à  $T = 30^{\circ}\text{C}$

- A la température  $T = 60^{\circ}\text{C}$

**Tableau III.7:** Evaluation de la vitesse de corrosion en fonction du Temps des solutions  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{NaCl}$  à  $T = 60^{\circ}\text{C}$

| Temps (h)                      | m <sub>0</sub> (g) | m <sub>f</sub> (g) | Δ m   | V (g /cm <sup>2</sup> .h) | V(mm/an) |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|-------|---------------------------|----------|
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> |                    |                    |       |                           |          |
| 1 h                            | 5 ,672             | 4,735              | 0,937 | 0,2342                    | 2,6134   |
| 2 h                            |                    | 4,386              | 1,286 | 0,3215                    | 3,5876   |
| 3 h                            |                    | 4,054              | 1,618 | 0,4045                    | 4,5139   |
| NaCl                           |                    |                    |       |                           |          |
| 1 h                            | 5,920              | 5,916              | 0,004 | 0,001                     | 0,0111   |
| 2 h                            |                    | 5,913              | 0,007 | 0,0017                    | 0,0189   |
| 3 h                            |                    | 5,909              | 0,011 | 0,0027                    | 0,0301   |

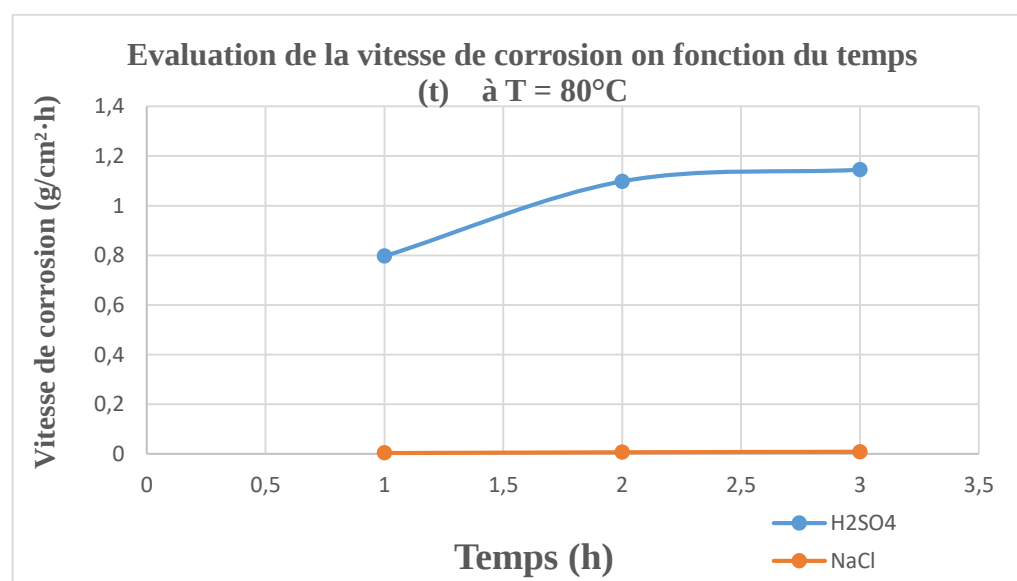


**Figure III.17:** Evaluation de la vitesse de corrosion en fonction du Temps des solutions  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{NaCl}$  à  $T = 60^{\circ}\text{C}$ .

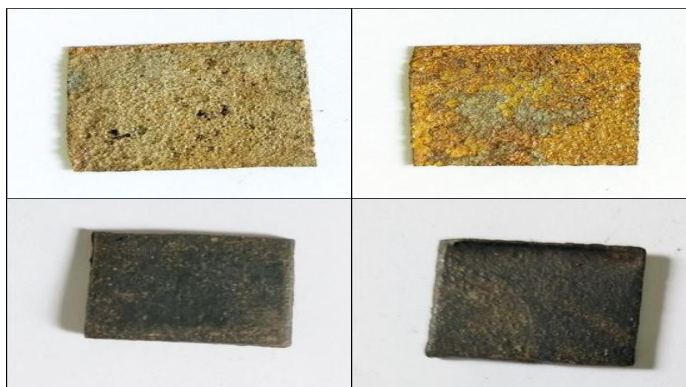
- A la température  $T = 80^{\circ}\text{C}$

**Tableau III.8 :** Evaluation de la vitesse de corrosion en fonction du Temps des solutions  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{NaCl}$  à  $T = 80^{\circ}\text{C}$ .

| Temps (h)                      | m <sub>0</sub> (g) | m <sub>f</sub> (g) | Δ m   | V (g /cm <sup>2</sup> .h) | V(mm/an) |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|-------|---------------------------|----------|
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> |                    |                    |       |                           |          |
| 1 h                            | 5 ,672             | 2,485              | 3,187 | 0,7967                    | 8,8927   |
| 2 h                            |                    | 1,280              | 4,392 | 1,098                     | 12,2528  |
| 3 h                            |                    | 1,093              | 4,579 | 1,1447                    | 12,7739  |
| NaCl                           |                    |                    |       |                           |          |
| 1 h                            | 5,920              | 5,903              | 0,017 | 0,0042                    | 0,0468   |
| 2 h                            |                    | 5,894              | 0,026 | 0,0065                    | 0,0725   |
| 3 h                            |                    | 5,887              | 0,033 | 0,0082                    | 0,0915   |



**Figure III.18 :** Evaluation de la vitesse de corrosion en fonction du Temps des solutions  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{NaCl}$  à  $T = 80^{\circ}\text{C}$ .



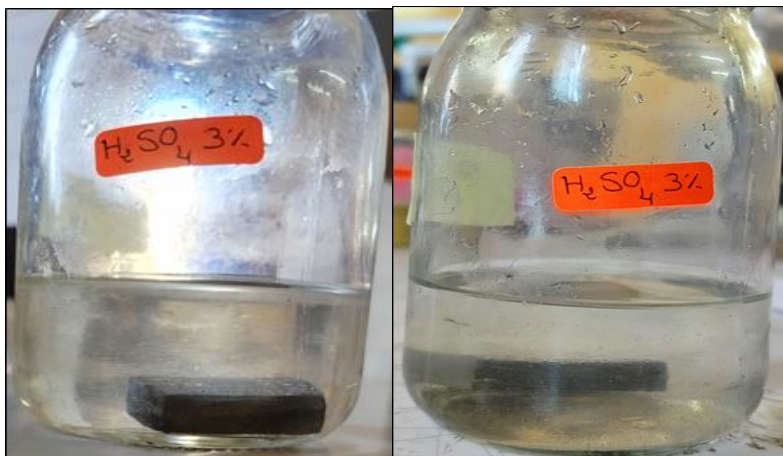
**Figure III.19 :** Echantillons non revêtu après l'attaque chimique.

#### ❖ Discussion

- La vitesse de corrosion augmente avec la température et la durée d'immersion dans les deux milieux ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{NaCl}$ ).
- L'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) est significativement plus corrosif que la solution de chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ) à toutes les températures testées.
- A la température 30 °C : la corrosion dans  $\text{H}_2\text{SO}_4$  atteint 0,1242 g/cm<sup>2</sup>·h (1,3859 mm/an) contre 0,00075 g/cm<sup>2</sup>·h dans  $\text{NaCl}$ .
- A la température 60 °C : les vitesses de corrosion s'élèvent à 0,4045 g/cm<sup>2</sup>·h (4,5139 mm/an) dans  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et 0,0027 g/cm<sup>2</sup>·h dans  $\text{NaCl}$ .
- A la température 80 °C : la corrosion dans  $\text{H}_2\text{SO}_4$  atteint 1,1447 g/cm<sup>2</sup>·h (12,7739 mm/an) contre 0,0082 g/cm<sup>2</sup>·h dans  $\text{NaCl}$ .
- En milieu  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , les ions  $\text{H}^+$  favorisent la dissolution anodique continue du métal.
- En milieu  $\text{NaCl}$ , une couche passive vraisemblablement formée à l'interface métal-électrolyte limite l'action des ions  $\text{Cl}^-$ .
- La nature du milieu corrosif constitue le paramètre déterminant : les ions  $\text{H}^+$  sont plus agressifs que les ions  $\text{Cl}^-$  dans les conditions expérimentales utilisées

## III.5.2 Avec revêtement

- Étude l'influence de la concentration et du temps



**Figure III.20 :** Immersion des échantillons revêtus dans la solution de NaCl et  $H_2SO_4$  a différentes concentrations et temps.



**Figure III.21:** Echantillons revêtus après l'immersion.

- ✓ **Solution acide**

**Tableau III.9:** Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Nickel en fonction du Temps des solutions  $H_2SO_4$ .

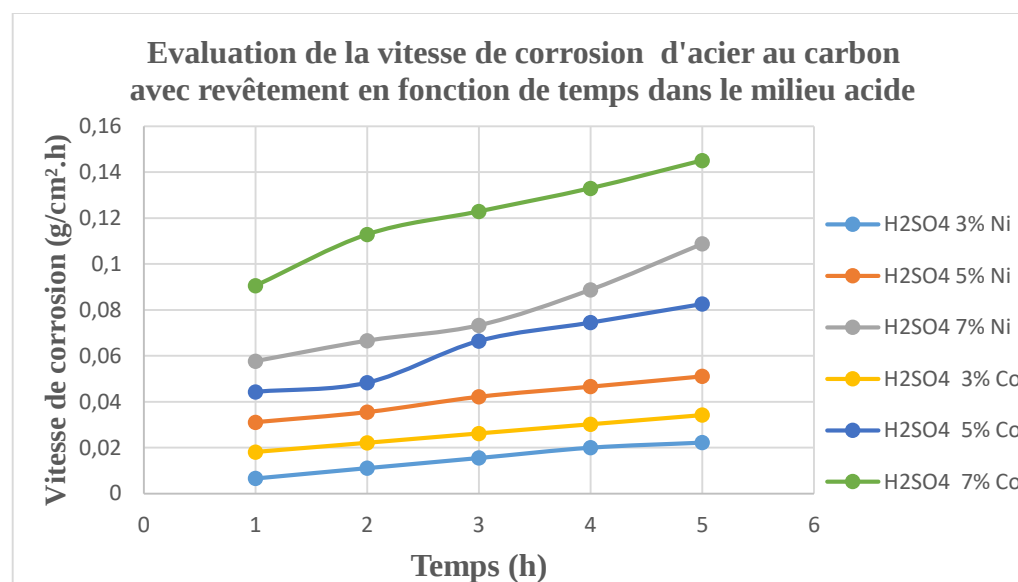
| $H_2SO_4$ 3%                       |        |        |        |       |        |
|------------------------------------|--------|--------|--------|-------|--------|
| t (h)                              | 1      | 2      | 3      | 4     | 5      |
| m0 (g)                             | 31,67  |        |        |       |        |
| mf (g)                             | 31,64  | 31,62  | 31,60  | 31,58 | 31,57  |
| $\Delta m$ (g)                     | 0,03   | 0,05   | 0,07   | 0,09  | 0,1    |
| V corrosion (g/cm <sup>2</sup> .h) | 0,0066 | 0,0111 | 0,0155 | 0,02  | 0,0222 |

|                                       |        |        |        |        |        |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| V corrosion<br>(g/cm <sup>2</sup> .h) | 0,0736 | 0,1238 | 0,1729 | 0,2231 | 0,2477 |
| <b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5%</b> |        |        |        |        |        |
| mf (g)                                | 31,53  | 31,51  | 31,48  | 31,46  | 31,44  |
| Δm (g)                                | 0,14   | 0,16   | 0,19   | 0,21   | 0,23   |
| V corrosion<br>(g/cm <sup>2</sup> .h) | 0,311  | 0,0355 | 0,0422 | 0,0466 | 0,0511 |
| V corrosion<br>(g/cm <sup>2</sup> .h) | 0,3470 | 0,3961 | 0,4709 | 0,5200 | 0,5702 |
| <b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 7%</b> |        |        |        |        |        |
| mf (g)                                | 31,41  | 31,37  | 31,34  | 31,27  | 31,18  |
| Δm (g)                                | 0,26   | 0,3    | 0,33   | 0,4    | 0,49   |
| V corrosion<br>(g/cm <sup>2</sup> .h) | 0,0577 | 0,0666 | 0,0733 | 0,0888 | 0,1088 |
| V corrosion<br>(g/cm <sup>2</sup> .h) | 0,6438 | 0,7432 | 0,8179 | 0,9909 | 1,2141 |

**Tableau III.10:** Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Cobalt en fonction du Temps des solutions H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

|                                             |               |               |               |               |               |
|---------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 3%</b>       |               |               |               |               |               |
| <b>t (h)</b>                                | <b>1</b>      | <b>2</b>      | <b>3</b>      | <b>4</b>      | <b>5</b>      |
| <b>m0 (g)</b>                               | <b>35,60</b>  |               |               |               |               |
| <b>mf (g)</b>                               | <b>35,51</b>  | <b>35,49</b>  | <b>35,47</b>  | <b>35,45</b>  | <b>35,43</b>  |
| <b>Δm (g)</b>                               | <b>0,09</b>   | <b>0,11</b>   | <b>0,013</b>  | <b>0,15</b>   | <b>0,17</b>   |
| <b>V corrosion<br/>(g/cm<sup>2</sup>.h)</b> | <b>0,0181</b> | <b>0,0221</b> | <b>0,0262</b> | <b>0,0302</b> | <b>0,0342</b> |
| <b>V corrosion<br/>(g/cm<sup>2</sup>.h)</b> | <b>0,2019</b> | <b>0,2466</b> | <b>0,2923</b> | <b>0,3370</b> | <b>0,3816</b> |
| <b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5%</b>       |               |               |               |               |               |
| <b>mf (g)</b>                               | <b>35,38</b>  | <b>35,36</b>  | <b>35,27</b>  | <b>35,23</b>  | <b>35,19</b>  |
| <b>Δm (g)</b>                               | <b>0,22</b>   | <b>0,24</b>   | <b>0,33</b>   | <b>0,37</b>   | <b>0,41</b>   |
| <b>V corrosion<br/>(g/cm<sup>2</sup>.h)</b> | <b>0,0443</b> | <b>0,0483</b> | <b>0,0665</b> | <b>0,0745</b> | <b>0,0826</b> |
| <b>V corrosion<br/>(g/cm<sup>2</sup>.h)</b> | <b>0,4943</b> | <b>0,5389</b> | <b>0,7420</b> | <b>0,8313</b> | <b>0,9217</b> |
| <b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 7%</b>       |               |               |               |               |               |
| <b>mf (g)</b>                               | <b>35,15</b>  | <b>35,04</b>  | <b>34,99</b>  | <b>34,94</b>  | <b>34,88</b>  |

|                                    |        |        |        |        |        |
|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\Delta m$ (g)                     | 0,45   | 0,56   | 0,61   | 0,66   | 0,72   |
| V corrosion (g/cm <sup>2</sup> .h) | 0,0907 | 0,1129 | 0,1229 | 0,1330 | 0,1451 |
| V corrosion (g/cm <sup>2</sup> .h) | 1,0121 | 1,2598 | 1,3714 | 1,4841 | 1,6192 |



**Figure III.22:** Evaluation de la vitesse de corrosion d'acier au carbone avec revêtement en fonction de temps dans le milieu acide.

✓ **Solution salin**

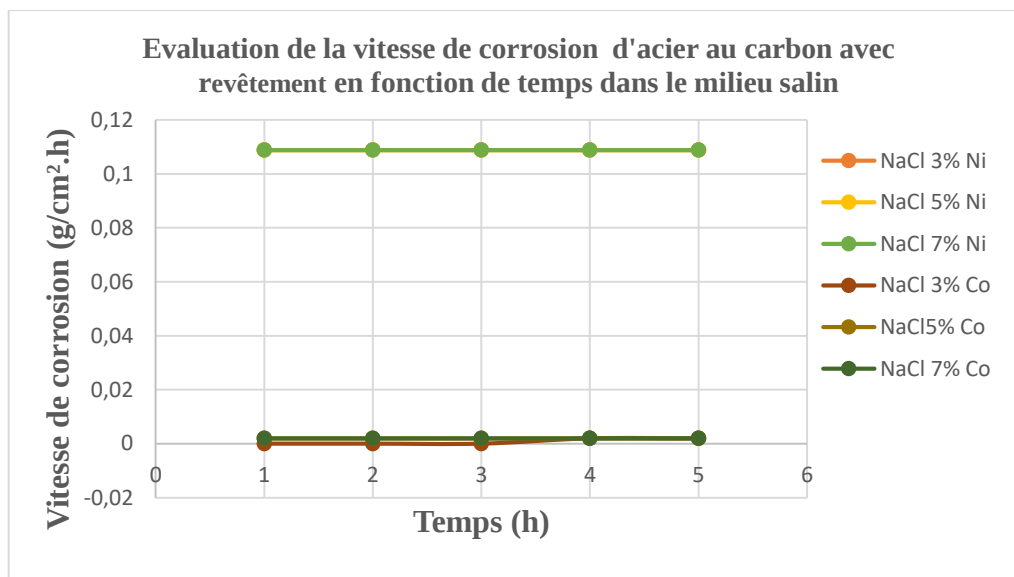
**Tableau III.11:** Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Nickel en fonction du Temps des solutions NaCl.

| NaCl 3%                            |        |        |        |        |        |
|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| t (h)                              | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| m0 (g)                             | 31,67  |        |        |        |        |
| mf (g)                             | 31,18  | 31,18  | 31,18  | 31,18  | 31,18  |
| $\Delta m$ (g)                     | 0,49   | 0,49   | 0,49   | 0,49   | 0,49   |
| V corrosion (g/cm <sup>2</sup> .h) | 0,1088 | 0,1088 | 0,1088 | 0,1088 | 0,1088 |
| V corrosion (g/cm <sup>2</sup> .h) | 1,2141 | 1,2141 | 1,2141 | 1,2141 | 1,2141 |
| NaCl 5%                            |        |        |        |        |        |

|                                         |               |               |               |               |               |
|-----------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>mf (g)</b>                           | <b>31,18</b>  | <b>31,18</b>  | <b>31,18</b>  | <b>31,18</b>  | <b>31,18</b>  |
| <b><math>\Delta m</math> (g)</b>        | <b>0,49</b>   | <b>0,49</b>   | <b>0,49</b>   | <b>0,49</b>   | <b>0,49</b>   |
| <b>V corrosion (g/cm<sup>2</sup>.h)</b> | <b>0,1088</b> | <b>0,1088</b> | <b>0,1088</b> | <b>0,1088</b> | <b>0,1088</b> |
| <b>V corrosion (g/cm<sup>2</sup>.h)</b> | <b>1,2141</b> | <b>1,2141</b> | <b>1,2141</b> | <b>1,2141</b> | <b>1,2141</b> |
| <b>NaCl 7%</b>                          |               |               |               |               |               |
| <b>mf (g)</b>                           | <b>31,18</b>  | <b>31,18</b>  | <b>31,18</b>  | <b>31,18</b>  | <b>31,18</b>  |
| <b><math>\Delta m</math> (g)</b>        | <b>0,49</b>   | <b>0,49</b>   | <b>0,49</b>   | <b>0,49</b>   | <b>0,49</b>   |
| <b>V corrosion (g/cm<sup>2</sup>.h)</b> | <b>0,1088</b> | <b>0,1088</b> | <b>0,1088</b> | <b>0,1088</b> | <b>0,1088</b> |
| <b>V corrosion (g/cm<sup>2</sup>.h)</b> | <b>1,2141</b> | <b>1,2141</b> | <b>1,2141</b> | <b>1,2141</b> | <b>1,2141</b> |

**Tableau III.12:** Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Cobalt en fonction du Temps des solutions NaCl.

|                                         |               |               |               |               |               |
|-----------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>NaCl 3%</b>                          |               |               |               |               |               |
| <b>t (h)</b>                            | <b>1</b>      | <b>2</b>      | <b>3</b>      | <b>4</b>      | <b>5</b>      |
| <b>m0 (g)</b>                           | <b>35,60</b>  |               |               |               |               |
| <b>mf (g)</b>                           | <b>35,60</b>  | <b>35,60</b>  | <b>35,60</b>  | <b>35,59</b>  | <b>35,59</b>  |
| <b><math>\Delta m</math> (g)</b>        | <b>0</b>      | <b>0</b>      | <b>0</b>      | <b>0,01</b>   | <b>0,01</b>   |
| <b>V corrosion (g/cm<sup>2</sup>.h)</b> | <b>0</b>      | <b>0</b>      | <b>0</b>      | <b>0,002</b>  | <b>0,002</b>  |
| <b>V corrosion (g/cm<sup>2</sup>.h)</b> | <b>0</b>      | <b>0</b>      | <b>0</b>      | <b>0,0223</b> | <b>0,0223</b> |
| <b>NaCl 5%</b>                          |               |               |               |               |               |
| <b>mf (g)</b>                           | <b>35,59</b>  | <b>35,59</b>  | <b>35,59</b>  | <b>35,59</b>  | <b>35,59</b>  |
| <b><math>\Delta m</math> (g)</b>        | <b>0,01</b>   | <b>0,01</b>   | <b>0,01</b>   | <b>0,01</b>   | <b>0,01</b>   |
| <b>V corrosion (g/cm<sup>2</sup>.h)</b> | <b>0,002</b>  | <b>0,002</b>  | <b>0,002</b>  | <b>0,002</b>  | <b>0,002</b>  |
| <b>V corrosion (g/cm<sup>2</sup>.h)</b> | <b>0</b>      | <b>0</b>      | <b>0</b>      | <b>0,0223</b> | <b>0,0223</b> |
| <b>NaCl 7%</b>                          |               |               |               |               |               |
| <b>mf (g)</b>                           | <b>35,59</b>  | <b>35,59</b>  | <b>35,59</b>  | <b>35,59</b>  | <b>35,59</b>  |
| <b><math>\Delta m</math> (g)</b>        | <b>0,01</b>   | <b>0,01</b>   | <b>0,01</b>   | <b>0,01</b>   | <b>0,01</b>   |
| <b>V corrosion (g/cm<sup>2</sup>.h)</b> | <b>0,002</b>  | <b>0,002</b>  | <b>0,002</b>  | <b>0,002</b>  | <b>0,002</b>  |
| <b>V corrosion (g/cm<sup>2</sup>.h)</b> | <b>0,0223</b> | <b>0,0223</b> | <b>0,0223</b> | <b>0,0223</b> | <b>0,0223</b> |

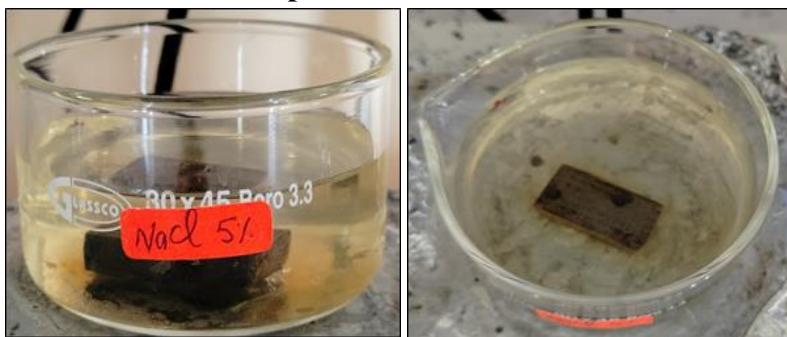


**Figure III.23:** Evaluation de la vitesse de corrosion d'acier au carbone avec revêtement en fonction de temps dans le milieu salin.

#### ❖ Discussions

- La corrosion augmente avec la concentration et la durée d'immersion dans les deux milieux. Le milieu  $\text{H}_2\text{SO}_4$  s'avère significativement plus corrosif que le NaCl, avec des vitesses atteignant  $1,6192 \text{ g/cm}^2\cdot\text{h}$  contre  $1,2141 \text{ g/cm}^2\cdot\text{h}$  respectivement.
- En milieu  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , le nickel présente une résistance supérieure au cobalt, avec des vitesses de corrosion variant de  $0,2477$  à  $1,2141 \text{ g/cm}^2\cdot\text{h}$  pour le nickel contre  $0,9856$  à  $1,6192 \text{ g/cm}^2\cdot\text{h}$  pour le cobalt (3-7 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 5h). Cette différence s'explique par la formation d'oxydes moins stables ( $\text{CoO}$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ) chez le cobalt et par l'action des  $\text{H}^+$  qui détruit la couche passivante.
- En milieu NaCl, le cobalt démontre une excellente résistance ( $\approx 0,002 \text{ g/cm}^2\cdot\text{h}$  stable) grâce à la formation d'une couche passive ( $\text{CoO}/\text{Co}(\text{OH})_2$ ), tandis que le nickel subit une attaque localisée constante ( $1,2141 \text{ g/cm}^2\cdot\text{h}$  dès 1h).

## ❖ Étude l'influence de la température

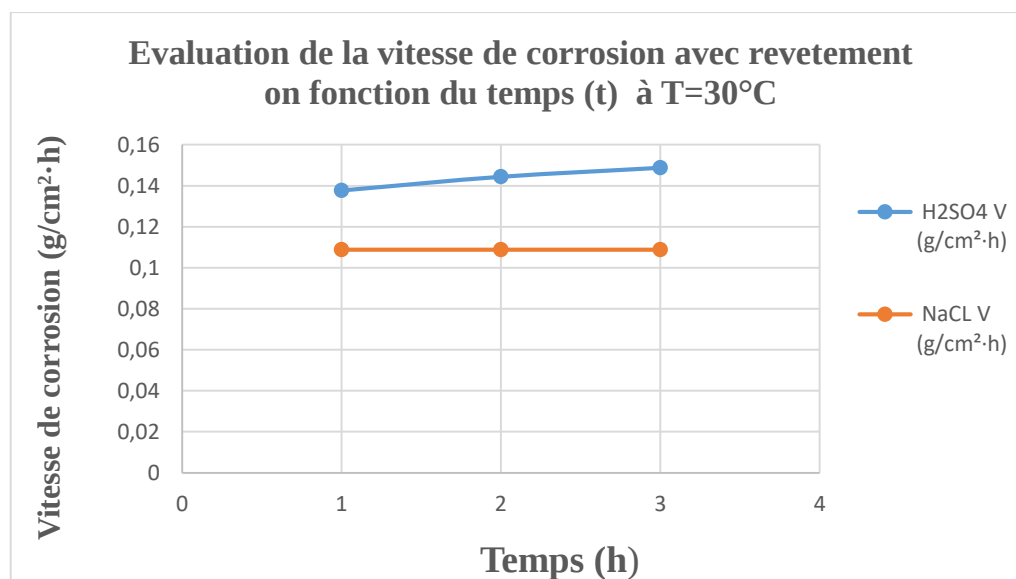


**Figure III.24:** Immersion des échantillons revêtus dans la solution de NaCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> à différent température.

## ✓ A la température T= 30 °

**Tableau III.13 :** Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Nickel en fonction du Temps des solutions H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et NaCl à T= 30°C.

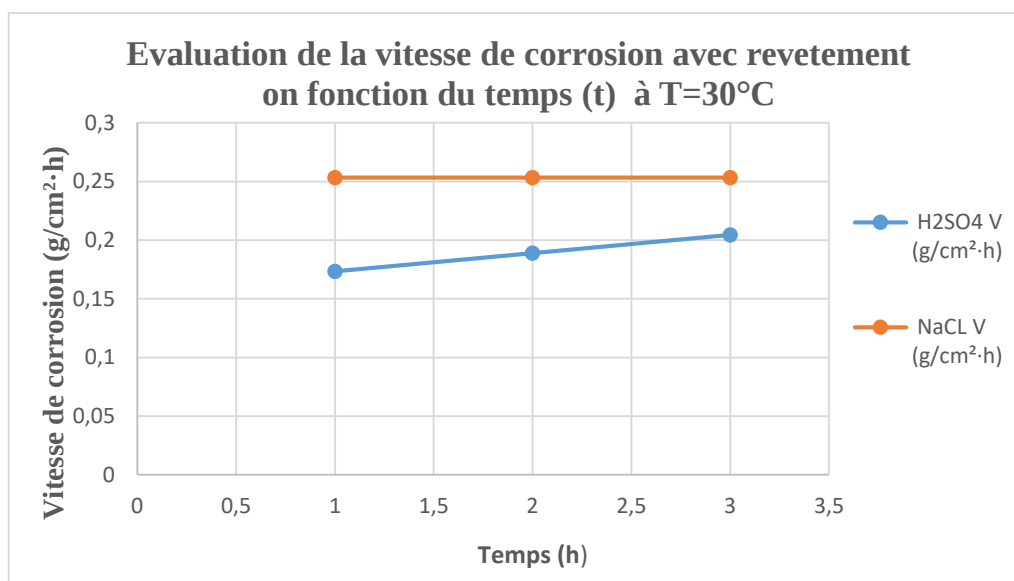
| Temps (h)                      | m <sub>0</sub> (g) | m <sub>f</sub> (g) | Δ m  | V (g /cm <sup>2</sup> .h) | V(mm/an) |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|------|---------------------------|----------|
| NaCl                           |                    |                    |      |                           |          |
| 1 h                            | 31.67              | 31,18              | 0,49 | 0,1088                    | 1,2141   |
| 2 h                            |                    | 31 ,18             | 0,49 | 0,1088                    | 1,2141   |
| 3 h                            |                    | 31,18              | 0,49 | 0,1088                    | 1,2141   |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> |                    |                    |      |                           |          |
| 1 h                            | 31,67              | 31,05              | 0,62 | 0,1377                    | 1,5366   |
| 2 h                            |                    | 31,02              | 0,65 | 0,1444                    | 1,6113   |
| 3 h                            |                    | 31,00              | 0,67 | 0,1488                    | 1,6604   |



**Figure III.25:** Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Nickel en fonction du Temps des solutions  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{NaCl}$  à  $T= 30^\circ\text{C}$ .

**Tableau III.14:** Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Cobalt en fonction du Temps des solutions  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{NaCl}$  à  $T= 30^\circ\text{C}$ .

| Temps (h)                      | m <sub>0</sub> (g) | m <sub>f</sub> (g) | Δ m  | V (g /cm <sup>2</sup> .h) | V(mm/an) |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|------|---------------------------|----------|
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> |                    |                    |      |                           |          |
| 1 h                            | 35,60              | 34,82              | 0,78 | 0,1733                    | 1,9338   |
| 2 h                            |                    | 34,75              | 0,85 | 0,1888                    | 2,1068   |
| 3 h                            |                    | 34,68              | 0,92 | 0,2044                    | 2,2809   |
| NaCl                           |                    |                    |      |                           |          |
| 1 h                            | 35,60              | 34,19              | 1,41 | 0,2533                    | 2,8266   |
| 2 h                            |                    | 34,19              | 1,41 | 0,2533                    | 2,8266   |
| 3 h                            |                    | 34,19              | 1,41 | 0,2533                    | 2,8266   |

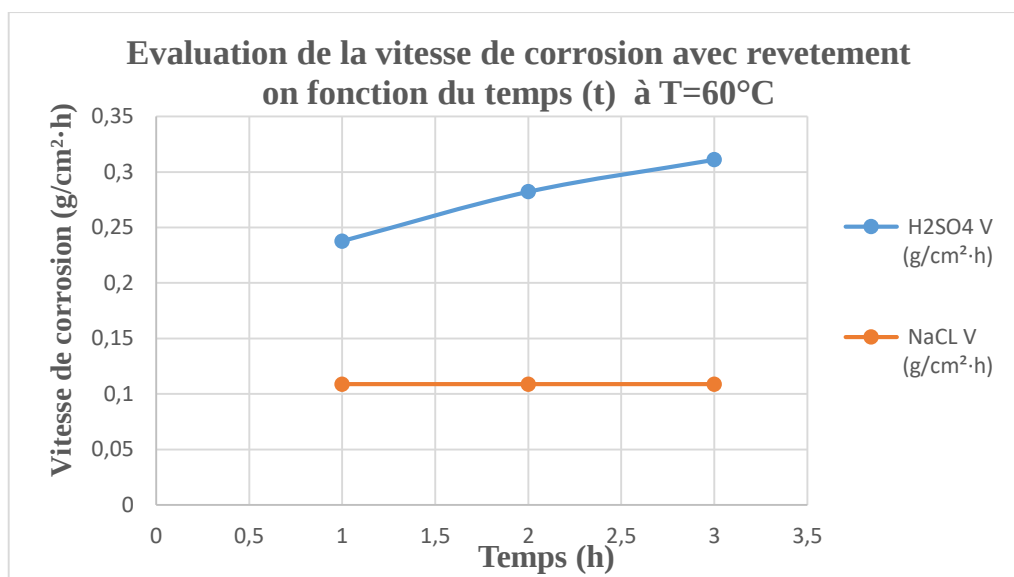


**Figure III.26:** Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Cobalt en fonction du Temps des solutions  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{NaCl}$  à  $T = 30^\circ\text{C}$ .

✓ A la température  $T = 60^\circ$

**Tableau III.15:** Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Nickel en fonction du Temps des solutions  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{NaCl}$  à  $T = 60^\circ\text{C}$ .

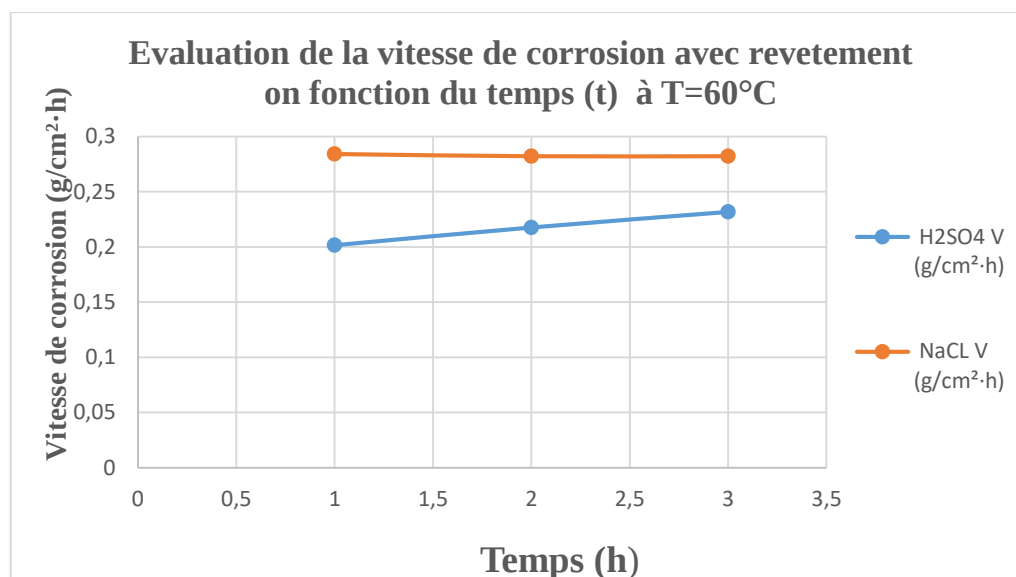
| Temps (h)                      | m <sub>0</sub> (g) | m <sub>f</sub> (g) | Δ m  | V (g /cm <sup>2</sup> .h) | V(mm/an) |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|------|---------------------------|----------|
| NaCl                           |                    |                    |      |                           |          |
| 1 h                            | 31,67              | 31,18              | 0,49 | 0,1088                    | 1,2141   |
| 2 h                            |                    | 31,18              | 0,49 | 0,1088                    | 1,2141   |
| 3 h                            |                    | 31,18              | 0,49 | 0,1088                    | 1,2141   |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> |                    |                    |      |                           |          |
| 1 h                            | 31,67              | 30,60              | 1,07 | 0,2377                    | 2,6525   |
| 2 h                            |                    | 30,40              | 1,27 | 0,2822                    | 3,1491   |
| 3 h                            |                    | 30,27              | 1,40 | 0,3111                    | 3,4716   |



**Figure III.27:** Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Nickel en fonction du Temps des solutions  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{NaCl}$  à  $T= 60^\circ\text{C}$ .

**Tableau III.16:** Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Cobalt en fonction du Temps des solutions  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{NaCl}$  à  $T= 60^\circ\text{C}$ .

| Temps (h)                      | m <sub>0</sub> (g) | m <sub>f</sub> (g) | Δ m  | V (g /cm <sup>2</sup> .h) | V(mm/an) |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|------|---------------------------|----------|
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> |                    |                    |      |                           |          |
| 1 h                            | 35,60              | 34 ,60             | 1,00 | 0,2016                    | 2,2497   |
| 2 h                            |                    | 34,52              | 1,08 | 0,2177                    | 2,4293   |
| 3 h                            |                    | 34,45              | 1,15 | 0,2318                    | 2,5867   |
| NaCl                           |                    |                    |      |                           |          |
| 1 h                            | 35,60              | 34,19              | 1,41 | 0.2842                    | 3,1714   |
| 2 h                            |                    | 34,19              | 1,41 | 0,2822                    | 3,1714   |
| 3 h                            |                    | 34,19              | 1,41 | 0,2822                    | 3,1714   |

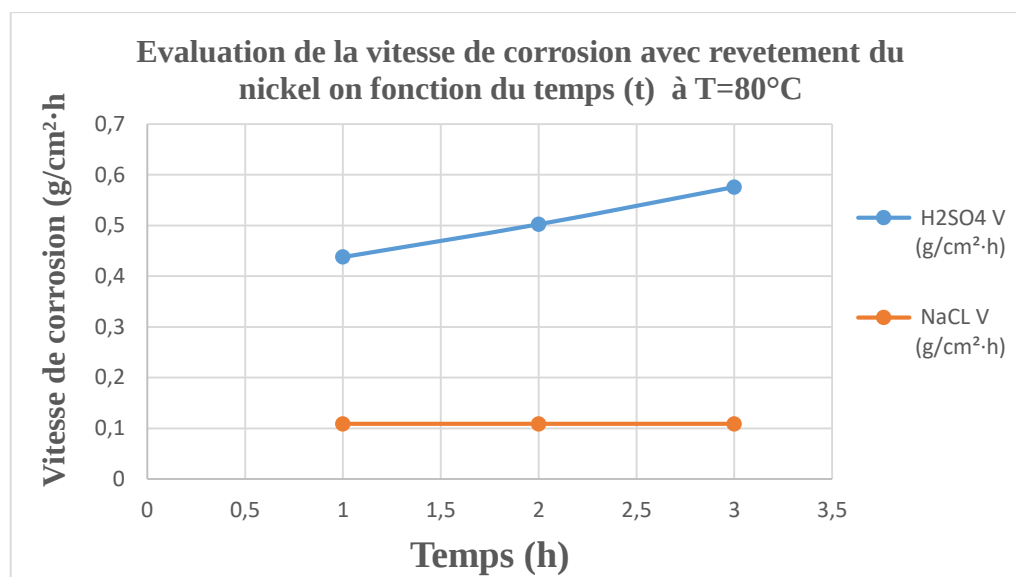


**Figure III.28:** Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Cobalt en fonction du Temps des solutions  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{NaCl}$  à  $T=60^\circ\text{C}$ .

✓ A la température  $T=80^\circ$

**Tableau III.17:** Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Nickel en fonction du Temps des solutions  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{NaCl}$  à  $T=80^\circ\text{C}$ .

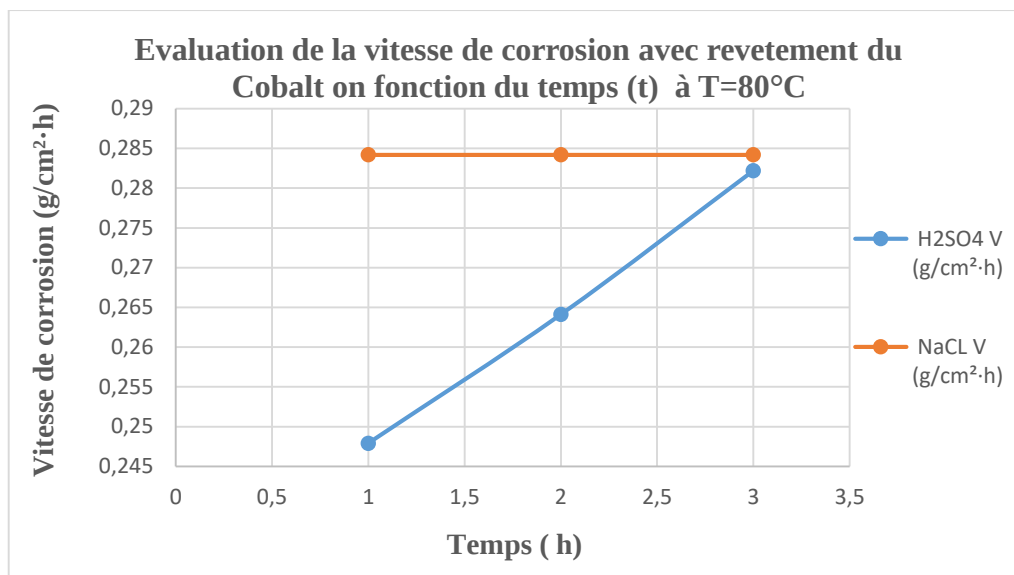
| Temps (h)                      | m <sub>0</sub> (g) | m <sub>f</sub> (g) | Δ m  | V (g /cm <sup>2</sup> .h) | V (mm/an) |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|------|---------------------------|-----------|
| NaCl                           |                    |                    |      |                           |           |
| 1 h                            | 31,67              | 31,18              | 0,49 | 0,1088                    | 1,2141    |
| 2 h                            |                    | 31,18              | 0,49 | 0,1088                    | 1,2141    |
| 3 h                            |                    | 31,18              | 0,49 | 0,1088                    | 1,2141    |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> |                    |                    |      |                           |           |
| 1 h                            | 31,67              | 29,70              | 1,97 | 0,4377                    | 4,8843    |
| 2 h                            |                    | 29,41              | 2,26 | 0,5022                    | 5,6041    |
| 3 h                            |                    | 29,08              | 2,59 | 0,5755                    | 6,4221    |



**Figure III.29:** Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Nickel en fonction du Temps des solutions H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et NaCl à T= 80°C.

**Tableau III.18:** Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Cobalt en fonction du Temps des solutions H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et NaCl à T= 80°C.

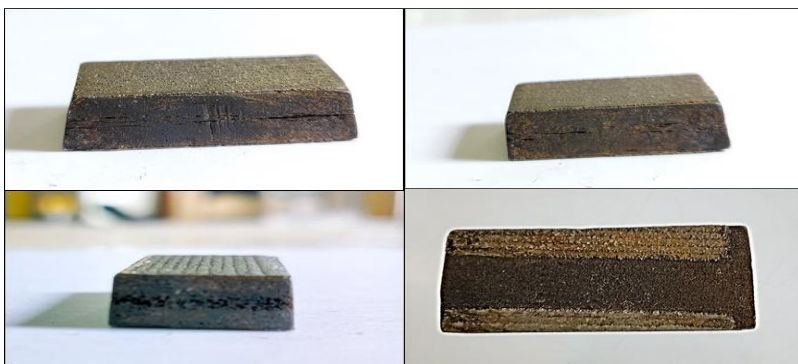
| Temps (h)                      | m <sub>0</sub> (g) | m <sub>f</sub> (g) | Δ m  | V (g /cm <sup>2</sup> .h) | V(mm/an) |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|------|---------------------------|----------|
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> |                    |                    |      |                           |          |
| 1 h                            | 35,60              | 34,37              | 1.23 | 0.2479                    | 2,7663   |
| 2 h                            |                    | 34,29              | 1,31 | 0,2641                    | 2,9471   |
| 3 h                            |                    | 34,20              | 1,40 | 0,2822                    | 3,1491   |
| NaCl                           |                    |                    |      |                           |          |
| 1 h                            | 35,60              | 34,19              | 1,41 | 0,2842                    | 3,1714   |
| 2 h                            |                    | 34,19              | 1,41 | 0,2842                    | 3,1714   |
| 3 h                            |                    | 34,19              | 1,41 | 0.2842                    | 3,1714   |



**Figure III.30:** Evaluation de la vitesse de corrosion du revêtement base Cobalt en fonction du Temps des solutions H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et NaCL à T= 80°C.



**Figure III.31:** Echantillons revêtu au nickel après l'attaque chimique



**Figure III.32:** Echantillons revêtu au Cobalt après l'attaque chimique

### ❖ Discussion

#### ✓ A la température 30 °C

- Nickel : La corrosion demeure stable en milieu NaCl avec une vitesse de  $0,1088 \text{ g/cm}^2\cdot\text{h}$  ( $1,2141 \text{ mm/an}$ ), tandis qu'une augmentation progressive est observée en milieu  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , passant de  $0,1377$  à  $0,1488 \text{ g/cm}^2\cdot\text{h}$  ( $1,5366$  à  $1,6604 \text{ mm/an}$ ). Le milieu sulfurique s'avère plus agressif.
- Cobalt : À l'inverse du nickel, le cobalt présente une corrosion plus élevée en milieu NaCl, avec une vitesse de  $0,2533 \text{ g/cm}^2\cdot\text{h}$  ( $2,8266 \text{ mm/an}$ ) quasi constante. En  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , la corrosion augmente modérément de  $0,1733$  à  $0,2044 \text{ g/cm}^2\cdot\text{h}$  ( $1,9338$  à  $2,2809 \text{ mm/an}$ ). Le cobalt est ainsi plus sensible aux ions chlorure.

#### ✓ A la température 60 °C

- Nickel : En milieu NaCl, les valeurs restent stables malgré l'élévation de température. En  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , une forte accélération est constatée, la vitesse de corrosion atteignant  $0,3111 \text{ g/cm}^2\cdot\text{h}$  et la pénétration  $3,4716 \text{ mm/an}$  après 3 heures. La température amplifie significativement la corrosion en milieu acide.

- Cobalt: Le comportement demeure inchangé, la corrosion est plus élevée en NaCl avec une pénétration de 3,1714 mm/an contre 2,5867 mm/an en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. La sensibilité aux ions chlorure persiste.
- ✓ **A la température 80 °C**
  - Nickel : La corrosion atteint son maximum en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> avec une vitesse de pénétration de 6,4221 mm/an, représentant la valeur la plus élevée enregistrée. En NaCl, les valeurs restent faibles et constantes.
  - Cobalt : Les vitesses de corrosion deviennent très proches dans les deux milieux (environ 3,15 mm/an), témoignant d'une convergence des effets corrosifs à température élevée.

### III.6 Conclusion

L'étude démontre que la vitesse de corrosion de l'acier au carbone est significativement influencée par l'agressivité du milieu, la concentration, la température et la durée d'exposition. Les essais gravimétriques indiquent une augmentation de la corrosion avec l'accroissement de ces paramètres. Le milieu acide sulfurique se montre bien plus agressif que le milieu salin chloruré, entraînant des pertes de masse et des vitesses de corrosion supérieures. L'application de revêtements métalliques améliore notablement la résistance à la corrosion. Le nickel offre une protection optimale en milieu acide, tandis que le cobalt présente une efficacité intéressante en milieu salin, attribuable à la formation de couches passives. Ces résultats confirment l'intérêt des revêtements métalliques pour limiter la dégradation des métaux en environnements corrosifs. Ils constituent une aide au choix des revêtements adaptés aux conditions industrielles et ouvrent la voie à des recherches complémentaires sur d'autres types de revêtements et méthodes d'analyse.

***Conclusion générale***

### Conclusion générale

Ce travail de recherche a permis d'étudier les mécanismes de la corrosion industrielle et d'évaluer l'efficacité protectrice de revêtements bimétalliques à base de nickel et de cobalt (Ni-Co) comme solution de durabilité. Après avoir posé les fondements théoriques des réactions électrochimiques et cartographié les différentes formes de dégradation (uniforme, par piqûres ou galvanique), l'étude s'est concentrée sur la réponse de ces dépôts face à des milieux sévères. Les essais d'immersion menés en solutions acides et salines, quantifiés par la méthode gravimétrique de perte de masse sous diverses conditions de température et de concentration, ont démontré une excellente inertie chimique et une diminution drastique des vitesses de corrosion des substrats protégés. Cette solution technologique confirme ainsi son fort potentiel industriel pour prolonger la durée de vie des équipements, optimiser les coûts de maintenance et sécuriser les installations en conditions agressives. En guise de perspectives, ce travail gagnerait à être prolongé par des analyses microstructurales au microscope électronique à balayage et des caractérisations électrochimiques complémentaires, telles que la spectroscopie d'impédance, afin d'élucider plus finement les mécanismes cinétiques à l'interface film-électrolyte.

## ***Références bibliographiques***

**Références :**

- [1] Bouhria, K. (2022). Corrosion et protections des métaux. (Mémoire de Master, Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf).
- [2] Allali, M., & HADJ, A. N. (2020). Synthèse bibliographique sur les inhibiteurs pour lutter contre la corrosion électrochimique. (Thèse de doctorat, Université Kasdi-Merbah Ouargla).
- [3] Prabhu, S. (2021). 8 Things to Know and Understand About Iron Corrosion. Corrosion Journal.
- [4] El Mokhtar Mansouri, M. (2019). Étude de corrosion en utilisant les inhibiteurs. (Mémoire de Master, Université de Biskra).
- [5] Publisher. (2021). Corrosion des aciers et leur protection. Éditions universitaires européennes. ISBN: 978-620-3-42842-1
- [6] Kiani Khouzani, M., Bahrami, A., Hosseini-Abari, A., Khandouzi, M., & Taheri, P. (2019). Microbiologically influenced corrosion of a pipeline in a petrochemical plant. *Metals*, 9(4), 459.
- [7] Daufin, G., & Talbot, J. (1971). Etude de quelques problèmes de corrosion dans l'industrie laitière. Première partie. Généralités sur la corrosion des métaux et alliages. *Le Lait*, 51(507), 375-398.
- [8] Diler, E. (2012). Étude de la corrosion atmosphérique du zinc et zinc-magnésium, en milieu marin (Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale-Brest)
- [9] Sabatier, G., Ragusa, F., & Antz, H. (2006). Manuel de technologie mécanique. Dunod.
- [10] Flows. (2025). Le navire à problèmes Sedrata libéré après trois ans d'enchaînement.
- [11] Ployhar, S. J., Gopalapillai, B., Teodoros, L. C., Orco, G. D., Kumar, A., Gupta, D., ... & Jadhav, M. A. (2014). ITER components cooling: Satisfying the distinct needs of systems and components. *Fusion Engineering and Design*, 89(9-10), 1975-1978.

- [12] Bouzekri, O. (2016). Contribution à l'étude de l'inhibition de la corrosion d'un acier c38 en milieu acide chlorhydrique molaire par deux composés organiques dérivés de pyrazolesthiazoles. (Mémoire de Master, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah).
- [13] Hanane, Y., & Souaad, B. (2020). Etude des inhibiteurs de corrosion pour protéger l'acier ordinaire en milieu agressif (Thèse de doctorat, Faculté des Sciences et Technologies).
- [14] Wayne, B. (2023). Tackling Corrosion Cost: Water Treatment Chemicals. Clean chemistry.
- [15] Cramer, S. D., & Covino Jr, B. S. (Eds.). (2003). Corrosion: fundamentals, testing, and protection. ASM international.
- [16] Iqra, Z. Awan & Abdul Qadeer, K, J. (2018). Corrosion. Occurrence & Prevention. Chem.Soc.Pak, Vol. 40, No. 04, 2018 602.
- [17] Slideshare. (n.d.). Cavitation in pumps: Describes the conditions for cavitation.
- [18] Oulabbas, A. (2019). Effet des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers ordinaires dans deux milieux acides. (Thèse de doctorat, Université de Badji Mokhtar, Annaba).
- [19] Lahouel, M. B, Hammadi M. (2021). Évaluation de la corrosion des matériaux utilisés en aéronautique. (Mémoire de Master, université Saad Dahlab De Blida).
- [20] Landolt, D. (2003). Corrosion et chimie de surfaces des métaux (Vol. 12, p. 413). EPFL Press.
- [21] SACOME. (2024). Comment éviter la corrosion intergranulaire ?.
- [22] Editorial Feature. (2001). Corrosion Fatigue. Metallic Corrosion.
- [23] Corrosion, D. M. (2005). ENSPM Formation Industrie-IFP Training. France.
- [24] Innovation24. (2024). Comment gérer efficacement l'hydrogène.
- [25] Fontana, M. G. (1986). Corrosion engineering. McGraw-Hill International.
- [26] Jones, D. A. (1996). Principles and prevention of corrosion. Prentice Hall.
- [27] Pourbaix, M. (1974). Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions. NACE.

- [28] Xie, C., Han, J., Hou, Y., Sun, F., & Ogle, K. (2026). The spontaneous passivation of multi-principal element alloys III: Influence of 5 at% elemental additions in the CoCrFeNi family. *Corrosion Science*, 113712.
- [29] Ssalloy Steel. (n.d.). How long does it take for copper to turn green?
- [30] Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: An introduction*. John Wiley & Sons.
- [31] Lédion, J. Blériot, P. (2023). *Inhibiteurs de corrosion dans le traitement des circuits d'eau*.
- [32] Khiati, Z. (2023). *Corrosion et protection des métaux*. Chemin Vicinal N° 9, Oran, ESGEE.
- [33] Ahmad, Z. (2006). *Principles of corrosion engineering and corrosion control*. Elsevier. p280.310.
- [34] D.J. Duquette, (2006). *Encyclopedia of Materials. Science and Technology* (2nd ed, P 1-7).
- [35] Gacem, I. (2019). *Électrodéposition et caractérisation d'un dépôt composite Ni /particule solide*. (Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra).
- [36] Bouzekri, O. (2016). *Contribution à l'étude de l'inhibition de la corrosion d'un acier C38 en milieu acide chlorhydrique molaire par deux composés organiques dérivés de pyrazoles-Thiazoles*. (Mémoire de Master, Université Sidi Mohammed Ben Abdallah).
- [37] Gacem, I. (2019). *Électrodéposition et caractérisation d'un dépôt composite Ni /particule solide*. (Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra).
- [38] Schütze, M., & Schütze, S. (2013). *Corrosion Protection by Organic Coatings*. Woodhead Publishing.
- [39] Zhang, Q., et al. (2017). "Electrochemical corrosion and microstructural characterization of cobalt-based alloy coatings deposited by laser cladding. *Applied Surface Science* 400, pp. 397-405.
- [40] ENSAD. (2018). *Les céramiques et les verres*.

- [41] Ferkous, H., Abdennouri, A., Ghouafria, I., & Madaci, A. (2025). Metal– Organic Frameworks Corrosion Mitigation Potential in Maritime Structures. In *Advancing Corrosion Control with Metal– Organic Frameworks: Beyond Rust* (pp. 223–243). American Chemical Society.
- [42] Everbrilliant. (n.d.). Penetration grade.
- [43] BOUTELDJA, M. (2016). Contribution à l'étude de l'utilisation des inhibiteurs dans la lutte contre la corrosion (Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla).
- [44] Rauta Group. (n.d.). Revêtements polymères pour bardages et toitures en acier.
- [45] Campa, A. (1971). *Protection des Surfaces Métalliques Contre la Corrosion, Technologie Professionnelle pour les Mécaniciens*, (Tome 2). Paris.
- [46] Romain, T. Bialek Peinture. (2025). L'importance du vernis dans la retouche peinture carrosserie pour protéger les peintures de voiture.
- [47] Pierre, R. NACE International. (2017). *Corrosion Basics. An Introduction to Corrosion Science and Engineering*, (3e éd. Chapitre 11).
- [48] Revie, R.W. & Uhlig, H.H. (2008). *Corrosion and Corrosion Control*. (4e éd., Wiley. Chapitre 12).
- [49] SC 15 - Pipelines & Tanks. NACE SP0169. (2019). *Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems*.
- [50] SC 15 - Pipelines & Tanks NACE SP0177. (2012). *Applications offshore*. Elsevier.
- [51] Petroleum, P. (2015). *Natural Gas Industries. Cathodic Protection of Pipeline Systems. Part 1: On-Land Pipelines*. NEQ, Standard ISO, 15589-1.
- [52] Emelu, V. O., Emelu, C., Babatunde, B. B., Wali, E., & Afolabi, O. O. (2023). Associated Disaster Risk of Inadequate Corrosion Control (Cathodic Protection) on Pipelines in Port Harcourt, Nigeria: A quantitative Approach. *Journal of Corrosion Studies*.

- [53] Bensabra, D. H. (2016). Cours de corrosion et protection des métaux. Université de Jijel, p 3-4.
- [54] Li, J., Kong, Z., Liu, X., Zheng, B., Fan, Q. H., Garratt, E., ... & Jin, H. (2021). Strategies to anode protection in lithium metal battery: A review. *InfoMat*, 3(12), 1333-1363.
- [55] Almabrouk, A. M., Eisay, A. R., Hassan, A. I., & Moftah, E. (2024). Cathodic protection performance assessment for crude oil transportation pipeline from Sarir Oilfield to Tobruk Refinery. *Tobruk University Journal of Engineering Science*, 5(2), 32-50.
- [56] Faustin, M. (2013). Etude de l'effet des alcaloïdes sur la corrosion de l'acierC38 en milieu acide chlorhydrique 1M. (Thèse de doctorat, Cayenne).
- [57] Yue, X., Zhang, M., Wang, T., & Su, X. (2023). A review paper on the research status and development trend of corrosion inhibitors. *International Journal of Energy*, 3, 24-27.
- [58] Fontana, M. G., & Greene, N. D. (1986). Corrosion engineering (2nd ed., chap. 11). McGraw-Hill.
- [59] Sastri, V. S. (1998). Corrosion inhibitors : principles and applications (vol. 1). Wiley.
- [60] Uhlig, H. H., & Revie, R. W. (1984). Corrosion and corrosion control. (Pp.195-204 pour factures influençant l'efficacité).
- [61] Ali, B, & Başak, H. (2020). *World Journal of Advanced Research and Reviews*.DOI: 29.1.4297.
- [62] Raja, P. B., Ismail, M., Ghoreishiamiri, S., Mirza, J., Ismail, M. C., Kakooei, S., & Rahim, A. A. (2016). Reviews on corrosion inhibitors: A short view. *Chemical Engineering Communications*, 203(9), 1145-1156.
- [63] Sastri, V. S. (1998). Corrosion Inhibitors. Wiley. (Chap. 4 : critères/méthodologie).

- [64] Chakri, S. (2015). Compréhension des mécanismes d'inhibition de la corrosion des armatures métalliques des bétons par des molécules d'origine biologique (Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI).
- [65] Verma, C., Ebenso, E. E., & Quraishi, M. A. (2020). Molecular structural aspects of organic corrosion inhibitors: Influence of–CN and–NO<sub>2</sub> substituents on designing of potential corrosion inhibitors for aqueous media. *Journal of Molecular Liquids*, 316, 113874.
- [66] Bouraoui, M. M., Chettouh, S., Chouchane, T., & Khellaf, N. (2019). Inhibition efficiency of cinnamon oil as a green corrosion inhibitor. *Journal of Bio-and Tribo Corrosion*, 5(1), 28.
- [67] Bouzid, E., Hadjeb Laissaoui, D., Djellab, R. (2021). Caractérisation et étude du pouvoir inhibiteur d'un base de chiffé de type anilinesalicylidene. (Mémoire de Master, Université Houari Boumediene).
- [68] Savary, A., & Robin, S. (1964). Étude de l'adsorption physique par spectroscopie infrarouge. *Journal de physique*, 25(6), 719-724.
- [69] Douadi, R., & Beladjal, A. (2021). Étude de l'efficacité d'inhibiteur de corrosion CHAMPION utilisé dans le champ de Hassi Messaoud. (Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah –Ouargla).
- [70] Wang, J., Zhang, Y., Li, X., Liu, Z., & Chen, H. (2019). Corrosion behavior of laser clad Ni-based coatings. *Surface & Coatings Technology*, 364, 225–235.