



UNIVERSITÉ  
DE BISKRA

Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des sciences et de la technologie  
Département de chimie industrielle

# MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine : Sciences et Technologies**

**Filière : Génie des procédés**

**Spécialité : Génie des procédés d'environnement**

Réf. : Abdelouaheb Tourir « Synthèse et caractérisations des inhibiteurs naturels de corrosion », Mémoire de Master, Université Mohamed khider de Biskra, Algérie(2025).

---

Présenté et soutenu par :  
**TOUIR ABDELOUAHEB**  
Le : 16/06 /2025

## Synthèse et caractérisation des inhibiteurs naturels de corrosion (Start-up)

---

### Jury :

|    |                  |     |                      |                                 |
|----|------------------|-----|----------------------|---------------------------------|
| Dr | NOUIOUA Asma     | MCA | Université de Biskra | Président                       |
| Dr | GHEBGHOUB Fatima | MCA | Université de Biskra | Examineur                       |
| Dr | BOUREMEL Cherifa | MCA | Université de Biskra | Rapporteur                      |
| Dr | SAKRI Adel       | MCA | Université de Biskra | Rapporteur                      |
| Dr | HAMDI Fella      | MCA | Université de Biskra | Représentant<br>de l'incubateur |

**Année universitaire : 2024- 2025**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## **Remerciement**

Tout d'abord, nous rendons grâce à Allah Tout-Puissant de nous avoir accordé la patience, le courage, la santé et la compréhension nécessaires à la réalisation de ce mémoire. Ce travail a été mené au sein du Laboratoire de Chimie Industrielle de l'Université de Biskra, au Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides (CRSTRA) de Biskra, ainsi qu'au Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico-Chimiques (CRAPC) de Biskra.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos encadrants, Dr. Bouremal Cherifa et Dr. Sakri Adel, pour leurs encouragements, leurs conseils et leur accompagnement tout au long de ce travail. Nous leur adressons notre respect et notre reconnaissance sincère.

Nos remerciements vont également au Dr. Hamrelain Samir, responsable des analyses chimiques et physiques au CRAPC, pour son aide précieuse.

Nous adressons tous nos remerciements et notre respect aux membres du jury qui nous ont honorés par leur participation à l'évaluation de ce travail.

Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance à tous les enseignants de la Faculté des Sciences et de la Technologie, pour la qualité de l'encadrement et de la formation reçue durant notre parcours universitaire. Nous citons particulièrement Dr. Kalthoum Adaïka et Dr. Asmaa Nouioua et notre éminent enseignant, Monsieur le DR : Ben Jaouahdou Chawki.

Enfin, je souhaite remercier du fond du cœur ma famille, qui n'a cessé de me soutenir durant toutes ces années d'études, en particulier ma chère mère et ma sœur aînée, qui ont toujours été à mes côtés.

## *Dédicace*

*Tout d'abord, je tiens à remercier Allah  
De m'avoir donné la force et le courage de mener à  
bien ce modeste travail.*

*Je tiens à dédier cet humble travail à :  
Mon père et mon frère aux paradis INCHA'ALLAH qui  
me manquent aujourd'hui.*

*Ma mère qui m'a soutenu jusqu'à ce jour.*

*Mes chères sœurs Que Dieu le garde.*

*Mes chers frères pour leurs encouragements  
permanents.*

*Tous mes amis, j'exprime mon tendre et sincère  
remerciement. Je vous offre ce travail en souvenir du  
bon vieux temps où on a passé ensemble. Puisse Dieu  
vous procurer bonheur, succès et prospérité.*

*Notre promoteur Dr Cherifa. BOURMAL qui a accepté  
de prendre soin de nous qui nous a aidé dans notre  
travail. Merci beaucoup pour votre gentillesse, votre  
compétence et votre compréhension.*

*Tous les professeurs qui nous ont enseigné car si nous  
sommes là aujourd'hui c'est grâce à eux tous. alors un  
grand merci à eux.*

*Mes chères collègues qui sont restés toujours serviables  
surtout aux moments difficiles tout au long de mon  
cursus universitaire. A tous ceux qui, par un mot, m'ont  
donné la force de continuer*

## Sommaire

|                                                         |           |
|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Sommaire</b>                                         | <b>I</b>  |
| <b>Liste des figures</b>                                | <b>IV</b> |
| <b>Liste des tableaux</b>                               | <b>V</b>  |
| <b>Liste des abréviations</b>                           | <b>V</b>  |
| <b>Introduction générale</b>                            | <b>1</b>  |
| <b>Chapitre I : Généralités sur la corrosion</b>        |           |
| <b>I.1.Introduction</b>                                 | <b>4</b>  |
| <b>I.2. Définition de corrosion</b>                     | <b>4</b>  |
| <b>I.3..Facteurs de corrosion</b>                       | <b>5</b>  |
| I.3.1. Effet d’humidité                                 | <b>5</b>  |
| I.3.2. Effet de la température                          | <b>6</b>  |
| I.3.3. Effet d’acidité                                  | <b>6</b>  |
| <b>I.4. Type de Corrosion</b>                           | <b>7</b>  |
| I.4.1. Corrosion chimique (sèche)                       | <b>7</b>  |
| I.4.2. Corrosion électrochimique (humide)               | <b>8</b>  |
| I.4.3. Corrosion biochimique (bactérienne)              | <b>9</b>  |
| I.4.4. Corrosion accompagnée d’érosion (mécanique)      | <b>9</b>  |
| <b>I.5. Aspect morphologique de la corrosion</b>        | <b>10</b> |
| I.5.1. Corrosion uniforme ou généralisée                | <b>10</b> |
| I.5.2. Corrosion localisée                              | <b>10</b> |
| I.5.3. Corrosion galvanique (corrosion bimétallique)    | <b>11</b> |
| I.5.4. Corrosion par piquûre                            | <b>11</b> |
| I.5.5 Corrosion inter granulaire                        | <b>12</b> |
| I.5.6. Corrosion sélective                              | <b>13</b> |
| I.5.7. Corrosion caverneuse                             | <b>13</b> |
| I.5.8. Corrosion filiforme                              | <b>14</b> |
| I.5.9. Corrosion sous contrainte                        | <b>14</b> |
| <b>Chapitre II : Lutte contre la corrosion</b>          |           |
| <b>II.1. Introduction</b>                               | <b>17</b> |
| <b>II.2. Moyens de protection contre la corrosion</b>   | <b>17</b> |
| II.2.1. Prévention par un choix judicieux des matériaux | <b>17</b> |
| II.2.1.1 Protection par la géométrie des pièces         | <b>18</b> |
| II.2.1.2. Élimination des zones humides                 | <b>18</b> |
| II.2.2. Protection cathodique                           | <b>18</b> |
| II.2.3. Protection anodique                             | <b>19</b> |
| II.2.4. Protection par revêtements                      | <b>20</b> |

|                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| II.2.5. Inhibiteurs de corrosion                                      | 20        |
| II.2.5.1 Historique                                                   | 20        |
| II.2.5.2 Définition                                                   | 21        |
| II.2.5.3. Conditions d'utilisation                                    | 21        |
| II.2.5.4. Propriétés des inhibiteurs                                  | 22        |
| II.2.5.5. Domaines d'utilisation                                      | 22        |
| II.2.5.6. Classes d'inhibiteurs                                       | 22        |
| II.2.5.6.1. Classement selon la nature de l'inhibiteur                | 24        |
| II.2.5.6.1.1. Les inhibiteurs organiques                              | 24        |
| II.2.5.6.1.2. Les inhibiteurs minéraux                                | 24        |
| II.2.5.6.2. Classement selon le mécanisme d'action                    | 25        |
| II.2.5.6.2.1. Mécanisme d'action électrochimique                      | 25        |
| II.2.5.6.2.2. Mécanismes d'action inter-faciale                       | 26        |
| II.2.5.6.3. Inhibition de corrosion par les substances naturelles     | 27        |
| II.2.5.6.3.1. Extraits principaux dans l'inhibiteur de corrosion      | 27        |
| II.2.5.6.3.2. Exemple d'extraits                                      | 27        |
| II.2.5.6.3.3. Avantages et limites des extraits                       | 27        |
| <b>Chapitre III : Matériels et méthodes</b>                           |           |
| <b>III.1. Introduction</b>                                            | <b>30</b> |
| <b>III.2. Préparation des échantillons</b>                            | <b>30</b> |
| <b>III.3. Méthode d'extraction sélectionnée</b>                       | <b>32</b> |
| III.3.1. Extraction par l'appareil de Soxhlet multiples               | 32        |
| <b>III.4. Caractérisation des extraits</b>                            | <b>34</b> |
| III.4.1. Chromatographie GC-MS                                        | 34        |
| III.4.2. Spectroscopie FTIR                                           | 35        |
| <b>III.5. Analyse phytochimique</b>                                   | <b>36</b> |
| III.5.1. Dosage des teneurs en phénols et flavonoïdes                 | 36        |
| III.5.1.1. Dosage de phénols totaux                                   | 36        |
| III.5.1.1.1. Préparation des solutions                                | 36        |
| III.5.1.1.2. Mode opératoire                                          | 37        |
| III.5.1.1.3. Préparation de la gamme d'étalon de l'acide gallique     | 37        |
| III.5.1.2. Dosage de Flavonoïdes totaux                               | 38        |
| III.5.1.2.1. Préparation des solutions                                | 38        |
| III.5.1.2.2. Mode opératoire                                          | 38        |
| III.5.1.2.3. Gamme d'étalon de la Quercetine                          | 38        |
| III.5.2. Dosage des tanins condensés                                  | 39        |
| III.5.2.1. Mode opératoire                                            | 39        |
| III.5.3. Activité biologie (DPPH radical libre)                       | 39        |
| III.5.3.1. Principe de la réaction                                    | 39        |
| III.5.3.2. Instrument utilisés                                        | 39        |
| III.5.2.3. Réactifs utilisés                                          | 39        |
| III.5.2.4. Mode opératoire                                            | 39        |
| <b>III.6. Préparation de l'acier</b>                                  | <b>40</b> |
| III.6.1. Aciers étudiés                                               | 40        |
| III.5.2. Compositions chimique de l'acier XC42 en (%)                 | 40        |
| <b>III.7. Étude d'effets des extraits sur l'acier en milieu acide</b> | <b>40</b> |
| III.7.1. Préparation des solutions d'immersion pour l'acier XC42      | 40        |

|                                                                                                        |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>III.8. Analyses de l'acier XC42 après immersion dans des solutions d'HCl contenant des extraits</b> | <b>41</b> |
| III.8.1. Microscopie électronique à balayage (MEB)                                                     | 41        |
| III.8.2. Microscopie à Force Atomique (AFM)                                                            | 42        |

## Chapitre IV : Résultats et discussions

|                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>IV. Résultats et discussions</b>                                          | <b>44</b> |
| <b>IV.1. Dosages des teneurs des flavonoïdes et les composés phénoliques</b> | <b>44</b> |
| IV.1.1. Teneurs des flavonoïdes                                              | 44        |
| IV.1.1.1 Courbe d'étalonnage de Quercetine                                   | 44        |
| IV.1.2. Teneur en polyphénol                                                 | 45        |
| <b>IV.2. Teneurs de tanin</b>                                                | <b>45</b> |
| <b>IV.3. Analyse spectroscopique FTIR</b>                                    | <b>46</b> |
| <b>IV.4 Analyse chromatographique GC-MS</b>                                  | <b>47</b> |
| <b>IV.5. Analyse gravimétrique</b>                                           | <b>48</b> |
| <b>IV.6. Etude micrographique (MEB-AFM)</b>                                  | <b>49</b> |
| <b>Conclusion générale</b>                                                   | <b>52</b> |
| <b>Référence bibliographiques</b>                                            | <b>54</b> |

## Liste des figures

### Chapitre I

|                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figure I.1</b> : Mécanisme de la corrosion atmosphérique. | <b>8</b>  |
| <b>Figure I.2</b> : Corrosion généralisé.                    | <b>10</b> |
| <b>Figure I.3</b> : Corrosion localisée.                     | <b>11</b> |
| <b>Figure I.4</b> : Corrosion galvanique.                    | <b>11</b> |
| <b>Figure I.5</b> : Corrosion par piquûre.                   | <b>12</b> |
| <b>Figure I.6</b> : Corrosion inter granulaire.              | <b>12</b> |
| <b>Figure I.7</b> : Corrosion sélective.                     | <b>13</b> |
| <b>Figure I.8</b> : Corrosion caverneuse.                    | <b>13</b> |
| <b>Figure I.9</b> : Corrosion filiforme.                     | <b>14</b> |
| <b>Figure I.10</b> : Corrosion sous contrainte.              | <b>15</b> |

### Chapitre II

|                                                                                                                                         |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figure II.1</b> : Principe de la protection cathodique.                                                                              | <b>19</b> |
| <b>Figure II.2</b> : Principe de la protection anodique.                                                                                | <b>19</b> |
| <b>Figure. II.3.</b> Classement des inhibiteurs de corrosion.                                                                           | <b>23</b> |
| <b>Figure. II.4.</b> Formation des couches barrières cathodiques (A) et anodiques (B).                                                  | <b>26</b> |
| <b>Figure. II.5.</b> Représentation schématique des modes d'adsorption de molécules organiques inhibitrices sur une surface métallique. | <b>26</b> |

### Chapitre III

|                                                                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figure III.1</b> : Echantillons des feuilles d'ortie avant et après le broyage.                                                 | <b>30</b> |
| <b>Figure III.2</b> : Echantillons des feuilles de tomate avant et après le broyage.                                               | <b>31</b> |
| <b>Figure III.3</b> : Echantillon roulier dans un papier absorbant.                                                                | <b>31</b> |
| <b>Figure III.4</b> : Appareil de Soxhlet multiples.                                                                               | <b>32</b> |
| <b>Figure III.5</b> : Les ballons d'ébullition ainsi que les cartouches contenant les échantillons ont été placés dans l'appareil. | <b>32</b> |
| <b>Figure III.6</b> : La fin de l'extraction et les échantillons ont été placés dans des flacons en verre.                         | <b>33</b> |
| <b>Figure III.7</b> : Chromatographie GC-MS SHIMADZU Nexis GC-2030.                                                                | <b>34</b> |
| <b>Figure III.8</b> : Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) Agilent Cary 630.                                   | <b>35</b> |
| <b>Figure III.9</b> : Préparation des extraits pour l'analyse des composés phénoliques et flavonoïdiques.                          | <b>37</b> |
| <b>Figure III.10</b> : Spectroscopie UV-Visible.                                                                                   | <b>38</b> |
| <b>Figure III.11</b> : Spectrophotomètre-lecteur microplaque Multiskan Sky.                                                        | <b>39</b> |
| <b>Figure III.12</b> : Pièces d'acier XC42 avant et après polissage.                                                               | <b>40</b> |
| <b>Figure III.13</b> : Etude gravimétrique.                                                                                        | <b>41</b> |
| <b>Figure III.14</b> : Microscope Electrique à Balayage (MEB).                                                                     | <b>42</b> |
| <b>Figure III.15</b> : Microscopie à Force Atomique (AFM).                                                                         | <b>42</b> |

## Chapitre IV

|                                                                                                                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Figure IV.2</b> : Courbe d'étalonnage d'acide gallique.                                                                                                              | <b>44</b> |
| <b>Figure IV.2</b> : Courbe d'étalonnage d'acide gallique.                                                                                                              | <b>45</b> |
| <b>Figure IV.3</b> : Courbe d'étalonnage pour déterminer la teneur en tanin.                                                                                            | <b>46</b> |
| <b>Figure IV.4</b> : Spectres infrarouge (FTIR) des extraits préparés.                                                                                                  | <b>47</b> |
| <b>Figure IV.5</b> : Analyse chromatographique GC-MS des extraits préparés M(T+O).                                                                                      | <b>48</b> |
| <b>Figure IV.6</b> : Microstructure par le MEB de l'acier XC42 immergé dans un milieu corrosif de 1M de HCl sans inhibiteur et avec 300ppm de l'extrait M (inhibiteur). | <b>49</b> |
| <b>Figure IV.7</b> : Microstructure par AFM de l'acier XC42 immergé dans un milieu corrosif de 1M de HCl sans inhibiteur et avec 300ppm de l'extrait M (inhibiteur).    | <b>50</b> |

## Liste des tableaux

### Chapitre I

|                                                            |          |
|------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Tableau I.1</b> : Les principaux facteurs de corrosion. | <b>5</b> |
|------------------------------------------------------------|----------|

### Chapitre III

|                                                            |           |
|------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tableau III.1</b> : Composition de l'acier XC42 étudié. | <b>40</b> |
|------------------------------------------------------------|-----------|

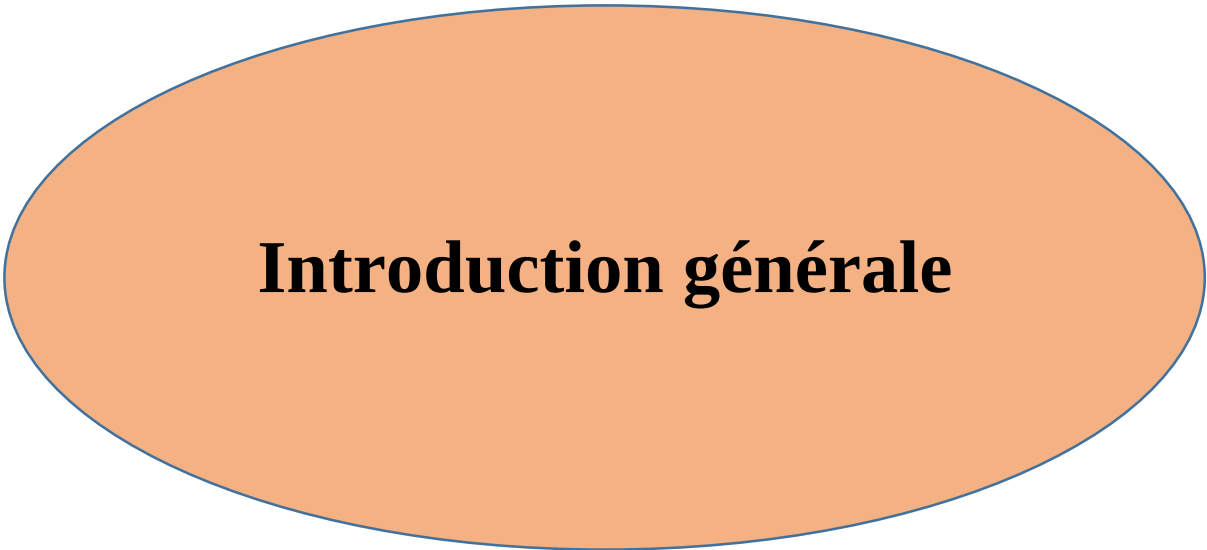
### Chapitre IV

|                                                                                                                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tableau IV.1</b> : Teneur en flavonoïdes dans les extraits préparés.                                                                                                           | <b>44</b> |
| <b>Tableau IV.2</b> : Teneur en phénols dans les extraits préparés.                                                                                                               | <b>45</b> |
| <b>Tableau IV.3</b> : Teneur en composés tanin dans les extraits préparés.                                                                                                        | <b>46</b> |
| <b>Tableau IV.4</b> : Vitesses de corrosion et efficacités inhibitrices calculées de l'acier XC42immergé dans une solution 1M de HCL avec l'extrait à différentes concentrations. | <b>49</b> |

## Liste des abréviations

|             |                                                |              |                                                                      |
|-------------|------------------------------------------------|--------------|----------------------------------------------------------------------|
| <b>ISO</b>  | International Organization for Standardization | <b>GC-MS</b> | chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse |
| <b>NACE</b> | National Association of Corrosion Engineers    | <b>FTIR</b>  | La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier                 |
| <b>PH</b>   | Potenciel hydrogen                             | <b>MEB</b>   | microscopie électronique à balayage                                  |
| <b>T</b>    | Tomate                                         | <b>AFM</b>   | Microscopie a force atomique                                         |
| <b>O</b>    | Ortie                                          | <b>BHA</b>   | butylhydroxyanisole                                                  |
| <b>M</b>    | Mélange                                        | <b>BHT</b>   | butylhydroxytoluène                                                  |
| <b>NIST</b> | National Institute of Standards and Technology | <b>SM</b>    | Solution mere                                                        |
| <b>Abs</b>  | Absorbance                                     | <b>Cons</b>  | concentration                                                        |
| <b>mg</b>   | milligramme                                    | <b>ml</b>    | millitre                                                             |
| <b>nm</b>   | nanometer                                      | <b>ppm</b>   | Parties par million                                                  |
| <b>M</b>    | Mollaire                                       | <b>V</b>     | Volume                                                               |

|              |                      |            |                         |
|--------------|----------------------|------------|-------------------------|
| <b>mm</b>    | millimètre           | <b>Cr</b>  | Vitesse                 |
| <b>EP</b>    | Potentiel électrique | <b>EI</b>  | Efficacité d'inhibiteur |
| <b>Icorr</b> | Vitesse de corrosion | <b>D</b>   | Dilution                |
| <b>Ox</b>    | Oxidant              | <b>Red</b> | Réducteur               |



# **Introduction générale**

## Introduction générale

La corrosion est un phénomène naturel résultant des interactions chimiques et électrochimiques entre un matériau, généralement métallique, et son environnement. Elle est souvent causée par des agents tels que l'humidité, l'oxygène ou d'autres substances chimiques présentes dans l'air ou dans des solutions, pouvant compromettre la solidité et la longévité des matériaux. Bien que complexe, la corrosion constitue un défi majeur dans de nombreux secteurs industriels et de la construction, entraînant des défaillances matérielles, des pertes économiques importantes et des risques pour la sécurité. Il est donc crucial de comprendre les mécanismes de la corrosion et de mettre en place des solutions efficaces pour la prévenir ou la maîtriser, afin d'assurer la durabilité des structures et équipements métalliques [1].

La corrosion représente un obstacle considérable pour les industries qui utilisent des matériaux métalliques. Ses conséquences sont multiples : dégradation des équipements, risques de sécurité et coûts économiques importants. La gestion de la corrosion nécessite une approche proactive, intégrant des technologies innovantes, l'utilisation d'additifs antirouille, une maintenance régulière, ainsi que des matériaux spécialement conçus pour en limiter les effets [2].

De nombreuses études menées dans diverses industries chimiques ont pour objectif de mieux comprendre les mécanismes de corrosion, afin d'optimiser les méthodes de protection. En parallèle de ces recherches, plusieurs solutions de protection sont mises en œuvre en fonction des caractéristiques du milieu corrosif, visant toutes à réduire la vitesse de corrosion. L'usage d'inhibiteurs pour diminuer l'agressivité du milieu est couramment appliqué, notamment dans l'industrie [3].

Les inhibiteurs de corrosion sont des substances chimiques ou naturelles ajoutées aux matériaux ou aux environnements afin de prévenir ou ralentir la corrosion. Ce phénomène naturel, qui entraîne la dégradation des matériaux métalliques par réaction chimique, est souvent aggravé par l'humidité, l'oxygène et d'autres agents chimiques présents dans l'air ou dans des solutions. L'usage d'inhibiteurs de corrosion constitue une méthode efficace de protection, utilisée particulièrement dans des secteurs tels que la construction, l'automobile, l'aéronautique et l'énergie [4].

## INTRODUCTION GENERALE

Notre projet de fin d'études porte sur la synthèse d'inhibiteurs de corrosion naturels, des substances d'origine naturelle permettant de prévenir ou de ralentir la corrosion des matériaux métalliques. Contrairement aux inhibiteurs chimiques synthétiques, ces substances proviennent de ressources naturelles comme les extraits de plantes, les huiles essentielles, les composés organiques ou les substances minérales. Elles constituent une alternative écologique aux inhibiteurs de corrosion traditionnels, souvent associés à un impact environnemental plus élevé.

Ce travail a pour objectif la préparation d'extraits à partir de déchets agroalimentaires, en particulier des feuilles de tomate et des feuilles d'ortie, en vue d'évaluer leur potentiel en tant qu'inhibiteurs de corrosion pour un acier doux de type XC42. L'extraction des composés bioactifs a été réalisée à l'aide d'un appareil de Soxhlet. Les extraits obtenus ont ensuite été caractérisés par différentes techniques analytiques : la spectroscopie infrarouge (IR), la chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS), ainsi que la spectroscopie UV-Visible pour la quantification des flavonoïdes et des composés phénoliques. L'efficacité inhibitrice a été évaluée par des essais gravimétriques, complétés par une analyse morphologique des surfaces métalliques à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) et d'un microscope à force atomique (AFM).

Ce manuscrit est structuré en quatre chapitres :

- ❖ **Chapitre I** : Une étude bibliographique consacrée aux principes généraux de la corrosion.
- ❖ **Chapitre II** : Une présentation des différentes méthodes de lutte contre la corrosion, en mettant particulièrement l'accent sur l'utilisation des inhibiteurs de corrosion.
- ❖ **Chapitre III** : La description des conditions expérimentales, des techniques de préparation d'inhibiteurs naturels à partir de cinq plantes sélectionnées, ainsi que des méthodes de caractérisation de la surface de l'acier XC42.
- ❖ **Chapitre IV** : L'analyse et la présentation des résultats expérimentaux obtenus, accompagnées de l'exploitation de diverses techniques analytiques (GC-MS, UV-Visible, AFM, FTIR, MEB, et gravimétrie). Ce chapitre se conclut par une synthèse générale des travaux réalisés.



**CHAPITRE I**  
**GENERALITES SUR LA  
CORROSION**

## I.1. Introduction

Les métaux, et plus spécifiquement les aciers, occupent une place prépondérante dans le domaine de la technologie industrielle en raison de leur grande polyvalence et de leurs propriétés physico-chimiques remarquables. Ils sont largement utilisés dans une multitude d'applications, allant de la fabrication de composants de machines industrielles, à la construction de moyens de transport (automobiles, trains, navires, avions), jusqu'à l'édification d'infrastructures complexes telles que les centrales électriques, les ponts, les bâtiments industriels et autres structures d'ingénierie lourde. Cette utilisation étendue s'explique non seulement par leur excellente résistance mécanique, leur ténacité et leur ductilité, mais également par leur coût de production relativement faible comparé à d'autres matériaux de performance équivalente.

Cependant, malgré ces nombreux avantages, les aciers présentent une vulnérabilité notable liée à leur composition chimique. Étant majoritairement constitués de fer, ils sont particulièrement sensibles au phénomène de corrosion, notamment lorsqu'ils sont exposés à des environnements humides ou à des milieux aqueux agressifs. Cette dégradation est encore plus prononcée en présence d'agents acides, qui accélèrent le processus de corrosion électrochimique, compromettant ainsi la durabilité et la fiabilité des structures métalliques à long terme. Cela rend nécessaire l'utilisation de traitements de surface, de revêtements protecteurs ou d'alliages spécifiques pour améliorer leur résistance à la corrosion dans les environnements hostiles [5].

## I.2. Définition de corrosion

La corrosion est définie par la norme internationale ISO 8044 comme une interaction physico-chimique entre un métal et son environnement, entraînant des modifications des propriétés du métal et, dans de nombreux cas, une dégradation fonctionnelle de ce métal, de son environnement ou du système technique résultant de l'interaction entre ces deux éléments. [6]

À l'instar d'autres phénomènes naturels, la corrosion suit des lois thermodynamiques, où le métal tend à retrouver son état initial, c'est-à-dire à revenir à des formes plus stables sous lesquelles il existe naturellement. En effet, à l'exception des métaux précieux comme l'or ou le platine, qui se trouvent sous forme native, la plupart des métaux sur Terre sont présents sous forme d'oxydes, sulfures, carbonates ou silicates [7].

### I.3. Facteurs de corrosion

La corrosion résulte de nombreux facteurs, que l'on peut regrouper en quatre grandes catégories :

**Tableau I.1** : Les principaux facteurs de corrosion [8].

| Facteur dépendant du temps                                                                                                                            | Facteurs définissent les conditions                                                                                                                             | Facteurs métallurgiques                                                                                                                                             | Facteurs de milieu corrosif                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vieillissement</li> <li>• Tensions Mécaniques</li> <li>• Modification des revêtements protecteurs</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Etat de surface</li> <li>• Forme des pièces</li> <li>• Emploi d'inhibiteur</li> <li>• Procédés d'assemblage</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Composition de l'alliage</li> <li>• Procédés d'élaboration</li> <li>• Impuretés</li> <li>• Traitement thermique</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentration du réactif</li> <li>• Teneur en oxygène</li> <li>• PH du milieu</li> <li>• Température</li> <li>• Pression</li> </ul> |

La vitesse de corrosion d'un métal dans un environnement corrosif est influencée conjointement par la température et le pH, qui agissent directement sur le processus corrosif. Leur impact indirect se manifeste également à travers la phase aqueuse, telle que l'eau de condensation ou l'eau de production. Par ailleurs, les conditions d'écoulement, la formation d'un film protecteur à la surface du métal, ainsi que la pression interviennent directement, notamment par le biais de la pression partielle du CO<sub>2</sub> [8].

#### I.3.1. Effet d'humidité

L'humidité joue un rôle crucial dans le processus de corrosion des matériaux, en particulier des métaux. En présence d'eau, même sous forme de vapeur, une fine pellicule d'humidité peut se former à la surface du métal, créant un environnement propice aux réactions électrochimiques responsables de la corrosion. Cette couche d'humidité agit comme un électrolyte, facilitant le transfert des ions entre les zones anodiques et cathodiques du métal. Plus l'humidité relative de l'air est élevée, plus la vitesse de corrosion augmente, surtout lorsqu'elle dépasse un certain seuil critique (souvent autour de 60 à 70 %). De plus, l'humidité peut dissoudre des polluants atmosphériques, comme le dioxyde de soufre ou les chlorures, qui aggravent encore la corrosion en rendant la solution plus acide ou plus conductrice. Ainsi, le contrôle de l'humidité

est essentiel pour limiter la dégradation des structures métalliques dans de nombreux environnements [9].

### I.3.2. Effet de la température

Les climats équatoriaux se distinguent par une température annuelle moyenne avoisinant les 25°C. Les variations de température au cours de la journée ne dépassent généralement pas les 15°C. Toutefois, des différences saisonnières existent, principalement en fonction des précipitations. En l'absence de facteurs supplémentaires, ces variations sont encore atténuées par la présence d'un couvert forestier. Les températures des sols dépendent largement de cette couverture végétale. Par exemple, en Guyane, selon le Service Météorologique, on observe les données suivantes :

- Sous la forêt : température moyenne de 24°C, avec des minimas entre 21-22°C et
- Des maximas restant inférieurs à 30°C.
- Sous le gazon : température moyenne de 32°C, avec des maximas atteignant 50°C.
- Quant aux sols nus et au gazon, leurs minima sont similaires, autour de 25-26°C. Cela montre que le gazon offre une faible protection contre la chaleur du sol.

Température influe principalement par ses effets de dilatation et de contraction. Cependant, en climat équatorial, ces effets sont relativement faibles. En réalité, son rôle est davantage lié à l'accélération et à l'intensification des effets d'autres facteurs, notamment l'humidité.

En règle générale, une élévation de la température favorise les La processus de corrosion en réduisant les plages de stabilité des métaux et en accélérant les réactions et les phénomènes de transport. Toutefois, l'impact de cette influence varie selon le type de milieu corrosif dans lequel le matériau est situé [8].

### I.3.3. Effet d'acidité

La sensibilité d'un matériau métallique à la corrosion dépend fortement du pH de l'électrolyte dans lequel il est immergé. En effet, le pH influence directement la nature chimique du milieu et le comportement électrochimique des surfaces métalliques. Lorsque le pH diminue, c'est-à-dire que la concentration en ions hydrogène (protons  $H^+$ ) augmente, le milieu devient plus acide et donc plus agressif vis-à-vis du matériau. Cette acidité accrue perturbe les équilibres

thermodynamiques des réactions chimiques et électrochimiques impliquées dans le processus de corrosion, en favorisant notamment les réactions d'oxydation du métal.

Plus précisément, en milieu acide, les réactions anodiques (oxydation du métal en ions métalliques) et cathodiques (réduction des protons en hydrogène moléculaire) sont thermodynamiquement plus favorables, ce qui accélère la dissolution du métal. Ainsi, à mesure que le pH de la solution diminue, le potentiel corrosif du milieu augmente, entraînant une intensification du taux de corrosion. Ce phénomène est particulièrement critique dans le cas des aciers et autres métaux ferreux, pour lesquels la solubilité des produits de corrosion, comme les oxydes ou hydroxydes de fer, est également influencée par le pH. Par conséquent, dans des conditions de faible pH, non seulement la corrosion est plus rapide, mais les produits formés ne sont souvent pas protecteurs, ce qui aggrave davantage la dégradation du matériau [8].

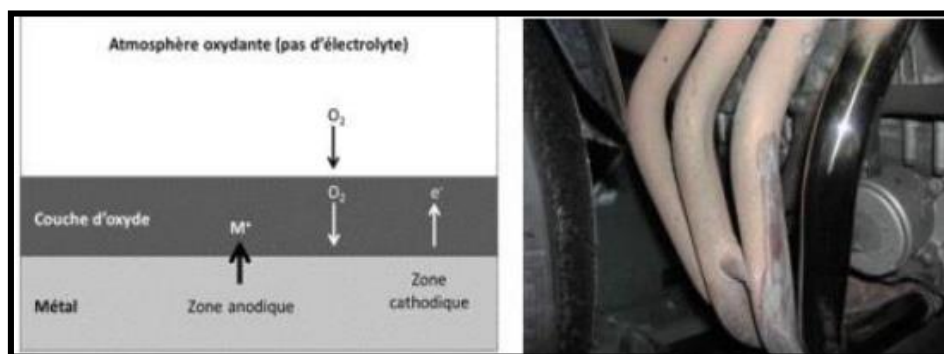
#### I.4. Type de Corrosion

En fonction des caractéristiques de l'environnement dans lequel se trouve le métal, ainsi que de la manière dont cet environnement interagit avec lui, il est possible d'identifier le type de corrosion auquel le métal est exposé. Les conditions physico-chimiques, telles que l'humidité, la température, la présence d'oxygène, de substances chimiques agressives ou de micro-organismes, influencent directement la nature du processus corrosif [9].

##### I.4.1. Corrosion chimique (sèche)

La corrosion chimique est un phénomène résultant de l'interaction directe entre un métal et un milieu environnant, qu'il soit à l'état gazeux ou liquide. Lorsque cette réaction se déroule à des températures élevées, on parle alors de corrosion sèche, ou encore corrosion à haute température. Dans ce type de corrosion, les réactions d'oxydation du métal et de réduction de l'agent oxydant se produisent simultanément au sein d'un même processus, sans intervention d'un courant électrique ou d'un électrolyte. Les atomes métalliques réagissent directement avec les molécules de l'oxydant, qui capte leurs électrons de valence, formant ainsi des composés chimiques stables, souvent sous forme d'oxydes. La réaction globale qui en résulte peut-être représentée de la manière suivante [10].





**Figure I.1** : Mécanisme de la corrosion atmosphérique [10].

Exemple : de la corrosion d'un collecteur d'échappement.

#### I.4.2. Corrosion électrochimique (humide)

La corrosion électrochimique, également appelée corrosion humide, survient principalement lorsque l'environnement corrosif est de nature liquide, en particulier sous forme de solution électrolytique. Dans ce contexte, le métal est soumis à une réaction d'oxydation, conduisant à la transformation de celui-ci en ions métalliques ( $M^{n+}$ ) ou en composés oxydés tels que les oxydes métalliques. Cette dégradation est provoquée par des échanges d'électrons entre le métal et le milieu environnant, ce dernier agissant comme électrolyte. En effet, lorsqu'un métal est mis en contact avec une solution électrolytique, des zones à potentiel électrique différent peuvent se former à la surface ou à l'intérieur même du métal, ou entre différents métaux s'ils sont en contact. Cela engendre la formation d'une cellule électrochimique, ou pile de corrosion, dans laquelle un courant électrique circule entre des zones anodiques (où se produit l'oxydation) et cathodiques (où se produit la réduction).

La zone anodique, étant le siège de l'oxydation, subit la perte de matière métallique, ce qui se traduit par une attaque localisée et une détérioration progressive du matériau. De son côté, la zone cathodique reçoit les électrons issus de l'anode et permet la réduction d'agents oxydants présents dans l'électrolyte. Cette réaction d'oxydo-réduction nécessite la présence d'un réducteur dans le milieu, tel que l'eau ( $H_2O$ ), l'hydrogène moléculaire ( $H_2$ ) ou d'autres espèces capables d'accepter des électrons. L'intensité et la vitesse de la corrosion dépendent de nombreux facteurs, tels que la composition du métal, la nature du réactif, la température, le pH et la concentration des ions dans la solution [11]

### I.4.3. Corrosion biochimique (bactérienne)

La corrosion bactérienne, également appelée corrosion microbiologique (ou MIC pour Microbiologically Influenced Corrosion), résulte de l'activité métabolique de certains micro-organismes, en particulier des bactéries anaérobies. Ces bactéries prolifèrent dans des environnements humides et pauvres en oxygène, notamment dans les eaux stagnantes ou faiblement renouvelées contenant des sulfates. Parmi elles, les bactéries sulfato-réductrices (comme *Desulfovibrio desulfuricans*) jouent un rôle majeur. Elles utilisent les sulfates dissous comme accepteurs d'électrons et produisent, au cours de leur métabolisme, des composés corrosifs tels que le sulfure d'hydrogène ( $H_2S$ ), qui attaquent les surfaces métalliques, provoquant la formation de piqûres et une dégradation accélérée des matériaux. Cette forme de corrosion est particulièrement redoutée dans les installations industrielles (tuyauteries, réservoirs, structures immergées...), car elle peut se développer même en l'absence d'oxygène, rendant la détection et la prévention plus complexes. Actuellement, la principale stratégie de lutte contre la corrosion bactérienne repose sur des traitements biologiques, notamment par l'injection de biocides ou de bactéricides dans les milieux à risque. Ces substances ont pour objectif de limiter, voire d'éliminer, les colonies bactériennes responsables de la corrosion. Cependant, cette méthode nécessite un suivi régulier et précis, car une mauvaise application peut favoriser l'apparition de souches résistantes ou ne pas suffire à enrayer le développement microbien [12].

### I.4.4. Corrosion accompagnée d'érosion (mécanique)

Dans ce cas, les produits de corrosion forment une couche adhérente et continue à la surface du métal, ce qui tend généralement à ralentir le processus de corrosion. Cependant, cette couche peut être localement éliminée par l'abrasion due au mouvement du liquide ou à la présence de particules solides, entraînant alors une accélération de la corrosion. Le même phénomène se produit lorsqu'il y a frottement entre deux pièces en mouvement. La corrosion par cavitation, quant à elle, est causée par la formation de bulles de vapeur dans un liquide en circulation rapide, notamment près d'une pièce tournante. Lorsque la pression locale devient inférieure à la tension de vapeur du liquide, ces bulles implosent, provoquant des chocs violents sur la surface métallique et détruisant la couche protectrice, ce qui relance le processus de corrosion [13].

### I.5. Aspect morphologique de la corrosion

La corrosion des métaux peut se manifester sous plusieurs formes, généralement classées selon l'aspect observé à la surface attaquée. Les deux principales catégories sont :

- La corrosion uniforme.
- La corrosion localisée [14].

#### I.5.1. Corrosion uniforme ou généralisée

Il s'agit de la forme de corrosion la plus classique. Elle se produit de manière relativement uniforme sur toute la surface exposée, entraînant une perte régulière de matière. Les zones anodiques et cathodiques se déplacent sur la surface au contact de l'agent corrosif, ce qui provoque une diminution progressive de l'épaisseur ou une perte de masse par unité de surface et de temps. Ce type de corrosion est généralement prévisible et contrôlable, car il peut être détecté par des essais standard et se manifeste par une usure visible du matériau [15].



**Figure I.2 :** Corrosion généralisée [17].

#### I.5.2. Corrosion localisée

Ce phénomène se manifeste, à l'inverse, lorsque le matériau est exposé à un environnement adoptant un comportement sélectif à son égard. Cette sélectivité peut découler de divers facteurs, qu'ils soient liés au matériau lui-même (alliage multi phase, inclusions, défauts localisés dans la protection de surface, présence de deux métaux différents, etc.) ou à l'environnement (hétérogénéité locale de la composition, du pH ou de la température) . Ce type de corrosion se développe uniquement en certains points localisés à la surface du matériau [16].

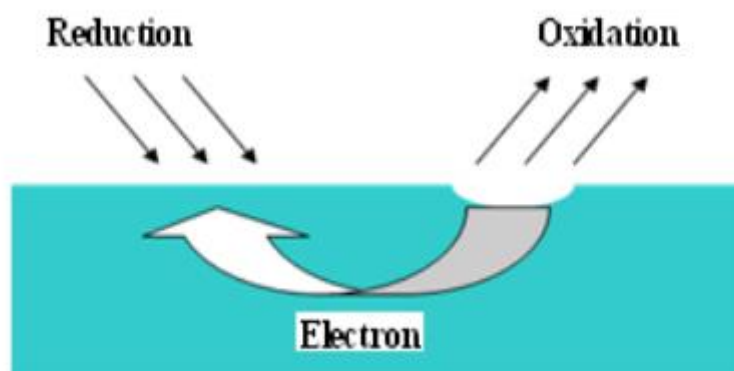


Figure I.3 : Corrosion localisée [13].

### I.5.3. Corrosion galvanique (corrosion bimétallique)

Il s'agit d'un des types de corrosion les plus fréquemment rencontrés en milieu aqueux. Elle résulte de la formation d'une cellule électrochimique entre deux matériaux, où l'un des électrodes, appelée anode, se dégrade au profit de l'autre, la cathode, qui demeure inchangée. Cette réactivité différenciée est attribuée à une hétérogénéité, pouvant provenir du matériau lui-même, du milieu environnant, ou encore des conditions physico-chimiques et thermodynamiques à l'interface [16].



Figure 1 – Corrosion galvanique d'un joint plomb/cuivre

Figure I.4 : Corrosion galvanique [16].

### I.5.4. Corrosion par piqûre

La corrosion par piqûre survient lorsque des métaux protégés par une fine couche d'oxyde, tels que l'aluminium, ses alliages ou les aciers inoxydables, sont exposés à un environnement aqueux, généralement neutre en pH, contenant des ions halogénures — en particulier les ions chlorure ( $\text{Cl}^-$ ). Bien que la quantité de métal corrodé soit minime, ce phénomène engendre la formation de cavités atteignant quelques dizaines de micromètres de diamètre à partir d'une ouverture de très faible superficie.

Ce type de corrosion évolue en deux phases distinctes : l'amorçage, correspondant à la rupture locale de la couche passive, puis la phase de propagation, au cours de laquelle la piqure s'approfondit [17].

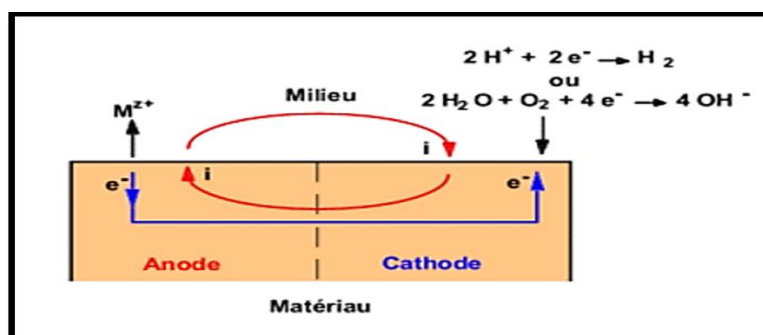


Figure I.5 : Corrosion par piqure [17].

### I.5.5 Corrosion inter granulaire

Ce type de corrosion se développe au niveau des joints de grains du métal. Il peut entraîner l'apparition de fissures internes, compromettant ainsi les propriétés mécaniques du matériau. Certains aciers inoxydables et alliages à base de fer, chrome et nickel y sont particulièrement sensibles, ce qui peut entraîner une diminution drastique, voire critique, de leur résistance mécanique. Ce phénomène, d'abord imperceptible à l'œil nu, évolue à l'échelle microscopique dans ses premières phases [18].



Figure I.6 : Corrosion intergranulaire [17].

### I.5.6. Corrosion sélective

Ce type de corrosion est particulièrement dangereux en raison de son caractère insidieux : la pièce affectée peut paraître intacte en surface, alors que sa résistance mécanique est fortement compromise. Il s'agit d'une dissolution sélective d'un des constituants de l'alliage, tandis que les autres éléments demeurent inchangés. Ce processus rend le métal poreux et entraîne une perte significative de ses propriétés mécaniques [18].



**Figure I.7 :** Corrosion sélective [19].

### I.5.7. Corrosion caverneuse

La corrosion caverneuse résulte d'une inégale répartition de l'oxygène entre différentes zones d'une structure, ce qui génère une cellule électrochimique. Cette forme de corrosion localisée affecte préférentiellement les zones confinées ou difficilement accessibles, telles que les fissures ou les interstices, où l'oxygène pénètre difficilement. Elle est fréquemment favorisée par la stagnation de petites quantités de solution corrosive, souvent piégées dans des cavités, sous des dépôts discontinus ou entre des surfaces en contact [19].



**Figure I.8 :** Corrosion caverneuse [17].

### I.5.8. Corrosion filiforme

Ce type de corrosion est généralement lié à la présence d'un revêtement protecteur, tel qu'une peinture ou un vernis, partiellement perméable à l'eau et à l'oxygène. L'attaque se manifeste sous forme de filaments s'étendant radialement à partir de défauts du revêtement. Elle peut affecter divers métaux, notamment le fer et l'aluminium, exposés à des environnements humides, généralement entre 20 et 30 °C. L'eau et l'oxygène sont indispensables à la propagation de la corrosion filiforme, tandis que la présence d'ions agressifs tels que  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  ou  $\text{CO}_3^{2-}$  favorise son déclenchement en provoquant une acidification locale. Selon les mesures de potentiel et de pH, chaque filament présente une tête acide, contenant une solution aqueuse, et une queue alcaline, où s'accumulent les produits de corrosion. L'environnement alcalin de cette zone terminale contribue au décollement progressif du revêtement protecteur [18].



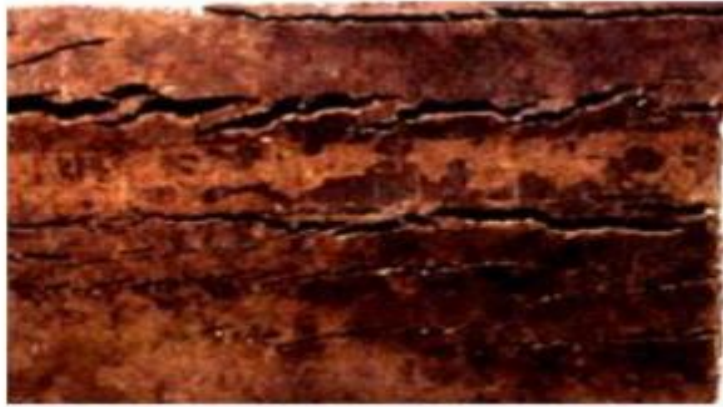
**Figure I.9 :** Corrosion filiforme [8].

### I.5.9. Corrosion sous contrainte

La corrosion sous contrainte se caractérise par l'apparition de fissures dans le métal, causée par l'action combinée d'une contrainte mécanique et d'un environnement électro- chimiquement agressif.

Ce phénomène évolue en deux étapes : l'initiation de la fissure, suivie de sa propagation. Sa survenue dépend principalement de plusieurs facteurs, notamment l'intensité des contraintes

appliquées, la nature du matériau (composition chimique et structure cristalline), l'état de surface, les caractéristiques du milieu corrosif, ainsi que la température [18].



**Figure I.10 :** Corrosion sous contrainte [17].



**CHAPITRE II**  
**LUTTE CONTRE LA**  
**CORROSION**

## II.1. Introduction

La prévention contre la corrosion doit être intégrée dès la phase de conception d'une installation. En anticipant les risques à ce stade, il est possible de limiter considérablement les problèmes liés à la durabilité des équipements. Cette approche est d'autant plus cruciale dans des secteurs sensibles comme le nucléaire, l'industrie chimique ou l'aéronautique, où une défaillance liée à la corrosion peut entraîner des conséquences graves, tant pour la sécurité des personnes que pour la protection de l'environnement [20].

Pour protéger contre la corrosion, plusieurs approches peuvent être envisagées : agir directement sur le matériau (choix du type de métal, adaptation de la forme, gestion des contraintes selon les applications), traiter la surface du matériau (par l'application de revêtements, peintures ou divers traitements de surface), ou encore intervenir sur l'environnement en réduisant les facteurs corrosifs (par exemple, en inhibant la corrosion) [21].

## II.2. Moyens de protection contre la corrosion

La protection contre la corrosion peut être assurée en intervenant à plusieurs niveaux : d'une part, par le choix pertinent des matériaux, en tenant compte de leur nature, de leur forme et des contraintes spécifiques à leur usage ; d'autre part, en agissant sur leur surface, grâce à des traitements adaptés tels que les revêtements, les peintures ou d'autres procédés de protection ; enfin, en modifiant l'environnement en contact avec le matériau, notamment par l'emploi d'inhibiteurs de corrosion [21].

### II.2.1. Prévention par un choix judicieux des matériaux

Il sera possible de lutter contre les risques de corrosion en agissant sur le choix judicieux du matériau. Le choix des matériaux repose sur plusieurs critères, notamment :

- Le domaine d'application.
- La nature et l'intensité des sollicitations mécaniques et thermiques.
- Les traitements choisis.
- Le coût et la disponibilité des matériaux [22].

---

### II.2.1.1. Protection par la géométrie des pièces

La corrosion peut être significativement réduite en adaptant la forme des pièces aux conditions dans lesquelles elles seront utilisées. Une conception géométrique appropriée permet non seulement de limiter les zones à risque, mais aussi d'augmenter considérablement la durée de vie des composants. Nous présenterons ici quelques solutions courantes, appliquées selon le type de corrosion à prévenir [23].

### II.2.1.2. Élimination des zones humides

De manière générale, la corrosion atmosphérique ne se développe qu'en présence d'humidité. Il est donc essentiel de concevoir les pièces de façon à éviter toute rétention d'eau. En assurant un drainage efficace, on limite l'accumulation d'humidité et, par conséquent, le risque de corrosion [22].

### II.2.2. Protection cathodique

Cette méthode vise à maintenir le métal dans sa zone d'immunité électrochimique. Elle peut être mise en œuvre de deux façons : soit par l'utilisation d'une anode sacrificielle, soit par l'application d'un courant imposé.

La protection par anode sacrificielle repose sur l'association du métal à protéger avec un métal plus réactif (moins noble), qui joue le rôle d'anode et se corrode à sa place.

Quant à la protection par courant imposé, elle consiste à faire circuler un courant électrique entre le métal à protéger, qui devient cathode, et une anode inerte (telle que du graphite, du plomb ou un métal noble). L'intensité du courant doit être suffisante pour abaisser le potentiel du métal à un niveau où les réactions anodiques de corrosion ne peuvent plus se produire [14].

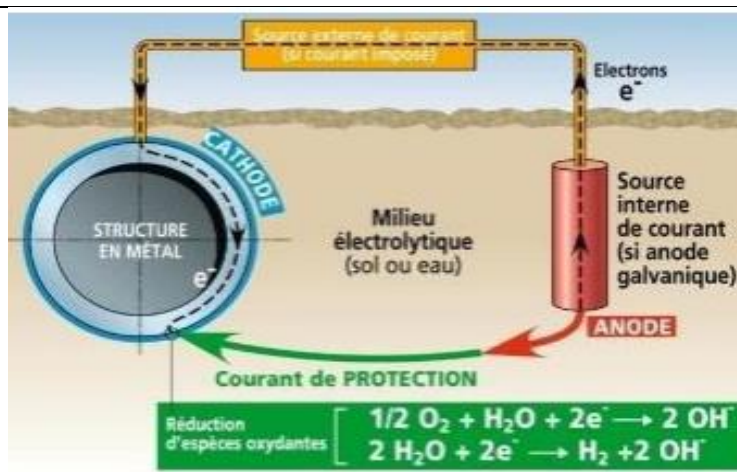
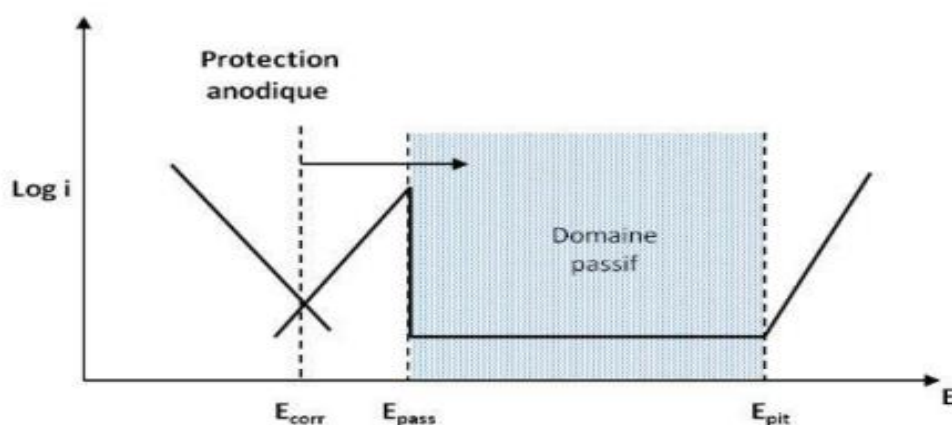


Figure II.1 : Principe de la protection cathodique [23].

### II.2.3. Protection anodique

La protection anodique s'applique uniquement aux métaux pouvant être passivés, c'est-à-dire ceux dont le potentiel de corrosion se situe dans la zone active ( $E_{\text{corr}} < E_p$ ). Elle consiste à polariser le métal de manière à faire basculer son potentiel dans la zone passive, où la corrosion est fortement limitée.

Une fois l'état passif atteint, le courant nécessaire pour maintenir cette protection reste très faible, équivalent à la densité de courant passif. Toutefois, pour atteindre cet état, il faut initialement appliquer un courant plus important, supérieur à la densité de courant de passivation[14].



$E_{\text{pass}}$ : potentiel de passivation;  $E_{\text{pit}}$ : potentiel de dépassivation ou dépiquûration

Figure II.2 : Principe de la protection anodique [14].

#### II.2.4. Protection par revêtements

- Les revêtements protègent le métal en le séparant de son environnement. Ils doivent résister aux attaques chimiques, bien adhérer au support et offrir une bonne résistance mécanique.

On distingue :

- Les revêtements organiques : agissent comme barrières imperméables.
- Les revêtements inorganiques : souvent décoratifs, ils protègent aussi contre la corrosion atmosphérique et l'usure [24].

#### II.2.5. Inhibiteurs de corrosion

##### II.2.5.1. Historique

Comme dans de nombreux autres domaines, il est difficile de définir précisément l'origine de l'inhibition en tant que technologie à part entière. Pourtant, il y a plusieurs décennies, on a observé que les dépôts de calcaire (chaux) se formant dans les conduites d'eau naturelle jouaient un rôle protecteur contre la corrosion. Plutôt que de renforcer directement la résistance des tuyaux à la corrosion, une stratégie efficace consiste à réguler la composition minérale des solutions circulant dans ces conduites, favorisant ainsi la formation de dépôts calcaires dits « protecteurs ».

En 1945, on ne comptait qu'une trentaine de publications scientifiques traitant spécifiquement des inhibiteurs de corrosion. Dans un article de 1948, Wald Rip évoque un rapport de 1943 portant sur la protection contre la corrosion dans les puits de pétrole, soulignant ainsi l'émergence progressive de cette approche dans le domaine industriel [25].

Entre 1945 et 1954, de nombreux articles ont abordé l'inhibition, souvent déconseillée dans plusieurs secteurs industriels. Ces publications témoignent des progrès réalisés dans la lutte contre la corrosion. Par la suite, l'intérêt pour ce sujet s'est intensifié, avec 647 articles recensés en 1970 [26].

---

### II.2.5.2. Définition

Selon la norme ISO 8044, un inhibiteur est une substance chimique ajoutée au système de corrosion à une concentration choisie pour son efficacité, celle-ci entraîne une diminution de la vitesse de corrosion du métal sans modifier de manière significative la concentration d'aucun agent corrosif contenu dans le milieu agressif [27].

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

Un inhibiteur de corrosion doit être actif à faible concentration, facile à mettre en œuvre, ne pas modifier les propriétés physiques de la solution et être peu onéreux [28].

### II.2.5.3. Conditions d'utilisation

Un inhibiteur (ou un mélange d'inhibiteurs) peut être utilisé comme unique moyen de protection :

- L'inhibiteur peut être utilisé comme solution de protection permanente, permettant ainsi l'emploi de matériaux métalliques, tels que les aciers non alliés, dans des conditions offrant une résistance acceptable à la corrosion. Toutefois, une surveillance régulière de l'installation demeure nécessaire.
- L'inhibiteur peut également être utilisé comme protection temporaire, notamment durant des phases où la pièce ou l'installation est particulièrement vulnérable à la corrosion, comme lors du stockage, du décapage ou du nettoyage. Dans ce contexte, le contrôle du système est généralement plus aisé, car il est plus facile d'anticiper le comportement de l'inhibiteur sur une période limitée.

Un inhibiteur, seul ou en combinaison avec d'autres, peut être associé à un autre mode de protection : il peut ainsi renforcer la résistance à la corrosion d'un alliage déjà performant ou être intégré à un revêtement de surface tel que de la peinture, de la graisse ou de l'huile [29].

---

**II.2.5.4. Propriétés des inhibiteurs**

À partir de cette définition, un inhibiteur de corrosion doit ainsi posséder un ensemble de propriétés essentielles :

- Réduire la vitesse de corrosion du métal sans altérer ses propriétés physico-chimiques.
- Être conforme aux normes en vigueur en matière de non-toxicité et de respect de l'environnement.
- Être efficace à faible concentration.
- Être stable en présence d'autres constituants.
- Être stable dans le domaine de températures utilisé.
- Économiquement avantageux comparé aux gains qu'il permet de réaliser [30].

**II.2.5.5. Domaines d'utilisation**

Les inhibiteurs de corrosion sont utilisés dans plusieurs domaines d'applications tels que :

- ✓ Le traitement de l'eau, qu'il s'agisse des eaux sanitaires, des eaux utilisées dans les procédés industriels ou des eaux de chaudières.
- ✓ Le secteur pétrolier, incluant les étapes de forage, d'extraction, de raffinage, ainsi que le stockage et le transport.
- ✓ Les peintures, dans lesquelles les inhibiteurs de corrosion sont intégrés comme additifs pour assurer la protection des surfaces métalliques contre la corrosion [31].

**II.2.5.6. Classes d'inhibiteurs**

Les inhibiteurs peuvent être classés selon plusieurs critères, chacun permettant de les distinguer de manière différente :

- ❖ En fonction de la nature chimique des produits, qu'ils soient organiques ou minéraux.
- ❖ En fonction de leur mode d'action électrochimique : inhibiteurs cathodiques, anodiques ou mixtes.
- ❖ En fonction de leur mécanisme d'interaction à l'interface métal/environnement, tel que l'adsorption à la surface métallique et/ou la formation d'un film protecteur [32].

Les inhibiteurs de corrosion peuvent être classifiés selon trois critères suivants :

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

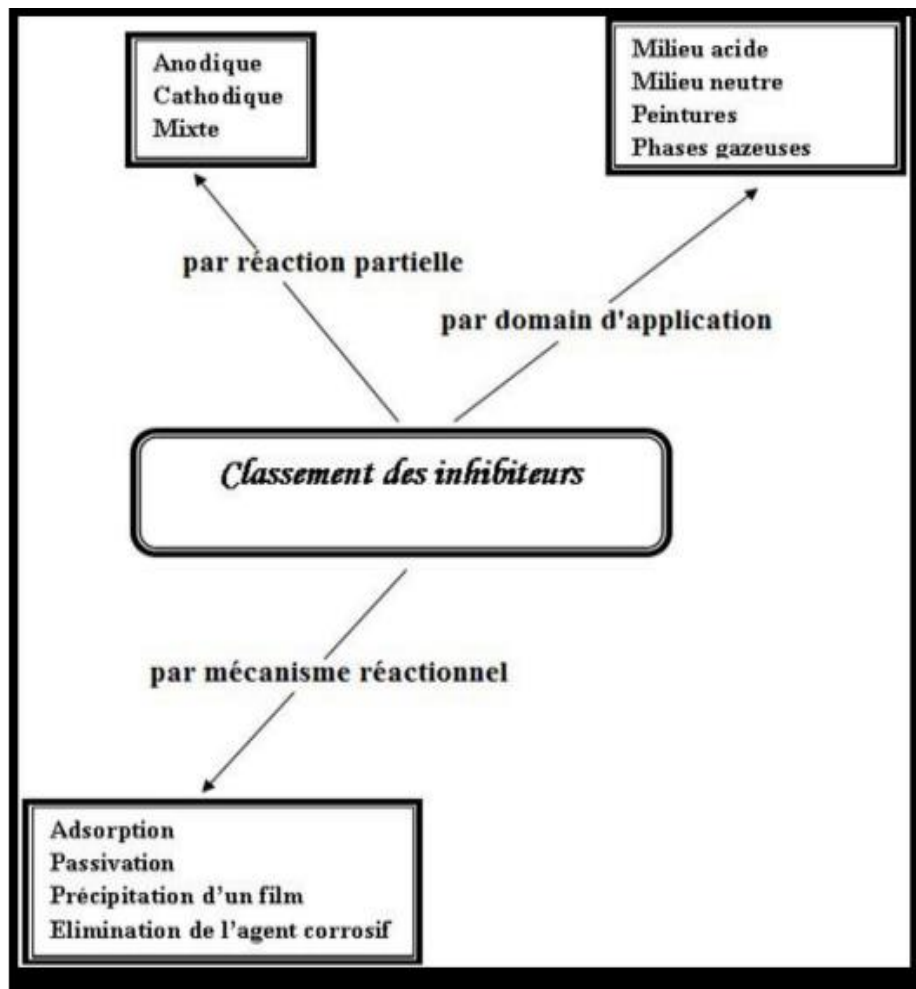


Figure. II.3. Classement des inhibiteurs de corrosion [32].

---

### II.2.5.6.1. Classement selon la nature de l'inhibiteur

#### II.2.5.6.1.1. Les inhibiteurs organiques

Les molécules organiques représentent une alternative prometteuse en matière d'inhibition de la corrosion. Leur utilisation est aujourd'hui privilégiée par rapport aux inhibiteurs inorganiques, notamment en raison de leur moindre impact environnemental et de préoccupations croissantes liées à l'écotoxicité.

Leur mécanisme d'action repose sur la formation d'un film protecteur, plus ou moins homogène, d'épaisseur limitée, qui agit comme une barrière empêchant l'accès de l'électrolyte à la surface métallique.

Un grand nombre de composés organiques présentent un potentiel en tant qu'inhibiteurs de corrosion. À partir d'une molécule de base jugée efficace, il est souvent possible de concevoir des structures plus complexes afin d'en améliorer les performances. Cependant, la viabilité commerciale d'un inhibiteur repose largement sur son coût de production. C'est pourquoi les sous-produits de l'industrie pétrolière sont souvent privilégiés, car ils offrent un bon compromis entre efficacité et rentabilité.

Les inhibiteurs organiques contiennent généralement au moins un hétéroatome, tel que l'azote, l'oxygène, le soufre ou le phosphore, jouant le rôle de site actif pour l'adsorption sur la surface du métal. Néanmoins, leur utilisation peut être limitée à haute température, en raison de leur instabilité thermique [13].

#### II.2.5.6.1.2. Les inhibiteurs minéraux

Les composés minéraux sont principalement utilisés en milieux quasi-neutres à alcalins, et plus rarement en milieux acides. En solution, ces substances se dissocient, et ce sont principalement leurs produits de dissociation, c'est-à-dire les anions et les cations qui interviennent dans les mécanismes d'inhibition.

Parmi les cations à effet inhibiteur, les plus couramment utilisés sont  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Zn}^{2+}$ . Du côté des anions, les inhibiteurs les plus efficaces appartiennent à la famille des oxo-anions de type  $\text{XO}_4^{n-}$ , tels que les chromates et les molybdates [34].

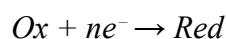
### II.2.5.6.2. Classement selon le mécanisme d'action

Les inhibiteurs de corrosion n'agissent pas selon un mécanisme unique. Un même composé peut présenter des modes d'action différents selon le couple métal/solution concerné. Dans la majorité des cas, l'action inhibitrice s'exerce à proximité immédiate de la surface métallique, où l'inhibiteur interagit directement avec les sites actifs de corrosion. Toutefois, dans les systèmes en circuit fermé, où l'oxygène peut être éliminé, la corrosion peut être efficacement maîtrisée par un simple ajustement du PH à une valeur suffisamment élevée. Dans de telles conditions, des inhibiteurs tels que les chromates, les amines et les nitrites se révèlent particulièrement efficaces [35].

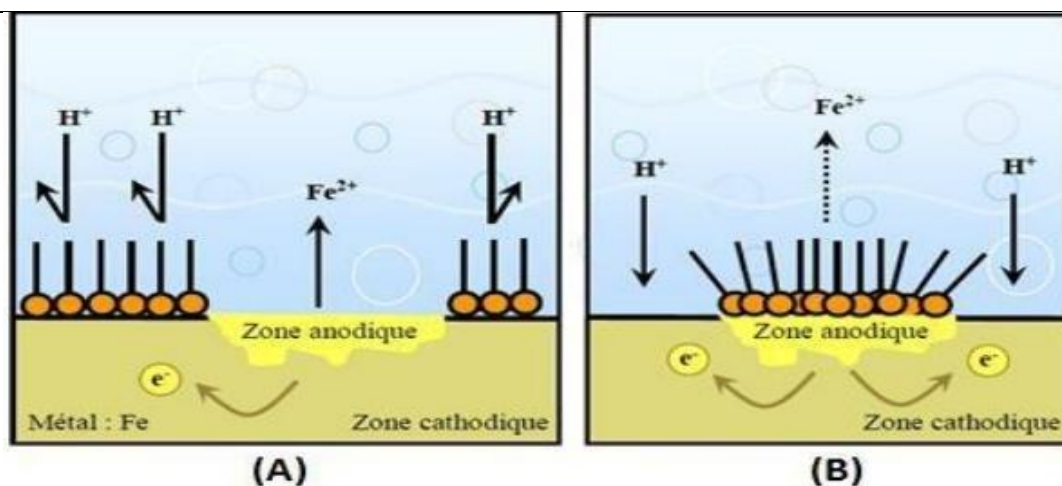
#### II.2.5.6.2.1. Mécanisme d'action électrochimique

La classification des inhibiteurs de corrosion repose sur la nature électrochimique des réactions mises en jeu en phase liquide. Ce type de corrosion implique au minimum deux réactions distinctes :

- une réaction anodique correspondant à la dissolution du métal (oxydation) :
- une réaction cathodique impliquant la réduction d'un oxydant présent dans la solution :



Un inhibiteur est dit anodique s'il freine la réaction d'oxydation en bloquant les sites anodiques (où le métal se dissout). Il est qualifié de cathodique lorsqu'il ralentit la réaction de réduction en agissant sur les sites cathodiques, qu'il s'agisse de la réduction de l'oxygène dissous en milieu aéré ou celle des protons  $H^{+}$  en milieu acide. Enfin, les inhibiteurs mixtes interviennent simultanément sur les deux réactions, en réduisant à la fois les vitesses d'oxydation et de réduction [35].

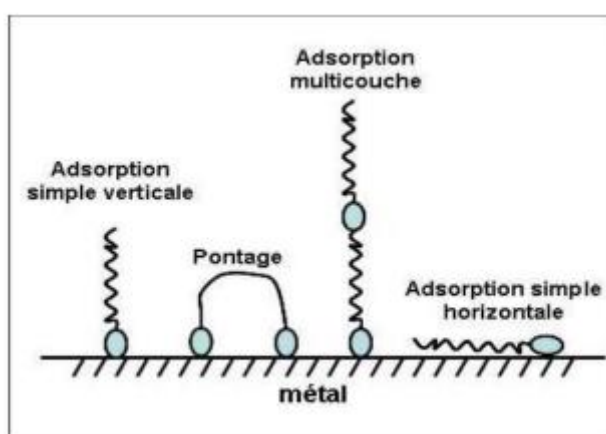


**Figure. II.4.** Formation des couches barrières cathodiques (A) et anodiques (B) [29].

#### II.2.5.6.2.2. Mécanismes d'action inter-faciale

Cet autre mode de classement des inhibiteurs, les classe en tenant compte de leur mode de fixation sur le substrat métallique. Ainsi on distingue :

- Les inhibiteurs d'adsorption ou "d'interface" qui apparaissent en milieu acide (film mono ou bidimensionnel).
- Les inhibiteurs dits "d'interphase" qui apparaissent en milieu alcalin (films tridimensionnels) [35].



**Figure. II.5.** Représentation schématisée des modes d'adsorption de molécules organiques inhibitrices sur une surface métallique. [33].

### II.2.5.6.3. Inhibition de corrosion par les substances naturelles

De nombreux inhibiteurs utilisés de nos jours sont soit des matières premières peu coûteuses, soit des composés organiques contenant des hétéroatomes tels que le phosphore, le soufre, l'azote ou l'oxygène, intégrés dans leur chaîne carbonée ou leur structure aromatique. Toutefois, en raison de leur faible biodégradabilité, ces substances peuvent engendrer une pollution environnementale. Face à ces inconvénients, la recherche s'oriente désormais vers des composés d'origine naturelle, susceptibles de présenter, eux aussi, des propriétés anticorrosion pour les métaux et les alliages [36].

#### II.2.5.6.3.1. Extraits principaux dans l'inhibiteur de corrosion

Il s'agit d'inhibiteurs naturels fabriqués par extraction de composés naturels. Il est possible d'utiliser plusieurs extraits, mais le principal souci réside dans la stabilité de ces derniers. On utilise principalement les extraits suivants :

- ❖ Les tanins (poly phénols).
- ❖ Les huiles essentielles.
- ❖ Les huiles.
- ❖ Le mucilage (polysaccharides).
- ❖ Les alcaloïdes.

Les groupements fonctionnels de ces extraits sont responsables de leur activité, car ils contiennent une grande quantité d'azote, d'oxygène et de soufre [37].

#### II.2.5.6.3.2. Exemple d'extraits

Les huiles et extraits de plantes sont de plus en plus étudiés comme inhibiteurs de corrosion pour divers métaux et alliages dans des milieux acides, notamment dans l'acide chlorhydrique. Parmi eux, on peut citer l'extrait de plante de chélidoine ainsi que l'huile extraite des graines de Prickly Pear (*Opuntia Ficus –indica* L) [38].

#### II.2.5.6.3.3. Avantages et limites des extraits

Les extraits de plantes aromatiques sont des substances respectueuses de l'environnement et ne renferment pas de métaux lourds ou d'autres substances toxiques, et leur prix est

relativement abordable. Les composés contenant l'oxygène, le soufre et des éléments d'azote sont des mélanges. Cependant, la biodégradabilité des extraits naturels restreint leur capacité à être stockés et utilisés comme inhibiteurs de corrosion à long terme. Toutefois, il est suggéré que l'ajout de biocides tels que des biocides pourrait prévenir la décomposition d'extraits de plantes par des microorganismes. Le sodium dodecylsulphate et le bromide d'ammonium N-Cetyl-N, N, N-trimethyl [39].



**CHAPITRE III**  
**MATERIELS ET**  
**METHODES**

### III.1. Introduction

Ce chapitre présente la démarche expérimentale adoptée pour la préparation d'un inhibiteur de corrosion à partir de déchets agroalimentaires, ainsi que les différentes techniques de caractérisation utilisées pour évaluer son efficacité sur la vitesse de corrosion d'un acier de type XC42.

### III.2. Préparation des échantillons

Dans ce travail, deux types de déchets agroalimentaires ont été utilisés : les feuilles de tomate (T) et les feuilles d'ortie(O). Les échantillons ont été récoltés en mars 2025. Afin d'éliminer les impuretés, les feuilles ont été lavées à l'eau distillée, puis laissées à sécher à l'air libre pendant 20 jours. Par la suite, elles ont été placées dans une étuve à 40 °C pendant 24 heures. Les figures (III.1et III.2) illustres l'aspect des échantillons avant et après l'étape de broyage.



**Figure III.1** : Enchantelions des feuilles d'ortie avant et après le broyage.



**Figure III.2 :** Echantillons des feuilles de tomate avant et après le broyage.

- Nous avons commencé par peser 10 g de poudre de chaque échantillon, que nous avons enveloppés séparément dans du papier absorbant, sous forme de cartouches. De la même manière, nous avons préparé un second échantillon(**M**) en mélangeant 5 g de feuilles de tomate(**T**) avec 5 g de feuilles d'ortie(**O**), avant de les rouler également en forme cylindrique dans du papier absorbant.



**Figure III.3 :** Echantillon rouler dans un papier absorbant.

### III.3. Méthode d'extraction sélectionnée

Dans notre travail expérimental, nous avons choisi la méthode d'extraction par solvant.

#### III.3.1. Extraction par l'appareil de Soxhlet multiples

L'extracteur de Soxhlet est une pièce de verrerie permettant d'effectuer une extraction solide-liquide avec une grande efficacité. L'appareil porte le nom de son inventeur : Franz von Soxhlet. Le Soxhlet est une méthode classique pour l'extraction solide-liquide [40].



**Figure III.4 :** Appareil de Soxhlet multiples.

- Nous avons rempli le ballon d'ébullition de l'appareil Soxhlet avec 100 mL de méthanol pour chaque échantillon, puis placé le ballon en position, en réglant la température à 70 °C. Les cartouches contenant les échantillons préparés ont ensuite été introduites dans le corps en verre de l'appareil, avant de lancer le processus d'extraction.



**Figure III.5 :** Les ballons d'ébullition ainsi que les cartouches contenant les échantillons ont été placés dans l'appareil.

- Le processus d'extraction est maintenu pendant une durée de 6 à 8 heures afin d'assurer une extraction complète des composés présents dans les échantillons.
- À l'issue du processus d'extraction, chaque extrait a été transféré dans un flacon en verre muni d'une étiquette précisant le type d'échantillon. Les flacons ont ensuite été laissés à refroidir à température ambiante avant d'être placés au réfrigérateur pour leur conservation.



**Figure III.6 :** la fin de l'extraction et les échantillons ont été placés dans des flacons en verre.

### III.4. Caractérisation des extraits

#### III.4.1. Chromatographie GC-MS

La chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS) est une technique analytique puissante, largement utilisée pour identifier et quantifier les composés présents dans des mélanges complexes, en particulier les composés organiques volatils.

Dans le cadre de cette étude, la chromatographie GC-MS a été utilisée pour identifier les différents constituants présents dans chaque extrait obtenu. Cette méthode permet non seulement de séparer les composés volatils ou semi-volatils selon leur temps de rétention (grâce à la chromatographie en phase gazeuse), mais également de les identifier de manière précise à partir de leur spectre de masse caractéristique [41].

Pour cela l'instrument GC-MS utilisé est de la société SHIMADZU sous la marque : Nexis GC-2030.



Figure III.7 : Chromatographie GC-MSS HIMADZU Nexis GC-2030.

### III.4.2. Spectroscopie FTIR

Pour la caractérisation des groupements fonctionnels présents dans les extraits préparés, la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) a été utilisée. Les analyses ont été réalisées à l'aide d'un spectromètre Agilent Cary 630, équipé d'un accessoire FTIR/ATR-DRIFT (Attenuated Total Reflectance – Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform). Cette technique permet d'identifier les différentes fonctions chimiques (hydroxyles, carbonyles, amines, etc.) par l'analyse des bandes d'absorption caractéristiques dans le domaine infrarouge. L'utilisation du mode ATR-DRIFT permet une analyse directe des échantillons solides ou pâteux, sans préparation complexe, tout en garantissant une bonne sensibilité et reproductibilité.



**Figure III.8 :** spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) Agilent Cary 630.

## III.5. Analyse phytochimique

### III.5.1. Dosage des teneurs en phénols et flavonoïdes

Cette étude a pour objectif de déterminer la teneur en composés phénoliques et en flavonoïdes, ainsi que d'évaluer le potentiel antioxydant des différents extraits préparés, à l'aide de la spectroscopie UV réalisée avec un spectrophotomètre Agilent Cary 60.

### III.5.1.1. Dosage de phénols totaux

#### III.5.1.1.1. Préparation des solutions

- **Extraits** : 1mg de chaque extrait est dissous dans 1ml de Méthanol
- **Folin-Ciocalteu (FCR)** : 1ml de (FCR) concentré + 9ml de H<sub>2</sub>O
- **Carbonate de Sodium(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)** : 7.5g de carbonate de (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) +100ml H<sub>2</sub>O

#### III.5.1.1.2. Mode opératoire

● Pour chaque extrait de plante, trois échantillons de 20 µL ont été prélevées. À chacune d'elles, 100 µL de réactif de Folin-Ciocalteu ont été ajoutés, suivis de 75 µL d'une solution de bicarbonate de sodium.

● Un blanc est préparé de la même manière en remplaçant l'extrait par le solvant utilisé (Méthanol)

- Incubation à l'obscurité pendant 2h30
- Lecture à 765 nm

#### III.5.1.1.3. Préparation de la gamme d'étalon de l'acide gallique

- S<sub>1</sub>=0.2mg/ml : 0.5 mg de l'acide gallique +5 ml de Méthanol
- Les dilutions sont préparées dans des eppendorfs comme la suite :

D1=25µg/ml: 25µl de S1+ 175µl de MeOH

D2=50µg/ml: 50µl de S1+ 150µl de MeOH

D3=75µg/ml: 75µl de S1+ 125µl de MeOH

D4=100µg/ml: 100µl de S1+ 100µl de MeOH

D5=125µg/ml: 125µl de S1+75µl de MeOH



**Figure III.9 :** Préparation des extraits pour l'analyse des composés phénoliques et flavonoïdiques.

### III.5.1.2. Dosage de Flavonoïdes totaux

#### III.5.1.2.1. Préparation des solutions

- **Extraits :** 1mg de chaque extrait est dissous dans 1ml de Méthanol
- **Trichlorure d'aluminium( $\text{AlCl}_3$ ) :** 200mg de ( $\text{AlCl}_3$ ) sont dissous dans 10ml de  $\text{H}_2\text{O}$
- **Acétate de Sodium :** 500mg d'Acétate de Sodium sont dissous dans 10ml de  $\text{H}_2\text{O}$

#### III.5.1.2.2. Mode opératoire

● Pour chaque extrait de plante, trois échantillons de 50  $\mu\text{L}$  ont été prélevées. À chacune d'elles, 50 $\mu\text{L}$  de réactif de Trichlorure de d'Aluminium ont été ajoutés, suivis de 150 $\mu\text{L}$  d'une solution d'Acétate de sodium.

● Un blanc est préparé de la même manière en remplaçant les réactives par le Méthanol (50  $\mu\text{L}$  d'extrait+200  $\mu\text{L}$  méthanol)

- Incubation à l'obscurité pendant 2h30
- Lecture à 440 nm

#### III.5.1.2.3. Gamme d'étalon de la Quercetine

- Solution mère = SM = 1 mg de la Quercetine + 5 ml de mathan (0 mg/ml).
- Les dilutions sont préparées dans des eppendorfs comme la suite :  
 $D1 = 25 \mu\text{g} / \text{m} \cdot \text{l} \cdot 25 \mu\text{l de SM} + 175 \mu\text{l de MeOH}$   
 $D2 = 50 \mu\text{g} / \text{m} \cdot \text{l} \cdot 50 \mu\text{l de SM} + 150 \mu\text{l de MeOH}$   
 $D3 = 75 \mu\text{g} / \text{m} \cdot \text{l} \cdot 75 \mu\text{l de SM} + 125 \mu\text{l de MeOH}$   
 $D4 = 100 \mu\text{g} / \text{m} \cdot \text{l} ; 100 \mu\text{l de SM} + 100 \mu\text{l de MeOH}$   
 $D5 = 125 \mu\text{g} / \text{m} \cdot \text{l} \cdot 125 \mu\text{l de SM} + 75 \mu\text{l de MeOH}$

#### III.5.2. Dosage des tanins condensés

Les tanins condensés sont diterminés par la méthode da la vanilline en milieu acide décrite par Juikunen-Lift (1985).

##### A. Mode opératoire

- 5  $\mu\text{l}$  de cheque extrait sont ajoutés à 150  $\mu\text{l}$  de vanilline à 4% (m/v méthanol).
- Le mélange est agité puis additionné de 750  $\mu\text{l}$  d'HCl concentré et laser incubé 20 mn à l'obscurité et à température ambiante. L'absorbance est mesurée à 550 nm par un spectrophotomètre UV (Per in Elmer) contre un blanc réalisé par le remplacement de l'extrait par de le Méthanol a 75%. Les résultats sont exprimés en mg équivalent catéchine / g de matière végétale sèche en se référant à la courbe d'étalonnage de la catéchine (obtenue à différentes concentrations).



Figure III.10 : Spectroscopie UV-Visible.

### III.5.3. Activité biologique (DPPH radical libre)

#### III.5.3.1. Principe de la réaction

● L'activité anti-radicalaire libre est déterminée par spectrophotométrie par le dosage du DPPH (Blois 1958), l' $\alpha$ -tocopherol, BHT et le BHA sont utilisés comme standards antioxydants.

#### III.5.3.2. Instrument utilisés

- Un lecteur de microplaque à 96 puits de volume 200  $\mu$ l pour chaque puits

#### III.5.3.3. Réactifs utilisés

- Méthanol
- DPPH
- Extrait de plante

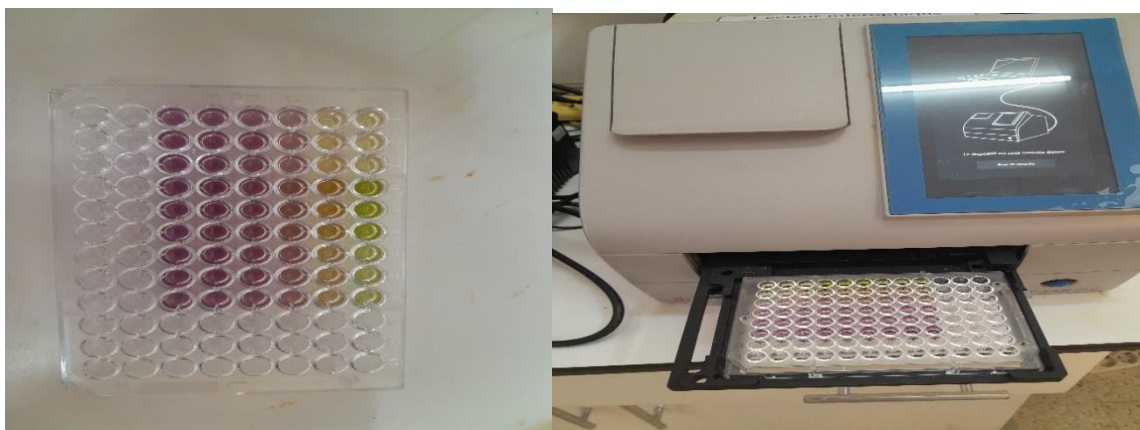
#### III.5.2.4. Mode opératoire

##### ➤ Préparation de la DPPH :

● Dissoudre 6 mg de DPPH dans un volume de 100 ml de méthanol, le radical DPPH est dissous dans le méthanol et gardé à  $-20^{\circ}\text{C}$  à l'abri de la lumière. L'absorbance est 0.5 nm (517 nm) dans le spectrophotomètre.

##### ➤ Procédure :

- 160  $\mu$ l (DPPH) + 40  $\mu$ l (extrait) + lecture 517



**Figure III.11** : spectrophotomètre-lecteur microplaque Multiskan Sky.

### III.6. Préparation de l'acier

- Dans un premier temps, le métal a été découpé en petits morceaux d'environ 1 cm<sup>3</sup>. Ensuite, la couche d'oxydation en surface a été éliminée, puis la surface du métal a été polie à l'aide d'un appareil de polissage afin de la préparer pour les essais.



**Figure III.12 :** pièces d'acier XC42 avant et après polissage.

#### III.6.1. Aciers étudiés

- Dans ce travail, nous avons choisi l'acier XC42 pour la réalisation des expériences.

#### III.5.2. Compositions chimique de l'acier XC42 en (%)

**Tableau III.1. :** Composition de l'acier XC42 étudié [42].

| C    | S     | Mn   | P     | Si   | Ni   | Cr   | Mo   | Cu   | Al    |
|------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|-------|
| 0.42 | 0.031 | 0.72 | 0.023 | 0.23 | 0.03 | 0.15 | 0.01 | 0.03 | 0.045 |

### III.7. Étude d'effets des extraits sur l'acier en milieu acide

#### III.7.1. Préparation des solutions d'immersion pour l'acier XC42

Pour chaque extrait, quatre solutions ont été préparé :

**Solution 1 :** HCl 1M (Témoin)

**Solution 2 :** 100 ppm ( HCl + Extrait )

**Solution 3 :** 300 ppm ( HCl + Extrait )

**Solution 4 :** 600 ppm ( HCl + Extrait )

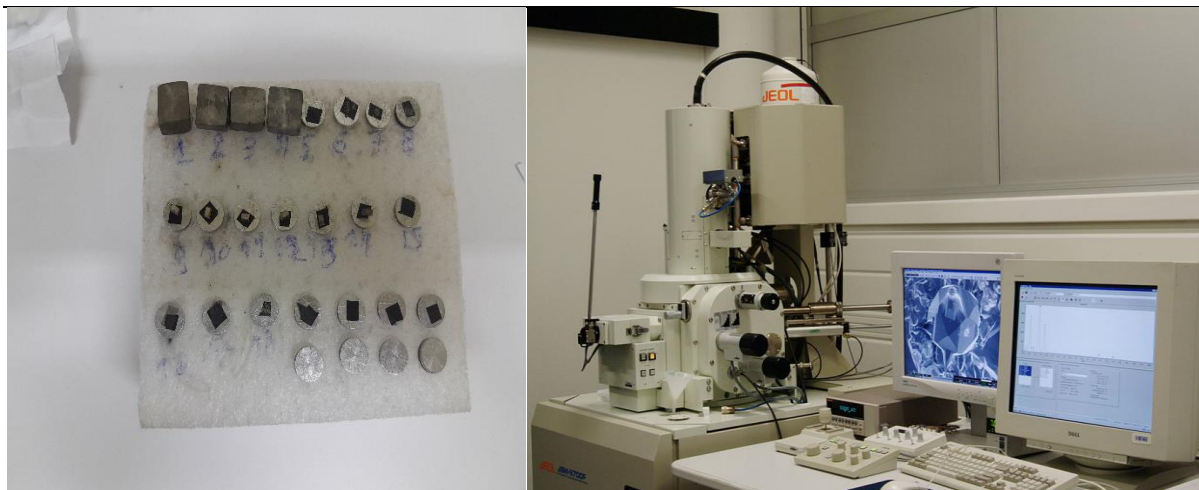


**Figure III.13 :** Etude gravimétrique.

### **III.8. Analyses de l'acier XC42 après immersion dans des solutions d'HCl contenant des extraits**

#### **III.8.1. Microscopie électronique à balayage (MEB)**

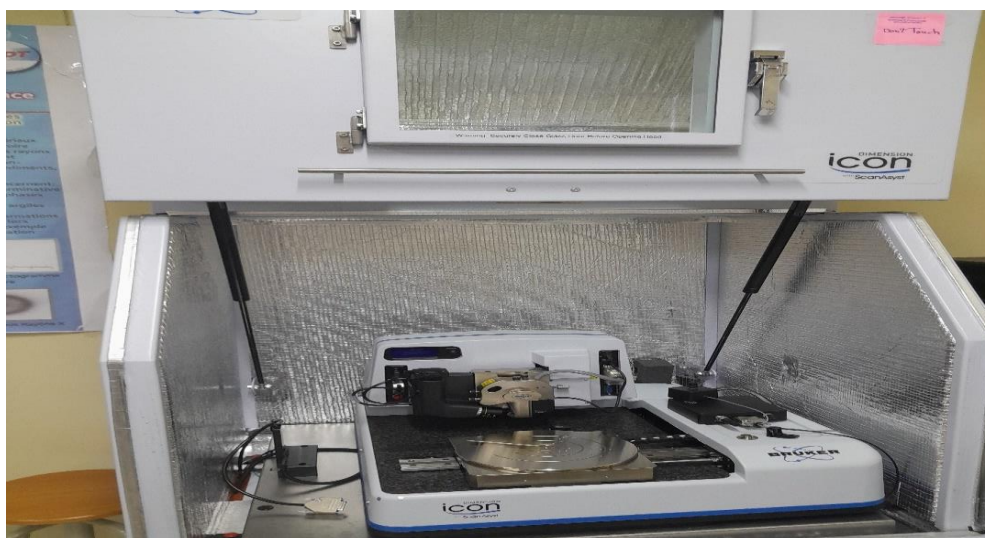
- Le microscope électronique à balayage (MEB) est un instrument de laboratoire avancé utilisé pour obtenir des images en haute résolution de la surface d'échantillons solides. Il est largement employé dans des domaines tels que la biologie, la science des matériaux, la chimie, la paléontologie, la microélectronique et la mécanique.
- Les résultats de l'analyse ont été réalisés à l'aide de l'appareil de MEB de la marque Thermo Fisher (EX FEI) Prisma EX.



**Figure III.14 :** Microscope Electrique à Balayage (MEB).

### III.8.2. Microscopie à Force Atomique (AFM)

- La Microscopie à Force Atomique (AFM) est une technique d'imagerie de surface très puissante qui permet d'observer et de manipuler la matière à l'échelle nanométrique, voire atomique, sans utiliser de faisceau d'électrons (contrairement au MEB). Elle fait partie de la famille des microscopies à sonde locale.
- L'analyse a été effectuée à l'aide d'un microscope (AFM) de marque Bruker, modèle Dimension Icon.



**Figure III.15.** Microscopie à Force Atomique (AFM).

**CHPITRE IV**  
**RESULTATS ET DISCUTION**

## IV. Résultats et discussion

### IV.1. Dosages des teneurs des flavonoïdes et les composés phénoliques

#### IV.1.1. Teneurs des flavonoïdes

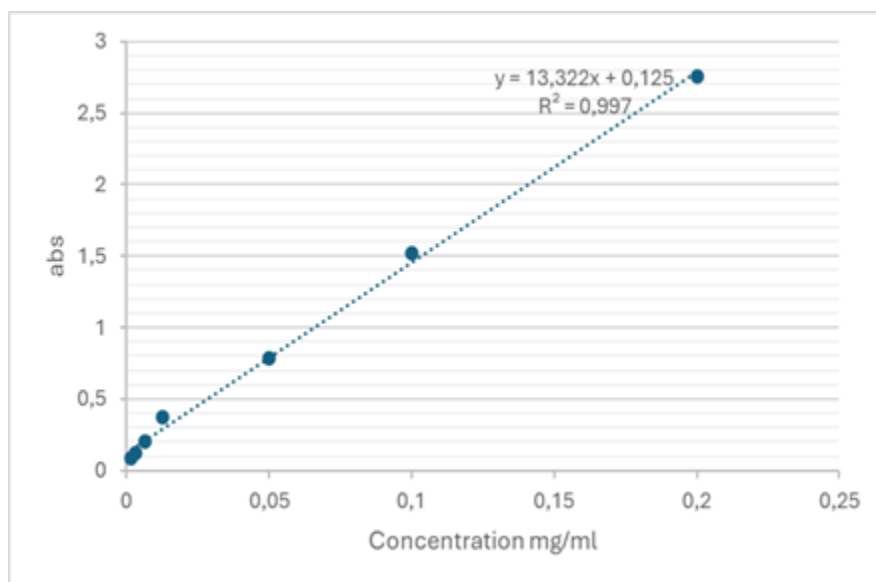
Basant sur les courbes d'étalonnage qui ont été déjà préparé on a calculé la teneur en flavonoïde, le phénol et le tanin présents dans chaque extrait préparés (T, O et M).

##### IV.1.1.1 Courbe d'étalonnage de Quercetine

Les résultats montrent que les extraits étudiés contiennent une faible quantité de flavonoïdes, ce qui suggère soit une pauvreté naturelle du végétal en ces composés, soit une efficacité limitée de la méthode d'extraction utilisée.

**Tableau IV.1** : Teneur en flavonoïdes dans les extraits préparés.

|             | O      | T       | M       |
|-------------|--------|---------|---------|
| Abs         | 0.6505 | 0.1886  | 0.6504  |
| Conc(mg/ml) | 0.0394 | 0.00477 | 0.03994 |



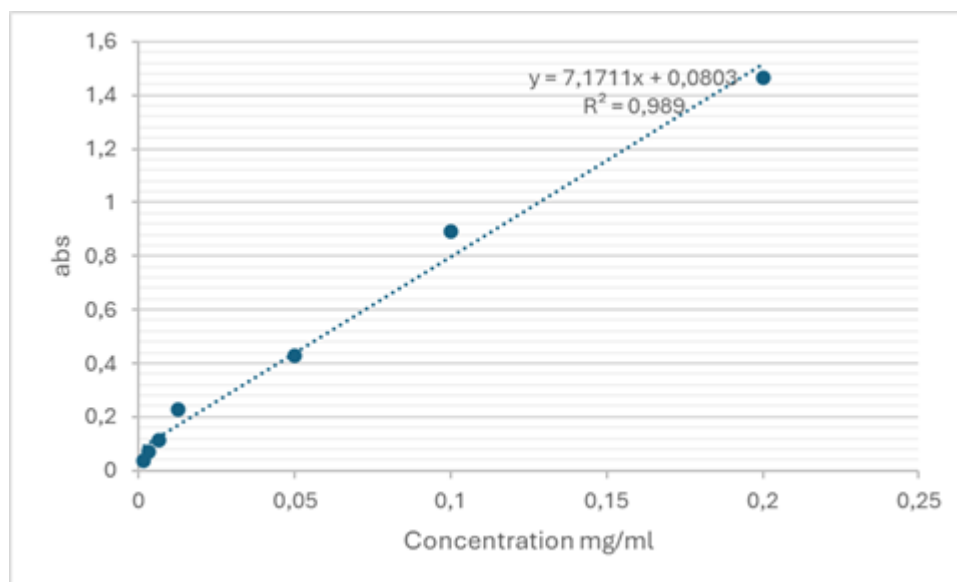
**Figure IV.1** : Courbe d'étalonnage de Quercetine.

### IV.1.2. Teneur en polyphénol

Le tableau ci-dessous (IV.2) montre les différentes concentrations en composés phénoliques présentes dans chaque extrait. On note que les composés phénoliques sont présents dans tous les extraits préparés avec différentes concentrations.

**Tableau IV.2 :** Teneur en phénols dans les extraits préparés.

|             | O      | T       | M      |
|-------------|--------|---------|--------|
| Abs         | 0.3121 | 0.2728  | 0.3121 |
| Conc(mg/ml) | 0.0687 | 0.02684 | 0.0323 |



**Figure IV.2 :** Courbe d'étalonnage d'acide gallique.

Le tableau (IV.2) montre les différentes concentrations en phénols présentes dans chaque extrait. On remarque que les composés flavonoïdes sont présents dans tous les extraits préparés avec différentes concentrations.

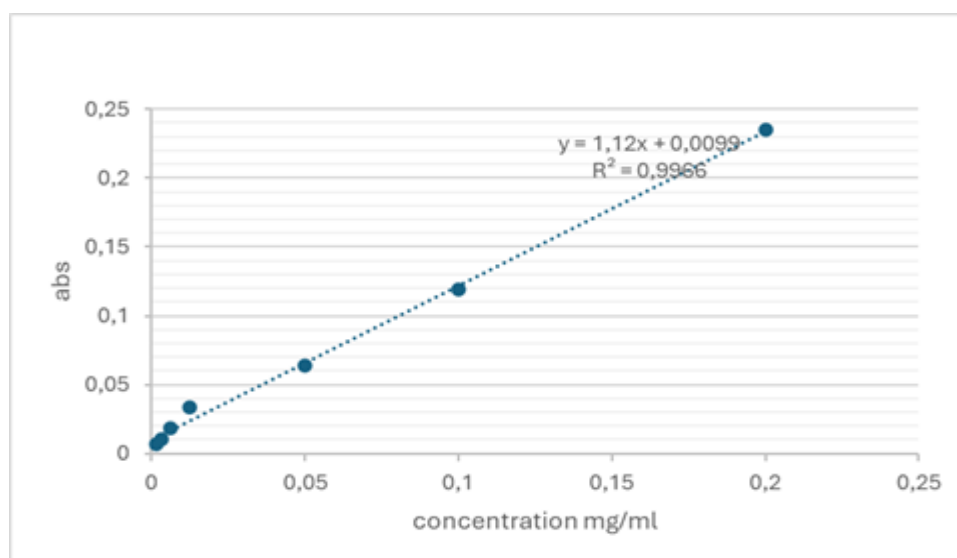
### IV.2. Teneurs de tanin (méthode de Folin-Ciocalteu)

L'analyse de la teneur en tanins des trois échantillons montre que l'échantillon (O) détient la concentration la plus élevée, avec environ 0,58 mg/ml, suivi par l'échantillon (T) avec 0,34 mg/ml. L'échantillon (M), qui est un mélange équimolaire des extraits O et T, présente une teneur intermédiaire en tanins d'environ 0,14 mg/ml. Cette valeur plus faible que la moyenne

des deux pourrait s'expliquer par des interactions entre composés lors du mélange ou par des variations dans la mesure expérimentale.

**Tableau IV.3 :** Teneur en composés tanin dans les extraits préparés.

|             | O      | T      | M      |
|-------------|--------|--------|--------|
| Abs         | 0.6583 | 0.3941 | 0.1651 |
| Conc(mg/ml) | 0.5786 | 0.3427 | 0.1386 |



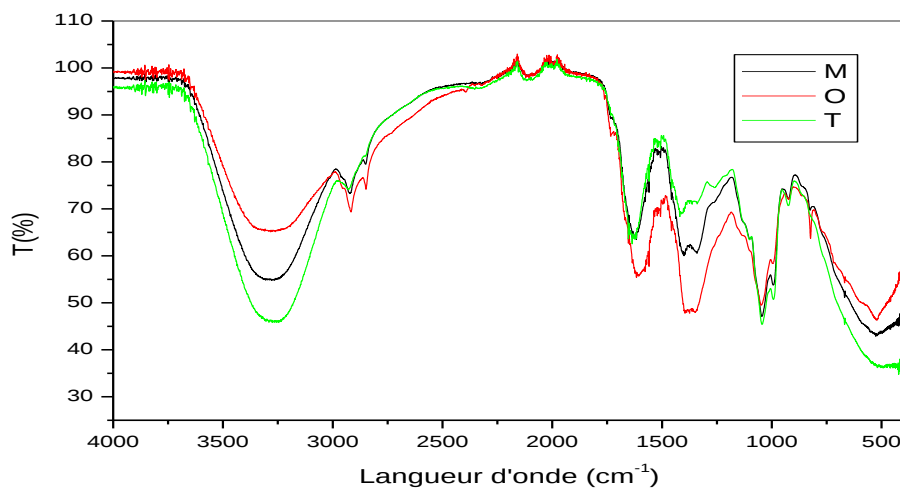
**Figure IV.3 :** Courbe d'étalonnage de la catéchine.

### IV.3. Analyse spectroscopique FTIR

Les spectres FTIR pour les extraits préparés sont illustrés dans la figure III-1. On observe la présence d'une large bande d'absorption entre 3200 et 3600  $\text{cm}^{-1}$  qui indique la présence de groupes hydroxyles (-OH) typiques des phénols, connus pour leur capacité à former des couches protectrices sur les surfaces métalliques (interaction par adsorption).

La présence d'un pic autour de 1700  $\text{cm}^{-1}$  correspondant aux vibrations des groupements carbonyle (C=O) des acides carboxyliques, suggère également la capacité de ces composés à interagir chimiquement avec le métal, renforçant la formation d'une couche inhibitrice. Les bandes situées entre 1600 et 1500  $\text{cm}^{-1}$  attribuées aux groupements aromatiques, indiquent une

structure conjuguée qui peut favoriser la stabilisation des complexes formés à la surface métallique.



**Figure IV.4 :** Spectres infrarouge (FTIR) des extraits préparés.

#### IV.4 Analyse chromatographique GC-MS

La figure IV.2 montre les résultats des analyses de GC-MS des différents extraits (M) où est un mélange des deux extraits préparés. Dans cette étude, les constituants phytochimiques des différents extraits préparés ont été identifiés par l'analyse GC-MS. Les composés phytochimiques des extraits ont été comparés aux composés chimiques de la bibliothèque de données du NIST17.lib et W11N17MAIN1.lib. L'extrait analysé contient plusieurs composés bioactifs à potentiel inhibiteur de corrosion. Les plus abondants, tels que  $\tau$ -cadinol, phytol, carvone et heneicosane[43]. sont bien connus pour leur capacité à s'adsorber sur les surfaces métalliques et à former une couche protectrice contre les attaques acides [44].

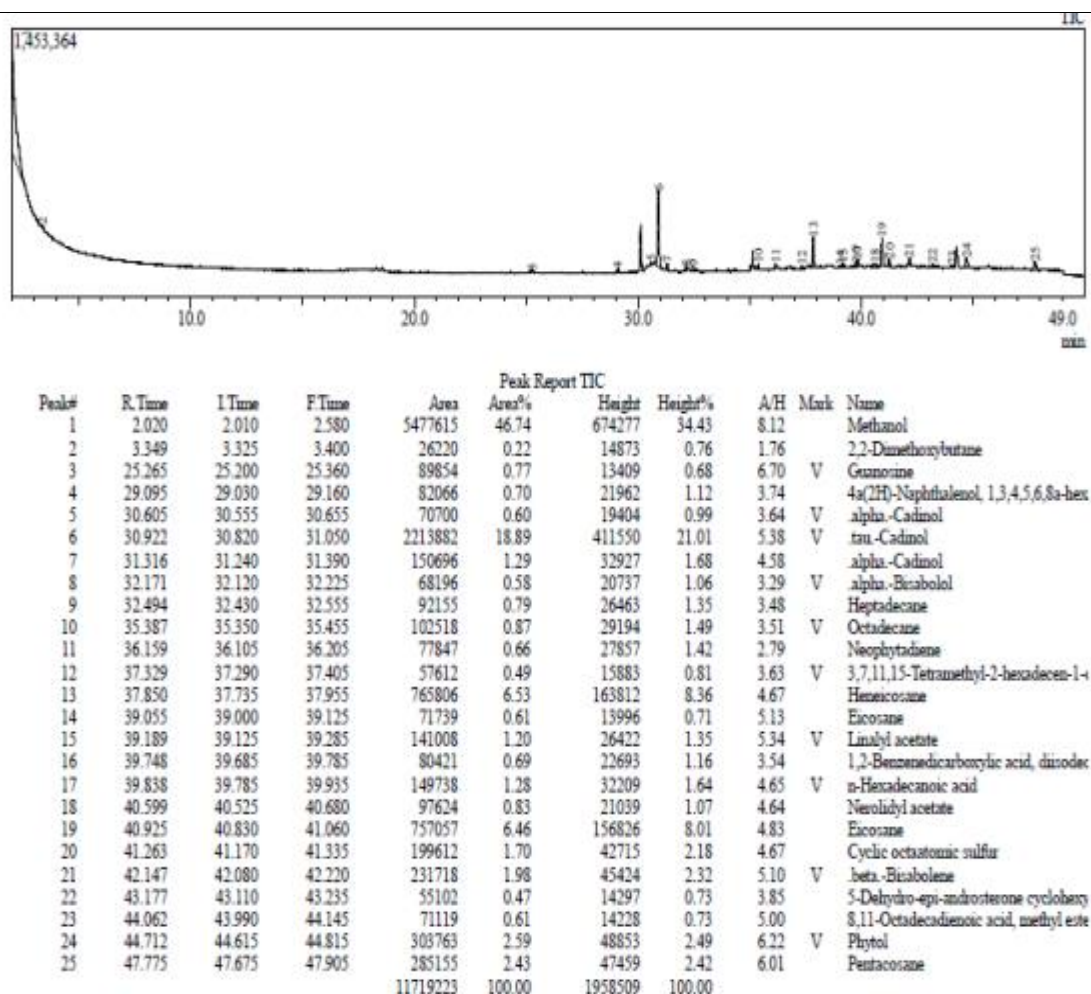


Figure IV.5 : Analyse chromatographique GC-MS des extraits préparés M(T+O).

#### IV.5. Analyse gravimétrique

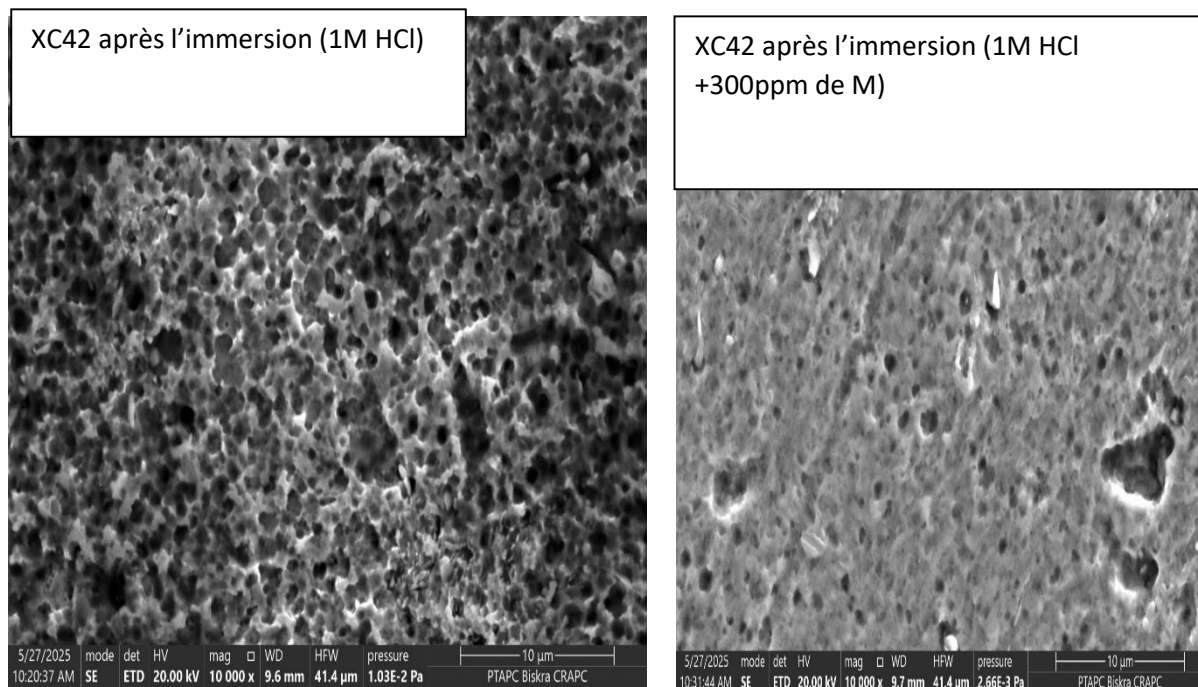
Les résultats présentés dans le Tableau... montrent l'évolution du taux de corrosion de l'acier XC42 immergé dans une solution de HCl 1 M, en présence des extraits préparés, après 24 h et 48 h d'immersion. On observe une nette diminution du taux de corrosion avec l'ajout de l'extrait, diminution qui devient plus marquée avec l'augmentation de la concentration. Cette réduction s'explique par l'adsorption progressive des molécules actives de l'extrait sur la surface de l'acier, formant ainsi une couche protectrice qui limite l'action agressive du milieu acide. Ce profil chimique soutient les résultats de GC-MS précédents et confirme que l'extrait possède une efficacité inhibitrice notable, grâce à la synergie entre ses constituants majoritaires et mineurs.

**Tableau IV.4 :** Vitesses de corrosion et efficacités inhibitrices calculées de l'acier XC42 immergé dans une solution 1M de HCL avec l'extrait à différentes concentrations.

| Extrait | Concentration (PPM) | 24 heures  |     | 48 heures  |     |
|---------|---------------------|------------|-----|------------|-----|
|         |                     | Cr (mm/y)  | EI% | Cr (mm/y)  | EI% |
| T       | 100                 | 0,00084359 | 84  | 0,00214882 | 64  |
|         | 300                 | 0,00027234 | 92  | 0,00025573 | 81  |
|         | 600                 | 0,00027898 | 90  | 0,00025573 | 45  |
| O       | 100                 | 0,00028562 | 94  | 0,00022916 | 72  |
|         | 300                 | 0,00031219 | 94  | 0,00022252 | 88  |
|         | 600                 | 0,00033876 | 93  | 0,00022916 | 45  |
| M       | 100                 | 0,00037862 | 93  | 0,00031884 | 79  |
|         | 300                 | 0,00027898 | 96  | 0,0002192  | 77  |
|         | 600                 | 0,00025905 | 95  | 0,00023913 | 77  |

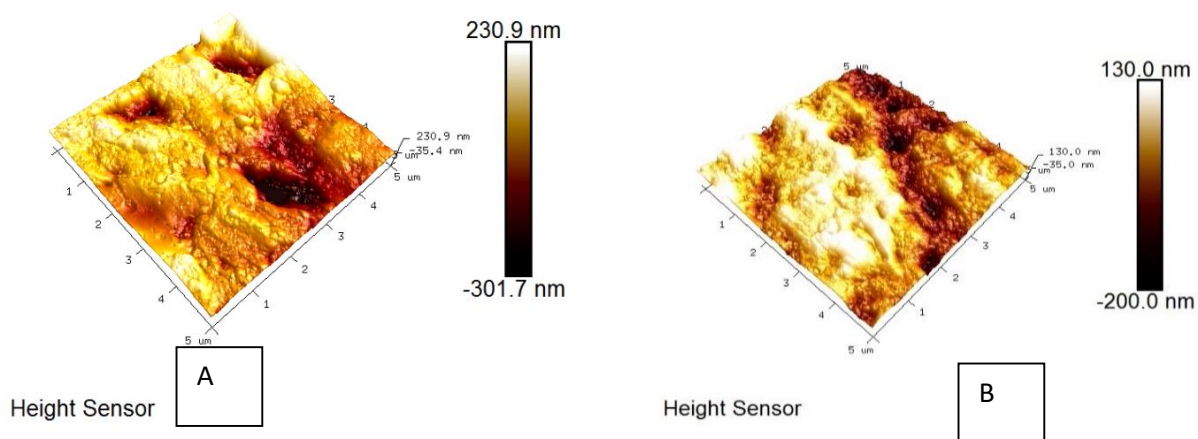
#### IV.6. Etude micrographique (MEB-AFM)

D'après les analyses morphologiques par le MEB on peut confirmer que le bon inhibiteur de corrosion est l'extrait de M avec la concentration optimale de 300ppm.



**Figure IV.6 :** Microstructure par le MEB de l'acier XC42 immergé dans un milieu corrosif de 1M de HCl sans inhibiteur et avec 300ppm de l'extrait M (inhibiteur).

La figure IV.7 montre l'analyse AFM de la surface de l'acier XC42 révèle une rugosité moyenne de 230,9 nm après immersion dans une solution de HCl 1 M sans inhibiteur, indiquant une attaque corrosive sévère. En présence de 300 ppm du mélange des deux extraits (50 % T + 50 % O), la rugosité diminue à 130 nm, ce qui permet de dire que la surface devienne beaucoup plus lisse. Cette réduction confirme l'efficacité inhibitrice de l'extrait, probablement due à la formation d'un film protecteur sur la surface métallique, limitant ainsi la progression de la corrosion.



**Figure IV.7 :** Microstructure par AFM de l'acier XC42 immergé dans un milieu corrosif de 1M de HCl sans inhibiteur et avec 300ppm de l'extrait M (inhibiteur).

**CONCLUSION GENERALE**

### Conclusion générale

D'après les résultats obtenus dans ce travail on peut conclure que :

- L'analyse phytochimique des extraits végétaux a révélé la présence significative de composés phénoliques, flavonoïdes et tanins en quantités variables. Ces composés sont reconnus pour leurs propriétés antioxydantes et leur capacité à adsorber sur les surfaces métalliques.
- L'analyse FTIR obtenu des extraits des feuilles de tomate et d'ortie illustre la présence de groupes fonctionnels tels que les groupes hydroxyles des phénols, les groupements carbonyles des acides carboxyliques et structures aromatiques. Ces composés possèdent une forte adhésion sur surfaces métalliques et peuvent former une couche protectrice sur la surface métallique.
- L'analyse GC-MS montre que l'extrait contient plusieurs composés bioactifs qui ont des propriétés inhibitrices de corrosion parce que ses molécules peuvent adsorbées sur la surface métallique et empêche la corrosion.
- L'étude gravimétrique réalisée sur l'acier XC42 en milieu acide (HCl 1 M) a démontré que l'extrait préparé (l'extrait de feuilles de tomate et l'extrait des feuilles d'ortie agit efficacement comme inhibiteur de corrosion. L'efficacité inhibitrice ( $E_i$ ) atteint jusqu'à 96 % à 300ppm de (M). Ces résultats confirment la formation d'un film protecteur sur la surface de l'acier et réduire la réaction corrosive.
- Les observations par MEB ont montré que la surface de l'acier XC42 immergée dans une solution acide (HCl 1 M) sans inhibiteur est fortement endommagée, présentant des piqûres et une attaque généralisée mais en présence de l'extrait végétal (notamment le mélange M = 50 % T + 50 % O à 300 ppm), la surface apparaît nettement plus **lisse** ce qui permet de dire que la présence d'une concentration de 300ppm de mélange des deux extraits (T+O) protège la surface du métal XC42.
- Les résultats AFM confirment le résultat de MEB où la rugosité de la surface passe de 230,9 nm (en milieu acide seul) à 130 nm avec l'extrait M. Cette réduction importante indique que le film inhibiteur formé par l'extrait des feuilles de tomate et d'ortie limitent la corrosion de la surface métallique.

## CONCLUSION GENERALE

Ces résultats justifient la poursuite des études pour évaluer l'efficacité de ces extraits comme inhibiteurs écologiques, offrant une alternative naturelle aux composés chimiques classiques souvent toxiques.

## Référence bibliographiques

- [1] I. Ouilles « *Étude des revêtements des aciers contre la corrosion au milieu salin* », Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie (UMMTO) (2024).
- [2] R. Berchiche & K. Bouadi « *Audit de la maîtrise du processus de fabrication industrielle – Cas : Electro-industries Azazga* », Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie (2022).
- [3] M. Goland « *Comportement en corrosion et en corrosion sous contrainte en milieu primaire REP d'un acier inoxydable 316L élaboré par fabrication additive WAAM et WLAM* » Thèse de doctorat, Université Sorbonne, France (2024).
- [4] E. Mahfouf & K. Derbal « *Utilisation des déchets organiques biodégradables pour la production de biohydrogène par fermentation obscure* » Thèse de doctorat, Université Constantine 3 Salah Boubnider, Algérie (2023).
- [5] A. Attou « *Étude expérimentale et théorique de L'inhibition de la corrosion d'acier par composés organiques* », thèse de doctorat, Université de Saïda, Algérie (2021).
- [6] AFNOR « *Corrosion des métaux et alliages : terme principaux et définition* » NF EN ISO8044, Paris, AFNOR (2000).
- [7] C. VARGEL « *le comportement de l'aluminium et de ses alliages* » DUNOD Technique, 25-105. (1979).
- [8] F.Boumegue, D.Iabbassen « *Etude de l'inhibition de la corrosion de zinc dans l'acide chlorhydrique par l'extrait de la plante d'Ortie* » Mémoire de fin d'études, Université A. MIRA – Bejaia, Algérie (2017).
- [9] B. Korichi « *Étude et caractérisation de la corrosion des alliages d'Aluminium-Silicium* » Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie (2024).
- [10] S. Marmi « *Comportement à la corrosion des revêtements à base de nickel et de chrome sur des substrats cuivre* » Thèse de doctorat Université de Biskra, Algérie (2017).
- [11] R. Mehibil « *Étude de l'efficacité inhibitrice de quelques nouveaux inhibiteurs, dits non polluants, sur la corrosion de deux types d'alliages d'aluminium* » Mémoire de magistère Université de Skikda, Algérie (2008).

- [12] A. Ziane et A.Adjouati « L'inhibition de la corrosion de l'acier par les extraits aqueux de feuilles d'olivier », mémoire de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie(2020).
- [13] C. Fiaud, C. Lemaitre, N. Pebère « *Inhibiteurs de corrosion* », in : *Corrosion et Anticorrosion (pratique industrielle)*, Hernès Science Publications, Paris, France (2002).
- [14] D. Landolt « *Corrosion et chimie de surface des métaux* », Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne (1993).
- [15] H. Haouame et Z.Bensaada « Étude gravimétrique de L'inhibition de corrosion de l'aluminium par l'huile essentielle de menthe verte (menthe specata) en milieu salin (3.0%Nacl) », mémoire de master, Université Guelma, Algérie (2021/2022).
- [16] I. Derouiche et E.Dalaa « Étude théorique d'un inhibiteur naturel », mémoire de master, Université Bordj Bou Arreridj, Algérie (2021).
- [17] A. Habchi « Etude de l'effet de la température sur la corrosion de l'acier XC52 en présence du sulfarlem et leur sel correspondent dans un milieu H<sub>2</sub> SO<sub>4</sub> 20% », Mémoire master académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algerie (2013).
- [18] H. Elbakouri, « Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier doux au carbone en milieu acide ortho phosphorique par un antibiotique organique », Mémoire d'étude supérieures, Université Mohammed 1 – Oujda, Maroc, (2000).
- [19] A. Oulabbas « nouvelles voies d'inhibition de la corrosion des aciers plus respectueuses de l'environnement », Mémoire de magister, université de Souk-Ahras, Algérie (2012-2013).
- [20] B. Houda, Mémoire magister « Modélisation de l'effet de la corrosion sur des tubes inoxydables destines aux appareils à pression », Mémoire magister, Université Skikda, Algérie (2014).
- [21] F. Bentiss,« hétérocycles penta atomiques : synthèses organiques, études des propriétés inhibitrice de la corrosion et des propriétés complexantes », Habilitation à diriger des recherches (HDR), Université de Lille, France (2006).

[22] M. Annou « Etude de la résistance à la corrosion des dépôts composites (Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) », Mémoire magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie (2013).

[23] F. Khoukhi, « Etude de l'efficacité de deux inhibiteurs de corrosion dans les milieux multiphasiques (eau, huile et gaz) », Mémoire de magister, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes, Algérie (2008).

[24] L. Hannachi, W. Dafri « *Les Liquides Ioniques Inhibiteurs De Corrosion Efficace Sur l'acier A9 Dans Un Milieu Acide : Une Approche Ecologique* », mémoire de fin d'études, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie (2018).

[25] H.E. Waldrip « *Present Day Aspects of Condensate Well Corrosion* », *Corr*, (1948).

[26] N.E. Hamner « *Scope and importance of inhibitor technology* », in : C.C. Nathan (éd.), *NACE Corrosion Inhibitors*, National Association of Corrosion Engineers, Houston, USA (1973).

[27] Y. Rezaiguia, H. Ait Hamouda « *Etude phytochimique et évaluation de l'activité anti corrosive de l'extrait de feuilles d'Olea europaea L. : Application à l'inhibition de l'acier en milieu NaCl 3%* », mémoire de fin d'études, Université 08 Mai 1945 Guelma, Algérie (2022).

[28] A. Aghzzaf « *Argiles en tant que réservoirs d'inhibiteurs de corrosion métallique issus de ressources naturelles dans des peintures pour la protection des métaux* », thèse de doctorat, Université de Lorraine, Nancy, France (2014).

[29] Mohamed el Mokhtar MANSOURI « Etude de corrosion en utilisant les inhibiteurs », université de Biskra (2020).

[30] K. Rahmouni, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie CURIE. Paris VI. France (2005).

[31] C. Fiaud, « Inhibiteur de corrosion », Université Pierre & Marie curie, ENSC, Paris. France (1972).

[32] D. Landolt « *Corrosion et chimie de surface des métaux* », 1<sup>re</sup> édition, Alden Press, Oxford, Grande Bretagne (1993).

- [33] M. Henriquez Gonzalez « *Étude d'un traitement multifonctionnel vert pour la protection contre la corrosion de l'acier au carbone API 5L-X65 en milieu CO<sub>2</sub>* », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France (2011).
- [34] V. Meiffren « *Développement de nouveaux revêtements anti-corrosion sur alliages de zinc par des voies sol-gel en milieu aqueux ou faiblement solvanté* », thèse de doctorat, Université de Toulouse, France (2011).
- [35] M. Deghamna, B. Zeroual « *Développement d'un revêtement anti-corrosion à base de TMOS sur l'acier doux A9 et l'acier inoxydable C0400-08 via le procédé sol-gel* », mémoire de fin d'études, Université 8 Mai 1945, Guelma (2019).
- [36] Z. Bensouda « *Extraction, caractérisation et potentiel inhibiteur des huiles essentielles contre la corrosion d'aciers doux dans une solution chlorhydrique molaire* », thèse de doctorat, Université de Fès, Maroc, (2018).
- [37] N. Hajjaji « *Vers des nouveaux inhibiteurs de corrosion pour la protection du patrimoine métallique en bronze au Maroc* », Babel, Maroc (2021).
- [38] L. Benmessaoud, et all. « *Revue : Huiles et extraits de plantes comme inhibiteurs de corrosion pour différents métaux et alliages dans le milieu acide chlorhydrique* » université Casablanca, Maroc (2013).
- [39] A. khadraoui « *Extraction et pouvoir bio-inhibiteur des substances naturelles d'origine végétal vis-à-vis de la corrosion acide de L'acier* », thèse de doctorat, Université de Blida1, Algérie (2014).
- [40] J. Leybros, P. Frémeaux « *Extraction solide-liquide : aspects théoriques* », *Techniques de l'ingénieur*, traité Génie des procédés, J1 077 06 (1990).
- [41] Q. Dumont « *Attachement anionique en spectrométrie de masse électrospray négative : étude de la régiosélectivité et application à l'amélioration de la détection des stéroïdes en matrice urinaire pour le contrôle antidopage dans le sport* », thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie – Paris VI, France (2015).

[42] W. Zaim « *Étude de l'inhibiteur le réglisse sur le comportement à la corrosion de l'acier XC42* », mémoire de fin d'études, Université de Biskra, Algérie (2021).

[43] [ZHANG, Yiyun, BAO, Xin, ZHU, Yiqing, et al. Advances in machine learning screening of food bioactive compounds. Trends in Food Science & Technology, (2024).

[44] DJAPIC, Nina. Chemical Composition of Vitis vinifera Leaves Essential Oil and N. Djapic « *Chemical composition of Vitis vinifera leaves essential oil and supercritical carbon dioxide extract* », *Natural Product Communications*, (2023).

## Résumé

La corrosion est un phénomène naturel qui dégrade les matériaux métalliques sous l'effet de l'humidité, de l'oxygène ou d'agents chimiques. Elle représente un défi majeur pour l'industrie, entraînant des pertes économiques et des risques de sécurité. Pour la maîtriser, des méthodes telles que l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion – naturels ou chimiques – sont largement utilisées pour protéger les structures métalliques dans divers secteurs.

L'étude menée sur les extraits de feuilles de tomate et d'ortie a mis en évidence leur efficacité comme inhibiteurs naturels de corrosion pour l'acier XC42 en milieu acide (HCl 1 M). L'analyse phytochimique a révélé la présence de composés phénoliques, flavonoïdes et tanins, connus pour leurs propriétés antioxydantes et leur capacité d'adsorption sur les surfaces métalliques. Les analyses FTIR ont confirmé la présence de groupes fonctionnels (hydroxyles, carbonyles, structures aromatiques) favorisant la formation d'un film protecteur. La GC-MS a identifié plusieurs composés bioactifs susceptibles de se fixer à la surface métallique et d'enrayer le processus de corrosion. Les tests gravimétriques ont démontré une efficacité inhibitrice allant jusqu'à 96 % à une concentration de 300 ppm du mélange des deux extraits (50 % tomate + 50 % ortie), indiquant la formation d'un film protecteur sur l'acier. Les observations MEB ont montré une surface fortement attaquée sans inhibiteur, tandis qu'en présence de l'extrait, la surface était visiblement protégée. Enfin, l'analyse AFM a révélé une diminution significative de la rugosité de la surface (de 230,9 nm à 130 nm), confirmant l'effet protecteur de l'extrait végétal.

## Abstract

Corrosion is a natural phenomenon that degrades metallic materials due to the effects of humidity, oxygen, or chemical agents. It poses a major challenge to industry, leading to economic losses and safety risks. To control it, methods such as the use of corrosion inhibitors (whether natural or chemical) are widely employed to protect metal structures in various sectors.

The study conducted on tomato and nettle leaf extracts demonstrated their effectiveness as natural corrosion inhibitors for XC42 steel in an acidic medium (1 M HCl). Phytochemical analysis revealed the presence of phenolic compounds, flavonoids, and tannins, known for their antioxidant properties and ability to adsorb onto metal surfaces. FTIR analysis confirmed the presence of functional groups (hydroxyls, carbonyls, aromatic structures) that promote the formation of a protective film. GC-MS identified several bioactive compounds capable of binding to the metal surface and interrupting the corrosion process.

Gravimetric tests showed an inhibitory efficiency of up to 96% at a concentration of 300 ppm of the mixed extracts (50% tomato + 50% nettle), indicating the formation of a protective film on the steel surface. SEM observations revealed severe surface damage in the absence of an inhibitor, while in the presence of the extract, the surface appeared clearly protected. Finally, AFM analysis showed a significant reduction in surface roughness (from 230.9 nm to 130 nm) confirming the protective effect of the plant-based extract.

ملحق القرار رقم: 933 المؤرخ في: 20 جويلية 2016

الذي يحدد القواعد المتعلقة بالوقاية من السرقة العلمية ومكافحتها

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

مؤسسة التعليم العالي:

نموذج التصريح الشرفي

خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد: طوبى عبد الوكيل الصفة: طالب، أستاذ باحث، باحث دائم: طالب

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم: 206964336 والصادرة بتاريخ: 2021.09.19

المسجل بكلية العلوم والتكنولوجيا قسم: البيولوجيا الصناعية

و المكلف بإنجاز أعمال بحث ( مذكرة التخرج ، مذكرة ماستر ، مذكرة ماجستير ، أطروحة

دكتوراه)، عنوانها: Synthèse et caractérisation des inhibiteurs

de la corrosion

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية ومعايير الأخلاقيات المهنية والنزاهة الأكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2021.06.14

امضاء المعني



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

بسكرة في: 2025/06/17

جامعة محمد خيضر-بسكرة

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الكيمياء الصناعي

إذن بإيداع مذكرة الماستر بعد التصحيحات

نحن الممضين أسفله الأساتذة: بورمل الشريفة و ساكري عادل

الرتبة: أساتذة محاضرين قسم أ

أساتذة مشرفين على مذكرة ماستر -للطالب (ة): طوير عبد الوهاب

الشعبة: هندسة الطرائق

التخصص: هندسة الطرائق للبيئة

بعنوان: Synthèse et caractérisations des inhibiteurs naturels de corrosion

نرخص بإيداع المذكرة المذكورة.

رئيس لجنة المناقشة

الأستاذ المشرف

