الجمهـوريـــــة الجزائـــريـــــة الديمقـــراطيـــــة الشـعبيـــة
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التـــعلـــيـــــم العـــــالـــــي و البـحـــــــث العـلمـــــي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Sécurité Industrielle et Environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle

Spécialité : Sécurité Industrielle et Environnement

Thème

Etude et évaluation de l`efficacité des inhibiteurs de corrosion dans une unité industrielle fonctionnant en régime continu

Présenté et soutenu publiquement par :

Errebih Boualem **Et** Bouzir Senouci

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mme. SEGUENI Fouzia	MCB	IMSI / Univ Oran 2	Président
Mme. CHAHMANA Safia	MCA	IMSI / Univ Oran 2	Encadrante
Mme. TALBI Zehera	MCB	IMSI / Univ Oran 2	Examinateur

Année 2025/2026

Remerciements

Pour commencer, merci à ALLAH le Tout-Puissant pour le courage qu'Il a mis en nous. Ce fut Lui qui donna la volonté, pas seulement au début mais jusqu'au bout. La force aussi vint de Lui, celle dont on avait besoin pour mener cela à bien. Sans Son aide, chaque étape aurait été plus lourde. C'est grâce à Sa direction que le chemin est devenu clair peu à peu. Un grand merci va à Madame Chahmana Safia, toujours présente, qui a guidé ce travail pas à pas. Ses remarques ont souvent changé la direction des choses, sans bruit. Chaque échange comptait, même les plus brefs. Elle prenait le temps quand d'autres l'auraient laissé filer. L'aide offerte n'était ni spectaculaire ni tapageuse - juste là, exactement quand il fallait. Pas une étape ne s'est faite sans qu'elle soit en arrière-plan, attentive. Son appui ressemblait moins à un rôle qu'à une constance tranquille. Ce projet porte, ici et là, les marques de ses interventions calmes mais justes. La patience qu'elle a montrée mérite d'être nommée, simplement. Même après coup, on sent que certaines phrases portent encore sa trace. Un grand merci aux personnes du jury ayant dit oui pour examiner ce travail. Leur temps compte beaucoup ici. Chaque regard posé dessus a eu son importance. Sans elles, cette étape n'aurait pas la même forme. Elles ont pris le risque de plonger dans ces pages. Leurs retours aideront à y voir plus clair ensuite. Un grand merci aux professeurs du département Hygiène et Sécurité Industrielle. Leur accompagnement a compté, tout au long de nos études. Grâce à eux, on comprend mieux certains enjeux. Chaque conseil reçu fait maintenant partie de ce qu'on sait. Sans leur implication, le chemin aurait été plus lourd. Ce qu'ils ont partagé prend tout son sens aujourd'hui. Un grand merci à celles et ceux qui ont aidé, chacun à leur manière, pour que ce projet voie le jour.

Dédicace

Avec l'aide d'Allah le Tout-Puissant, ce travail a pu être accompli.

Je dédie ce modeste travail :

À ma très chère mère, source d'amour, de tendresse et de sacrifice, merci pour ton soutien, tes prières et tout ce que tu as fait pour moi.

À mon très cher père, symbole de courage, de sagesse et de persévérance, merci pour tes conseils, tes efforts et ta présence à chaque étape de mon parcours.

À mon cher ami Bouzir Houcin, en témoignage d'une amitié sincère, du soutien et des moments partagés.

À tous mes collègues parcours dans la spécialité Sécurité Industrielle et Environnement, avec qui j'ai partagé apprentissage, efforts et souvenirs.

À tous les enseignants et professeurs qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours universitaire, merci pour votre savoir, votre patience et vos précieux conseils.

Et enfin, à tous ceux qui me sont chers… Je dédie ce travail.

Dédicace

Je remercie avant tout Allah le Tout-Puissant qui m'a accordé la force, la patience et la volonté pour mener à bien ce travail.

J'adresse ensuite mes plus sincères remerciements à mon père, mon soutien et ma fierté, pour ses encouragements et son appui constant tout au long de mon parcours.

À ma chère mère, source de tendresse et de courage, dont les prières et le sacrifice ont été une lumière dans mon chemin vers la réussite.

À mes frères, Abdelhak, Mohamed, youcef.

À mes chers amis, Abdelrahman, zakaria, ilies, kadour, mohamed.

À mes collègues d'études ,senouci, naceur, karim, mohamed, khalil, titou, benhariga, aness.

À toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, je dédie ce modeste mémoire.

Liste des figures

Figure I.1.corrosion uniforme schéma..... 4

Figure I.2.corrosion sous contrainte (SCC)..... 5

Figure I.3. La corrosion galvanique schéma..... 5

Figure I.4. Corrosion intergranulaire schéma..... 6

Figure I.5. Corrosion par érosion schéma.....7

Figure I.6. Corrosion localisée schéma..... 7

Figure I.7. Corrosion par frottement schéma..... 8

Figure I.8. Corrosion influencée par les micro-organismes schéma..... 9

Figure I.9. Corrosion par oxydation 9

Figure I.10.Corrosion par piqûres.....10

Figure IV.1. Courbet de perte de mass……...46

Figure IV.2. Vitesse de corrosion……47

Liste des tableaux

Tab.IV.1. information expérimentales…….46

Tab.IV.2. récapitulatif des conditions expérimentales…….46

Tab.IV.2. comparaison entre Nitrite de sodium et Phosphate de sodium……51

ملخص:

في البداية، غالبًا ما يكون التآكل غير مرئي، ولكنه يتطور بصمت. تُعد الصناعة الكيميائية من أكثر القطاعات تضررًا، نظرًا للظواهر التي تحدث داخل أنابيبها وعلى أسطحها. ولا تقتصر العواقب على الأعطال المفاجئة فحسب، بل غالبًا ما تتبعها خسائر مالية فادحة. تؤثر هذه المشكلة على حياة الناس والمعدات على حد سواء. ومع مرور الوقت، تطور الوضع، وظهرت تدريجيًا أساليب جديدة. ظهرت مواد خاصة، تُسمى مثبطات التآكل، لمكافحة التدهور البطيء للهياكل المعدنية. تعمل هذه المواد عن طريق تقليل معدل التآكل بشكل مباشر. يبحث هذا البحث في تآكل الفولاذ الطري تحت تأثير العوامل الخارجية. في موقع شركة جزائرية تقع في منطقة معسكر، اختبر الفريق مواد قادرة على الحد من الضرر. تتخصص شركة ألفيت في تصنيع البخاخات الصناعية. تم اختيار عاملين وقائيين مختلفين لتحديد أيهما أكثر فعالية: نتريت الصوديوم ($NaNO_2$) وفوسفات الصوديوم (Na_3PO_4). أشارت عمل المحلول الملحي كوسيط تفاعل بين المعدن والمادة الواقية. النتائج بوضوح إلى المادة التي توفر أفضل حماية. بعد انقضاء الفترة المحددة، تم تحليل البيانات. السلامة الصناعية ليست خياراً، بل ضرورة يومية. ترتبط الصحة والسلامة والبيئة ارتباطاً وثيقاً بالمواد الكيميائية المستخدمة. ويحدث التآكل حتى لو بدا السطح جافاً من بعيد.

Résume

Au début, la corrosion est souvent invisible, mais elle agit silencieusement. L'industrie chimique est l'une des plus touchées, en raison des phénomènes qui se produisent à l'intérieur de ses canalisations et sur ses surfaces. Les pannes soudaines ne sont pas la seule conséquence ; des pertes financières importantes suivent fréquemment. Le problème affecte aussi bien la vie des personnes que les équipements. Au fil du temps, la situation a évolué et de nouvelles méthodes ont progressivement émergé. Des matériaux spéciaux, appelés inhibiteurs, ont fait leur apparition pour lutter contre la lente détérioration des structures métalliques. Ces matériaux agissent en réduisant directement la vitesse de corrosion. Cette recherche étudie la corrosion de l'acier doux sous l'effet de facteurs externes. Sur le site d'une entreprise algérienne située à Mascara, l'équipe a testé des matériaux capables de réduire les dommages. L'entreprise ALPHYT, est spécialisée dans la fabrication de pulvérisateurs industriels. Deux agents protecteurs différents ont été sélectionnés afin de déterminer lequel était le plus efficace : le nitrite de sodium ($NaNO_2$) et le phosphate de sodium (Na_3PO_4). La solution saline a servi de milieu de réaction entre le métal et le matériau protecteur. Les résultats ont clairement indiqué quel matériau offrait la meilleure protection. Après la période spécifiée, les données ont été analysées. La sécurité industrielle n'est pas une option, mais une nécessité quotidienne. La santé, la sécurité et l'environnement sont étroitement liés aux produits chimiques utilisés. La corrosion se produit même si la surface paraît sèche à distance

Sommaire

Introduction générale……. 1

Chapitre I : généralités sur la corrosion en milieu

I.1.Définition et concepts de base de la corrosion …….. 3

I.2. Types de corrosion rencontrés dans les unités industrielles……..…… 3

I.2.1. La corrosion uniforme ……...… 3

I.2.2. La fissuration par corrosion sous contrainte (SCC)…… 4

I.2.3. La corrosion galvanique ……. 5

I.2.4. Corrosion intergranulaire……... 6

I.2.5. Corrosion par érosion ……. 6

I.2.6. Corrosion localisée ……. 7

I.2.7. Corrosion par friction ……. 8

I.2.8. Corrosion influencée parles micro-organismes …….. 8

I.2.9. Corrosion par oxydation……. 9

I.2.10. Corrosion par piqûres 10

I.2.11. Corrosion en crevasse.....10

I.3. Facteur influençant la corrosion en régime continu …….. 11

I.3.1. Nature du matériel …….. 11

I.3.2. Conditions physico-chimiques du milieu……..… 1 1

I.3.3. Paramètres opératoires…… 12

I.4.Conclusion ……. 12

I.4. Conséquences, techniques, économiques et environnementales de la corrosion……..... 13

I .4.1. Conséquence économiques de la corrosion ……... 13

I.4.2. Conséquence environnemental de la corrosion……... 13

I.4.3. Conséquences Technologie de la corrosion…… 13

Chapitre II : Inhibiteurs de corrosion : principes et mécanismes

II.1- Introduction……....15

II.2. Inhibiteurs définition……..15

II.3. Corrosion inhibiteur définition…….. 16

II.5. classification des inhibiteurs de corrosion…… 16

II.5.1. Selon mécanisme d'action électrochimique……... 16

II.5.1.1. Inhibiteur de corrosion anodique ……... 16

II.5.1.2. Inhibiteur de corrosion cathodique …… 17

II.5.1.3. Inhibiteur de corrosion mix …… 18

II.5.2. Selon environnement ……. 19

II.5.2.1. Inhibiteur de corrosion acide …….. 19

II.5.2.2. Inhibiteur de corrosion naturel ……... 19

II.5.2.3. Inhibiteur de corrosion alcaline …….. 2 0

II.5.3. Selon mécanisme réactionnel……. 2 0

II.5.3.1. Inhibiteur de corrosion adsorption ……. 2 0

II.5.3.2. Inhibiteur de corrosion passivation ……. 21

II.6. Mode d'action des inhibiteurs de corrosion ……..22

II.7.critères de choix des inhibiteurs en milieu industriel ……..23

II.8.avantages et limites de l'utilisation des les inhibiteur en régime continu … 24

II.8.1.Les Avantages…… 24

II.8.2.Les limites et inconvénients ……..... 25

Chapitre III : Présentation de l'unité industrielle et méthodologie expérimentale

III.1. Introduction ……. 28

III.2. Description de l'unité industrielle étudiée……... 28

III.2.1. définition d'industrie ……... 28

III.2.2. Procédé de fonctionnement …….. 29

III.2.3. Conditions opératoires ……..…. 3 0

III.2.4. Matériaux utilisés ……. 32

III.3. Problématique de corrosion observée dans l'unité…….. 33

III.4. Choix des inhibiteurs testés ……....… 34

III.5. méthodes d'évaluation de l'efficacité des inhibiteurs……. 35

III.5.1. Méthodes gravimétriques ……. 35

III.5.1.1. Avantages Méthodes gravimétriques……..36

III.5.1.2. Limites Méthodes gravimétriques …….36

III.5.2. Méthodes électrochimiques ……. 37

III.5.2.1. polarisation ……... 38

III.5.2.1.1. Avantages de la méthode LPR ……. 38

III.5.2.1.2. Limites de la méthode LPR ……..… 39

III.5.2.2. spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS) …….. 39

III.5.3. analyses physico-chimiques ……..... 4 0

III.6. protocole expérimental ……... 41

Chapitre IV : résultats et discussion et recommandations

IV.1. Introduction …… 44

IV.2. Présentation des résultats ……45

IV.3. Évaluation de l'efficacité des inhibiteurs de corrosion …….. 48

IV.4. Comparaison des inhibiteurs testés ……..… 5 0

IV.5. Influence des paramètres opératoires sur l'efficacité ……..52

IV.6. Discussion des résultats et interprétation …….. 53

IV.7. analyse technico-économique de l'utilisation de l'inhibiteur ……54

IV.8. Impact sur la durée de vie des équipements…….,,..... 55

IV.9. Aspects environnementaux et sécuritaires …….,,….. 56

IV.10. Recommandations pour l'exploitation industrielle …….. 57

IV.11. Perspectives d'amélioration et travaux futurs …….. 58

IV.12. Conclusion ……59

Conclusion générale…….60

Référence bibliographiques……..62

Introduction générale

La corrosion des métaux est un phénomène courant dans les secteurs industriels, notamment ceux liés à l'industrie chimique et à la production de masse, où les équipements sont constamment exposés à des environnements agressifs. De plus, la perte progressive de matériaux engendre des difficultés financières importantes pour les entreprises et les projets. Elle peut également provoquer des arrêts de production et accroître le risque d'accidents, dont certains affectent la santé des employés et les lieux de travail. Par ailleurs, elle a des impacts environnementaux lents, mais non négligeables. Dans ce contexte, les inhibiteurs de corrosion sont une solution privilégiée pour réduire les effets électrochimiques qui endommagent les métaux. Malgré leur utilisation répandue, tous les composés n'agissent pas de la même manière. Certains adhèrent à la surface du métal et réduisent l'activité réactionnelle. D'autres forment un revêtement mince et inactif qui empêche toute détérioration ultérieure. D'autres encore produisent un film protecteur qui résiste aux agressions extérieures. Ainsi, la durée de vie des équipements utilisés en usine est prolongée et leurs performances globales s'améliorent au fil du temps. Cette étude est issue d'une analyse menée sur le site industriel d'ALPHYT Algérie, spécialisé dans la production de pesticides aérobies. Malgré cela, l'unité fonctionne sous d'importantes contraintes environnementales dues à la présence de solvants organiques, de gaz saturés et de divers composants chimiques dans ses procédés. Ces conditions exacerbent la corrosion des composants métalliques. Ce travail répond à un réel besoin d'examiner l'efficacité de plusieurs inhibiteurs de corrosion, notamment le nitrite de sodium ($NaNO_2$) et le phosphate de sodium (Na_3PO_4), dans un environnement similaire à ceux rencontrés en milieu industriel. Différentes techniques ont été employées pour mieux comprendre le fonctionnement de ces matériaux. Parmi les méthodes étudiées, la méthode gravimétrique, qui repose sur la mesure des variations de masse, s'est révélée essentielle. De plus, des approches électrochimiques et physico-chimiques ont été utilisées pour élucider plus précisément les mécanismes de protection. Ce travail se déploie en une série de chapitres interconnectés. Le premier fournit une explication de base de la corrosion et des types d'inhibiteurs utilisés pour la combattre. La section suivante décrit en détail l'installation

étudiée, en présentant les méthodes de collecte de données et les observations. La troisième section présente les informations essentielles, en mettant en lumière les résultats expérimentaux et en expliquant le raisonnement qui sous-tend chaque observation. Enfin, la dernière section aborde les implications pratiques de ces matériaux en milieu industriel, en proposant des suggestions réalistes et des projections pour les développements futurs. Ainsi, l'importance de cette étude réside dans sa contribution à la compréhension de la prévention de la corrosion. Elle propose des solutions adaptées aux conditions industrielles réelles, visant à renforcer la confiance dans la sécurité de fonctionnement des équipements métalliques. Indirectement, elle contribue à prolonger la durée de vie de ces structures sans augmenter les coûts d'exploitation.

Chapitre I : généralités sur la corrosion en milieu industrielle

I.1.Définition et concepts de base de la corrosion :

La corrosion est la détérioration d'un matériau due à une réaction chimique avec un agent oxydant, le plus souvent l'oxygène ou les ions hydrogène (H+). Les dommages causés uniquement par des facteurs mécaniques, comme la rupture par impact, ne sont pas considérés comme de la corrosion. Cependant, la corrosion peut se produire conjointement à des effets mécaniques, donnant lieu à des phénomènes tels que la fissuration par corrosion sous contrainte. Elle peut également se manifester sous certaines formes de corrosion de surface où des facteurs physiques, chimiques et mécaniques se combinent. Les exemples les plus courants de corrosion sont la formation de rouille sur le fer et l'acier exposés à l'air ou à l'eau, et l'apparition d'une patine sur le cuivre et ses alliages, comme le bronze et le laiton. Toutefois, la corrosion ne se limite pas aux métaux ; elle affecte également les céramiques et les polymères, et se produit dans des environnements variés, notamment les solutions aqueuses, l'atmosphère et les hautes températures. Scientifiquement, la recherche fondamentale sur la corrosion relève du domaine de l'électrochimie, tandis que la recherche appliquée fait partie de la science des matériaux et intègre des concepts de chimie, de physique (chimie physique) et parfois de biologie. La corrosion représente un défi industriel majeur en raison de son coût élevé, lié aux mesures préventives, à la maintenance et au remplacement des équipements endommagés, ainsi qu'aux conséquences des accidents qu'elle peut engendrer. On estime que ce coût représente environ 3,4 % du PIB mondial, car de grandes quantités d'acier sont transformées chaque année en oxydes de fer.[1]

I.2. Types de corrosion rencontrés dans les unités industrielles :

I.2.1. La corrosion uniforme :

La corrosion uniforme est la forme la plus courante et la plus simple à reconnaître. Elle se fait par une attaque uniforme de toute la surface du métal, ce qui provoque la création de produits d'oxydation tels que la rouille. Sa dégradation peut être mesurée par une réduction

d’épaisseur exprimée en micromètres par an, ce qui permet de déterminer la durée de vie du matériau. [2]



Figure I.1.corrosion uniforme schéma

I.2.2. La fissuration par corrosion sous contrainte (SCC) :

La fissuration due à la corrosion sous contrainte, également appelée Stress Corrosion Cracking (SCC), survient lorsque l’on combine un environnement corrosif et une contrainte de traction. Ce phénomène peut causer une cassure soudaine d’un matériau, même si la force appliquée ne dépasse pas sa limite élastique. Une petite imperfection ou petite cavité à la surface peut commencer une fissure, que les forces internes (résiduelles) ou externes facilitent à se propager. La partie située à la fin de la fissure subit plus de pression, ce qui fait qu’elle s’élargit plus rapidement. [2]

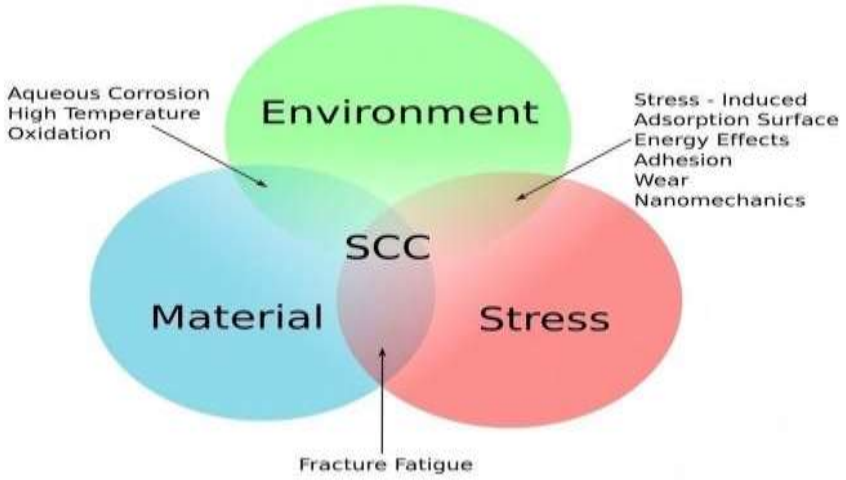


Figure I.2.corrosion sous contrainte (SCC)

I.2.3. La corrosion galvanique :

La corrosion galvanique se produit lorsque deux métaux différents sont en contact électrique dans le même milieu. Dans ce cas, le métal moins noble devient l'anode et s'use plus vite, tandis que le métal le plus noble sert de cathode et reste protégé. Ainsi, la détérioration affecte seulement le métal anodique, tandis que le métal cathodique ne se corrode pas beaucoup ou pas du tout. [2]

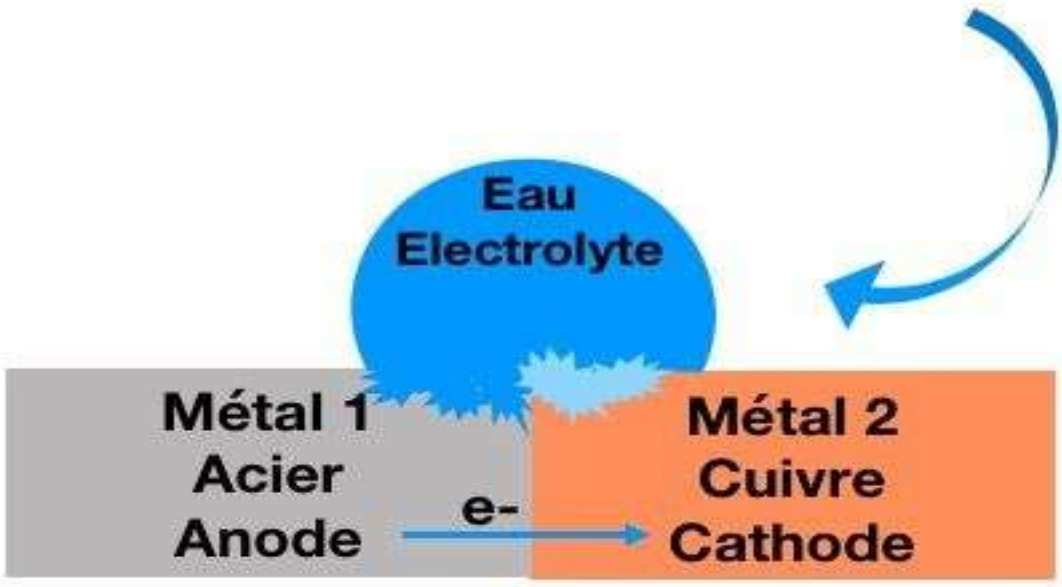


Figure I.3. La corrosion galvanique schéma

I.2.4. Corrosion intergranulaire:

La corrosion inter granulaire est une forme de détérioration qui se produit aux endroits où les grains métalliques se rejoignent. Elle est souvent due à une diminution locale des protections, comme le chrome dans les aciers inoxydables. Ce phénomène se produit fréquemment après un traitement à la chaleur mal exécuté ou une exposition longue à des températures très élevées, ce qui encourage la création de carbures de chrome. Pour réduire ce risque, on utilise des alliages qui sont stabilisés et des traitements thermiques appropriés. [3]

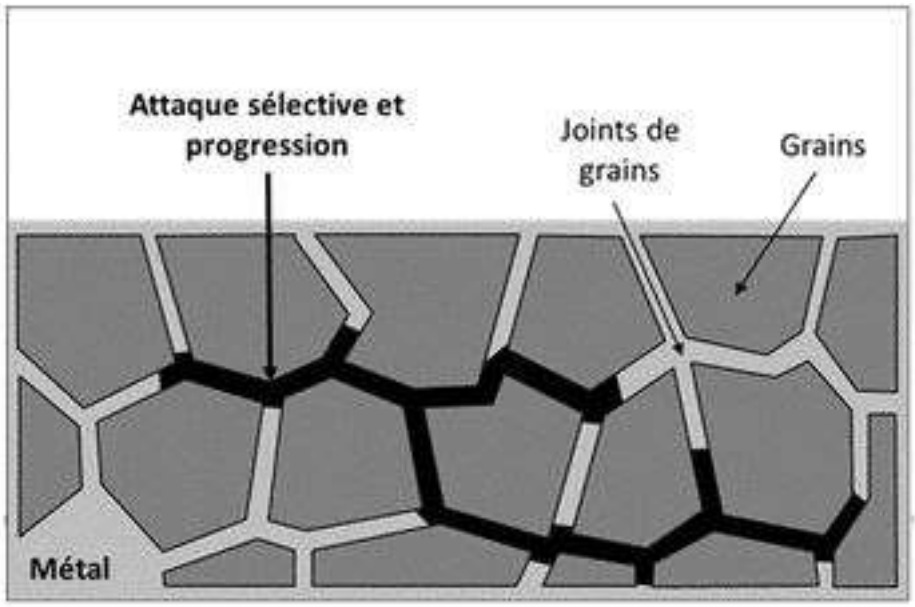


Figure I.4. Corrosion inter granulaire schéma

I.2.5. Corrosion par érosion :

Cette corrosion se produit à cause de l'action ensemble des réactions chimiques et des forces mécaniques provoquées par le déplacement des fluides. Elle se produit souvent dans les systèmes où les fluides passent rapidement ou en mouvement désordonné, ce qui use plus vite les surfaces en métal. [4]

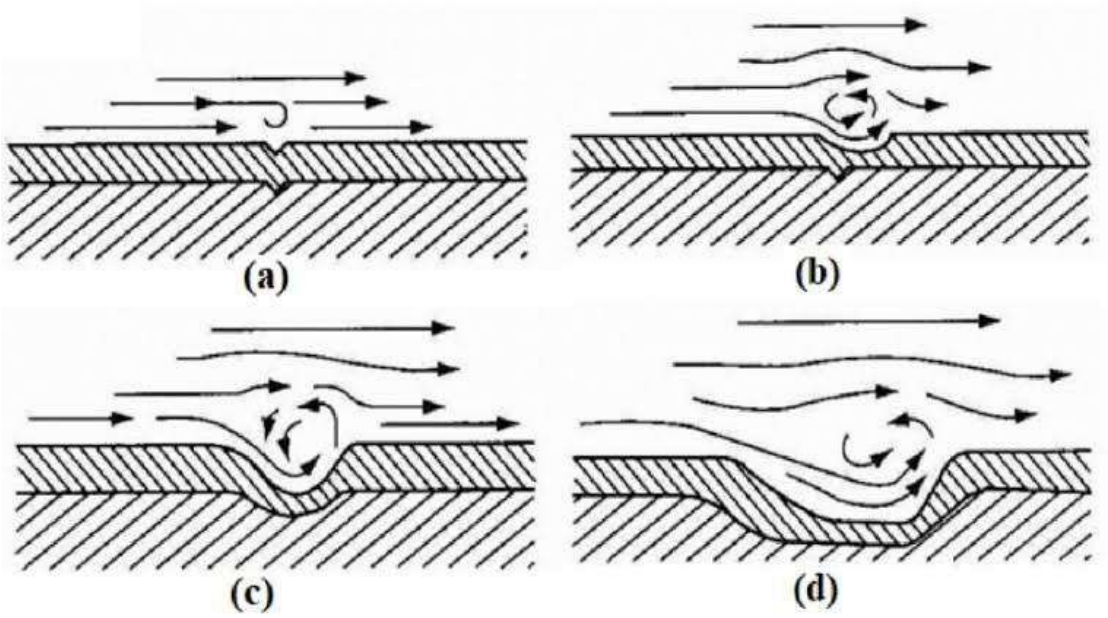


Figure I.5. Corrosion par érosion schéma

I.2.6. Corrosion localisée :

La corrosion se produit seulement dans certaines parties d'un matériau, qui deviennent électriquement plus actives que le reste de la surface. Contrairement à la corrosion uniforme, elle se produit surtout dans certaines zones, souvent à cause de défauts dans le matériau ou dans l'environnement. Même si la perte de matière globale est peu importante, elle peut quand même entraîner des perforations ou des fuites, ce qui est très risqué. [5]

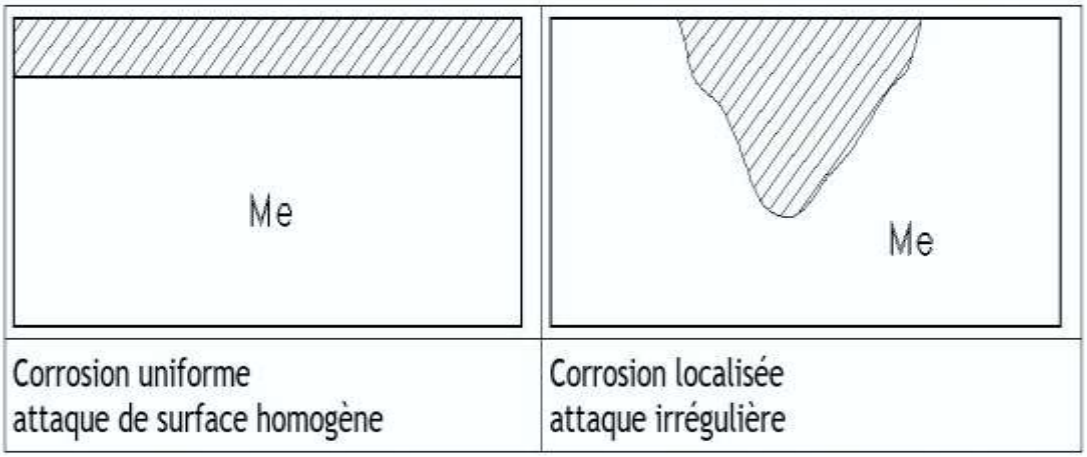


Figure I.6. Corrosion localisée schéma

I.2.7. Corrosion par friction :

La corrosion due au frottement se développe dans les parties où deux surfaces entrent en contact et subissent des mouvements répétés et légers. Elle mélange les effets de l'usure par frottement et de la rouille, ce qui provoque une détérioration du matériau au fil du temps. Ce phénomène peut aussi affecter les aciers ordinaires ainsi que les aciers inoxydables. [6]

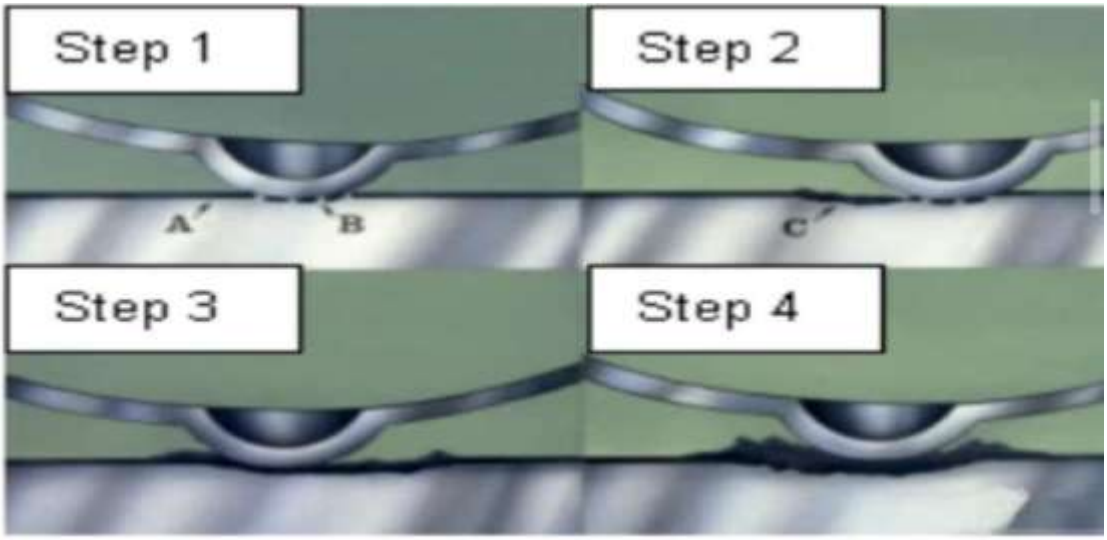


Figure I.7. Corrosion par frottement schéma

I.2.8. Corrosion influencée par les micro-organismes :

La corrosion microbiologique provient de l'action de micro-organismes qui s'attachent aux surfaces et créent des biomembranes. Ces organismes changent les conditions chimiques du milieu, par exemple le pH ou la quantité d'oxygène, ce qui accélère la corrosion. Cette attaque est généralement limitée à une zone précise et peut causer des fuites ou des percées, surtout dans les secteurs du pétrole et du gaz. [7]

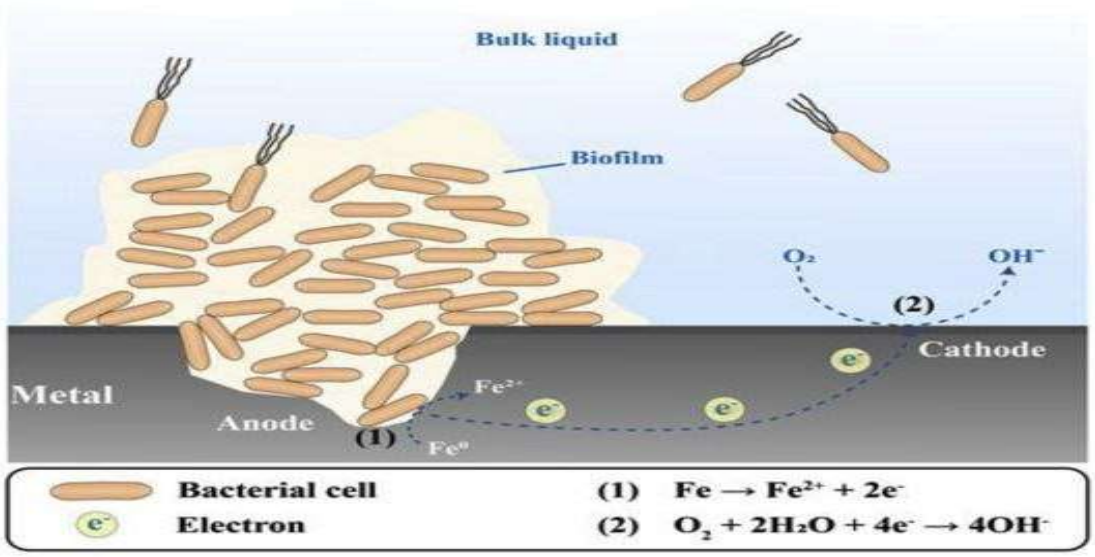


Figure I.8. Corrosion influencée par les micro-organismes schéma

I.2.9. Corrosion par oxydation :

L'oxydation est une réaction chimique qui se produit entre un métal et l'oxygène. Cela se manifeste par l'apparition de strates colorées à la surface du matériau, comme le rouge, le brun ou l'orangé, en fonction du métal utilisé. Contrairement à d'autres types de corrosion, celle-ci reste généralement à la surface et peut être retirée facilement grâce à des méthodes simples comme le polissage ou le ponçage. [8]



Figure I.9. Corrosion par oxydation

I.2.10. Corrosion par piqûres :

C'est un type de corrosion localisée (***Figure I.10.***), qui se traduit à la surface du métal par la formation de trous étroits, et qui peuvent progresser rapidement en profondeur. L'origine des piqûres est liée à la présence d'hétérogénéité, qui en surface, détermine la formation de piles locales. Bien que la quantité du métal corrodé soit faible, ce type de corrosion et très dangereux car il se produit en profondeur et peut conduire à la perforation des tôles même épaisses. L'hétérogénéité de la surface est due à des défauts du film passif qui favorisent la mise à nu locale du métal, il en résulte la formation d'une micro-pile entre le métal mis à nu qui joue le rôle d'anode, donc se corrode et le métal passif qui constitue la cathode. Les défauts du film passif ont pour origine la présence d'inclusions dans le métal d'ions agressifs tels que les chlorures provenant de la solution et absorbés à la surface métallique ou une cause extérieure liée à l'utilisation du matériau (rayures). [27]

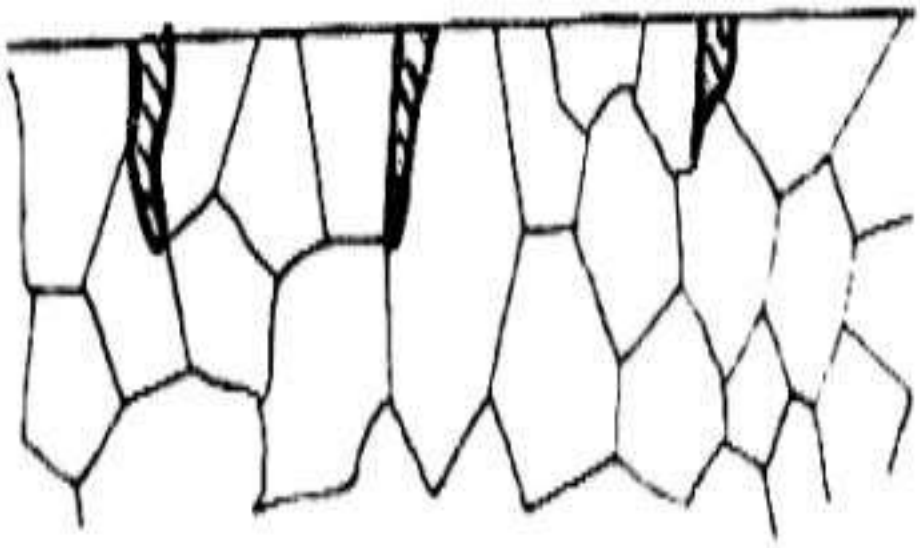


Figure I.10.Corrosion par piqûres [27]

I.2.11. Corrosion en crevasse :

Elle peut apparaître lorsqu'une pièce métallique est au contact d'un électrolyte dont le renouvellement n'est pas assuré : interstices entre matériaux de même nature, dépôts divers, sous matériau isolants, etc. Le processus de développement de la corrosion par crevasse

(caverneuse), n'est pas fondamentalement différent de celui de la corrosion par piqûres. Cependant, la cinétique et la morphologie de l'attaque sont toutes autres. Celle-ci s'étend en largeur à la surface de l'interstice ou sous le dépôt, et non pas en profondeur comme pour les piqûres (Figure I.11.) . L'anode, dans l'interstice, est le siège d'une réaction d'oxydation du métal tandis que le reste de la surface est la cathode où se produit la réduction de l'oxygène. La corrosion par crevasses peut prendre un caractère dangereux, notamment dans l'eau de mer. La prévention contre la corrosion caverneuse impose l'utilisation d'assemblages sans interstices, soudés par exemple. Le nettoyage des dépôts et salissures, l'utilisation de joints solides et non poreux.[27]

I.3. Facteur influençant la corrosion en régime continu :

I.3.1. Nature du matériel:

Le matériau utilisé joue un rôle important dans la corrosion :

Composition chimique : certains métaux (comme le fer) sont plus sensibles à l'oxydation.

Structure métallurgique : la présence de défauts (dislocations, inclusions) favorise la corrosion.

État de surface : une surface rugueuse ou fissurée accélère l'attaque.

Présence d'alliages : certains alliages (ex : acier inoxydable) résistent mieux grâce à une couche protectrice.[25]

I.3.2. Conditions physico-chimiques du milieu:

Le milieu environnant influence fortement la corrosion :

pH :

Milieu acide → corrosion rapide

Milieu basique → corrosion plus faible (souvent)

Présence d'oxygène : favorise les réactions d'oxydation.

Conductivité du milieu : plus elle est élevée, plus la corrosion électrochimique est facilitée.

Présence d'ions agressifs : comme Cl (chlorures), SO_4^{2-} → très corrosifs

Humidité : indispensable pour les réactions électrochimiques.[25]

I.3.3. Paramètres opératoires :

Les conditions de fonctionnement en régime continu accélèrent ou ralentissent la corrosion

Température :

Augmentation → accélère les réactions chimiques → corrosion plus rapide.

Pression :

Peut augmenter la solubilité des gaz (comme O ou CO_2) → influence la corrosion.

Débit (vitesse du fluide) :

Faible débit → stagnation → corrosion localisée. Fort débit → érosion + corrosion (érosion-corrosion).[25]

I.4. Conclusion :

La corrosion en régime continu dépend de l'interaction entre :le matériau, le milieu, les conditions de fonctionnement

Une bonne maîtrise de ces facteurs permet de :

1.choisir le bon matériau

2.contrôler le milieu

3.optimiser les conditions opératoires

afin de réduire la corrosion et augmenter la durée de vie des équipements.

I.4. Conséquences techniques, économiques et environnementales de la corrosion :

I.4.1. Conséquence économiques de la corrosion :

La corrosion est un phénomène courant mais souvent ignoré jusqu'à l'apparition de dégâts importants. Pourtant, elle représente un risque permanent dans l'industrie et les infrastructures. Son impact économique est très élevé. À l'échelle mondiale, les pertes liées à la corrosion sont estimées à environ 3 % de la production économique. Elle touche tous les pays et entraîne des dépenses importantes pour la maintenance, la réparation et le remplacement des matériaux. La corrosion pose aussi des problèmes de sécurité et d'environnement. Elle peut affaiblir les structures, provoquer des fuites et libérer des substances dangereuses, ce qui peut nuire à la santé et à l'environnement. Les coûts liés à la corrosion sont de deux types : Directs : protection des matériaux, entretien, réparations et perte de résistance. Indirects : pertes de production, arrêts d'installations, fuites et pertes d'énergie. [10]

I.4.2. Conséquence environnemental de la corrosion :

La corrosion affecte non seulement les matériaux, mais a également des conséquences environnementales importantes. Elle peut libérer des métaux lourds dans l'environnement. Ces substances toxiques polluent l'eau et les sols, perturbant l'équilibre écologique. [11]

I.4.3. Conséquences Technologie de la corrosion :

La corrosion contribue également à la pollution atmosphérique. Des concentrations élevées de dioxyde de soufre peuvent endommager les plantes en détruisant leurs feuilles et en freinant leur croissance. Ce gaz dégrade également la qualité de l'air et peut nuire à la santé humaine, voire entraîner la mort.

Corrosion is a significant technical issue in the industrial sector. It causes materials to gradually deteriorate, which reduces their mechanical resistance and makes them more susceptible to stresses. Over time, metal components may fracture or perforate, resulting in liquid or gas leaks. Additionally, corrosion affects the proper operation of machinery. It can lower their performance, for example, by interfering with thermal fluctuations or creating defects that prevent machines from operating normally. This may also result in a decrease in the effectiveness of installations. The decrease in the lifespan of individuals is another significant effect. The structures need to be replaced or repaired more frequently, which makes installation management more difficult. [9]

I.5. Conclusion :

Ici, on a parlé des bases de la corrosion dans l'industrie - un souci sérieux pour les installations et les pièces en métal. Loin d'être juste une usure visible, elle cache un processus profond, piloté par des transformations chimiques ou électriques. Ce qui arrive au matériau dépend autant du type de métal que du cadre autour, sans oublier comment il est utilisé jour après jour. Chaque détail compte quand les éléments s'activent ensemble. On a vu les formes courantes de détérioration des matériaux, avec comment elles se développent. Du coup, les éléments qui accélèrent ou aggravent ces processus ont aussi été examinés. Dans les usines, les conséquences ne touchent pas seulement l'équipement ; elles pèsent sur le budget, parfois sur l'environnement. En analysant tout cela, une chose devient claire : savoir gérer cette dégradation permet d'assurer la sûreté, éviter les interruptions et limiter les dépenses liées aux réparations. Vu ces résultats, on cherche maintenant des façons utiles pour réduire cet effet. Cela pousse à regarder les produits qui ne rouillent pas, très utilisés en usine pour protéger les métaux, dont l'étude continue au prochain chapitre

Chapitre II : Inhibiteurs de corrosion : principes et mécanismes

II.1- Introduction:

La corrosion des métaux est un problème très important dans plusieurs secteurs industriels, comme le pétrole, le gaz, la chimie et le traitement de l'eau. Ce phénomène naturel cause des pertes économiques et présente des risques pour la sécurité et le bon fonctionnement des équipements. Pour réduire ces impacts, différentes solutions de protection ont été mises en place, dont l'utilisation des inhibiteurs de corrosion, qui est une méthode facile à mettre en œuvre, efficace et très courante. Ces substances, ajoutées en petites quantités, ralentissent les réactions électrochimiques qui provoquent la détérioration des matériaux métalliques. Cela se fait soit en formant une couche protectrice, soit en modifiant les réactions chimiques. Dans ce chapitre, nous allons expliquer ce qu'est un inhibiteur de corrosion, présenter les différentes catégories qu'ils peuvent avoir, ainsi que les mécanismes grâce auxquels ils agissent selon le milieu, le type de réaction électrochimique et la manière dont ils interagissent avec la surface métallique.

II.2. Inhibiteurs définition:

Inhibiteurs sont des substances ajoutées en petite quantité à un milieu pour aider à réduire la perte de métal, diminuer le pH, protéger le métal contre la corrosion par piqûres, limiter la corrosion excessive et les gaz acides qui se forment lorsqu'on fait réagir des métaux acides et basiques, et aussi pour diminuer l'usage d'acide. Les retardateurs de corrosion fonctionnent en créant une barrière, en formant une couche qui absorbe l'humidité, en ralentissant les processus électrochimiques, soit en faisant les deux. Tout processus qui ralentit la corrosion ou diminue la vitesse d'oxydation du métal en ajoutant un produit chimique dans le système est appelé un retardateur de corrosion. Les retardateurs sont généralement simples à utiliser et permettent une application directement sur place sans perturber beaucoup le processus. L'usage des inhibiteurs de corrosion constitue l'une des meilleures façons de combattre la corrosion.[12]

II.3. Corrosion inhibiteur définition:

Les inhibiteurs de corrosion peuvent prendre n'importe quelle forme :(solides, liquides ou gazeux). Les inhibiteurs de corrosion à inhiber sont sélectionnés en fonction de leur solubilité ou de leur dispersibilité dans les fluides. Les inhibiteurs de corrosion se sont avérés être des agents efficaces et flexibles pour lutter contre la corrosion. L'emploi des inhibiteurs chimiques pour ralentir les processus de corrosion est très varié. Les inhibiteurs de corrosion sont utilisés dans l'exploration et la production du pétrole et du gaz, les raffineries de pétrole, la production chimique, les industries de production lourde, le traitement de l'eau et l'industrie des additifs pour produits. Dans les secteurs de l'extraction, du traitement du pétrole et de la chimie, les inhibiteurs de corrosion ont toujours été considérés comme la première ligne de défense. [13]

II.5. classification des inhibiteurs de corrosion:

II.5.1. Selon mécanisme d'action électrochimique :

II.5.1.1. Inhibiteur de corrosion anodique :

L'inhibiteur anodique augmente la polarisation anodique et déplace ainsi le potentiel de corrosion vers la direction cathodique, c'est pourquoi on l'appelle aussi inhibiteur de passivation. Les inhibiteurs d'anode, comme les chromates, les phosphates, les tungstates et d'autres ions d'éléments de transition à haute teneur en oxygène, sont des systèmes qui inhibent la réaction de corrosion qui a lieu à l'anode en créant un composé soluble en quantité modérée avec l'ion métallique nouvellement formé. Ils se forment sur la surface métallique en constituant une couche ou une barrière protectrice, ce qui réduit ainsi le taux de corrosion. Les inhibiteurs d'anode forment une mince couche protectrice sur l'anode et augmentent son potentiel, ce qui ralentit donc la dégradation et la réaction de corrosion.

Il existe deux types d'inhibiteurs de passivation : les anions oxydants, comme le chromate, le nitrite et le nitrate, peuvent passiver le fer sans oxygène. Les ions non oxydants comme le phosphate, le tungstate et le molybdate nécessitent la présence d'oxygène pour passiver

l'acier. En général, lorsque la concentration est inférieure au seuil minimal, l'inhibiteur de passivation peut en réalité provoquer des attaques locales et accélérer la corrosion. Il est nécessaire de surveiller la concentration de l'inhibiteur ; pour l'effet de l'inhibiteur à l'anode, il est très important que la concentration de l'inhibiteur dans la solution soit suffisamment élevée. Une quantité incorrecte d'inhibiteur affecte la formation de la couche protectrice, car elle ne recouvre pas complètement le métal, exposant ainsi la partie métallique, ce qui provoquera une corrosion locale.

Les concentrations en dessous de la valeur critique sont moins efficaces qu'aucun inhibiteur. En raison de la réduction de la surface de l'anode par rapport à celle de la cathode, il peut survenir une corrosion localisée appelée putting, ou bien, en cas de destruction totale de la passivation, la corrosion peut s'accentuer, comme la corrosion générale. Quelques exemples d'inhibiteurs inorganiques utilisés en anode sont le nitrate, le molybdate et le chromate de sodium, le phosphate, l'hydroxyde et le silicate.[14]

II.5.1.2. Inhibiteur de corrosion cathodique :

Lors du processus de corrosion, un inhibiteur de corrosion cathodique empêche la réaction cathodique du métal. Les ions métalliques provenant de ces inhibiteurs peuvent favoriser des réactions cathodiques en raison de leur alcalinité, ce qui conduit à la formation de composés insolubles précipitant sélectivement sur les sites cathodiques. Un film dense et adhérent se dépose alors sur la surface du métal, limitant la diffusion des substances réductibles dans ces zones. Par conséquent, la résistance de la surface augmente, ainsi que la limitation de la diffusion des substances réductibles, c'est-à-dire la diffusion de l'oxygène et la conduction des électrons dans ces zones.

Ces inhibiteurs entraînent ainsi une forte inhibition cathodique.

Quelques exemples d'inhibiteurs cathodiques inorganiques sont le magnésium, le zinc et le nickel, qui réagissent avec les ions hydroxyde (OH^-) de l'eau pour former des hydroxydes insolubles tels que $Mg(OH)_2$, $Zn(OH)_2$ et $Ni(OH)_2$. Ces composés se déposent sur les sites cathodiques de la surface métallique, assurant ainsi sa protection.

Par ailleurs, les polyphosphates, les tanins, les lignines ainsi que les sels de calcium peuvent également agir comme inhibiteurs en présentant un comportement similaire.

Dans les eaux dures, ce mécanisme est renforcé en raison de la présence de bicarbonates de calcium ou de magnésium. Lorsque ces eaux circulent sur le métal, elles favorisent la nucléation des carbonates, ce qui conduit à la formation de dépôts proches de l'équilibre.

Ces précipités, similaires au carbonate de calcium ($CaCO_3$), recouvrent les zones cathodiques et protègent ainsi la surface métallique.

Ces inhibiteurs cathodiques reposent principalement sur la chimie de l'eau et ne dépendent pas directement de la nature du métal, ce qui permet leur application à différents types de métaux.

On peut également citer les oxydes et sels d'antimoine, d'arsenic et de bismuth, qui se déposent sur les zones cathodiques dans les milieux corrosifs.

Enfin, ces inhibiteurs cathodiques limitent la formation et la libération de l'hydrogène en augmentant la surtension de l'hydrogène, ce qui réduit davantage la corrosion. [15]

II.5.1.3. Inhibiteur de corrosion mix :

Les inhibiteurs sont généralement sûrs. Les inhibiteurs de corrosion mixtes sont moins dangereux que les inhibiteurs anodiques purs, et dans de nombreux cas, ils ne peuvent pas augmenter la résistance à la corrosion. Les inhibiteurs les plus fréquents de cette catégorie sont les silicates et les phosphates. Ces inhibiteurs ont davantage d'avantages car ils permettent de contrôler les réactions d'altération de la cathode et de l'anode. Ces inhibiteurs ralentissent les processus cathodiques et anodiques impliqués dans le phénomène d'altération, c'est pourquoi ils sont appelés inhibiteurs mixtes. Ils sont généralement des composés formant un film qui provoque la formation de dépôts sur la surface, bloquant indirectement les sites anodiques et cathodiques. Dans la plupart des cas, les inhibiteurs anodiques sont dangereux, surtout lorsqu'ils sont présents en concentration trop faible. Mais cathodique.[15]

II.5.2. Selon environnement :

II.5.2.1. Inhibiteur de corrosion acide :

Les inhibiteurs sont utilisés dans un milieu acide pour empêcher la corrosion de l'acier lors des opérations de décapage ou de détartrage, qui se déroulent toutes dans un environnement acide. Ils travaillent dans l'industrie pétrolière en les ajoutant aux fluides utilisés pour forer. Dans les milieux acides, on utilise souvent des inhibiteurs organiques, car ils ont une capacité exceptionnelle à s'adsorber sur les surfaces métalliques, ce qui empêche les sites électrochimiques d'agir. Elles possèdent une partie non polaire, hydrophobe et relativement large, qui est principalement composée de chaînes de carbone et d'hydrogène, ainsi qu'une partie polaire, hydrophile, formée d'un ou plusieurs groupes fonctionnels. Le groupe fonctionnel contribue à l'adsorption sur la surface métallique, tandis que la partie non polaire masque en partie les sites actifs. Cette contribution du groupe fonctionnel à l'adsorption peut se faire par une simple attraction entre les sites polaires ou par un partage des électrons via une conjugaison.

Les autres inhibiteurs créent des complexes assez peu solubles avec les cations métalliques, ce qui se produit après la dissolution partielle du métal. Les complexes formés s'accumulent ensuite sur la surface du métal, créant ainsi des couches protectrices à la surface.[16]

II.5.2.2. Inhibiteur de corrosion naturel :

Les inhibiteurs de corrosion sont souvent utilisés dans un milieu neutre ou alcalin pour protéger les surfaces des conduites des circuits de refroidissement.

Puisque l'oxydation en milieu neutre provient essentiellement d'une attaque par l'oxygène dissous, le métal peut être protégé en réduisant la concentration d'oxygène dissous.

La cinétique de transfert de l'oxygène vers la surface, et cela diminuera ensuite la cinétique de la réduction cathodique. Il y a aussi d'autres méthodes pour réduire le taux de corrosion en

agissant sur.la passivation du métal ou l'utilisation de molécules capables d'adhérer à sa surface. L'inhibition par précipitation dans des milieux neutres s'effectue en formant des films superficiels qui présentent une. Barrière de diffusion qui empêche les espèces électro-actives de migrer vers les sites cathodiques. Exemples de Ces inhibiteurs sont les polyphosphates et les organophosphates. En ce qui concerne l'inhibition, ils agissent en bloquant certaines réactions chimiques. La passivation a un intérêt pratique car elle protège l'acier ou d'autres métaux. les employées dans un système de refroidissement. Les inhibiteurs oxydants et les agents tampons Les composés qui assurent le maintien d'un pH élevé favorisent la formation des oxydes et hydroxydes peu solubles. [17]

II.5.2.3. Inhibiteur de corrosion alcaline :

Les métaux qui forment des oxydes amphotères sont sujets à la corrosion dans les solutions alcalines. Beaucoup de composés organiques sont souvent utilisés comme inhibiteurs des métaux dans des solutions basiques. Des composés tels que la thiourée, les phénols substitués, le naphtol, les ß-dicétones, etc., ont été utilisés comme inhibiteurs efficaces dans des solutions basiques grâce à la formation de complexes métalliques. [19]

II.5.3. Selon mécanisme réactionnel:

II.5.3.1. Inhibiteur de corrosion adsorption :

La corrosion peut ralentir lorsque, une substance qui freine le processus s'attache à la surface du métal. En En général, ce sont les inhibiteurs organiques qui fonctionnent par adsorption. Cela empêche l'action du milieu agressif en se fixant sur la surface métallique. Cette fixation s'effectue Principalement grâce à l'action de l'inhibiteur; d'autres parties polaires peuvent aussi jouer un rôle. Les être adsorbées. Les inhibiteurs qui ralentissent l'acidification grâce à l'adsorption chimique se révèlent souvent plus efficaces que Ceux qui agissent par physisorption, car le partage des électrons renforce la liaison entre le substrat métallique et

l'espèce inhibitrice. La molécule inhibitrice agit par chimsorption .comme un donneur d'électrons et le métal agit comme un récepteur de ces mêmes. [17]

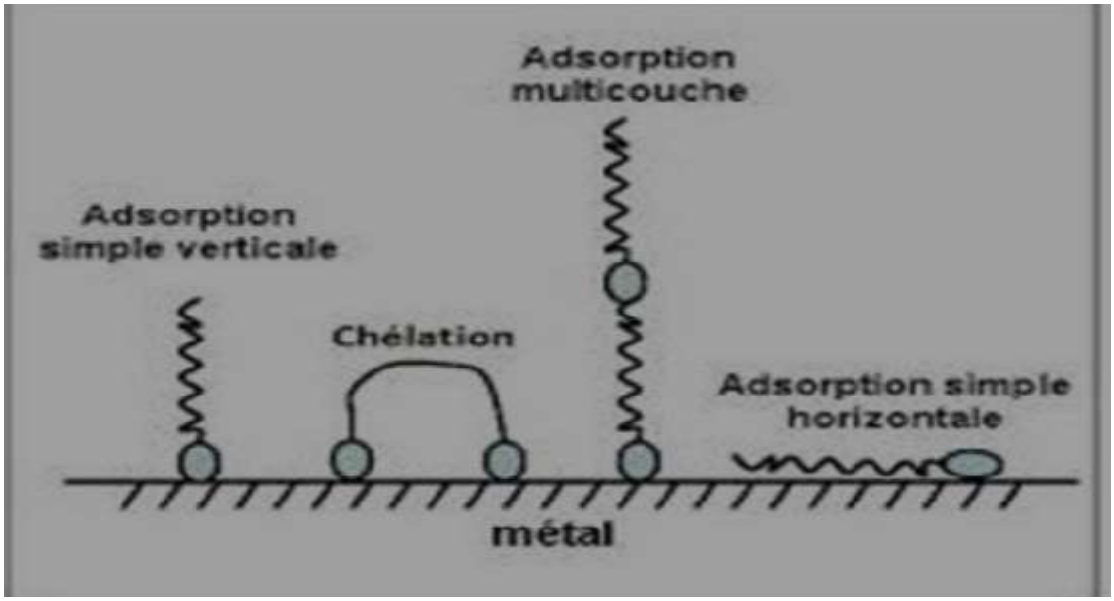


Figure II.1. Inhibiteur de corrosion adsorption schéma [21]

II.5.3.2. Inhibiteur de corrosion passivation :

La passivation consiste à rendre un métal moins réactif après l'application d'un revêtement par l'entremise d'une modification plus spécialisée de sa surface. Certains inhibiteurs oxydants agissent En provoquant une passivation spontanée du métal, cela réduit la vitesse à laquelle il corrode. La passivation peut aussi être favorisée par des agents tampons qui augmentent le pH près de la surface. La surface métallique. En général, ce sont les inhibiteurs minéraux qui agissent par passivation. Ils provoquent la passivation spontanée du substrat métallique consiste à renforcer la couche protectrice d'oxyde qui se forme naturellement sur la surface du métal. Ils se forment sur les pores de la couche d'oxyde ou d'hydroxyde, qui est une couche protégeant naturelle qui se forme sur la surface du métal. L'ion chromate est l'un des inhibiteurs passivant par excellence, mais son usage est limité à cause de son caractère .cancérigène et sa forte toxicité. [18]

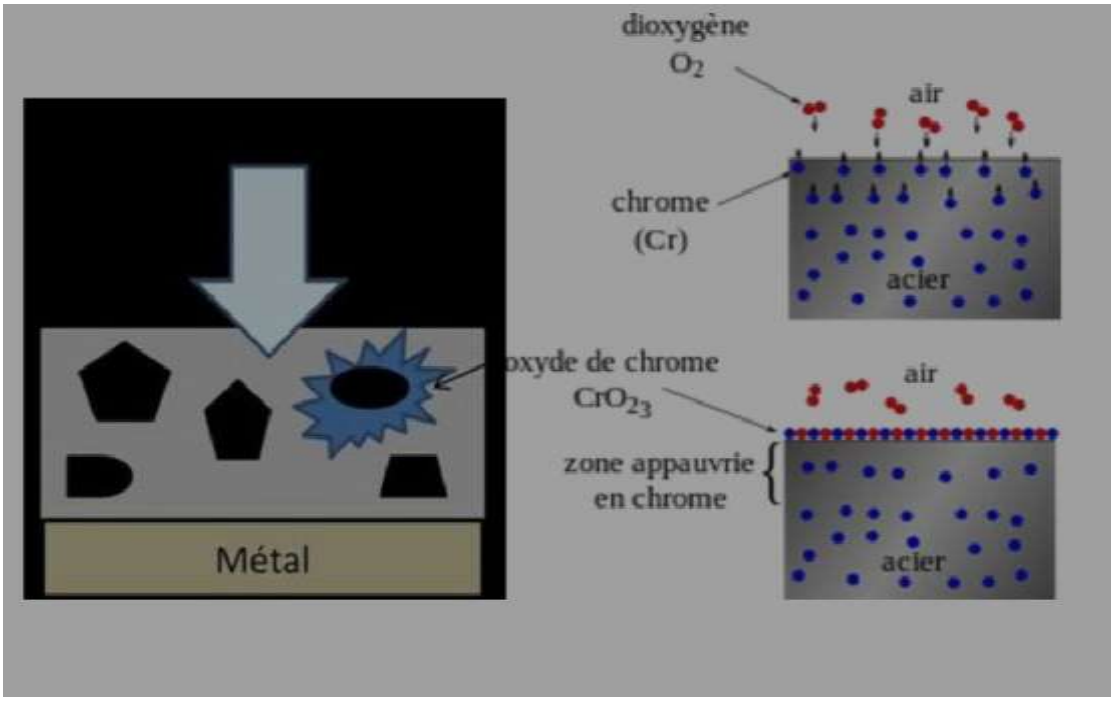


Figure II.2. Inhibiteur de corrosion passivation schéma [21]

II.6. Mode d'action des inhibiteurs de corrosion :

Il n'existe pas de mode d'action unique pour les inhibiteurs de corrosion. Le même composé peut avoir différents mécanismes d'action. Ces contraintes sont imposées par le milieu corrosif et la nature du métal à protéger.

Quel que soit le mécanisme par lequel l'inhibiteur de corrosion agit, il y a toutefois plusieurs considérations qui s'appliquent à tous les inhibiteurs de corrosion.

La corrosion étant un processus électrochimique fondamental, l'action de l'inhibiteur ne peut être effectuée qu'à l'une des étapes de réaction élémentaire (transport des espèces dans la solution, formation d'intermédiaires à la surface, adsorption des espèces à la surface des phases solides et transfert des charges électroniques).

Puisque l'intervention de l'inhibiteur de corrosion dans le processus de transport des espèces électro-actives (oxygène, protons, produits de réaction) au sein de la solution est peu

probable, le mécanisme d'action d'un inhibiteur est le plus souvent à rechercher dans les environs immédiats de la surface métallique (en contact avec le métal).

L'action de l'inhibiteur de corrosion peut être conçue comme :

- L'interposition d'une barrière entre le métal et le milieu corrosif ; cela correspond au cas des milieux acides.
- Le renforcement d'une barrière déjà présente, généralement la couche d'oxyde ou d'hydroxyde formée naturellement dans un milieu neutre ou alcalin.
- La formation d'une barrière par l'interaction de l'inhibiteur de corrosion avec une ou plusieurs espèces du milieu corrosif ; ce type de mécanisme est également spécifique aux milieux alcalins ou neutres.

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

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

2-Un aspect morphologique (intervention de la molécule de l'inhibiteur de corrosion dans la structure interfaciale.

Il est évident que le mécanisme d'action variera beaucoup selon le pH du milieu.[20]

II.7. critères de choix des inhibiteurs en milieu industriel :

Les critères essentiels pour sélectionner un inhibiteur de corrosion sont :

a. L'efficacité: Elle dépend des principaux éléments de l'inhibiteur, qui est constitué d'un ou plusieurs produits chimiques.

b. Compatibilité avec d'autres additifs : c'est très intéressant d'un point de vue économique et efficace.

c. La solubilité dans l'eau et les hydrocarbures est importante pour bien comprendre l'efficacité de l'inhibiteur et pour prendre en compte les aspects économiques.

d. Stabilité thermique aux températures d'utilisation: Pour vérifier leur stabilité aux températures que l'on trouve généralement sur le terrain, tous les inhibiteurs de corrosion ont été testés par un vieillissement accéléré.

e. La création d'émulsions: Il est important d'éviter la formation d'une émulsion, qu'elle soit directe ou indirecte.

f. Test de moussage: Les tests de moussage servent à comprendre comment un inhibiteur de corrosion affecte le comportement des mélanges d'eau et d'hydrocarbures, que ce soit en mouvement ou à l'arrêt. Le moussage est un phénomène qui se produit souvent dans les lieux de production.[26]

II.8. avantages et limites de l'utilisation les inhibiteurs en régime continu :

II.8.1. Les Avantages :

-Réduction de la vitesse de corrosion.

-Augmentation de la durée de vie des équipements industriels.

-Protection des canalisations, réservoirs et échangeurs thermiques.

-Réduction des coûts de maintenance périodique.

-Diminution des coûts de remplacement des équipements endommagés.

-Réduction des arrêts imprévus de production.

-Amélioration du rendement et de l'efficacité du système industriel.

-Protection continue et stable des surfaces métalliques.

-Facilité d'application dans les systèmes fermés.

-Possibilité d'utiliser dans différents secteurs industriels (pétrole, gaz, eau, chimie). Réduction de la consommation des métaux et des pièces de rechange.

-Limitation de la formation de rouille sur les surfaces métalliques.

-Réduction de la formation des dépôts et des tartres.

-Contribution au maintien de la qualité des fluides industriels.

-Réduction des risques de fuites dues à la corrosion.

-Amélioration de la sécurité industrielle.

-Protection des systèmes fonctionnant à haute température et haute pression. Possibilité d'intégrer avec d'autres programmes de traitement chimique.

-Réduction de l'effet de l'oxygène et des sels sur les métaux.

-Amélioration de la stabilité des conditions de fonctionnement.

-Efficacité dans les systèmes à écoulement continu.

-Possibilité d'ajuster les doses selon les besoins.

-Protection de différents métaux et alliages.

-Réduction des effets de la corrosion galvanique.

-Certains inhibiteurs assurent une double protection contre la corrosion et les dépôts.

II.8.2. Les limites et inconvénients :

- Continu L'efficacité dépend des caractéristiques chimiques du milieu.

-Sensibilité à la température, à la pression et à la vitesse d'écoulement.

-Nécessité d'un contrôle régulier de la concentration.

-Coût élevé de l'injection continue.

-Besoin d'équipements spéciaux pour l'injection.

-Certains inhibiteurs sont coûteux.

-Possibilité de perte d'efficacité avec le temps.

-Un mauvais choix d'inhibiteur peut aggraver la corrosion.

-Risque de corrosion localisée ou par piqûres.

-Certains inhibiteurs sont toxiques et polluants.

-Difficulté de traitement des déchets chimiques.

-Nécessité de personnel qualifié.

-Inefficacité dans certains milieux très agressifs.

-Possibilité de réactions chimiques avec d'autres substances.

-Formation possible de mousse ou de dépôts dans le système.

-Nécessité d'analyses de laboratoire continues.

-Les inhibiteurs ne suppriment pas totalement la corrosion.

-Changement possible du type d'inhibiteur selon les conditions de fonctionnement. –

-Diminution de l'efficacité en présence de contamination du milieu.

-Certains inhibiteurs peuvent affecter la qualité du produit final.

-Risque d'obstruction des canalisations à cause de certaines réactions chimiques. Influence des variations du pH et de la concentration en sels.

-Nécessité d'un contrôle environnemental strict.

-Risque de surdosage ou de sous-dosage.

-Difficulté d'évaluation réelle de l'efficacité des inhibiteurs dans certains systèmes industriels.[23]

Les inhibiteurs de corrosion jouent un rôle essentiel dans la protection des métaux contre les phénomènes de dégradation. Leur efficacité repose sur leur capacité à agir sur les réactions électrochimiques, soit en formant une barrière protectrice, soit en modifiant les conditions du milieu.

La classification des inhibiteurs selon leur mécanisme d'action (anodique, cathodique ou mixte), leur environnement d'utilisation (acide, neutre ou alcalin) et leur mode d'interaction (adsorption ou passivation) permet de mieux comprendre leur fonctionnement et d'optimiser leur utilisation dans les différents contextes industriels.

Ainsi, le choix judicieux d'un inhibiteur adapté, en tenant compte des paramètres du milieu et de la nature du matériau, constitue une étape fondamentale pour assurer la durabilité des installations, améliorer leur performance et réduire les coûts liés à la corrosion

Chapitre III : Présentation de l'unité industrielle et méthodologie expérimentale

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'unité industrielle étudiée ainsi que les différentes méthodes utilisées. Le travail a été réalisé dans l'entreprise ALPHYT Algérie, spécialisée dans la fabrication des insecticides en aérosol. Cette entreprise utilise plusieurs équipements industriels et des produits chimiques pendant la fabrication.

Dans cette industrie, les équipements métalliques sont en contact avec des produits chimiques et des gaz, ce qui peut causer la corrosion. Ce phénomène peut abîmer les équipements et créer des problèmes dans le fonctionnement de l'usine. C'est pour cela qu'il est important d'étudier les causes de la corrosion et les moyens utilisés pour protéger les métaux.

Dans ce chapitre, nous allons d'abord présenter l'entreprise, le procédé de fabrication et les conditions de travail dans l'unité industrielle. Ensuite, nous allons parler de la corrosion observée dans certains équipements et des inhibiteurs utilisés pour réduire ce problème. Enfin, les différentes méthodes utilisées pour étudier l'efficacité des inhibiteurs seront présentées.

III.2. Description de l'unité industrielle étudiée :

III.2.1. définition d'industrie :

Alphyt est une entreprise industrielle algérienne qui appartient au groupe Asmidal. Elle travaille surtout sur la création et la fabrication de produits qui protègent les plantes et la santé des gens, comme les insecticides. Elle a été fondée en 1978 et possède une grande usine de production située dans la wilaya de Mascara. Cette usine est connue pour produire surtout des produits en aérosol, avec une capacité de fabrication d'environ 10 millions d'unités chaque année. Elle peut ainsi satisfaire bien les besoins du marché local. L'entreprise utilise une infrastructure industrielle bien développée et joue un rôle important dans l'appui du secteur agricole et de la santé publique en Algérie.[22]

III.2.2. Procédé de fonctionnement :

La production des insecticides en aérosol se fait dans des usines industrielles qui ont des lignes de fabrication automatisées. Ces lignes utilisent des méthodes pour mélanger, remplir et compresser le produit. Toute cette production suit des règles très précises pour assurer la qualité et la sécurité. Le processus commence par la préparation de la formulation chimique dans des cuves de mélange en acier inoxydable, équipées d'agitateurs mécaniques qui assurent une bonne homogénéité du mélange et empêchent les matières actives de se déposer au fond. Cette formulation est principalement composée d'une substance active qui provoque un effet toxique sur les insectes. Les substances les plus courantes sont généralement des pyréthrinoïdes synthétiques comme la pyréthrine et la cyperméthrine, connues pour leur grande efficacité et leur rapidité d'action sur le système nerveux des insectes. La substance active est mélangée à des solvants organiques comme le kérosène ($C_{12}H_{26}$) ou le (White Spirit), qui aident à dissoudre les composés chimiques, facilitent leur pulvérisation et leur dispersion. La formule comprend aussi des agents qui mélangent bien les ingrédients pour qu'ils restent bien mélangés et ne se séparent pas, ainsi que des substances qui aident à garder les caractéristiques du produit intactes pendant qu'on le stocke et qu'on l'utilise. Comme la formule contient des liquides et des composants qui peuvent abîmer les parties en métal de l'aérosol ou de soupape, on ajoute des produits qui empêchent la rouille et la dégradation chimique des surfaces métalliques. Ces inhibiteurs créent une couche protectrice sur la surface du métal, ce qui empêche les réactions entre le métal, l'humidité et les substances chimiques agressives contenues dans la préparation. Cela aide à prolonger la durée de vie des emballages en métal et à assurer la sécurité du produit. Dans l'industrie, on utilise divers inhibiteurs de corrosion, dont certains composés organiques qui contiennent de l'azote ou du phosphore, ainsi que des sels particuliers qui aident à diminuer les réactions électrochimiques qui provoquent la corrosion. Après avoir préparé la formulation, le mélange est envoyé vers la ligne de remplissage automatique, où les aérosols métalliques, qui sont souvent en aluminium ou en fer-blanc peint, sont remplis avec une dose exacte du produit liquide. Une valve de pulvérisation est ensuite fixée sur chaque récipient pour réguler la sortie du produit. L'étape

suivante consiste à introduire le propulseur, qui est principalement constitué de gaz hydrocarbures compressés comme le butane, le propane et l'isobutane. Ces gaz assurent la pression nécessaire à l'intérieur pour faire sortir l'insecticide sous forme de petites gouttelettes lors de l'utilisation. En raison du risque d'incendie lié aux gaz utilisés pour l'injection, ces opérations sont effectuées dans des zones spécialement sécurisées, munies de systèmes de ventilation, de contrôle de pression et de dispositifs anti-explosion, conformes aux normes de sécurité industrielle. Après que le processus de remplissage soit terminé, les aérosols passent par plusieurs contrôles qualité, dont l'un des plus importants est le test dans un bain d'eau chaude. Les aérosols sont placés dans des bains d'eau chaude à température régulée pour augmenter la pression à l'intérieur et vérifier s'il y a une fuite de gaz ou de liquide. L'apparition de bulles d'air permet de repérer facilement les emballages qui ne sont pas conformes, qui sont ensuite enlevés de la chaîne de production pour assurer la sécurité et la qualité des produits. Enfin, les aérosols sont laissés sécher et ensuite marqués avec les informations techniques importantes, comme la composition chimique, les instructions pour l'utiliser et les précautions concernant les risques d'incendie et d'inhalation. Les produits finis sont ensuite mis dans des boîtes en carton et gardés dans des bâtiments adaptés, en veillant à ce qu'il y ait une bonne circulation de l'air et des mesures de sécurité avant qu'ils ne soient envoyés sur le marché.

III.2.3. Conditions opératoires :

L'usine de production d'insecticides en aérosol à Mascara, qui appartient à ALPHYT Algérie, doit respecter des conditions techniques et organisationnelles très strictes, en raison des substances chimiques et des gaz inflammables utilisés lors de la fabrication et du remplissage. Le procédé de production repose sur le mélange des matières actives avec des solvants organiques tels que le kérosène ($C_{12}H_{26}$) dans des cuves métalliques résistantes à la corrosion et équipées de systèmes d'agitation et de ventilation industrielle, avant l'orientation du mélange vers des lignes de remplissage automatiques où les gaz propulseurs comme le butane et le propane sont injectés dans les aérosols sous pression contrôlée. Pour des raisons

de sécurité, le kérosène ($C_{12}H_{26}$) est stocké dans des réservoirs fermés qui possèdent des systèmes pour éviter la formation d'électricité statique. Ces réservoirs sont également placés dans des zones fraîches et sèches, loin des sources de chaleur, des étincelles et des substances qui favorisent l'oxydation. Le gaz butane est stocké dans des bouteilles ou des réservoirs sous pression, conçus pour résister aux hautes pressions, placés en position verticale et sont protégés contre l'exposition directe au soleil ou aux températures élevées. L'unité dispose aussi de magasins industriels munis de systèmes de ventilation et de renouvellement d'air en permanence pour empêcher l'accumulation des vapeurs organiques et des gaz hydrocarbure, ainsi qu'un système de refroidissement industriel qui permet de garder une température stable dans les zones de stockage et les ateliers de production, ce qui aide à réduire les risques de surpression dans les emballages ou d'évaporation trop importante des solvants. Ces installations sont équipées de détecteurs de gaz qui permettent de repérer rapidement toute fuite et d'activer des alarmes automatiques si les limites de sécurité sont dépassées. En plus de cela, on trouve des systèmes pour éteindre les incendies et des dispositifs pour prévenir les explosions. Dans les ateliers de production, des règles strictes de sécurité sont en place, comme l'interdiction de fumer, le suivi constant de la pression et de la température pendant les étapes de mélange, de remplissage et d'injection des gaz propulseurs. On utilise aussi des systèmes d'aspiration et de ventilation pour atténuer la concentration des vapeurs chimiques dans l'air des locaux. Les matières premières et les produits finis sont également stockés sur des palettes adaptées, avec une séparation des substances chimiquement incompatibles et en respectant les règles de sécurité lors de la manutention et du stockage. Les matières premières et les produits finis sont également stockés sur des palettes adaptées, avec une séparation des substances chimiquement incompatibles et en respectant les règles de sécurité lors de la manutention et du stockage. En plus de cela, les travailleurs suivent des formations régulières sur les dangers liés aux produits chimiques et les actions à entreprendre en cas d'urgence. Ils portent également des équipements de protection comme des combinaisons résistantes aux produits chimiques, des gants, des lunettes de protection, des masques et des chaussures antistatiques et antidérapantes. Cela permet de diminuer les risques sur le lieu de travail, de

garantir la sécurité des employés, des appareils et du processus de production, tout en respectant les règles de sécurité et de qualité en vigueur.[22]

III.2.4. Matériaux utilisés :

L'unité de production utilise une infrastructure industrielle bien établie qui permet de fabriquer en grande quantité, jusqu'à 10 millions d'unités par an. Les principaux équipements techniques incluent : Réacteurs et cuves de mélange munis d'agitateurs pour garantir une homogénéité des préparations. Lignes de remplissage d'aérosols (remplissage, sertissage, injection du gaz propulseur). Compresseurs d'air industriels (marque Atlas Copco) pour alimenter les systèmes pneumatiques. Chaudière industrielle utilisée pour produire de la vapeur, nécessaire pour certains procédés. Systèmes de stockage (réservoirs pour solvants et gaz). Installations électriques (transformateurs, groupe électrogène). Système de lutte contre l'incendie (pompes, réseau d'eau sous pression). La plupart de ces équipements sont fabriqués en acier au carbone, acier inoxydable (304/316) et parfois recouverts d'anticorrosion, à cause de la nature agressive des produits manipulés. b. Équipements de protection individuelle (EPI) En raison des risques liés à la manipulation de produits chimiques et à l'environnement de travail, les employés sont équipés de dispositifs de protection, notamment : Des bottes résistantes aux produits chimiques et aux chocs. Des masques respiratoires pour se protéger contre les vapeurs toxiques et les aérosols. Des protections auditives (casques ou bouchons d'oreilles) en raison du bruit des machines. Des gants de protection contre les produits chimiques. Des lunettes de sécurité pour éviter les projections. Des combinaisons de travail adaptées pour limiter l'exposition aux produits chimiques. Ces équipements sont indispensables pour assurer la sécurité et la santé des travailleurs dans l'unité. Matières premières utilisées Les ingrédients principaux utilisés pour fabriquer les insecticides en aérosol comprennent :

- Insecticides actifs : composés chimiques qui agissent pour éliminer les insectes.

- Solvants organiques, comme le kérosène ou d'autres produits pétroliers, qui permettent de dissoudre les substances actives.

- Gaz propulseurs, tels que le butane ou des mélanges de GPL, qui permettent de faire sortir le produit de l'aérosol.

- Additifs : - Émulsifiants - Stabilisants - Parfums (dans certains produits)

Ces substances chimiques, notamment les solvants et les gaz, peuvent créer un environnement agressif, ce qui peut provoquer la corrosion des équipements en métal.[22]

III.3. Problématique de corrosion observée dans l'unité :

Dans les usines qui produisent les insecticides en aérosol, la corrosion se produit surtout dans les réservoirs où on stocke le kérosène et les produits actifs, surtout sur les parois intérieures et les endroits où s'accumulent les dépôts. Elle se produit aussi dans les canalisations qui transportent des liquides et des gaz, à cause de la pression constante, du frottement à l'intérieur et des changements dans le débit. Les vannes et les pompes peuvent aussi se corroder à cause des mouvements mécaniques continus et du contact avec des produits chimiques. De même, les tuyaux utilisés pour remplir et injecter les gaz propulseurs travaillent dans des conditions qui combinent des solvants organiques et des gaz sous pression, ce qui fait que les métaux s'usent plus vite. La corrosion peut aussi apparaître sur les structures métalliques extérieures et les attaches, à cause de l'humidité et des changements de température dans un environnement industriel.

La corrosion affecte aussi le réseau d'extinction d'incendie, notamment les tubes et les vannes, à cause de la pression constante et de la qualité de l'eau qui circule dans le système. Les extincteurs peuvent aussi être impactés avec le temps par l'humidité et la corrosion extérieure. De plus, la corrosion se remarque à la station de pompage car les pompes et les conduites internes sont en contact constant avec l'eau, et à la station électrique, où des éléments métalliques comme les structures porteuses, les boîtiers de protection et les gaines des câbles

se corrodent progressivement à cause de l'humidité et des conditions environnementales de l'industrie.

La corrosion peut également se produire dans le réservoir d'eau, surtout sur les parois internes et les connexions métalliques, sans être trop bref ni exclure aucun élément important. Enfin, les structures environnantes comme les grillages, les clôtures et les barrières de protection sont aussi affectées par la corrosion causée par l'humidité et les changements climatiques. Cela signifie qu'il faut les surveiller régulièrement dans l'usine.

III.4. Choix des inhibiteurs testés :

Le choix des inhibiteurs de corrosion utilisés dans l'unité de production des insecticides en aérosol dépend du type de matières métalliques employées, du milieu chimique présent dans les équipements comme l'eau, les solvants organiques ou les gaz sous pression, ainsi que des conditions de travail comme la pression, la température et la vitesse à laquelle les fluides circulent. L'objectif principal de l'utilisation de ces inhibiteurs est de diminuer le taux de corrosion à l'intérieur des équipements industriels comme les cuves, les tubes, les pompes et les systèmes de stockage, pour améliorer leur longévité et garantir le fonctionnement continu de la production dans des conditions sécurisées. Les inhibiteurs analysés dans cette étude appartiennent à différentes catégories, chacune agissant de manière différente selon le type d'environnement industriel. Les phosphates travaillent en créant une couche épaisse et insoluble sur la surface du métal. Cette couche protège le métal en le séparant du milieu corrosif et diminue les réactions électrochimiques, surtout dans les systèmes à base d'eau comme les circuits de refroidissement et les systèmes de lutte contre l'incendie. Les chromates sont des substances efficaces qui agissent grâce à un phénomène appelé passivation. Ils transforment la surface du métal en une fine couche d'oxyde solide et compacte, ce qui empêche le métal de continuer à réagir avec son environnement. Cela ralentit beaucoup ou même stoppe la corrosion, surtout dans des conditions propices. Les silicates, quant à eux, agissent différemment : ils s'unissent à la surface du métal pour former une couche fine semblable à un verre (un film silicaté), qui agit à la fois comme une barrière physique et

chimique. Ils fonctionnent très bien dans les environnements liquides où le pH change souvent. Enfin, les inhibiteurs organiques tels que les amines et les composés azotés reposent sur le mécanisme d'adsorption, où leurs molécules se fixent à la surface du métal pour former une couche moléculaire mince et invisible mais très efficace, empêchant l'accès de l'eau, de l'oxygène et des agents corrosifs à la surface métallique, tout en réduisant les réactions électrochimiques. Ce genre d'inhibiteurs est très utile dans les endroits où il y a des solvants organiques ou des gaz hydrocarbure, car ils offrent une protection fiable sans changer les caractéristiques du milieu industriel.[22]

III.5. méthodes d'évaluation de l'efficacité des inhibiteurs :

III.5.1. Méthodes gravimétriques :

Ces méthodes constituent l'une des approches les plus courantes et les plus fréquemment employées pour mesurer la corrosion ainsi que l'efficacité des composés qui empêchent la corrosion. Le principe de cette méthode s'appuie sur la mesure de la différence de masse d'un échantillon métallique avant et après qu'il ait été exposé à un environnement corrosif pendant un temps fixe. La baisse de poids constatée représente la quantité de métal qui s'est dissous ou détérioré grâce à la corrosion. Dans cette méthode, les morceaux de métal sont soigneusement préparés, nettoyés et pesés avant d'être plongés dans le milieu à étudier. Après que la période d'exposition se soit achevée, les échantillons sont enlevés, puis les produits de corrosion présents sur leur surface sont enlevés grâce à un nettoyage mécanique ou chimique, afin de déterminer la masse exacte du métal qui reste. La différence entre la masse initiale et la masse finale permet de calculer la perte de masse due à la corrosion. Ici, désigne la masse initiale du coupon, correspond à la masse finale après corrosion, représente la surface exposée et indique la durée d'immersion. Cette relation permet de calculer le taux de corrosion en se basant sur la perte de masse par unité de surface et par unité de temps. Les résultats peuvent ensuite être transformés en vitesse de corrosion en millimètres par an, pour estimer la réduction d'épaisseur des matériaux métalliques.

La durée de l’essai joue un rôle très important dans les techniques de mesurage par gravimétrie. Dans des environnements très agressifs comme les acides, les tests peuvent durer quelques minutes ou quelques heures seulement, alors que dans l'eau, les carburants ou certains milieux industriels moins corrosifs, ces tests peuvent durer plusieurs jours, semaines ou même plusieurs mois. Les résultats obtenus permettent généralement de tracer des courbes qui montrent comment la perte de masse varie en fonction du temps pendant l'immersion, ce qui permet d'analyser l'évolution du processus de corrosion.

Les méthodes gravimétriques sont souvent employées dans les laboratoires ainsi que dans les usines pour examiner la corrosion qui affecte les systèmes de refroidissement, les réservoirs et les installations pétrolières. Elles sont également très employées pour évaluer les performances des inhibiteurs de corrosion en mesurant la baisse du taux de corrosion après l'introduction de l'inhibiteur dans un milieu corrosif.

III.5.1.1. Avantages Méthodes gravimétriques :

Cette méthode est simple, peu coûteuse et facile à mettre en œuvre.

Fournit des résultats fiables et précis pour la corrosion uniforme.

Permet de calculer directement la perte de masse et la vitesse de corrosion.

Une technique très couramment employée pour mesurer l'efficacité des inhibiteurs de corrosion dans divers environnements.

III.5.1.2. Limites Méthodes gravimétriques :

Les essais nécessitent en général des durées d'exposition assez prolongées.

Peu adaptée aux matériaux présentant une très faible vitesse de corrosion.

Le nettoyage des produits de corrosion peut entraîner des erreurs expérimentales.

Ne permet pas une surveillance continue ou en temps réel de la corrosion.[24]

III.5.2. Méthodes électrochimiques :

Les méthodes électrochimiques de surveillance de la corrosion reposent sur la compréhension que la corrosion des métaux et des alliages dans des solutions électrolytiques est un processus électrochimique. Cela signifie que les méthodes électrochimiques fonctionnent le mieux pour la corrosion des métaux dans des environnements hautement conducteurs. Lorsque les réactions de corrosion sont électrochimiques, les principales caractéristiques de la corrosion sont le potentiel d'électrode, le courant électrique et la résistance électrique, qui dépend des deux premiers paramètres. La mesure de ces trois paramètres nous permet de caractériser et de suivre la corrosion des métaux dans des milieux conducteurs.

Le potentiel d'électrode d'un métal est une propriété thermodynamique du processus de corrosion. Sa formule est **ΔG = -nFE**, où n est le nombre de moles d'électrons impliquées dans la dissolution du métal, F est la constante de Faraday, et E est la différence entre les forces électromotrices des réactions anodiques et cathodiques. Nous devons nous assurer que nous mesurons le potentiel de corrosion, et non le potentiel d'électrode réversible utilisé dans cette formule

À partir du courant électrique, nous pouvons calculer la perte de masse du métal en utilisant la loi de Faraday (1.37 et 5.14). La vitesse de corrosion d'un métal est proportionnelle au courant de corrosion. Basées sur les trois paramètres électrochimiques — potentiel d'électrode, courant électrique et résistance électrique — les méthodes électrochimiques peuvent être divisées en approches qualitatives et quantitatives. Les méthodes qualitatives comprennent l'identification du caractère corrosif des milieux (détermination du potentiel redox) et la détermination du potentiel de corrosion (potentiel d'électrode) d'une surface métallique corrodée.[24]

III.5.2.1. polarisation :

La méthode de la résistance de polarisation linéaire (LPR) est une technique électrochimique utilisée pour mesurer la vitesse de corrosion et pour étudier l'efficacité des inhibiteurs de corrosion. Elle repose sur l'application de faibles variations de potentiel électrique autour du potentiel de corrosion, généralement comprises entre ±10 et ±30 mV. Ensuite, le courant généré entre deux électrodes identiques immergées dans une solution électrolytique est mesuré.

Dans cette région de faible polarisation, le courant obtenu est directement proportionnel au courant de corrosion. La résistance de polarisation est alors déterminée à partir du rapport entre la variation de potentiel et la variation de courant. Une augmentation de cette résistance indique généralement une diminution de la vitesse de corrosion.

Les résultats obtenus peuvent ensuite être utilisés pour calculer le courant de corrosion à l'aide de la relation de Stern-Gary :

I corr = B / Rp

Où**B** est une constante qui dépend à la fois du métal et du milieu corrosif. À partir de ces valeurs, il est également possible de déterminer la vitesse de corrosion en utilisant **la loi de Faraday.**

La méthode LPR est largement employée dans les pipelines pétroliers, les circuits de refroidissement et les installations industrielles, notamment pour le suivi de la corrosion uniforme et l'évaluation des performances des inhibiteurs de corrosion.

III.5.2.1.1. Avantages de la méthode LPR :

- Mesure rapide du taux de corrosion
- Technique adaptée aux milieux aqueux conducteurs
- Faible perturbation de la surface métallique pendant les essais

- Outil efficace pour évaluer les inhibiteurs de corrosion

III.5.2.1.2. Limites de la méthode LPR :

- Difficulté à détecter la corrosion localisée, en particulier la corrosion par piqûres
- Efficacité réduite dans les milieux à faible conductivité
- Les dépôts et couches de tartre peuvent influencer les résultats
- Présence possible de réactions parasites pouvant fausser les mesures. [24]

III.5.2.2. spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS) :

La spectroscopie d'impédance électrochimique est une méthode utilisée en électrochimie pour étudier les phénomènes de corrosion et évaluer l'efficacité des matériaux qui freinent la corrosion. Cette méthode consiste à appliquer un faible signal alternatif de tension ou de courant à une électrode en métal qui est immergée dans un environnement corrosif, généralement proche du potentiel de corrosion. La réponse électrique du système est ensuite mesurée à plusieurs fréquences afin de connaître le spectre d'impédance du système électrochimique. Contrairement à la résistance électrique traditionnelle décrite par la loi d'Ohm, l'impédance électrochimique change selon la fréquence et tient compte de plusieurs phénomènes physiques et chimiques qui se produisent à l'endroit où le métal entre en contact avec la solution. L'analyse des spectres d'impédance permet de mesurer la vitesse de corrosion, d'étudier les réactions électrochimiques et d'évaluer la qualité des couches protectrices qui se forment sur la surface du métal. À des fréquences basses, l'impédance ressemble à la résistance de polarisation obtenue grâce à la méthode LPR . La méthode EIS est fréquemment utilisée pour analyser la corrosion des métaux, vérifier la durabilité des couches de protection, contrôler le bon fonctionnement de la protection cathodique et mesurer l'efficacité des inhibiteurs de corrosion dans différents lieux de travail industriels. Avantages de la méthode EISPermet d'estimer rapidement les vitesses de corrosion. Applicable aux milieux à faible conductivité électrique. Très efficace pour vérifier le fonctionnement des

inhibiteurs de corrosion. Permet l'analyse des revêtements de protection et des films de surface.

Limites de la méthode EIS Les mesures prennent généralement un temps assez long pour être testées. Le système doit rester stable pendant toute la durée de la mesure pour garantir des résultats fiables. L'analyse des spectres d'impédance est relativement complexe. La méthode exige souvent de comparer avec d'autres techniques électrochimiques telles que la LPR. [24]

III.5.3. analyses physico-chimiques :

Les méthodes de contrôle de l'environnement sont parmi les moyens les plus importants pour surveiller et évaluer la corrosion dans les unités industrielles. Elles incluent des méthodes chimiques analytiques, physico-chimiques, physiques et microbiologiques. Ces techniques reposent sur l'analyse des caractéristiques du milieu, telles que la concentration d'ions dissous, de gaz, de substances chimiques et de micro-organismes. Elles mesurent également des paramètres physico-chimiques comme le pH, la conductivité électrique, la dureté et le taux d'oxygène dissous. Ces analyses permettent de détecter le niveau de corrosion et d'évaluer l'agressivité du milieu envers les matériaux métalliques dans différents systèmes industriels, y compris les eaux de refroidissement, les eaux de chaudières, les systèmes biphasés eau-hydrocarbures et les produits chimiques industriels.

Les programmes de traitement chimique, qui utilisent des inhibiteurs de corrosion, des antitartres et des biocides, nécessitent le maintien de paramètres spécifiques pour garantir leur efficacité. Plusieurs techniques analytiques modernes sont employées, notamment la spectroscopie infrarouge, la spectroscopie ultraviolette, l'absorption atomique, la chromatographie, les électrodes sélectives d'ions et les pH-mètres. Dans les raffineries pétrolières, ces méthodes sont souvent combinées avec les méthodes de perte de masse et de résistance électrique pour mesurer les concentrations de fer, de cuivre, de chlorures et de sulfates, qui sont des indicateurs importants de la corrosion. En outre, une faible résistivité

électrique du sol indique une forte agressivité corrosive. Cela nécessite parfois d'analyser l'humidité, les chlorures, les sulfates et le pH du sol.

Les valeurs critiques des paramètres analytiques diffèrent selon le type de système et les matériaux utilisés. Par exemple, dans les systèmes de refroidissement, la concentration totale en fer ne doit pas dépasser 1 ppm, tandis que celle du cuivre doit rester en dessous de 0,05 ppm pour éviter la corrosion. La surveillance continue des variations soudaines des concentrations chimiques est également un moyen efficace de détecter la corrosion à un stade précoce.

Enfin, les méthodes chimiques analytiques offrent plusieurs avantages, comme leur grande sensibilité et leur capacité à mesurer les vitesses de corrosion, même dans des situations où les méthodes classiques sont difficiles à appliquer. Elles permettent également d'estimer la vitesse de corrosion à partir de la concentration des ions métalliques dissous dans le milieu.[24]

III.6. protocole expérimental :

Ce protocole vise à étudier l'utilisation d'un plan précis pour observer la corrosion des métaux et tester des matériaux capables d'induire ce phénomène dans un environnement de travail restreint. Chaque étape du processus suit un système rigoureux, garantissant ainsi des procédures cohérentes pour les essais suivants.

À bord, les plaques d'acier, double face, sont calibrées avec des dimensions parfaitement identiques. Un polissage progressif est appliqué à l'aide de grains abrasifs successivement liés, uniformisant ainsi les caractéristiques de surface. L'étape suivante consiste en un nettoyage minutieux à l'acétone pour éliminer tout résidu. Un séchage naturel est ensuite effectué grâce à la circulation d'air ambiant. Une pièce de mesure précise permet d'enregistrer avec exactitude la largeur totale (m_0).

Après avoir réalisé les tests nécessaires dans des conditions soigneusement définies, la préparation des solutions corrosives est simple. De par leur composition simple, ces fluides

reproduisent efficacement certains des environnements industriels les plus exigeants. Par ailleurs, chaque inhibiteur peut être dosé avec précision pour permettre une comparaison équitable. De nombreux services sont disponibles sans nécessiter de référence supplémentaire lors des étapes suivantes.

Les effets sont durables et disparaissent dans différentes solutions. Il existe une plaque supplémentaire, adaptée aux environnements agressifs, contenant ou non un agent corrosif. Les temps d'application varient : parfois de 20 à 40 heures, souvent de 40 à 80 heures, voire plus si nécessaire. La stabilité tout au long du processus de chauffage, de température et de mélange du liquide empêche la formation de résidus instables. Cependant, les mesures obtenues peuvent être comparées sans risque de distorsion.

Après l'application, les préréglages deviennent caducs. Un rinçage d'une minute est nécessaire pour optimiser l'efficacité du composé anticorrosion. Ce nettoyage est effectué avant une nouvelle application, fournissant une valeur M_1. Grâce à cet état final, il est possible d'évaluer précisément la détérioration globale causée par la minéralisation.

Enfin, les données des agents contenant un inhibiteur et des cellules témoins seront comparées. L'objectif ? Établir une échelle de comparaison pour tous les matériaux soumis à des tests de réaction libre, dans un contexte similaire à celui rencontré en milieu industriel.

Pour détailler la fonction d'ALPHYT Algérie, nous aborderons la semaine prochaine les pesticides produits par pulvérisation. Lors de leur utilisation, les employés sont souvent familiarisés avec les produits susceptibles de développer des altérations de surface. Les liquides qui circulent dans les locaux, accompagnés de vaporisateurs, fragilisent les éléments métalliques. Il est donc nécessaire de vérifier, sans interruption, la qualité des éléments présents dans l'installation.

L'analyse de la détérioration révèle une corrosion accrue affectant d'autres composants : réservoirs, canalisations, équipements de purification et éléments structurels. En conséquence,

des techniques d'oxydation ciblées sont mises en œuvre pour préserver l'intégrité de l'ensemble du système métallique et garantir son bon fonctionnement.

D'autres techniques d'analyse de la corrosion peuvent être envisagées, telles que l'utilisation de matériaux actifs (par exemple, des batteries de grande capacité), de procédés électrochimiques ou l'introduction de composés modifiés. Ces stratégies nécessitent toutefois des essais approfondis des produits et un suivi régulier de leurs transformations.

Chapitre IV : résultats et discussion et recommandations

IV.1. Introduction :

Voici les résultats de l'étude, venant après un échange sur les bases théoriques liées à la corrosion, ses freins possibles, le site industriel étudié et comment ont été menées les recherches. Juste derrière, vient l'analyse - placée tout près des données exposées, enrichie par ce qu'a montré le terrain. Ce que cela met en lumière rejoint certaines façons de faire habituelles dans les usines. Pas question ici de couper net entre observations concrètes et concepts abstraits ; plutôt, chaque élément se croise pour mieux dessiner l'ensemble. Ce qu'on observe dans la vraie vie rejoint parfois ce qui se passe au labo, pas en plus, mais comme un élément lié aux changements mesurés. En discutant, on examine les données avec distance, sans tout couvrir ni trancher totalement. Ce que montrent les tests invite à y voir autrement, remettre certains départs en question. Même ainsi, le chemin global ne dévie guère des idées premières posées avant même d'avoir commencé. Pour tester comment certains produits ralentissent la rouille sur l'acier plongé dans du sel, on a pesé les échantillons avant et après immersion. Un premier essai incluait du nitrite de sodium **($NaNO_2$),** un autre employait du phosphate de sodium **(Na_3PO_4).** Chaque solution passée à l'épreuve devait montrer son effet face à l'oxydation. Des données initiales montrent que **$NaNO_2$** comme **Na_3PO_4** changent nettement ce qu'il advient du métal exposé. Dans un cadre similaire aux installations usuelles, leurs impacts ne semblent pas négligeables. D'entrée, on observe ici ce que montrent les mesures faites sur la diminution du poids, la rapidité avec qu'un métal s'use et comment certains produits ralentissent ce phénomène. Un peu plus loin, tout cela se croise avec les éléments capables de changer leur comportement utile. Parfois, des détails du terrain viennent troubler leurs effets – ceux-là aussi passent sous examen. Pour finir, sans rien exagérer, on regarde où ils pourraient servir vraiment, surtout quand il faut fabriquer à grande échelle. En même temps, on voit bien comment ça agit sur la durée de vie du matériel dans les usines. Concernant les dépenses courantes, là aussi les effets se font sentir sans discussion possible. Quant à la sûreté ou au respect du vivant, plusieurs points sautent aux yeux dès qu'on y regarde. Pourtant, malgré tout cela, il reste utile de passer au crible ce que donne vraiment son usage réel. Depuis un autre angle, voici comment les résultats parlent du

quotidien à ALPHYT Algérie. En situation réelle, gérer la corrosion devient incontournable dans les routines d'entretien. Là où circulent produits chimiques ou solvants, elle montre son visage souvent. Quand on manipule des gaz sous forte pression, agir dessus prend tout son sens.

IV.2. Présentation des résultats expérimentaux :

L'évaluation de l'efficacité des inhibiteurs de corrosion a été réalisée par la (méthode gravimétrique), basée sur la mesure de la perte de masse des échantillons après exposition à un milieu corrosif. Trois échantillons de forme carrée en acier doux, de masse initiale égale à 25 g et de surface totale de 10 cm2, avec des dimensions géométriques standards de (2.1 cm * 2.1 cm), avec 3 mm épaisseur.

Les essais ont été effectués dans des béchers en verre contenant chacun 100 mL d'eau distillée dans laquelle du chlorure de sodium a été dissous à une concentration de 3%. Le premier échantillon a été immergé directement dans cette solution, où la valeur initiale du pH du milieu était neutre, se situant entre 6.8 et 7.0 . Quant aux deux autres échantillons, ils ont subi un processus d'immersion rapide et instantané dans les solutions d'inhibiteurs à 1% nitrite de sodium(NaNO2) et phosphate de sodium (Na3PO4) avant d'être transférés immédiatement et directement dans les béchers de corrosion contenant 100 mL de la solution de NaCl à 3%. En raison de la forte dilution des gouttelettes adhérant à la surface au sein du volume de liquide 100 mL, le pH s'est stabilisé durant la période de corrosion de la manière suivante : * Dans le bécher de l'échantillon au nitrite de sodium NaNO2, le pH s'est stabilisé dans la plage neutre entre 7.0 et 7.5 . * Dans le bécher de l'échantillon au phosphate de sodium Na3PO4, le milieu a maintenu une très légère alcalinité variant entre 7.5 et 8.2, grâce à l'effet basique résiduel des ions phosphate. Les trois échantillons ont été laissés en immersion totale dans ces milieux à température ambiante (25 C^{0}) pendant une durée continue de 72 heures. Les résultats obtenus après le retrait, le lavage et le séchage des échantillons montrent une diminution significative de la corrosion en présence des inhibiteurs. Le phosphate de sodium a présenté la meilleure efficacité inhibitrice avec un taux de 65.5%, contre 57.7% pour le nitrite de sodium.

Cette amélioration est attribuée au succès instantané des ions phosphate à former un film protecteur stable de phosphate de fer peu soluble à la surface du métal, et ce, malgré la courte durée de l'immersion initiale.

Échantillon	Milieu	mo (g)	m_1 (g)	Δm(g)	Vitesse de corrosion (mm/an)
Témoin (sans inhibiteur)	NaCl 3%	25.000	24.812	0.188	1.42
Avec $NaNO_2$	NaCl + inhibiteur	25.000	24.920	0.080	0.60
Avec Na_3PO_4	NaCl+inhibiteur	25.000	24.935	0.065	0.49

Tab.IV.1. information expérimentales

Paramètre	Valeur
Matériau étudié	Acier doux (Fe + C)
Nombre d'échantillons	3
Masse initiale de chaque échantillon	25 g
Méthode d'étude	Gravimétrique (perte de masse)
Milieu corrosif	Solution de NaCl
Concentration de NaCl	3 % (30 g/L)
Ph de milieu sans inhibiteur	7
Inhibiteur 1	$NaNO_2$
Concentration de $NaNO_2$	1 g/L
Ph de $NaNo_2$	7 – 7.5
Inhibiteur 2	Na_3PO_4

Paramètre	Valeur
Concentration de Na_3PO_4	1 g/L
Ph de Na_3Po_4	7.5 - 8
Durée d'immersion	72 h
Température	25 ± 2 °C (température ambiante)
Nombre de répétitions	1
Densité de l'acier	7,86 g/cm³
Surface exposée	10 cm²
Epaisseur	3 mm
Constante de calcul	K = 87600

Tab.IV.2. récapitulatif des conditions expérimentales

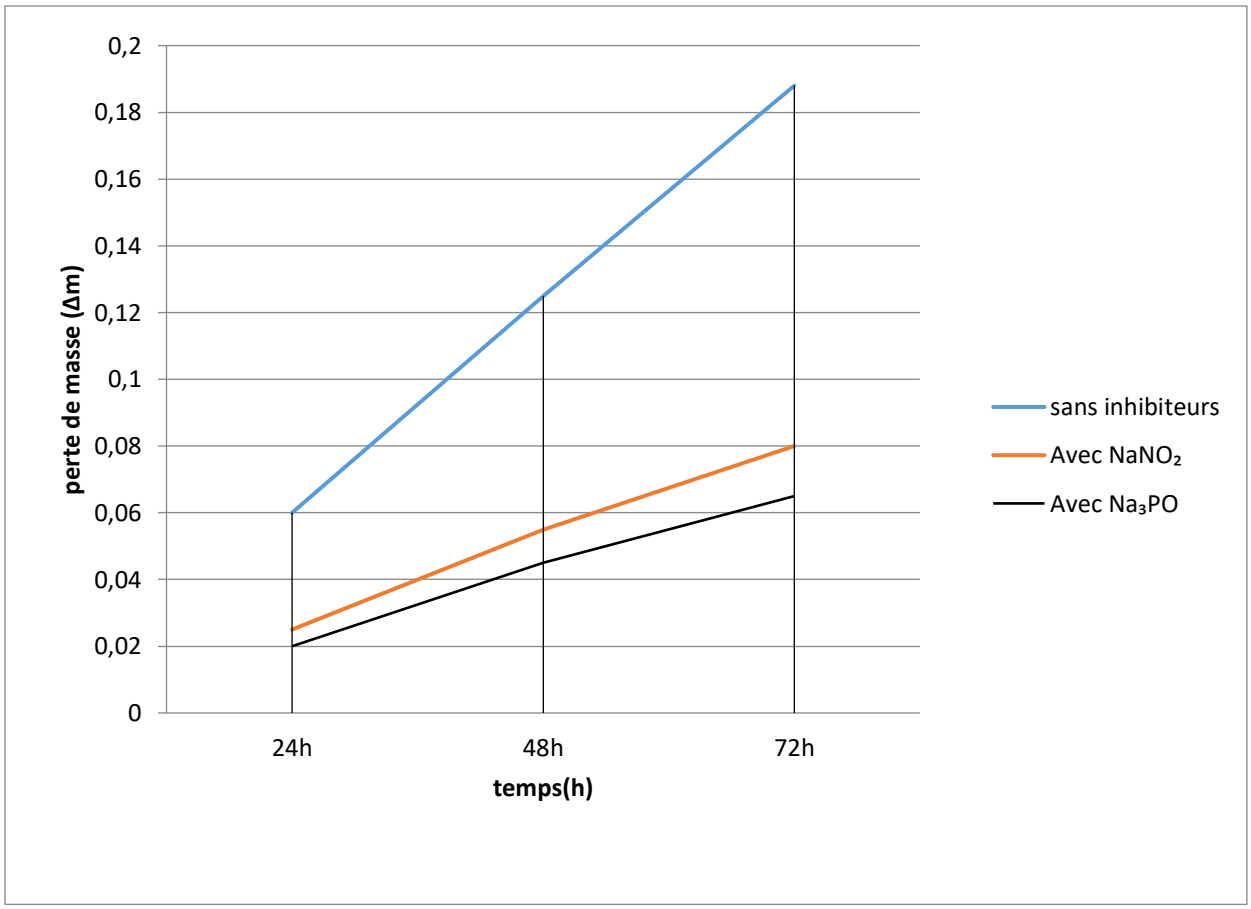


Figure IV.1. Courbet de pert de masse

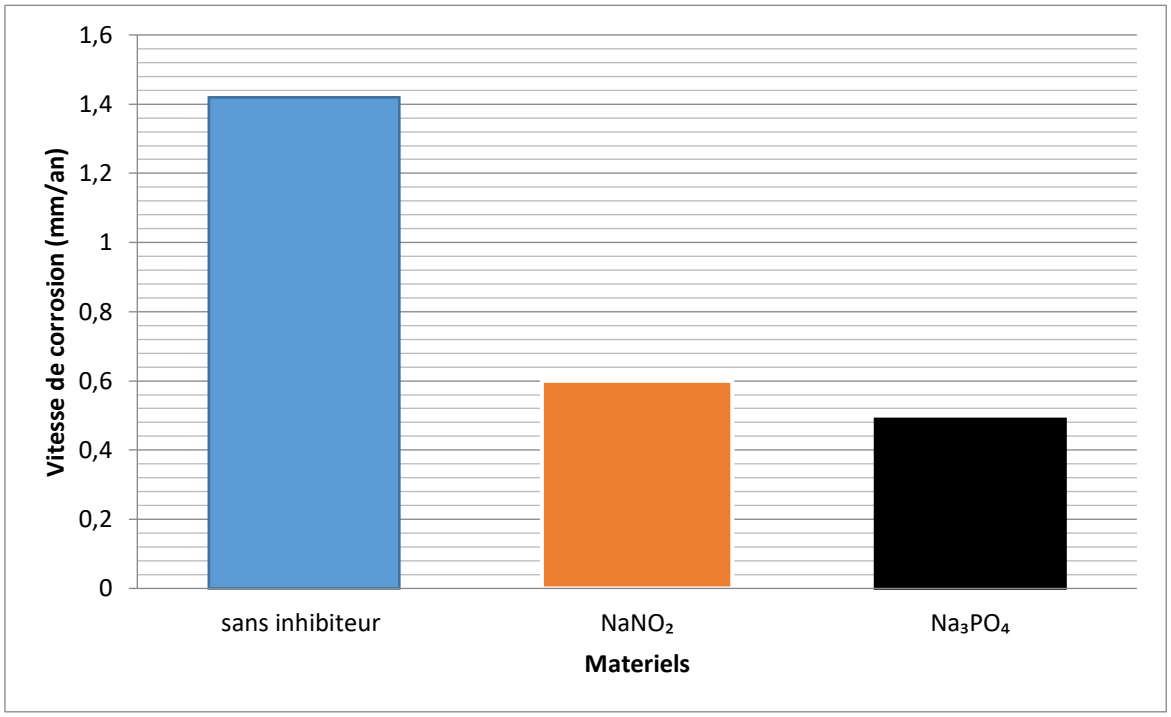


Figure IV.2. Vitesse de corrosion

IV.3. Évaluation de l'efficacité des inhibiteurs de corrosion :

L'efficacité des inhibiteurs de corrosion a été jugée en se basant sur les résultats obtenus grâce à la technique gravimétrique, qui repose sur l'évaluation de la diminution de masse des échantillons métalliques après leur immersion dans un environnement corrosif. Nous avons utilisé trois échantillons d'acier doux : un témoin sans inhibiteur et deux autres contenants respectivement du nitrite de sodium **($NaNO_2$)** et du phosphate de sodium **(Na_3PO_4).**

Suite à une exposition de 72 heures dans une solution de **NaCl à 3 %,** les échantillons ont été retirés, nettoyés et pesés pour mesurer la diminution de leur masse :

$\Delta m = m0 - m1$

Où:

- **m0** représente la masse initiale de l'échantillon,
- **m1** représente la masse finale après immersion.

Les pertes de masse obtenues expérimentalement sont les suivantes :

- Échantillon témoin : **Δm=0.188**
- Avec **$NaNO_2$** : **Δm=0.080 g**
- Avec **Na_3PO_4** : **Δm=0.065 g**

La vitesse de corrosion a ensuite été calculée à l'aide de la relation suivante :

$V_{corr} = (K \times \Delta m)/(\rho \times A \times t)$

Avec:

- **V_{corr}** : vitesse de corrosion (mm/an),
- **K**=87600 : constant de conversion,
- **Δm :** perte de masse (g),
- **ρ**=7.86 g/cm3 : densité de l'acier,
- **A**=10 cm2: surface de l'échantillon,
- **t=72** h: temps d'immersion.

Calcul de la vitesse de corrosion

Échantillon témoin

$V_{corr}=(87600\times0.188)/(7.86\times10\times72)\approx1.42$ mm/an

Échantillon avec $NaNO_2$

$V_{corr}=(87600\times0.080)/(7.86\times10\times72)\approx0.60$ mm/an

Échantillon avec Na_3PO_4

$V_{corr}=(87600\times0.065)/(7.86\times10\times72)\approx0.49$ mm/an

L’efficacité inhibitrice de chaque composé a ensuite été déterminée à partir de la formule suivante :

$\eta=((V0-Vinh)/(V0))\times(100)$

Où:

- **V0** est la vitesse de corrosion de l’échantillon témoin,
- **Vinh** est la vitesse de corrosion en présence de l’inhibiteur.

Calcul de l’efficacité inhibitrice

Pour le nitrite de sodium ($NaNO_2$)

$\eta=((1.42-0.60)/(1.42))\times100=57.7\%$

Pour le phosphate de sodium (Na_3PO_4)

$\eta=((1.42-0.49)/(1.42))\times100=65.5\%$

Les observations indiquent que l'introduction d'inhibiteurs diminue de façon significative la rapidité de corrosion de l'acier doux dans l'environnement examiné. Le phosphate de sodium affiche l'efficacité inhibitrice la plus élevée avec un taux de 65,5 %, alors que le nitrite de sodium montre une efficacité de 57,7 %. La réduction de la corrosion peut être attribuée à l'établissement d'une pellicule protectrice sur le métal, qui minimise les réactions électrochimiques à l'origine du processus corrosif. [24]

IV.4. Comparaison des inhibiteurs testés :

Pour comparer les inhibiteurs testés, une analyse a été faite entre le nitrite de sodium ($NaNO_2$) et le phosphate de sodium (Na_3PO_4) en se basant sur les résultats expérimentaux obtenus par la méthode gravimétrique. Les éléments de comparaison choisis sont l'efficacité

des inhibiteurs, la rapidité de la corrosion, la stabilité dans diverses conditions de fonctionnement et le coût d'utilisation en milieu industriel.

Critères de comparaison	**Nitrite de sodium ($NaNO_2$)**	**Phosphate de sodium (Na_3PO_4)**
Efficacies inhibitrice (%)	57,7 %	65,5 %
Vitesse de corrosion (mm/an)	0,60	0,49
Niveau de protection	Bonne protection	Très bonne protection
Stabilité en milieu industriel	Stable en milieu neutre et légèrement alcalin	Très stable dans différents milieux aqueux
Formation d'une couche protectrice	Couche passive modérée	Couche protectrice plus compacte
Résistance aux variations de température	Moyen	Bonne
Compatibilité avec les circuits industriels	Bonne	Très bonne
Coût industriel	Moyen	Faible à moyen
Impact environnemental	Peut devenir toxique à forte concentration	Plus écologique
Classement global	2e	1er

Tab. IV.2. comparaison entre Nitrite de sodium et Phosphate de sodium

Les résultats indiquent que les deux inhibiteurs diminuent la corrosion de l'acier doux, mais avec des performances variées. Le nitrite de sodium offre une bonne protection en créant une couche passive sur la surface métallique. Cependant, son efficacité est encore moins bonne que celle du phosphate de sodium. Le phosphate de sodium a montré les meilleurs résultats lors des expériences, avec une vitesse de corrosion plus faible et une meilleure efficacité pour inhiber la corrosion. Il crée une couche de protection qui est plus stable et plus solide, ce qui renforce la protection du métal dans les conditions industrielles examinées. En plus, il offre une meilleure stabilité, un coût assez bas et un impact sur l'environnement réduit. Pour ces raisons, il est vu comme le meilleur inhibiteur parmi tous les produits qui ont été testés dans cette étude.

IV.5. Influence des paramètres opératoires sur l'efficacité :

L'efficacité des inhibiteurs de corrosion est influencée par plusieurs facteurs : la composition chimique de la solution aqueuse, le pH, le débit, la température et l'état de surface du métal (rugosité, présence de produits de corrosion et d'autres composés). Les inhibiteurs sont plus efficaces dans une plage de pH spécifique. Les nitrites perdent leur efficacité en dessous d'un pH de 5,5 à 6,0 ; les polyphosphates sont utilisés entre pH 6,5 et 7,5 ; les inhibiteurs à base de phosphate de zinc sont généralement utilisés entre pH 7,8 et 8,2. Plus la concentration en ions chlorure et sulfate est élevée, plus la concentration d'inhibiteurs de corrosion nécessaire à la protection est importante. En général, des concentrations plus élevées d'inhibiteurs de corrosion sont nécessaires en milieu stagnant qu'en milieu circulant. La nature de la surface métallique est primordiale. La présence d'hydrocarbures (huile ou graisse) ou de produits de corrosion à la surface du métal nuit à l'efficacité des inhibiteurs, car ces derniers ne peuvent pas pénétrer la surface. La surface métallique doit être nettoyée et passivée avant l'application des inhibiteurs de corrosion. La plupart des entreprises recommandent une passivation par des produits chimiques spécifiques contenant des inhibiteurs de corrosion avant utilisation dans les systèmes d'eau de refroidissement. Les matières en suspension sont préjudiciables à l'utilisation des inhibiteurs, car elles peuvent être

adsorbées par la surface métallique, empêchant ainsi les inhibiteurs de corrosion d'atteindre cette surface. Par ailleurs, les inhibiteurs de corrosion peuvent être adsorbés par les matières en suspension dans l'eau, ce qui nécessite des concentrations plus élevées. Généralement, les propriétés inhibitrices diminuent avec l'augmentation de la température. Cependant, certains inhibiteurs de corrosion, comme les silicates, sont plus efficaces entre 60 et 80 °C qu'à 25 °C. [24]

IV.6. Discussion des résultats et interprétation :

Dès les premières mesures , on remarque moins de dégradation sur l'acier lorsque les produits sont ajoutés . Un autre point : avec du **$NaNO_2$** ou du **Na_3PO_4,** la perte de poids ralentit visiblement. Ce frein dans l'attaque chimique indique une barrière plus efficace autour du matériau . Chaque échantillon traité révèle cette même tendance au fil du temps . La protection n'apparaît pas par hasard mais suit un schéma régulier lors des tests . Même si les conditions changent légèrement, le résultat reste cohérent. En revanche , sans additif , la dégradation avance vite dès le départ .

Vu sous l'angle des réactions chimiques , on comprend ces observations parce que, dans un environnement chargé en chlore , l'acier s'abîme quand apparaissent des parties actives et d'autres plus calmes à sa surface. Ici , les produits ajoutés ont changé le rendement : ils ont freiné la perte de fer d'un côté , restreignent la transformation de l'air présent de l'autre , avec pour effet une usure moindre au total .

Du côté du nitrite de sodium, on remarque son rôle surtout en tant qu'inhibiteur qui freine les réactions à l'anode. La formation d'un film oxydé de fer se produit grâce à lui, posé sur le métal comme un bouclier fragile. Ce voile limite comment l'environnement ronge la surface. Pourtant, quand les ions chlore sont là, ils grignotent ce système défensif. Du coup, son action paraît moins solide comparée à celle de l'autre molécule testée.

Du côté du phosphate de sodium, on observe des résultats plus solides. Sa force vient d'un dépôt phosphaté serré, bien accroché au métal. Ce revêtement joue le rôle de bouclier face aux

agents agressifs. Ainsi, les échanges chimiques capables d'endommager le matériau ralentissent nettement.

On a vu aussi que tout cela colle bien avec ce qu'on sait déjà sur la corrosion électrochimique. Des travaux antérieurs le confirment : quand un inhibiteur crée un film solide à la surface, il protège davantage comparé aux produits qui se contentent de rendre passive la couche métallique.

On termine par dire que les deux produits freinent bien la détérioration de l'acier tendre. Pourtant, celui à base de phosphate de sodium s'avère plus fiable. Son revêtement tient plus longtemps. Il supporte aussi mieux les changements dans l'environnement analysé.

IV.7. analyse technico-économique de l'utilisation de l'inhibiteur :

Lors de notre stage chez Alphyt, une usine de fabrication de pesticides à Mascara, nous avons constaté que les équipements métalliques, tels que les canalisations, les réservoirs et les systèmes d'extinction d'incendie, sont constamment exposés à la corrosion en raison de la nature de l'environnement industriel, caractérisé par la présence de produits chimiques, d'humidité et de conditions d'exploitation variables.

D'un point de vue technique, nous avons constaté que l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion contribue à réduire la vitesse de détérioration du métal en formant une couche protectrice à sa surface, minimisant ainsi l'interaction entre le métal et son environnement.

D'un point de vue économique, nous avons observé que le coût de maintenance ou de remplacement des équipements endommagés par la corrosion est nettement supérieur au coût d'utilisation des inhibiteurs. Par conséquent, leur adoption permet de réaliser des économies à long terme et d'améliorer la continuité de la production. Nous avons constaté que le coût de la maintenance ou du remplacement des équipements endommagés par la corrosion est bien plus élevé que celui des inhibiteurs à utiliser. En adoptant ces solutions, on peut donc réaliser des économies à long terme et améliorer la continuité de la production.

IV.8. Impact sur la durée de vie des équipements :

Au sein de la société Alphyt, nous n’avons constaté que les structures métalliques des unités de production, telles que les canalisations, les réservoirs, les systèmes de remplissage et les systèmes d'extinction d'incendie, sont soumises à des environnements agressifs et subissent une corrosion rapide. L'humidité, les produits chimiques et les variations des régimes d'exploitation entraînent la détérioration du métal, ce qui réduit la durée de vie des équipements.

Selon les données expérimentales recueillies lors de cette étude, l'application d'inhibiteurs diminue considérablement l'activité corrosive de l'acier doux. Les inhibiteurs créent un film protecteur à la surface du métal, limitant ainsi les processus électrochimiques responsables de sa dégradation. Cette protection contre la corrosion retarde l'usure des équipements et réduit la formation de phénomènes dangereux tels que les perforations, les fissures, les fuites et les dépôts corrosifs.

D'un point de vue pratique, la durée de vie des équipements est cruciale pour les industries. La réduction de la dégradation des équipements limite la maintenance et le remplacement des pièces métalliques, ce qui améliore l'efficacité opérationnelle des lignes de production. De plus, elle permet de garantir la sécurité des installations et d'éviter les pannes d'équipement dans les processus industriels.

De plus, nous avons constaté que les équipements protégés par des inhibiteurs conservent leurs caractéristiques mécaniques et leurs performances. Conclusion

Globalement, l'application d'inhibiteurs de corrosion contribue significativement à accroître la durée de vie des machines industrielles en minimisant l'impact de la corrosion et en assurant une meilleure stabilité de l'installation dans des conditions difficiles.

IV.9. Aspects environnementaux et sécuritaires :

Pendant notre formation chez Alphyt Compagnie, nous avons remarqué que l'emploi de substances chimiques dans une unité de production de pesticides nécessite une vigilance accrue concernant les aspects environnementaux et sécuritaires. L'existence de substances corrosives, de solvants et de gaz sous pression peut constituer un danger pour les installations, le personnel et l'environnement si des fuites ou des atteintes aux structures métalliques se produisent. Dans ce cadre, le recours à des inhibiteurs de corrosion est essentiel pour prévenir les dégâts liés à la corrosion. Ces inhibiteurs participent à la diminution du danger de fuites chimiques et de pollution sur le lieu de travail en limitant l'usure des tuyauteries, des cuves et des machines industrielles. Ils participent aussi à l'amélioration de la sûreté des installations et à la diminution du danger d'accidents professionnels associés à la perforation ou à la défaillance d'équipements en métal. Toutefois, un nombre de ces inhibiteurs de corrosion chimiques peut causer des dommages à l'environnement ou à la santé humaine s'ils sont employés en grande échelle ou manipulés sans les mesures de sécurité appropriées. C'est pour cette raison qu'il est crucial d'opter pour des inhibiteurs moins nocifs et de suivre strictement les directives de sécurité lors de leur entreposage, manipulation et utilisation dans le cadre de l'installation industrielle. Durant notre recherche, nous avons remarqué que les inhibiteurs de corrosion examinés fournissaient une excellente défense contre la corrosion tout en réduisant les dangers de préjudice matériel. Il est crucial de mettre en œuvre des mesures de sécurité telles que l'utilisation d'équipements de protection individuelle (EPI), une ventilation appropriée des espaces de travail et la vérification des conditions d'entreposage, afin d'assurer la sécurité des employés et la sauvegarde de l'environnement. Pour conclure, il est crucial d'intégrer les aspects environnementaux et sécuritaires lors de la sélection et l'emploi des inhibiteurs de corrosion, afin d'assurer une sauvegarde efficace des installations industrielles tout en réduisant au minimum les effets préjudiciables sur l'environnement et la santé des personnes. Comme l'a démontré la recherche, les inhibiteurs de corrosion employés dans ce processus se sont avérés très efficaces pour préserver les équipements contre toute sorte de corrosion sans leur causer de dommages. Il est donc essentiel d'adopter des actions de

protection pour sauvegarder l'environnement tout en assurant la sécurité des employés. Cela englobe le port d'équipements de protection individuelle, une ventilation adéquate des espaces de travail et un entreposage sécurisé des inhibiteurs.

IV.10. Recommandations pour l'exploitation industrielle :

Sur la base des conclusions de notre étude et des données collectées lors de notre expérience chez Alphyt, nous pouvons proposer plusieurs suggestions pour réduire la corrosion et renforcer la protection des appareils industriels dans les installations de production.

Il est conseillé d'appliquer systématiquement des inhibiteurs de corrosion, selon le type d'environnement industriel et les matériaux employés. La sélection de l'inhibiteur doit considérer son efficacité, sa stabilité, son prix et son influence potentielle sur l'environnement.

Il est aussi essentiel d'assurer la mise en place régulière de mesures préventives concernant l'état des équipements métalliques, comme les tuyaux, les citernes, les pompes et les dispositifs de lutte contre le feu. Des contrôles permettront de repérer vite les zones touchées par la corrosion. L'expertise dans la gestion des conditions opérationnelles, y compris la température, l'humidité, la disponibilité en eau et les niveaux de produits nocifs, peut aider à réduire au minimum la corrosion. Il est également conseillé d'assurer une bonne aération. Finalement, l'emploi de couches protectrices et de métaux résistants à la corrosion peut aider à étendre la longévité des appareils industriels. Il est également recommandé de dispenser aux travailleurs une formation appropriée pour prévenir tout accident et toute pollution.

Pour finir, il est recommandé aux secteurs industriels de mettre en œuvre un dispositif de surveillance de la corrosion, en utilisant des techniques de contrôle adéquates comme les méthodes gravimétriques ou électrochimiques, dans le but d'évaluer l'efficacité des inhibiteurs de corrosion employés.

IV.11. Perspectives d’amélioration et travaux futurs :

Dans le cadre de cette étude menée à l'intérieur d'Alphyt, les résultats démontrent l'utilité des inhibiteurs de corrosion pour protéger les équipements industriels. Cependant, il serait possible de faire des améliorations pour mieux faire fonctionner ces méthodes et pour explorer davantage de sujets dans les recherches à venir.

Il serait pertinent de rechercher d'autres catégories d'inhibiteurs, en particulier ceux qui sont considérés comme écologiques ou “verts”, pour diminuer l'effet sur l'environnement tout en assurant un niveau de protection satisfaisant. Ces substances deviennent de plus en plus essentielles dans l'industrie actuelle à cause des normes environnementales très exigeantes.

Ensuite, les travaux futurs pourraient comporter une analyse plus détaillée des conditions réelles de l'industrie, telles que les changements de température, de pression et de composition chimique du milieu. Cela aiderait à mieux reproduire les conditions dans lesquelles les équipements travaillent et à obtenir des résultats plus proches de ceux vus en fabrication.

Il serait également intéressant de combiner les inhibiteurs de corrosion avec d'autres techniques de protection, comme les peintures anticorrosion ou la protection cathodique, pour mieux comprendre leur action ensemble et prolonger davantage la durée de vie des installations.

De plus, l’étude pourrait être enrichie par des analyses électrochimiques plus poussées, telles que l'impédance électrochimique (EIS) ou le bruit électrochimique, pour mieux saisir le fonctionnement des inhibiteurs et leurs évolutions sur le long terme.

Enfin, des études à venir pourraient avoir pour objectif d'optimiser les quantités d'inhibiteurs utilisées et de diminuer leur prix, dans le but de trouver le meilleur équilibre entre efficacité technique, effets sur l'environnement et profits économiques.

En résumé, ces possibilités permettent de développer des améliorations qui renforcent la protection contre la corrosion et permettent d'utiliser mieux les installations industrielles dans des conditions plus sûres et plus durables.

IV.12. Conclusion :

Des tests en conditions réelles montrent que bloquer la rouille fonctionne bien sur l'acier tendre, surtout là où règnent les ambiances usines. On observe que le **$NaNO_2$** agit contre la détérioration du métal, tout comme le**Na_3PO_4** qui va plus loin. Ce dernier tient mieux dans le temps, car son film de protection adhère davantage à la surface exposée. Même si les deux ralentissent l'usure chimique, c'est celui-ci qui résiste avec plus de constance face aux chocs extérieurs. L'étude confirme cela sans surprise : quand on compare leur comportement, un seul assure une barrière durable. L'étude montrait aussi pourquoi gérer certains éléments du fonctionnement change tout : la chaleur ambiante, ce qu'il y a dans le liquide autour, ou encore comment se présente la couche du métal. Chaque détail joue son rôle. La corrosion avance plus vite si on néglige l'un d'eux. Le bouclier contre la détérioration en dépend étroitement. Du côté des usines, cette étude montre que les produits contre la rouille font durer plus longtemps les machines tout en baissant les dépenses pour les réparations. Grâce à eux, les lieux de travail deviennent aussi moins dangereux et limitent les dégâts autour des structures en métal. Ce travail rapproche surtout ce qu'on sait sur le papier de ce qui se passe vraiment sur le terrain, particulièrement en matière de sécurité et d'impact écologique. L'un après l'autre, ces résultats éclairent mieux pourquoi bloquer la corrosion dès le départ compte tant dans l'industrie. Même aujourd'hui, comprendre comment agissent ces protections attire encore beaucoup de recherches, surtout quand elles sont douces pour la nature ou s'appuient sur des outils nouveaux pour surveiller et protéger les installations - avec comme cap : tenir bon, sans compromettre ni la performance ni la planète.

Conclusion générale

Finalement, cette recherche montre que la corrosion touche durement les usines, surtout là où règnent produits chimiques, eau et variations de pression. Quand elle s'installe, elle ronge lentement les métaux, affaiblit leur structure avec le temps. Sans surveillance, cela met en danger le bon fonctionnement des machines, interrompt parfois la chaîne de travail. Des pannes sérieuses surviennent alors, accompagnées de coûts élevés et de dégâts pour la nature. L'étude montre qu'empêcher la rouille coûte peu quand on utilise certains produits chimiques bien choisis. Plutôt que de subir les dégâts, ces substances ralentissent les transformations à la surface des métaux, parfois en créant un bouclier invisible, parfois en bloquant certaines réactions hostiles dans l'environnement agressif. Deux d'entre eux ont été passés au crible : nitrite de sodium et phosphate de sodium dans une solution de chlorure de sodium à 3 %. Les mesures confirment qu'ils freinent la détérioration, mais le second s'impose clairement grâce à son film plus solide et durable. Sur le terrain, cette analyse - menée pendant un apprentissage lié au domaine Santé-Sécurité-Environnement - a donné corps aux idées apprises en classe, tout en confrontant celles-ci aux conditions réelles d'une usine en activité. Ce fait-là a aidé à mieux voir comment les dispositifs de prévention agissent, comment le suivi des dangers joue un rôle, tout comme la gestion de la corrosion qui s'inscrit au cœur même des approches sûres et durables dans l'industrie. Pendant ce temps, la formation permettait d'apercevoir sans détour comment les conditions réelles d'utilisation influencent la sécurité des machines, avec aussi cette idée forte : anticiper grâce à des actions concrètes devient indispensable quand il faut assurer un travail stable et protégé. C'est dans ces conditions qu'on voit l'emploi d'inhibiteurs de corrosion dépasser le cadre strictement technique pour toucher aussi bien l'économie que l'environnement ou encore la sûreté en milieu industriel. Grâce à eux, les fuites deviennent moins fréquentes, tout comme les pannes imprévues ou certains dangers latents ; du coup, les installations gagnent en stabilité tandis que les machines tiennent plus longtemps. Grâce à ce projet, on a gagné en savoir sur les aspects scientifiques et pratiques. Du coup, la distance entre cours et terrain s'est réduite petit à petit. Comprendre comment freiner la corrosion est devenu clair dans le cadre de la sûreté

industrielle. Pourtant, il reste du chemin à parcourir pour explorer d’autres pistes. De futures recherches pourraient améliorer les protections existantes. L’objectif ? S’adapter aux changements constants de l’industrie actuelle. À y regarder de plus près, utiliser des inhibiteurs bien choisis contre la corrosion s'avère payant. Ces traitements protègent les équipements industriels sans alourdir le fonctionnement. Moins de détérioration signifie moins d'arrêts imprévus. La production continue alors calmement, sans risque majeur ni alerte fréquente. Sécurité et régularité vont ensemble quand la prévention est active.

Référence bibliographiques :

[1]https://fr.wikipedia.org/wiki/Corrosion

[2]https://sodiags.fr/5-principaux-types-de-corrosion/

[3]https://www.studysmarter.fr/resumes/ingenierie/genie-chimique/corrosion-intergranulaire/

[4]https://material-properties.org/fr/quest-ce-que-lerosion-corrosion-definition/

[5]https://www.univbiskra.dz/enseignant/bensaada/corrosion.

[6]https://fr.techconfronts.com/17427436-fretting-corrosion-causes-and-prevention-methods

[7]https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/abs/pii/B9780081011058000085

[8]https://ferrostexar.com/en/differences-oxidation-corrosion/

[9]https://www.easy-inox.com/news/le-co%C3%BBt-de-la-corrosion-impact-%C3%A9conomique-et-strat%C3%A9gies-demitigation

[10]https://www.coatinc.com/fr/blog/2018/08/06/calcul-des-dommages-au-niveau-economique/

[11]https://www.camfil.com/fr-fr/infos/electronique-optique/effets-de-la-corrosion?srsltid=AfmBOooYi-rsFHcQTGyHJzOcctS-WNknjYR25Xg3CyKs31xC98IGBxCe

[12]Liu Y., Zou C., Yan X., Xiao R., Wang T., Li M., 2015. B-cyclodextrin modified naturalchitosan as a green inhibitor for carbon steel in acid solutions, Industrial & Engineering Chemistry Research 54, 5664-5672.

[13]Ahmed Ali M.A., 2016. Inhibition of mild steel corrosion in cooling systems by low- and non- toxic corrosion inhibitors, Thèse de Doctorat, Université de Manchester

[14]Roy P., Karfa P., Adhikari U., Sukul D.2014. Corrosion inhibition of mild steel in acidic medium by polyacrylamide grafted Guar gum with various grafting percentage: effect of intramolecular synergism, Corrosion Science 88, 246-253.

Fouda A.S., Elewady G.Y., Shalabi K., Habbouba S., 2014. Gibberellic acid as green corrosion inhibitor for carbon steel in hydrochloric acid solutions, Journal of Materials and Environmental Science 5(3), 767-778.Hu S., Chen Z.,GuoX., 2018. Inhibition Effect of Three-Dimensional (3D) Nanostructureson the Corrosion Resistance of 1-Dodecanethiol Self-Assembled Monolayer on Copper in NaCl Solution, Materials (Basel) 11(7), 1225.

[15]Fateh A., Aliofkhazraei M., Rezvanian A.R., 2017. Review of corrosive environments for copper and its corrosion inhibitors. Arabian Journal of Chemistrym, xxx, xxx–xxx.

[16]J. Scully, « The Fundamentals of Corrosion, International Series of Monographs on Materials Science and Technology,» Oxford, 2nd Ed. Pergamon International, 1975.

[17]A. Mendoza, «Corrosion de l'acier d'armature dans le béton fissuré chargé exposé aux sels de déglaçage,» Ontario, Canada, Université De Waterloo, 2000.

[18]D. Landolt, «Corrosion et chimie de surfaces des métaux. Presses polytechniques et Universitaires Romandes,» Lausanne, 1997.

[19]Khiati Z., 2013. Inhibition de la corrosion du cuivre en milieux chlorure et sulfate neutres par une nouvelle molécule dérivée de 1,2,4-triazole, Thèse de Doctorat, Université de Pierre et Marie Curie.

[20]M. Henriquez De Gonzalez, « Etude d'un traitement multifonctionnel vert pour la

Protection contre la corrosion de l'acier au carbone API 5L-X65 en milieu CO2 », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2011

[21]«MEMOIRE GHARBIE KHEIRA».

[22]Document de l'entreprise Alphyt

[23]Revie, R. W., &Uhlig, H. H. Uhlig's Corrosion Handbook. Wiley.Fontana, M. G. Corrosion Engineering.McGraw- Hill.Revie, R. W. Corrosion and Corrosion Control.Wiley.

Jones, D. A. Principles and Prevention of Corrosion.Pearson.ASM International. ASM Handbook, Volume 13: Corrosion. ASM International.AMPP (NACE International)

[24]Corrosion for everybody by groysman

[25]https://dspace.univ-ghardaia.edu.dz/server/api/core/bitstreams/634b200b-6d0b-460f-b09a-d3fed7b5f27d/content

[26]https://dspace.univouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/28445/1/GHARBI%20kheir

[27] https://www.univ-biskra.dz/enseignant/bensaada/corrosion.pdf