

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie des Procédés

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

Filière : Génie des Procédés
Spécialité : Génie des Procédés des Matériaux

THEME

Étude de la corrosion électrochimique des aciers X52, X65, A53
et A790 utilisés dans les pipelines

Présenté par :

DJENANE Fatima Zohra

TABTI Ouïam

Encadrant : Dr. Y. LAMRI

Co-encadrant : Mme. D. ZERROUKI

Promotion 2023- 2024

Résumé

Cette étude porte sur la protection de l'acier, largement utilisé dans différentes industries métallurgiques telles que les pipelines et les réservoirs de stockage. Ces applications variées exposent l'acier à des phénomènes de corrosion, entraînant des problèmes tels que la fissuration, les perforations et les contraintes. Notre travail a porté sur l'étude de l'inhibition de la corrosion pour quatre types d'acier : A790, A53, X65 et X52, en analysant leur comportement électrochimique dans un milieu aqueux acide auquel un inhibiteur organique à faible concentration a été ajouté. Les résultats ont montré une réduction de la vitesse de corrosion avec l'ajout de l'inhibiteur, augmentant ainsi son efficacité et améliorant la résistance des quatre types d'acier aux différentes formes de corrosion.

Mots clés : électrochimie ; pipeline ; acier ; corrosion ; inhibiteur.

ملخص

تتناول هذه الدراسة حماية الفولاذ المستخدم على نطاق واسع في مختلف صناعات المعادن مثل خطوط الأنابيب وخزانات التخزين. تعرض هذه التطبيقات المتنوعة للفولاذ لظواهر التآكل، مما يسبب مشاكل مثل التشقق والتقوب والتوترات. استقر عملنا على دراسة تثبيط التآكل لأربعة أنواع من الفولاذ: A53, A790, X65, X52، من خلال تحليل سلوكها الكهروكيميائي في وسط مائي حامضي حيث تم إضافة مثبط عضوي بتركيز منخفض. أظهرت لنتائج تقليباً في سرعة التآكل مع إضافة المثبط، مما زاد من كفاءته وتحسين مقاومة الأنواع الأربعة من الفولاذ ضد أشكال التآكل المختلفة.

الكلمات المفتاحية: الكهروكيمياء ، الأنابيب، الفولاذ، التآكل ، المانع.

Abstract

This study focuses on the protection of steel, widely used in various metallurgical industries such as pipelines and storage tanks. These diverse applications expose steel to corrosion phenomena, leading to issues such as cracking, perforation, and stress. Our work centered on studying corrosion inhibition for four types of steel: A790, A53, X65, and X52, by analyzing their electrochemical behavior in an acidic aqueous environment with the addition of a low-concentration organic inhibitor. The results demonstrated a decrease in corrosion rate with the addition of the inhibitor, thereby enhancing its effectiveness and improving the resistance of the four types of steel to different forms of corrosion.

Electrochemistry; pipeline; steel; corrosion; inhibitor.

Remerciement

Nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné la santé, les moyens, la volonté, le courage, opportunité de compléter cette étude

Que Dieu nous guide vers le chemin du succès sincère.

À remercier sincèrement Mes parent, Sans oublier mes collègues. Nos sincères

Remerciements vont à toutes nos familles et amis qui nous ont soutenus Jusqu'à la dernière minute.

*Un grand merci à notre promotor Dr. **LAMRI Younes** maître de conférences au département Génie des procédés de l'INGM pour, l'accueil, encadrement, l'assistance et pour ces consignes bienveillants, sa disponibilité, son sens des responsabilités et sa vitalité d'esprit.*

Nous remercions sincèrement le membre du jury de nous avoir fait l'honneur de juger ce modeste travail.

*A Dr. **MANSER Belkacem**, d'avoir accepté de présidé le jury*

*A Dr. **MESSAID Bachir Eddine**, pour avoir accepté examiner ce travail*

*Nos remerciements les plus chaleureux vont aussi à Mme **ZEROUKI Djahida**, Ingénieur d'analyse du Laboratoire Corrosion (Activité Électrochimie), pour avoir accepté de diriger ce travail, soutien, sa gentillesse et ses compétences nous ont été d'une aide inestimable.*

A l'ensemble des enseignants pour leur suivi pendant nos études.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont été directement ou indirectement impliqués dans la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie de tout mon cœur :

À mon cher père, qui est symbole de tendresse et de force, une étoile illuminant notre chemin avec sa sagesse et son amour infinie. Tu es un soutien inégalé, une âme qui rend tout possible .avec fierté et respect, à mon père formidable et grand .il attend avec impatience mon succès

A ma chère maman, tu es la lumière de ma vie et mon cœur chaleureux

A mes sœurs «HANANE», «YAMINA», et «RAHMA»

A mes frères «BILAL», «SAMIR» et «HOUSSAME»

Aux enfants de mes sœurs «ANES», « ASSIL», «SAIF EDDINE»,

« ZAKARIA» et «TAKWA»

A mon binôme et sœur pour toujours «TABTI OUIAM»

A mon amie «SOUAD»

A toute ma famille

Fatima Zohra DJENANE

Dédicace

*Je rends grâce à dieu et dédie ce modeste travail à tous ce qui sont proches
spécialement ;*

*A ma mère qui m'a éclairée mon chemin et qui m'a encouragée et soutenue
ainsi*

*A mon père qui m'a offert tout ce que dont j'avais besoin toute au long de mes
études*

*A mon mari, merci pour ton soutien inestimable, financier, matériel, moral et tes
conseils aussi nobles pour ma réussite*

Spéciale dédicace à mes enfant SILINE et DHIAA EDDINE

A toute ma famille.

A mes sœurs et mon frère

A mon binôme et sœur pour toujours «DJENANE FATIMA ZOHRA»

A mes amis.

Ouiam TABTI

Liste des figures

Présentation de l'entreprise

Figure 1.1. Direction général SONATRACH à HYDRA-ALGER.....	3
Figure 1.2. Centre de recherche et de développement de SONATRACH-BOUMERDES.....	4
Figure 1.3. Laboratoire de corrosion électrochimique.....	6

Chapitre I bibliographie

Figure I.1. Les pipelines.....	7
Figure I.2. Acier au carbone.....	12
Figure I.3. Diagramme fer-carbone.....	16
Figure I.4. les atomes de carbone dans les sites interstitiels dans la structure cc	16
Figure I.5. Transformation allotropique du Fer	17
Figure I.6. Structure de l'acier selon sa teneur en carbone	18
Figure I.7. La corrosion bactérienne des aciers.....	23
Figure I.8. Le phénomène de corrosion électrochimique.....	23
Figure I.9. Les formes de la corrosion	24
Figure I.10. Méthode de protection de la corrosion	27
Figure I.11. La fragilisation par hydrogène d'une pièce métallique	28
Figure I.12. Classification des inhibiteurs.....	29
Figure I.13. Diagramme schématique représentant le mécanisme d'adsorption des bases Shiff sur une surface en acier doux.	30
Figure I.14. Diagrammes d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur de corrosion.....	31
Figure I.15. Courbe d'évolution du taux de corrosion avec changement de concentration ...	32
Figure I.16. Courbe d'évolution de l'efficacité des inhibiteurs avec changement de concentration	32

Chapitre II Préparation et Techniques de caractérisation

Figure II.1. Les aciers utilisés (a) A790, (b) A53, (c) X65 et (d) X52.	34
Figure II.2. Découpage par scie ruban mécanique.....	37
Figure II.3. Appareil tronçonneuse (Mecatome ST 310).....	37
Figure II.4. Polissage	38
Figure II.5. Acier (a) avant pré polissage et acier (b) après pré-polissage	38
Figure II.6. Soudage.....	39
Figure II.7. Les étapes de processus de l'enrobage à froid.....	40

Liste des figures

Figure II.8. Polissage miroir	41
Figure II.9. Teste multimètre fluke	41
Figure II.10. Chaîne électrochimique	43
Figure II.11. Cellule électrochimique	43
Figure II.12. Schéma d'un électrode de travail.....	44
Figure II.13. Les électrodes (a) A790, (b) A53, (c) X65 et (d) X52.....	44
Figure II.14. Electrode de référence.....	45
Figure II.15. Contre électrode	45
Figure II.16. Décantation et filtration de l'eau de gisement	46
Figure II. 17. Les appareils PH-mètre (a) et dosimètre (b).....	47
Figure II.18. Spectroscopie d'adsorption atomique	48
Figure II.19. Opération d'injection d'inhibiteur par micro pipette	50
Figure II.20. Schéma de suivi du potentiel	51

Chapitre III Résultats et discussion

Figure III. 1. Potentiel de l'acier X52 en fonction du temps	53
Figure III.2. Potentiel de l'acier X65 en fonction du temps	54
Figure III.3. Potentiel de l'acier A53 en fonction de temps	54
Figure III.4. Les courbes de LRP $E=f(I)$ à déférent concentration de l'acier X52	56
Figure III.5. Les courbes de LRP $E=f(I)$ à déférent concentration de l'acier X65	57
Figure III.6. Les courbes de LRP $E=f(I)$ à déférent concentration de l'acier A53	58
Figure III.7. La résistance de polarisation en fonction de concentration d'inhibiteur	59
Figure III.8. la vitesse de corrosion en fonction de concentration d'inhibiteur	60
Figure III.9. l'efficacité inhibitrice en fonction de concentration d'inhibiteur de l'acier X52. 61	
Figure III.10. l'efficacité inhibitrice en fonction de concentration d'inhibiteur de l'acier X65	62
Figure III.11. l'efficacité inhibitrice en fonction de concentration d'inhibiteur de l'acier X65.....	62

Chapitre I bibliographie

Tableau I.1. Eléments d'addition et leur teneur en % masse de les aciers alliés et non alliés.	11
Tableau I.2. Caractéristiques de Fer et carbone	14
Tableau I.3. Composition mécanique de l'acier ASTM A790	19
Tableau I.4. Composition mécanique de l'acier ASTM A53	20
Tableau I.5. Composition mécanique de l'acier API X52	20
Tableau I.6. Composition mécanique de l'acier API X65	21
Tableau I.7. Composition chimique de l'acier A790, A53, X52 et X65	21
Tableau I.8. Le taux de corrosion en mm/an	26

Chapitre II Préparation et Techniques de caractérisation

Tableau II.1. La composition chimique des échantillons X52 et X65 en pourcentage massique	35
Tableau II.2. La composition chimique des échantillons A53 et A790 en pourcentage massique	35
Tableau II. 3. Le tableau montre la surface de contact de l'acier A790, A53, X65 et X52 ...	44
Tableau II.4. La composition chimique de l'eau de gisement	47
Tableau II.5. La composition chimique de l'eau de gisement	48
Tableau II.6. Propriétés physiques d'inhibiteur A	49
Tableau II.7. Les volumes d'inhibiteur ajouté à la cellule électrochimique	50

Chapitre III Résultats et discussion

Tableau III.1. Paramètres électrochimiques obtenus par la technique de la résistance de polarisation linéaire d'un acier au carbone nuance X52.	56
Tableau III.2. Tableau Paramètres électrochimiques obtenus par la technique de la résistance de polarisation linéaire d'un acier au carbone nuance X 65.....	58
Tableau III.3. Paramètres électrochimiques obtenus par la technique de la résistance de polarisation linéaire d'un acier au carbone nuance A53	59

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....1

Présentation de l'entreprise

1. Présentation de l'entreprise..... 3

1.1. Présentation de la DTD (ex CRD) : 4

1.2. Organigramme de CRD 5

1.2.1. Les activités du laboratoire de corrosion électrochimique..... 6

Chapitre I bibliographie

I.1. Les pipelines.....7

I.1.1. Introduction.....7

I.1.2. Définition des pipelines.....7

I.1.3. Type de canalisation.....8

I.1.4. Les caractérisations des pipelines.....8

I.1.5. Dispositifs placée le long d'un pipeline.....8

I.1.6. Les avantages et l'inconvénient de transport par pipelines.....9

I.1.6.1. Les Avantages.....9

I.1.6.2. Les inconvénients.....9

I.1.7. Corrosion des pipelines.....9

I.1.7.1. Corrosion par CO₂.....10

I.1.7.2. Corrosion par l'eau albienne.....10

I.1.7.3. Corrosion par H ₂ S.....	10
I.1.8. Conclusion.....	10
I.2. Les aciers.....	11
I.2.1. Définition de l'acier.....	11
I.2.2. Classification des aciers.....	11
I.2.2.1. Les aciers alliés.....	11
I.2.2.2. Les aciers inoxydables.....	12
I.2.2.3. Les aciers au carbone.....	12
I.2.2.3.1. Aciers faible teneur en carbone (C%<0.25%).....	13
I.2.2.3.2. Aciers à moyenne teneur en carbone (0.25% à 0.6%).....	13
I.2.2.3.3. Aciers à haute teneur en carbone (0.6% <C%≤1.4%).....	13
I.2.3. Les composants de l'acier.....	13
I.2.3.1. Les composants le plus importants.....	14
I.2.3.2. Les impuretés.....	14
I.2.3.3. Elément additifs.....	14
I.2.3.4. Composants associés.....	15
I.2.4. Diagramme fer-carbone.....	15
I.2.4.1. Les phases.....	16
I.2.4.1.1. La ferrite α.....	16
I.2.4.1.2. La ferrite δ.....	17
I.2.4.1.3. L'austénite.....	17
I.2.4.1.4. La cémentite (Carbone de fer Fe ₃ C)	17
I.2.4.1.5. La perlite.....	17
I.2.5. Type d'acier.....	17
I.2.5.1. Acier eutectoïde.....	17
I.2.5.2. Aciers hypoeutectoïdes.....	18

I.2.5.3. Aciers hypereutectoïdes.....	18
I.2.6. Propriétés de certains types d'acier.....	19
I.2.6.1. L'acier ASTM A790.....	19
I.2.6.2. L'acier ASTM A 53.....	19
I.2.6.3. L'acier API X52.....	20
I.2.6.4. L'acier API X65.....	20
I.2.7. Composition chimique.....	21
I.3. La corrosion des aciers.....	22
I.3.1. Introduction.....	22
I.3.2. Définition de corrosion.....	22
I.3.3. Classification de corrosion.....	22
I.3.3.1. La corrosion chimique.....	22
I.3.3.2. La corrosion bactérienne.....	22
I.3.3.3. La corrosion électrochimique.....	23
I.3.4. Les formes de la corrosion.....	24
I.3.5. Les facteurs influencent la corrosion.....	25
I.3.5.1. Factures liés au milieu.....	25
I.3.5.1.1. L'eau.....	25
I.3.5.1.2. L'oxygène.....	25
I.3.5.1.3. Effet de la température.....	26
I.3.5.1.4. Effet de pH.....	26
I.3.5.2. Factures métallurgiques.....	27
I.3.6. Les modes de protection des aciers contre la corrosion.....	27
I.3.6.1. Inhibiteur de corrosion.....	28
I.3.6.1.1. Définition de l'inhibiteur.....	28
I.3.6.1.2. Propriétés de l'inhibiteur.....	28

I.3.6.1.3. Classification des inhibiteurs de corrosion.....	29
I.3.6.1.3.1. Selon la nature des molécules de l'inhibiteur.....	29
I.3.6.1.3.2. Selon les mécanismes d'action électrochimique.....	30
I.3.6.1.3.3. Selon les mécanismes d'action interfaciale.....	31
I.3.7. Conclusion.....	33

Chapitre II Préparation et Techniques de caractérisation

II.1. Les aciers utilisés.....	34
II.1.1. La composition chimique.....	35
II.1.2. Classification des aciers utilisés.....	36
II.2. Préparation des échantillons.....	36
II.2.1. Découpage.....	36
II.2.1.1. Découpage par Scie ruban mécanique.....	36
II.2.1.2. Découpage par tronçonneuse.....	37
II.3. Préparation de l'électrode de travail.....	38
II.3.1. Polissage.....	38
II.3.2. Soudage.....	39
II.3.3. Enrobage.....	39
II.3.3.1. But.....	39
II.3.3.2. Processus d'enrobage à froid.....	40
II.3.4. Polissage miroir.....	40
II.3.5. Teste multimètre FLUKE.....	41
II.4. Techniques expérimentales d'étude de corrosion.....	41
II.4.1. Chaine électrochimique.....	42
II.4.1.1. la cellule électrochimie.....	43

II.5. Cinétique électrochimique.....	50
II.5.1. Potentiel libre.....	50
II.5.2. Mesures de La résistance de polarisation.....	51
II.5.3. Efficacités de l'inhibiteur.....	52
II.6. Conclusion.....	52

Chapitre III Résultats et discussion

III.1. Etude électrochimique des quatre aciers.....	53
III.1.1. Mesure de potentiel a circuit ouvert.....	53
III.2.1. Technique de résistance de polarisation (LRP)	55
III.1.2.1. La résistance de polarisation.....	59
III.1.2.2. La vitesse de corrosion.....	60
III.1.2.3. L'efficacité de l'inhibiteur.....	61
III.2. Conclusion.....	63
Conclusion générale.....	64
Références	65

Introduction générale

Introduction générale

L'Algérie est classée parmi les plus grands producteurs et exportateurs d'hydrocarbures en Afrique grâce à ses vastes réserves de pétrole et de gaz naturel, ce qui lui permet de rivaliser sur les marchés mondiaux. Cela se traduit par une importante disponibilité de moyens de transport, notamment via des pipelines s'étendant du désert algérien jusqu'aux pays européens, traversant des terrains accidentés et la mer Méditerranée. Cette distance engendre de nombreux problèmes, notamment le phénomène de corrosion, qui est l'une des principales préoccupations affectant les pipelines tant au niveau interne qu'externe.

La corrosion est un phénomène naturel très répandu et destructeur dans lequel les métaux se détériorent, causant une dégradation significative de tous les types d'aciers utilisés dans l'industrie des pipelines, en raison de l'impact environnemental, en particulier à l'intérieur des tuyaux.

Les sociétés de transport et de production d'hydrocarbures utilisent des eaux spécifiques pour extraire le pétrole et le gaz des puits, et ces eaux exacerbent le phénomène de corrosion de l'acier. Il est donc impératif de comprendre le fonctionnement de ce phénomène ainsi que ses mécanismes, ce qui contraint les entreprises productrices à rechercher des moyens de réduire la détérioration et la destruction de leur équipement.

Parmi les méthodes de protection contre la corrosion les plus couramment utilisées, on trouve les inhibiteurs, qui sont considérés comme le moyen le moins coûteux et le plus efficace. Ces substances chimiques, souvent dérivées de plantes, sont ajoutées à l'environnement agressif pour réduire la vitesse de corrosion en inhibant les réactions anodiques et cathodiques. Elles forment une couche sur la surface de l'acier, isolant les matériaux de la surface interne du tube.

Nous avons mené une étude électrochimique pour évaluer l'efficacité d'un inhibiteur de corrosion sur quatre types d'acier : ASTM A790, ASTM A53, API 5L X65 et API 5L X52, classés en deux catégories : acier inoxydable et acier à faible teneur en carbone, immergés dans l'eau des puits.

Cette étude soulève des questions essentielles, notamment la compréhension du processus de protection de l'acier contre la corrosion à l'aide d'inhibiteurs et la détermination de la performance optimale de l'inhibiteur sur les quatre échantillons d'acier utilisés.

Introduction générale

Ce travail comprend trois chapitres fondamentaux qui examinent tous les aspects ayant un impact sur la problématique étudiée.

Tout d'abord, le chapitre est une synthèse bibliographique qui traite en détail le comportement de l'acier face à la corrosion, tout en jetant un regard sur les moyens utilisés pour le protéger de ce phénomène.

Ensuite, le deuxième chapitre présente la préparation des échantillons ainsi que des diverses techniques de caractérisation employées dans cette étude.

Enfin, le dernier chapitre, la section des résultats et de la discussion, est consacré à l'examen des résultats et à leur discussion. Le travail se conclura par une synthèse générale des conclusions tirées de l'étude.

Présentation de l'entreprise

1. Présentation de l'entreprise

SONATRACH est une entreprise publique algérienne spécialisée dans l'exploration, la production, le transport, la transformation et la commercialisation des hydrocarbures. Fondée en 1963, elle est l'une des plus grandes sociétés pétrolières et gazières intégrées au monde. SONATRACH opère dans tous les secteurs de l'industrie pétrolière et gazière, allant de l'exploration et de la production en amont à la distribution et à la commercialisation en aval. SONATRACH est également impliquée dans des partenariats internationaux et joue un rôle crucial dans l'économie de l'Algérie en tant que principal fournisseur de revenus pour le gouvernement.

SONATRACH, en tant que société nationale algérienne des hydrocarbures, a formé ou été impliquée dans la création de plusieurs sociétés affiliées et filiales. Ces sociétés opèrent dans différents secteurs de l'industrie pétrolière et gazière ainsi que dans d'autres domaines connexes. Voici quelques-unes des sociétés formées à partir de SONATRACH ; NAFTAL SIPTEC TRC.



Figure 1.1. Direction général SONATRACH à HYDRA-ALGER

1.1. Présentation de la DTD (ex CRD) :

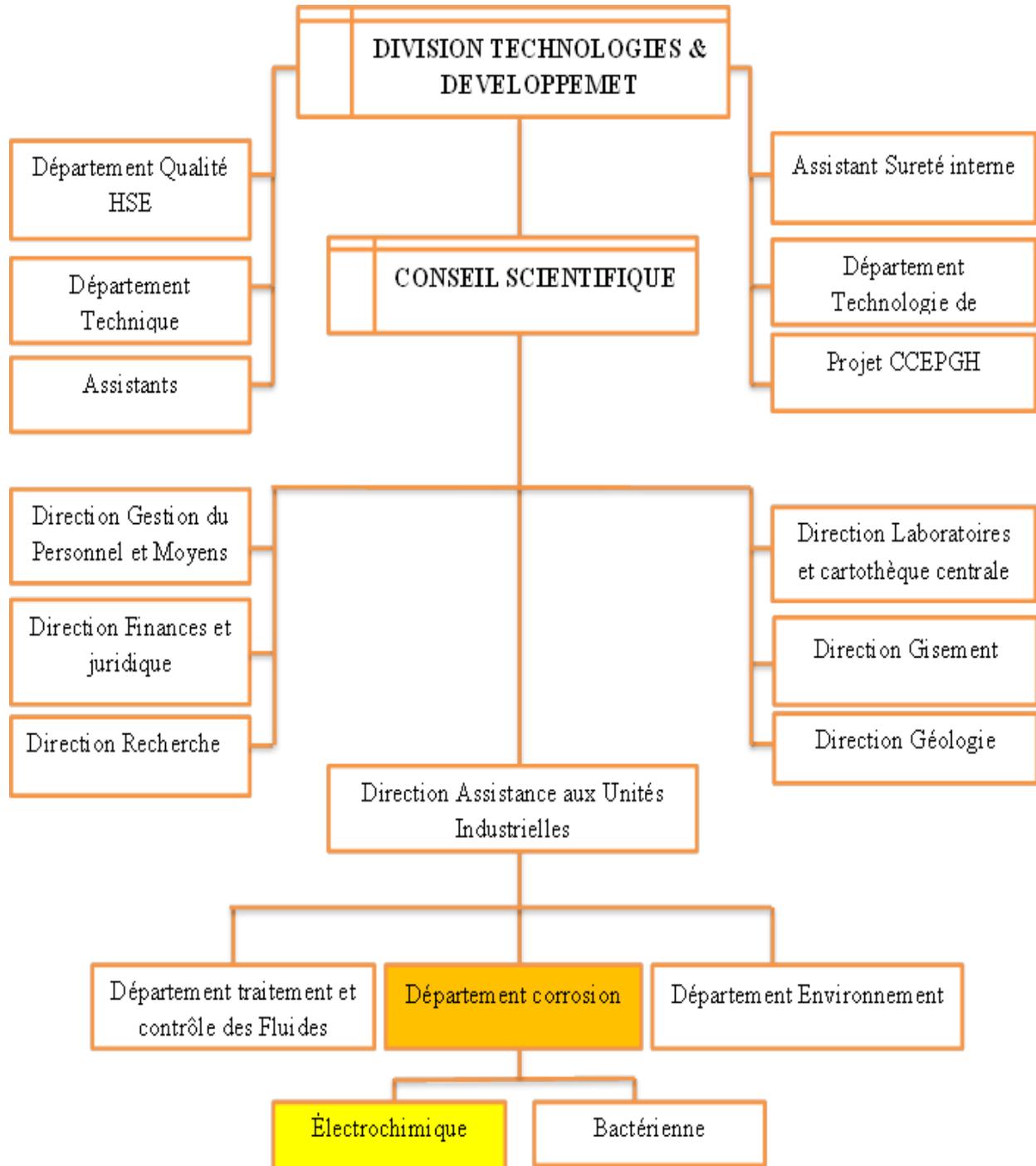


Figure 1.2. Centre de recherche et de développement de SONATRACH-BOUMERDES

- La Division Technologies et Développement a été créée en 1973 à Dar El Beida sous le nom du « Laboratoire Central des Hydrocarbures ». Elle a été ensuite installée à Boumerdès en 1975 et devient le Centre de Recherche et Développement - CRD - en 1987.
- Après le redéploiement du CRD en 2009, cette structure est devenue la Division Laboratoires et en 2014 elle est devenue Division Technologies et Développement.
- La Division Technologies et Développement représente l'outil scientifique et technique nécessaire à la prospection, l'exploitation et le développement des hydrocarbures.
- Pour mener à bien ses missions, la Division dispose de 40 laboratoires, dont 30 à Boumerdès et le reste à Hassi-Messaoud répartis dans les trois directions techniques fonctionnant en étroite collaboration : Direction géologie ; Direction gisement ; Direction assistance aux unités industrielles.
- Ces laboratoires assurent la plus large gamme de leurs prestations aux structures opérationnelles de SONATRACH et celles opérées en association, comme ils peuvent pareillement être sollicités par divers autres clients (institutions publiques ou sociétés privées).

- La DTD est devenu un outil scientifique et technologique indispensable pour les structures opérationnelles de la SONATRACH aussi bien en amont qu'en aval le domaine pétrolier

1.2. Organigramme de CRD



1.2.1. Les activités du laboratoire de corrosion électrochimique

- Etude de l'efficacité d'un inhibiteur de corrosion et des réducteurs d'oxygène par les méthodes électrochimiques, Application de l'impédance électrochimique pour l'étude et le suivi de l'inhibition de la corrosion, Caractérisation électrochimique des aciers.
- Etude de la corrosion sous contrainte, Etude de la performance des revêtements.
- Etude de la compatibilité entre les produits de traitement anticorrosion, Protection active et réactive, Analyse des causes de corrosion, Optimisation des inhibiteurs de corrosion par des essais industriels. Un inhibiteur de corrosion étant un composé chimique qui, ajouté à faible concentration au milieu corrosif, ralentit ou stoppe le processus de corrosion d'un métal placé au contact de ce milieu. (Le modèle de Langmuir peut être utilisé pour décrire le comportement de l'adsorption des inhibiteurs à la surface de l'acier pour différentes températures d'étude).



Figure 1.3. Laboratoire de corrosion électrochimique

CHAPITRE I. Bibliographie

Les pipelines sont des infrastructures essentielles pour le transport de fluides tels que les hydrocarbures, l'eau et d'autres substances industrielles sur de longues distances. Cependant, leur durabilité est souvent compromise par des problèmes de corrosion, ce qui nécessite des études approfondies et des solutions adaptées. Dans ce premier chapitre, une synthèse bibliographique est réalisée sur les pipelines et leurs problèmes de corrosion, les différents types d'aciers et leurs utilisations dans la conception des pipelines, ainsi que les différentes techniques utilisées pour la réduction de la corrosion.

I.1. Les pipelines

I.1.1. Introduction

L'activité de transport par canalisation revêt une importance stratégique dans l'acheminement des hydrocarbures à travers toute la chaîne d'approvisionnement, jouant un rôle vital pour l'économie. Elle assure le transport du pétrole brut, du gaz naturel, du GPL et du condensat depuis les champs de production jusqu'aux installations de traitement, de stockage et d'exportation, nécessitant l'installation de stations de pompage le long des pipelines.

I.1.2. Définition des pipelines

Les pipelines sont des canalisations souterraines ou aériennes utilisées pour transporter des biens liquides ou gazeux des sources d'origine vers les installations de traitement. Principalement construits en tubes d'acier soudés et revêtus, les pipelines peuvent être coûteux et difficiles à installer, notamment dans des zones sismiques ou politiquement instables. Cependant, une fois en place, leur utilisation est économique, en particulier sur de courtes et moyennes distances, comparée à d'autres modes de transport [1].



Figure I.1. Les pipelines

I.1.3. Type de canalisation

Le type de canalisation définie en fonction du fluide qu'il transport

- Pour le gaz naturel on parle de gazoduc.
- Pour l'eau salée, on utilise le terme saumoduc.
- pour le pétrole on parle d'oléoduc.
- Pour l'oxygène : d'oxygénoduc ou d'oxyde.
- Pour l'eau on parle d'aqueduc.
- Pour l'hydrogène, d'hydrogénoduc.

I.1.4. Les caractérisations des pipelines

Les pipelines présentent plusieurs caractéristiques, notamment :

- Un grand diamètre qui arrive jusqu'à 56 (et peut atteindre 64).
- La capacité maximale de transport.
- La pression de service élevée (jusqu'à 100).
- Bars Une grande longueur.
- L'épaisseur (variant de 6.35 mm à 23 mm).
- Le mode de pose (aérien ou souterrain). (Document Sonatrach).

I.1.5. Dispositifs placée le long d'un pipeline

Dispositifs de mesure, comme les débitmètres et les transducteurs de pression, adaptés aux pipelines selon leur mode de pose, mettant en lumière les avancées récentes comme les débitmètres à turbine à double rotor et les compteurs de temps de vol à ultrasons.

Les pompes centrifuges et volumétriques rotatives utilisées dans les pipelines, soulignant que les premières sont adaptées aux applications à grand volume ou à petit volume à rapport volume/pression élevé, tandis que les secondes sont préférées pour les liquides à viscosité élevée, comme le pétrole brut lourd, offrant une efficacité optimale et un coût initial inférieur [2].

Les pots de purge des hydrocarbures visent à garantir la sécurité et l'efficacité des pipelines en éliminant les liquides ou gaz indésirables, réduisant ainsi les risques de corrosion et

préservant la qualité du produit transporté, tout en maintenant une pression et un débit appropriés dans le système.

I.1.6. Les avantages et l'inconvénient de transport par pipelines

Les pipelines de transport de pétrole et de gaz présentent de nombreux avantages et inconvénients, notamment :

I.1.6.1. Les Avantages

- L'oléoduc fonctionne 24h/24h,
- Il ne consomme que l'énergie pour transporter le brut (ou le produit),
- La fiabilité est au maximum,
- Les frais opératoires et d'entretien sont pratiquement négligeables.
- La sécurité
- Impact sur l'environnement

I.1.6.2. Les inconvénients

- Exposition aux conditions climatiques
- Dégradation (fissures).
- Exposition aux risques de conflits

I.1.7. Corrosion des pipelines

La corrosion interne des pipelines est caractérisée par un double effet, l'endommagement des canalisations et ses conséquences, ainsi que la contamination des fluides transportés par les produits de corrosion. Elle peut être le fait soit du caractère corrosif du produit transporté, brut sulfureux par exemple, ou plus couramment des traces d'eau qui accompagnent toujours le fluide transporté et qui se déposent sur la paroi de la canalisation, ou s'y condensent dans le cas de transport de gaz. Cette corrosion apparaît quand l'eau contenue dans le brut ou le gaz naturel entre en contact avec la paroi métallique pendant un temps pour amorcer une corrosion et ce quel que soit la teneur en eau de l'effluent [3].

I.1.7.1. Corrosion par CO₂

La corrosion et la fuite dans les pipelines de pétrole sont causées par la présence de CO₂ (corrosion douce). Et la production de corrosion de FeCO₃ est la caractéristique saillante de cette corrosion. De cette manière, le facteur de dioxyde de carbone présent dans le composé chimique de la production pétrolière se dissout dans l'eau jumelle et se transforme en H₂CO₃, créant ainsi les conditions d'une corrosion par acidification.

Dans ces conditions, une couche de corrosion produite à partir de FeCO₃ se forme sur la surface métallique, qui peut être instable et n'avoir pas suffisamment d'adhésivité pour faire surface. La production discontinue de cette couche sur cette surface conduit à une corrosion localisée [4].



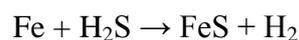
I.1.7.2. Corrosion par l'eau albienne

L'eau albienne est de l'eau accumulée dans la Terre depuis plus de 100 millions d'années. Il est utilisé pour produire du pétrole par injection de pétrole. Elle affecte particulièrement les canalisations de transport et peut donc provoquer différents types de corrosion [5].

I.1.7.3. Corrosion par H₂S

L'H₂S appelée aussi «Sour corrosion» (corrosion par les composés sulfurés), qui provoque la corrosion de différents types suivant la nature des métaux et les conditions de production. La teneur en soufre dans les bruts varie de 18a26%, Le soufre est sous forme de sulfures organiques plus ou moins complexes dont les bases sont les thiophènes, mercaptans, disulfures, La corrosivité est variable selon la composition.

La cinétique de la corrosion par H.S est contrôlée par la présence du film formé par le produit de corrosion, FeS, à la surface de l'acier [3].



I.1.8. Conclusion

Les pipelines sont les moyens les mieux adaptés au transport du pétrole brut depuis les champs de production jusqu'aux raffineries.

I.2. Les aciers

I.2.1. Définition de l'acier

L'acier est un alliage fer-carbone contenant de 2% de carbone, et la teneur en carbone a un effet de 0,08% sur les propriétés de l'acier, Par exemple, la dureté augmente à mesure que le pourcentage de cette dernière augmente.

L'acier peut être allié si plus de 0,5 % d'éléments d'alliage sont ajoutés, et si moins de 0,5 % est ajouté, il est non allié. Sa composition joue un rôle important dans le comportement à la corrosion [6].

I.2.2. Classification des aciers

I.2.2.1. Les aciers alliés

L'acier allié est généralement constitué de fer et de carbone, et de nombreux alliages dans des proportions différentes et faibles entrent dans sa composition, tels que le cuivre, le chrome et le nickel. Ces alliages affectent les propriétés de l'acier, améliorant ainsi sa résistance à l'oxydation et à la corrosion [7].

Tableau I.1.Eléments d'addition et leur teneur en % masse de les aciers alliés et non alliés.

Élément d'addition	Symbole chimique	Teneur limite en% de masse
Aluminium	Al	0.30
Chrome	Cr	0.30
Cuivre	Cu	0.40
Manganèse	Mn	1.50
Molybdène	Mo	0.08
Nickel	Ni	0.25
Silicium	Si	0.50
Titane	Ti	0.05
Vanadium	V	0.10
Plomb	Pb	0.40
Tungstène	W	0.30
Cobalt	Co	0.10
Phosphore, Soufre et Azote	P, S, N	0.10

I.2.2.2. Les aciers inoxydables

L'acier inoxydable contient des pourcentages de carbone allant de 0,02 à 0,08 %, et la teneur en chrome n'est pas inférieure à 10,5 % [8].

L'acier inoxydable possède de nombreuses propriétés, notamment :

- Les aciers résistant à la corrosion.
- Caractéristiques mécaniques élevées à hautes comme à basses températures (résistance, mécanique, ductilité, ténacité...).
- Une masse volumique de l'ordre de $7\,850\text{ kg/cm}^3$.
- La résistance à la traction est : 558 Mpa .
- L'allongement à la rupture est : 50%.
- La résistivité électrique des aciers inoxydables est : $7,4 \cdot 10^{-5}\text{ ohm.cm}$.

Une remarque importante concernant l'acier inoxydable est qu'il peut être recyclé, ce qui contribue à préserver les ressources et l'environnement [9].

I.2.2.3. Les aciers au carbone

Les aciers au carbone se divisent en trois sous-familles principales, Du point de vue pratique, la teneur en carbone de l'acier peut varier entre 0,05% et 1,35%, donnant ainsi diverses nuances. Outre le carbone, il existe dans l'acier, en proportions infimes, d'autres éléments tels. Le manganèse, Mg, le phosphore, P, le soufre, S, et le silicium, Si. La dureté d'un acier est fonction de sa teneur en carbone [10].



Figure I.2. Acier au carbone

I.2.2.3.1. Aciers faible teneur en carbone ($C\% < 0.25\%$)

Ces aciers, produits en grande quantité et à coût réduit, présentent des caractéristiques mécaniques spécifiques, notamment une grande ductilité et une ténacité élevée, conjuguées à une résistance relativement faible. Ils subissent généralement un écrouissage pour améliorer leur résistance et leur dureté par déformation plastique. Leur résistance à la traction est généralement comprise entre 415 et 550MPa, avec un allongement à la rupture pouvant atteindre jusqu'à 25%. Par ailleurs, ces aciers sont réputés pour leur facilité d'usinage et de soudage [11].

I.2.2.3.2. Aciers à moyenne teneur en carbone (0.25% à 0.6%)

Ces aciers offrent de meilleures combinaisons résistance-ductilité lorsqu'ils sont traités thermiquement (austénisation, trempe, revenu et recuit). L'apport d'éléments d'addition tels que le chrome, le nickel et le molybdène facilitent ces traitements.

L'austénisation consiste à chauffer au cours de l'élaboration l'alliage à une température comprise entre 750 et 900°C pour obtenir la structure austénite C.F.C (ou fer gamma) [11].

I.2.2.3.3. Aciers à haute teneur en carbone ($0.6\% < C\% \leq 1.4\%$)

Ils sont caractérisés par une grande dureté, une grande résistance, une faible ductilité et résistant à la corrosion, On associe souvent à ces aciers des éléments d'addition tels que le chrome, le vanadium et le tungstène afin d'obtenir des composés de carbures pour améliorer leur dureté [11].

I.2.3. Les composants de l'acier

La composition chimique des aciers joue un rôle très important du point de vue mécanique (dureté, limite d'élasticité, charge à la rupture, etc.) que de point de vue physico-chimique (résistance à la corrosion, usure, etc.)

I.2.3.1. Les composants le plus importants

A. Le fer (Fe) :

Ce le composant de base de 'acier c'est le métal et le matériau ferromagnétique le plus courant dans vie quotidienne.

B. Le carbone (C) :

Le carbone est de loin l'élément chimique le plus important de l'acier. L'augmentation de la teneur en carbone produit un matériau avec une résistance plus élevée et une ductilité inférieur

Tableau I.2. Caractéristiques de Fer et carbone

L'atome	Le fer	Le carbone
Masse atomique	55.86	12
Nombre atomique	26	6
Rayon atomique	1.27 Å	0.77Å
Masse volumique	7.8 g/cm ³	2.5 g/cm ³
Température de fusion	1539 °C	3500°C

I.2.3.2. Les impuretés

Le phosphore et le soufre sont deux éléments généralement indésirables dans l'acier. Ils réduisent tous deux la ductilité et ont un effet néfaste sur la soudabilité. Le pourcentage autorisé est inférieur à 0,04 à 0,05. Et il y a d'autres éléments comme : l'étain (Sn), l'arsenic (As), et l'antimoine (Sb).

I.2.3.3. Élément additifs

Ces éléments chimiques sont ajoutés afin d'augmentés les résistances mécaniques ou chimiques.

Chrome (Cr): Le chrome est présent en petites quantités dans certains aciers de construction. Il est principalement utilisé pour augmenter la résistance à la corrosion du matériau.

Columbium (Cb): Le columbium est un élément améliorant la résistance et est l'un des composants importants de certains aciers HSLA.

Cuivre (Cu): Le cuivre est un autre élément primaire de résistance à la corrosion. On le trouve généralement en quantités d'au moins 0,20%.

Molybdène (Mo): Le molybdène Il augmente particulièrement la résistance de l'acier à des températures plus élevées et améliore également la résistance à la corrosion.

Nickel (Ni): Outre son effet favorable sur la résistance à la corrosion de l'acier, le nickel améliore le comportement à basse température du matériau en améliorant la ténacité.

I.2.3.4. Composants associés

Utilisés pour le contrôle des différentes réactions physiques et chimiques.

Aluminium (Al): L'aluminium est l'un des désoxydants les plus importants du matériau et contribue également à former une microstructure cristalline à grain plus fin.

Le silicium (Si): Ils jouent le même rôle que l'aluminium [12].

I.2.4. Diagramme fer-carbone

Le système fer-carbone est théoriquement décrit par le diagramme fer-carbone dans lequel le carbone, insoluble dans le fer a précipiterait sous forme de graphite. Mais, dans le domaine des aciers ($C < 2,11\%$, environ) non alliés, l'expérience révèle qu'il n'en est pas ainsi et que le carbone en excès précipite sous la forme du carbure de fer Fe_3C appelé cémentite. Il est donc alors normal de considérer le diagramme d'équilibre fer-cémentite dont la figure 1.1 présente un schéma [13].

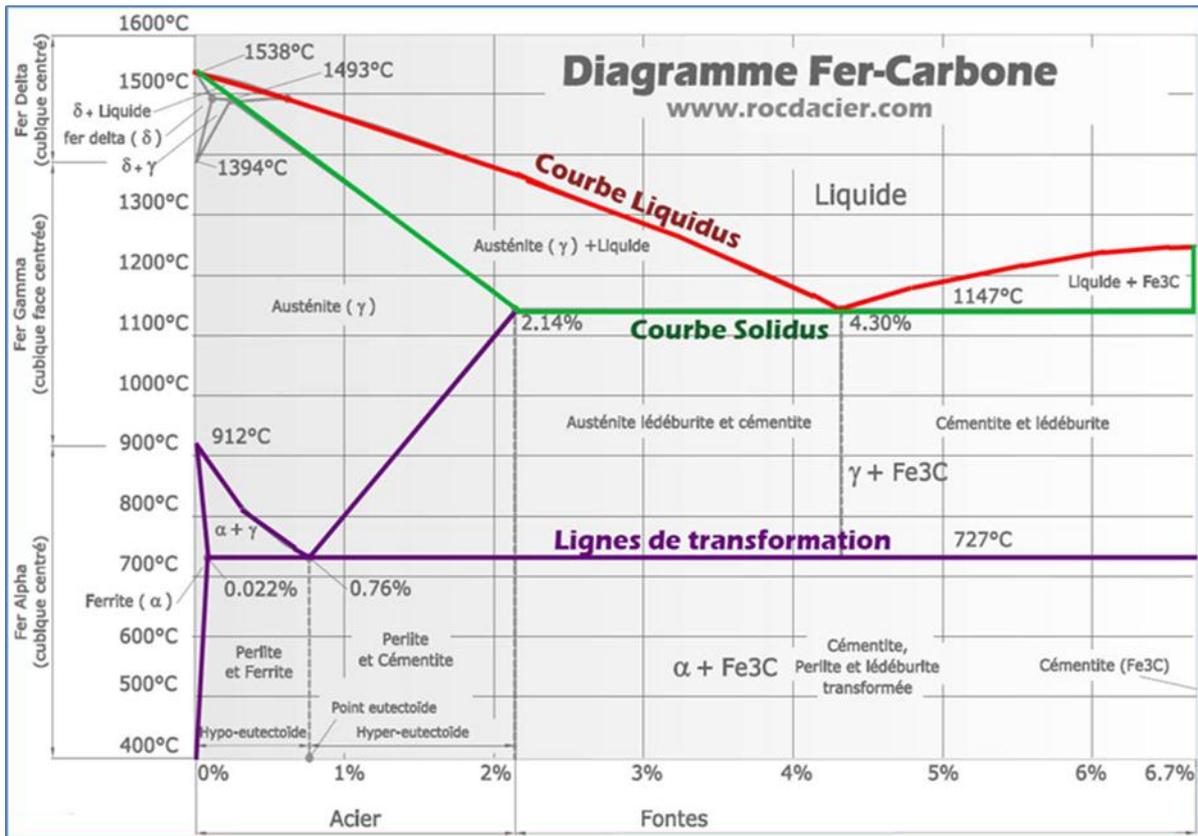


Figure I.3. Diagramme fer-carbone

I.2.4.1. Les phases

I.2.4.1.1. La ferrite α :

C'est un Solution solide d'insertion de carbone dans le Fer α, à structure cubique centrée (CC).

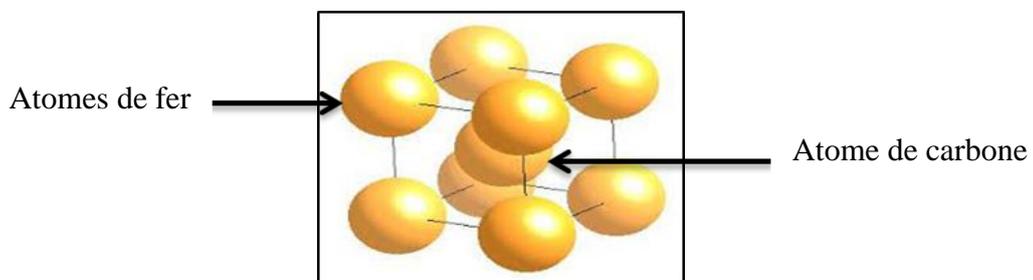


Figure I.4. les atomes de carbone dans les sites interstitiels dans la structure cc

I.2.4.1.2. La ferrite δ

Solution d'insertion de quelques atomes de carbone dans le fer δ . Sa structure est cubique centré (CC). Il se forme à la marge 1394-1538 °C et renferme 0.11% de carbone [14].

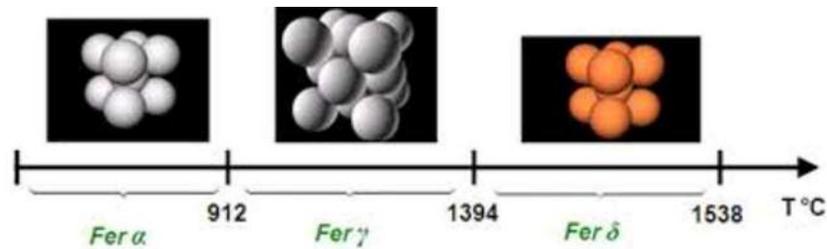


Figure I.5. Transformation allotropique du Fer

I.2.4.1.3. L'austénite

C'est une solution solide du carbone dans le fer δ (C. F. C.), la quantité de carbone atteint 2% C à 1145°C. Il est stable qu'à haute température. L'austénite est très ductile [15].

I.2.4.1.4. La cémentite (Carbone de fer Fe_3C)

La cémentite est un composé chimiquement défini CCD. Sa décomposition égale à 6,67% en masse de carbone, en état métastable. La cémentite se présente sous forme de lamelles ou de globules dans la perlite ou d'aiguilles dans les fontes blanche. Elle est très dure et très fragile [16].

I.2.4.1.5. La perlite

Agrégat eutectoïde ayant une structure de lamelles alternées de ferrite et de cémentite Ce constituant contient 0.8%C, La perlite est dure (HB-200), résistante (Rm 850 MPa) et assez ductile (A% \approx 10) [17].

I.2.5. Type d'acier

A partir de diagramme Fer-Carbone on aura:

I.2.5.1. Acier eutectoïde

Toute l'austenite initiale est précipitée en perlite : un seul constituant de base contenant (0.76 % de C) [18].

I.2.5.2. Aciers hypoeutectoïdes

Ils ont deux constituants de base, la perlite et la ferrite. Au refroidissement l'austenite se transforme d'abord en perlite, mais comme il n'y a pas assez d'atomes de carbone pour n'obtenir que de la perlite, il reste toujours une certaine quantité de ferrite dont la proportion est fonction du pourcentage de carbone initial. (0.022 à 0.76 % de carbone), et ils sont le plus Malléables [18].

I.2.5.3. Aciers hypereutectoïdes

(Entre 0.68 à 2.14 % de carbone), qui sont les plus durs et ne sont pas réputé soudables [19].

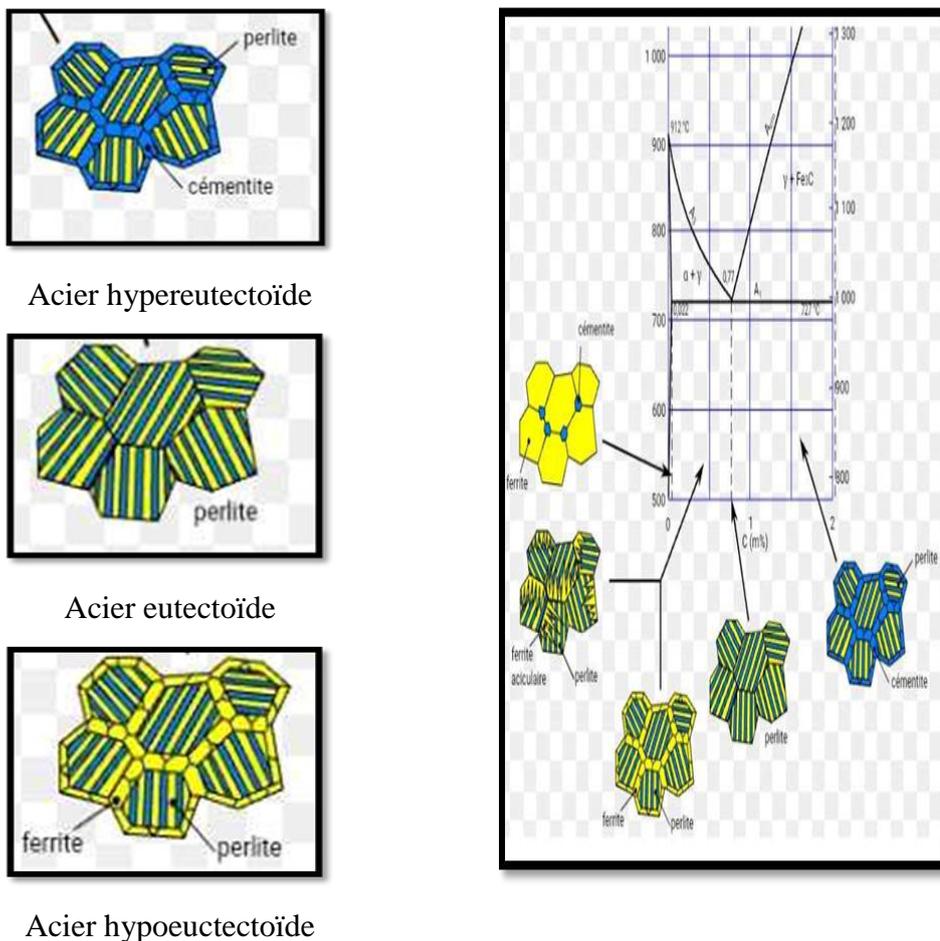


Figure I.6. Structure de l'acier selon sa teneur en carbone

I.2.6. Propriétés de certains types d'acier

Il existe de nombreux types d'acier différents comme :

I.2.6.1. L'acier ASTM A790

Il s'agit d'un type d'acier inoxydable duplex qui contient des pourcentages élevés de chrome, un maximum de 0,03 % de carbone et 3,5 % de molybdène. Ces matériaux renforcent certaines de ses propriétés [20], notamment :

- Résistance exceptionnelle à la corrosion à long terme et à la corrosion provoquée par les ions chlorure ;
- Résistance à la fissuration sous contrainte ;
- Grande durabilité;
- facile à souder ;

➤ Application

Les tuyaux A790 sont utilisés dans une variété d'applications à haute température, notamment les usines de transformation chimique et alimentaire, les générateurs de chaleur, les composants automobiles, l'eau de mer et les environnements marins.

Tableau I.3. Composition mécanique de l'acier ASTM A790

Propriété	Résistance à la traction [Mpa]	Limite d'élasticité [Mpa]	Allongement en %	Dureté	
				Rockwell C(RHC)	Brinell (HB)
Valeur	650	450	25	31Max	290Max

I.2.6.2. L'acier ASTM A 53

L'acier ASTM A53, également appelé acier ASME SA53, est destiné aux applications mécaniques et sous pression, et est également acceptable pour les utilisations normales dans les conduites de vapeur, d'eau, de gaz et d'air. Il convient aux opérations de soudage.

Et le façonnage, qui comprend le vrillage, le pliage et le bridage, selon un certain cahier des charges [21]

Tableau I.4. Composition mécanique de l'acier ASTM A53

Propriété	Résistance à la traction [Mpa]	Limite d'élasticité [Mpa]
Valeur	415	240

I.2.6.3. L'acier API X52

L'acier API X52 est l'un des matériaux les plus couramment utilisés pour les pipelines par la SONATRACH (la compagnie pétrolière nationale algérienne). En raison de leurs propriétés interconnectées (limite élastique élevée, bonne ductilité, excellente soudabilité et stabilité chimique contre une variété de milieux agressifs) [22].

L'acier x52 est un acier à faible teneur en carbone avec un taux de carbone compris entre 0,22% à 0,28%.

Tableau I.5. Composition mécanique de l'acier API X52

Propriété	Résistance à la traction [Mpa]		Limite d'élasticité [Mpa]		Allongement en %
	Min	Max	Min	Max	
Valeur	460	760	360	530	21

I.2.6.4. L'acier API X65

L'acier X65 est un acier au carbone qui se distingue par ses propriétés mécaniques et sa résistance aux risques de fissuration dus à la corrosion sous contrainte. La réaction du soufre avec le magnésium conduit à la formation de dépôts de sulfure de magnésium. Cette réaction entraîne l'apparition de corrosion localisée, donc plus la teneur en soufre est faible, plus la résistance à la corrosion augmente [23].

Tableau I.6. Composition mécanique de l'acier API X65

Propriété	Résistance à la traction [Mpa]	Limite d'élasticité [Mpa]
Valeur	531	448

I.2.7. Composition chimique

La composition chimique est ce qui confère à l'acier des caractéristiques qui le distinguent des autres aciers, de sorte que sa résistance à la corrosion puisse être déterminée. Le tableau suivant montre les proportions d'atomes présents dans certains types d'acier.

Tableau I.7. Composition chimique de l'acier A790, A53, X52 et X65

Acier	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	Ti	V	Fe
A790	0.03	2	0.50	0.03	0.02	23	3.50	6.50	0.18	0.01	0.003	0.05	Reste
A53	0.25	0.95	0.30	0.05	0.045	0.4	0.15	0.4	0.4	-	-	0.08	Reste
X52	0.24	1.40	0.45	0.025	0.015	0.30	0.15	0.30	0.30	0.05	0.04	0.10	Reste
X65	0.041	0.133	0.33	0.009	0.002	0.056	0.015	0.041	0.029	0.042	0.016	0.005	Reste

I.3. La corrosion des aciers

I.3.1. Introduction

La corrosion détruit un pourcentage important de la production d'acier que la majorité des entreprises de transport pétrolier utilisent dans la fabrication de canalisations de transport de pétrole. Dans ce chapitre, nous découvrons comment la corrosion affecte les propriétés de l'acier utilisé à l'intérieur des pipelines de transport de pétrole.

I.3.2. Définition de corrosion

La corrosion est le phénomène de destruction des matériaux métalliques par leur environnement. C'est le phénomène dans lequel les métaux ont tendance à revenir à leur état naturel, à être plus stables par rapport à l'environnement corrosif, par une réaction chimique ou électrochimique telle qu'ils perdent ou gagnent des électrons et il y a donc une perte progressive du matériau et également une détérioration de ses propriétés.

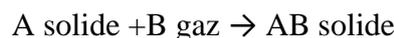
I.3.3. Classification de corrosion

La corrosion est généralement classée en deux grandes catégories selon l'environnement réactif : la corrosion sèche et la corrosion humide. La corrosion sèche, caractérisée par la réaction du métal avec les gaz environnants, conduit à la formation d'oxydes métalliques par des réactions telles que $M + O_2 \rightarrow \text{Oxyde}$.

A l'inverse, la corrosion humide résulte de l'attaque du métal par l'électrolyte. Cela conduit à l'émergence de trois classifications

I.3.3.1. La corrosion chimique

C'est la réaction entre le métal et une phase gazeuse ou liquide. Si cette corrosion se produit à haute température elle est alors appelée « corrosion sèche » [24].



I.3.3.2. La corrosion bactérienne

La corrosion bactérienne ou la bio-corrosion. Ce type regroupe tous les phénomènes de corrosion dans lesquels les bactéries agissent directement, soit en accélérant un processus déjà établi soit en créant les conditions favorables à son établissement [24].

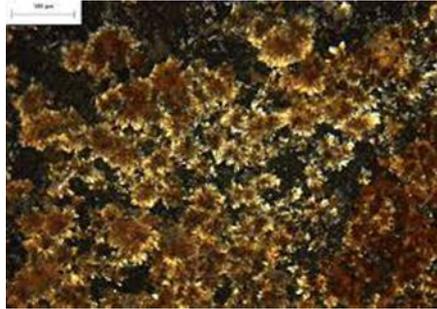


Figure I.7. La corrosion bactérienne des aciers

I.3.3.3. La corrosion électrochimique

La corrosion électrochimique ou corrosion humide, est le mode de corrosion le plus important et le plus fréquent. La corrosion électrochimique fait appelle à la fois à une réaction chimique et un transfert de charges électriques (circulation d'un courant). Cette corrosion nécessite la présence d'un agent réducteur (H_2O , O_2 , H_2 , etc.), sans celui-ci la corrosion du métal ne peut se produire. La corrosion électrochimique d'un matériau correspond à une réaction d'oxydo-réduction [24].

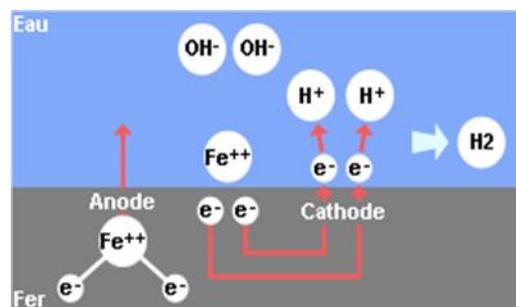
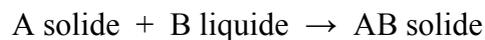


Figure I.8. Le phénomène de corrosion électrochimique

I.3.4. Les formes de la corrosion

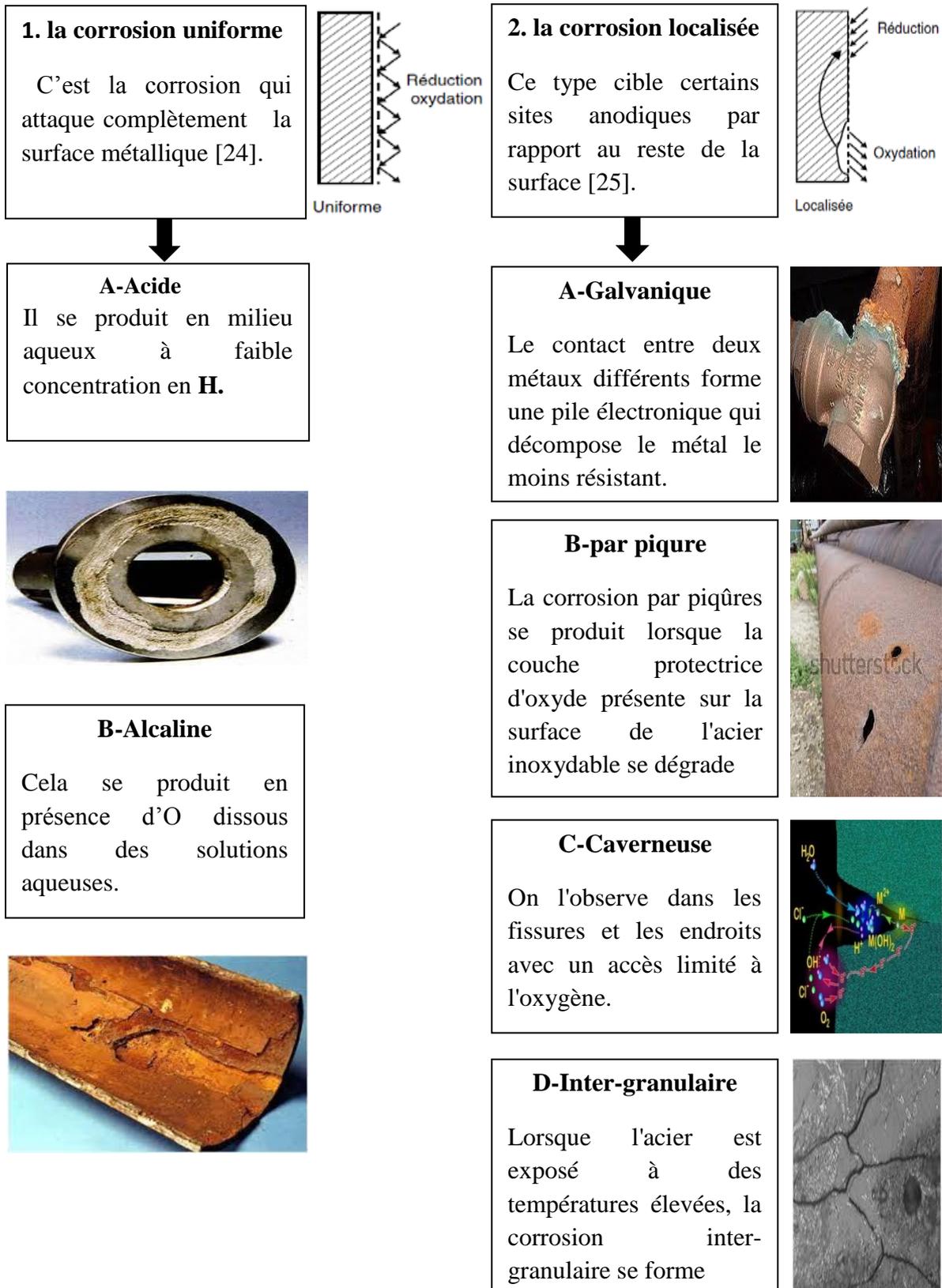


Figure I.9. Les formes de la corrosion

I.3.5. Les facteurs influencent la corrosion

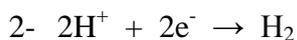
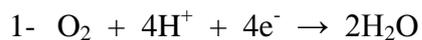
Les problèmes les plus importants posés par la corrosion dans les puits et conduites en acier sont causés par des substances chimiques conduisant à une acidification de l'eau contenue dans le brut ou le gaz naturel [26].

Les facteurs d'influence peuvent être classés en deux grandes catégories :

I.3.5.1. Facteurs liés au milieu

I.3.5.1.1. L'eau

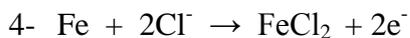
Le métal subit une attaque immédiate avec formation d'ions ferreux (dissolution anodique) et dans la zone cathodique, les électrons produits sont consommés afin de maintenir l'équilibre électronique. Les réactions cathodiques correspondantes sont la réduction de l'oxygène dissout dans l'eau (1) ou la réduction du proton avec dégagement d'hydrogène (2)



Autrement dit, la corrosion de l'acier au carbone est due à une réaction d'oxydoréduction irréversible entre le métal (Fe) et un agent oxydant (H^+), comme le montre la réaction globale (3).



Les ions chlore accélèrent la corrosion de l'acier en favorisant la dissolution anodique (4).



FeCl_2 est un produit instable, il sera oxydé en FeOH , et Cl^- se libère à nouveau, pour redémarrer un nouveau cycle [27].

I.3.5.1.2. L'oxygène

L'oxygène est un facteur essentiel dans les processus de corrosion de l'acier, qui sont fortement affectés par l'environnement. La corrosion électrochimique des aciers est régulée par les réactions suivantes lorsqu'il y a présence d'oxygène [28].

Réaction anodique : $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$

Réaction cathodique : $\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$

L'oxygène pénètre dans les tuyaux lorsque l'équipement est arrêté, vidangé ou lorsque les pompes sont utilisées [29].

I.3.5.1.3. Effet de la température

Il y a une relation directe entre la vitesse de corrosion et la température. Ainsi, plus la température est élevée, plus la vitesse de corrosion est importante [30]. en raison de l'augmentation du taux de diffusion des ions [31].

Grâce à l'expérience menée par C.Natividad et d'autres pour clarifier l'effet de la température sur la vitesse de corrosion de l'acier (API5L), les résultats présentés dans le tableau ont été obtenus.

Tableau I.8. Le taux de corrosion en mm/an

Temps (h)	20°C	40°C	80°C
T=0	0.0930	0.3950	0.5504
T=12	0.0656	0.2440	0.2905
T=24	0.0713	0.3905	0.1452

A travers les résultats présentés dans le tableau, il a été constaté que la température avait un affectait directement la Vitesse de corrosion. Lorsque la température augmentait, Le vitesse augmentait également [32].

I.3.5.1.4. Effet de pH

Les réactions chimiques et électrochimiques dépendent souvent du pH de la solution tout en participant aux phénomènes de corrosion. Lorsque le pH s'écarte du neutre, notamment du côté acide, l'agressivité des milieux corrosifs augmente [33].

I.3.5.2. Factures métallurgiques

Les facteurs métallurgiques sont nombreux et ont de grandes influences sur les processus réactionnels de la corrosion. Nous ne citerons sommairement que les plus importants, à savoir :

- Composition de l'alliage ;
- Procédé d'élaboration;
- Impuretés;
- Traitements thermiques;
- Traitements mécaniques;
- Additions protectrices;
- Caractéristiques cristallographiques (il s'agit essentiellement du type de structure à l'échelle du réseau et de la dimension des grains) [34].

I.3.6. Les modes de protection des aciers contre la corrosion

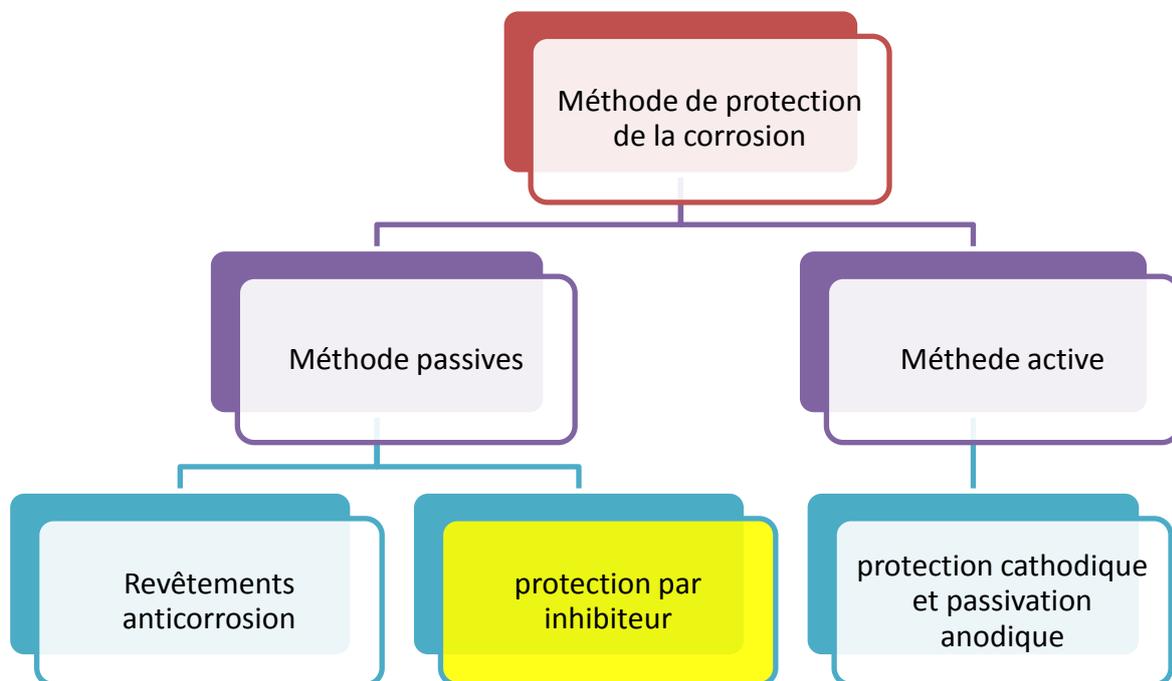


Figure I.10. Méthode de protection de la corrosion

I.3.6.1. Inhibiteur de corrosion

I.3.6.1.1. Définition de l'inhibiteur

Un Inhibiteur de corrosion est une substance chimique que l'on ajoute en petite quantité pour diminuer la vitesse de corrosion du matériau métallique à protéger. Leur domaine utilisation recouvre les milieux acides, la vapeur, et les eaux de refroidissement [35].

I.3.6.1.2. Propriétés de l'inhibiteur

Un inhibiteur de corrosion doit être conçu pour diminuer le taux de corrosion métallique tout en préservant l'intégrité physico-chimique du matériau. Il est impératif qu'il démontre une stabilité adéquate face aux constituants environnants, sans perturber l'équilibre des espèces présentes dans le milieu. En outre, sa performance doit être maintenue à des concentrations minimales et à la température opérationnelle spécifiée [36,37].

En dehors de tout mécanisme d'action, un inhibiteur de corrosion doit vérifier un certain nombre de propriétés fondamentales :

- Abaisser la vitesse de corrosion du métal tout en conservant les caractéristiques physicochimiques de ce métal. Par exemple, un inhibiteur utilisé lors du décapage acide d'un acier peut, s'il est mal choisi, aggraver les risques de pénétration de l'hydrogène dans le métal:

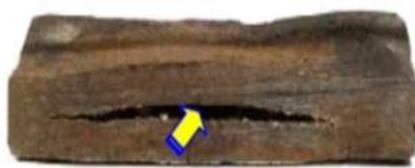


Figure I.11. La fragilisation par hydrogène d'une pièce métallique

- Être stable en présence des autres constituants du milieu, en particulier vis-à-vis des oxydants, tels certains biocides.
- Ne pas modifier la stabilité des espèces contenues dans le milieu, par exemple en provoquant l'apparition d'émulsions, voire de mousses.
- Être stable à la température d'utilisation.
- Être efficace à faible concentration.
- Être compatible avec les normes de non-toxicité et Être peu onéreux.

I.3.6.1.3. Classification des inhibiteurs de corrosion

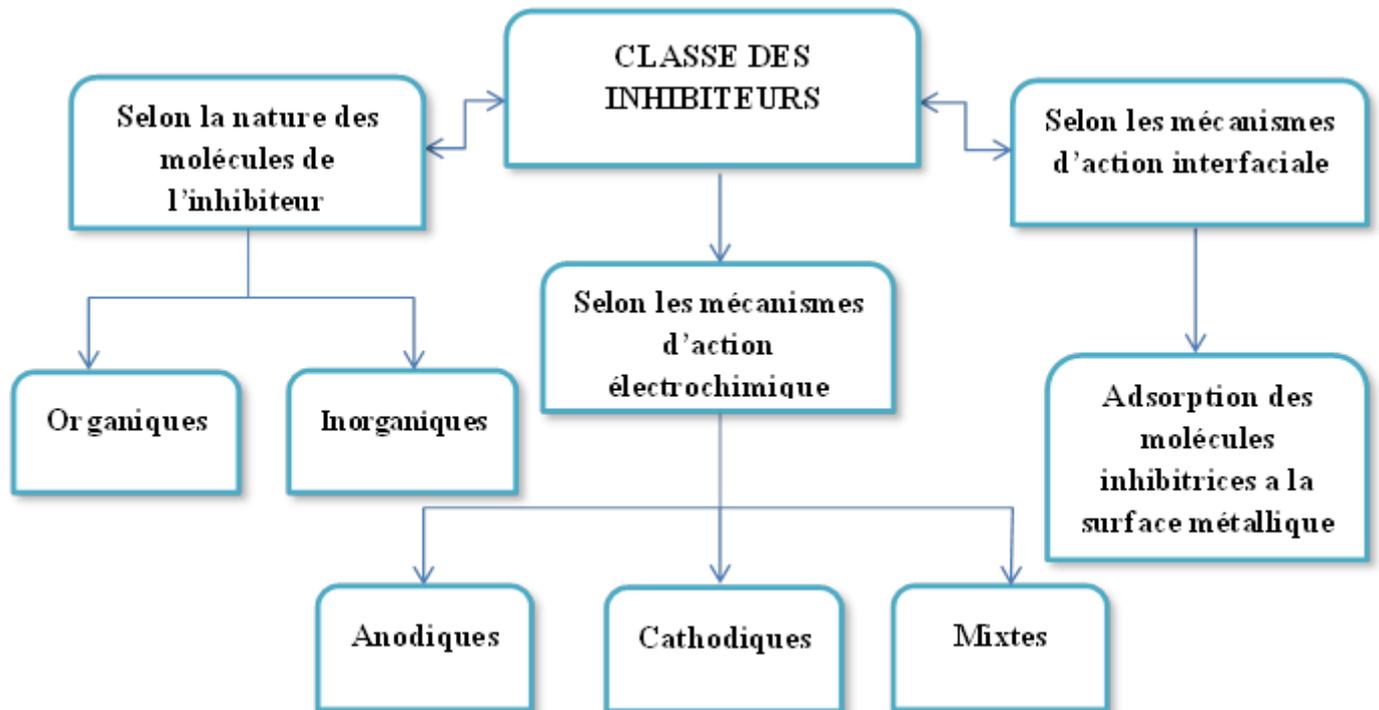


Figure I.12. Classification des inhibiteurs

I.3.6.1.3.1. Selon la nature des molécules de l'inhibiteur

A- Inhibiteurs organiques

Ils sont largement utilisés en raison de leur efficacité et de leurs propriétés physiques (solubilité dans les milieux aqueux et non aqueux, haute température et compatibilité avec les matériaux métalliques) [38]. Le mécanisme d'action des inhibiteurs de corrosion organiques repose sur l'adsorption sur la surface pour former un film protecteur qui chasse l'eau de la surface métallique et la protège de la détérioration [39].

Les inhibiteurs de corrosion organiques efficaces doivent contenir des hétéroatomes (azote, oxygène, soufre et phosphore) avec des paires d'électrons isolés et des fragments avec des électrons π (anneaux aromatiques et liaisons multiples) qui peuvent interagir avec le métal orbital libre d, favorisant le processus d'adsorption [40].

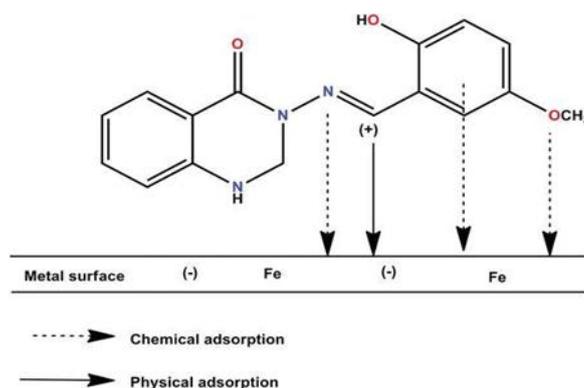


Figure I.13. Diagramme schématisant le mécanisme d'adsorption des bases Schiff sur une surface en acier doux.

B- Inhibiteurs inorganiques

Dans l'industrie pétrolière, les inhibiteurs de corrosion inorganiques sont utilisés pour protéger les pipelines de la corrosion causée par l'exposition à des liquides acides et à d'autres facteurs. Les inhibiteurs inorganiques les plus couramment utilisés dans cette industrie sont les composés à base de Zn, d'Al et de Mg, car ils offrent une excellente protection contre la corrosion générale et localisée. De plus, ces inhibiteurs peuvent également agir comme inhibiteurs de tartre, empêchant la formation de tartre sur les surfaces métalliques. Le CaCO_3 , le $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ et le FeS sont fréquemment utilisés. Dans le renforcement du béton, le nitrite de calcium et le nitrate de sodium sont des choix populaires. Dans le traitement des surfaces métalliques [41].

I.3.6.1.3.2. Selon les mécanismes d'action électrochimique

Les inhibiteurs de corrosion sont des agents qui induisent la formation d'une barrière protectrice sur les surfaces métalliques, altérant les réactions électrochimiques impliquées dans le processus de corrosion. Cette barrière peut sélectivement entraver les sites anodiques où se produit l'oxydation métallique ou les sites cathodiques où ont lieu les réductions, en fonction des caractéristiques du milieu environnant.

A- Inhibiteurs anodiques

Les inhibiteurs anodiques réduisent la densité de courant de dissolution métallique en induisant un déplacement positif du potentiel de corrosion. Une adéquation dans leur quantité est essentielle pour éviter une potentialisation de la corrosion dans les zones non protégées [42].

B- Inhibiteurs cathodiques

Les inhibiteurs cathodiques, en revanche, diminuent la densité de courant de réduction du solvant et déplacent le potentiel de corrosion dans le sens négatif. Du fait de leur mode d'action, les inhibiteurs cathodiques sont considérés comme plus sûrs que les inhibiteurs anodiques car ils ne risquent pas de favoriser la corrosion localisée [42].

C- Inhibiteurs mixtes

Ces inhibiteurs diminuent la vitesse des deux réactions partielles, mais modifient peu le potentiel de corrosion [42].

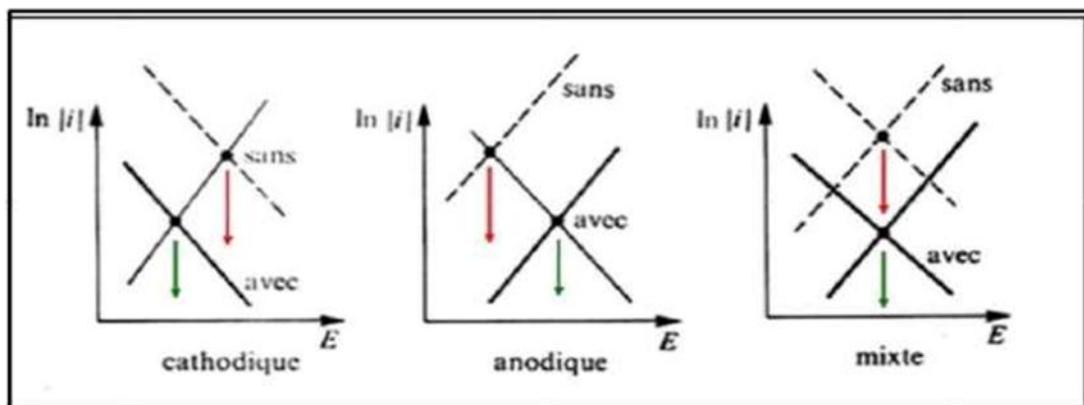


Figure I.14. Diagrammes d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur de corrosion

I.3.6.1.3.3. Selon les mécanismes d'action interfaciale

A- Adsorption des molécules inhibitrices à la surface métallique

Une expérience a été réalisée pour mesurer la vitesse de corrosion (VC [$\text{mg cm}^2 \text{h}^{-1}$]) et l'efficacité inhibitrice (EI) en présence d'un extrait de dichlorométhane (un inhibiteur de corrosion) à différentes concentrations. On remarque avec l'augmentation de la concentration de l'extrait une diminution de la vitesse de corrosion. (Figure I.15), et à partir de ces résultats, nous voyons qu'une concentration de l'ordre de 700 mg dans 1 litre donne une efficacité maximale jusqu'à 70 %.

La variation de l'efficacité inhibitrice (EI) de cet extrait avec la concentration est reportée sur la (Figure I.16), qui confirme d'avantage l'augmentation de l'efficacité inhibitrice avec l'augmentation de la concentration de l'extrait. Cela indique que les composé phytochimiques de cet extrait sont adsorbés sur la surface de l'acier et bloquent les sites actifs contre la corrosion [43-44].

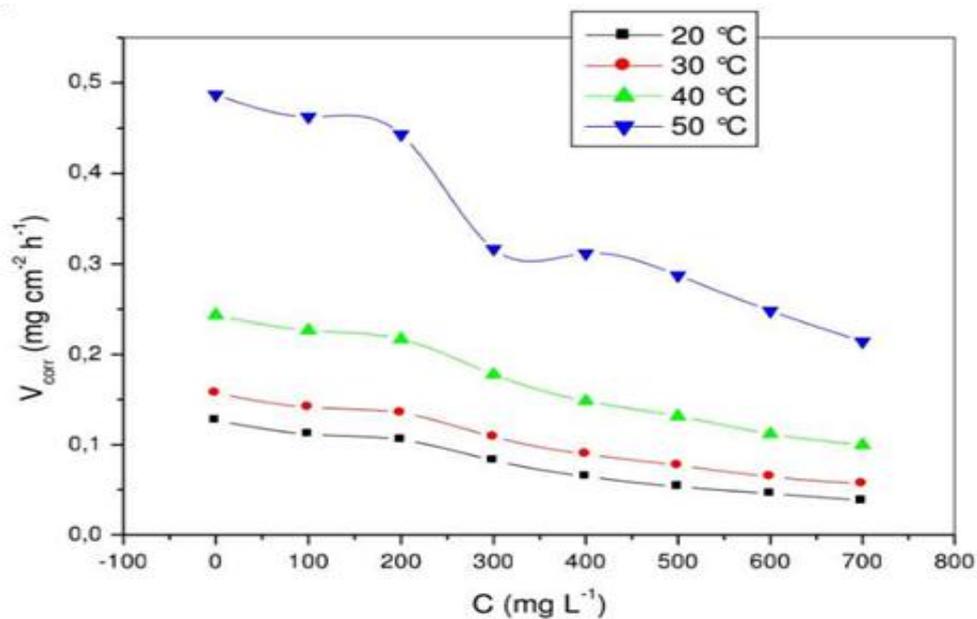


Figure I.15. Courbe d'évolution du taux de corrosion avec changement de concentration

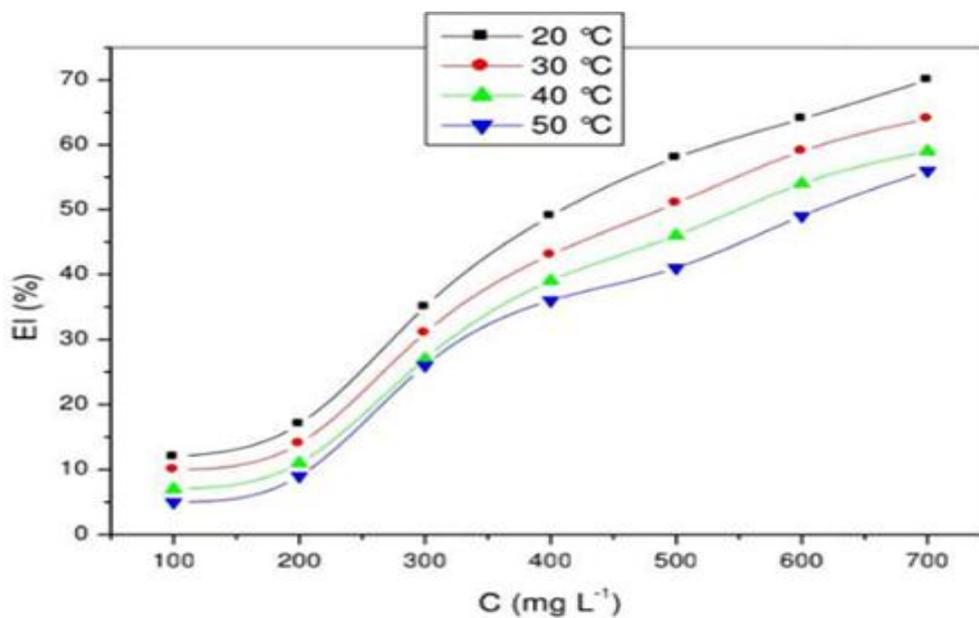


Figure I.16. Courbe d'évolution de l'efficacité des inhibiteurs avec changement de concentration

I.3.7. Conclusion

L'acier est un matériau important dans la fabrication des pipelines pour le transport du pétrole et du gaz, où la résistance à la corrosion est un facteur crucial. La corrosion est un phénomène complexe en raison de ses mécanismes et de ses multiples types. Il est nécessaire de s'en préoccuper, et parmi les méthodes utilisées pour protéger l'acier, il y a les inhibiteurs de corrosion, qui sont des produits chimiques ajoutés à faible concentration à l'environnement causant la corrosion, ce qui réduit la vitesse de corrosion du métal. Cette méthode est la plus facile à mettre en œuvre, mais les inhibiteurs sont considérés comme des substances toxiques et néfastes pour l'environnement. Actuellement, les inhibiteurs organiques sont utilisés pour la protection de l'environnement, et ils sont les plus efficaces contre la corrosion de l'acier.

***CHAPITRE II. Préparation et
Techniques de caractérisation***

Dans ce deuxième chapitre, les différents types d'aciers utilisés pour cette étude seront présentés, ainsi que les méthodes de préparation des échantillons et les techniques de caractérisation employées.

II.1. Les aciers utilisés

Dans cette étude, nous avons utilisé quatre types d'aciers de nuances différentes soumises à la classification américaine :

1/ ASTM : C'est l'abréviation de "American Society for Testing and Materials", une organisation bénévole visant à développer et à unifier les normes d'essai et les spécifications pour une variété de matériaux et de produits.

2/ API 5L : C'est une norme émise par l'American Petroleum Institute (API) concernant les tuyaux en acier utilisés dans l'industrie pétrolière et gazière. Cette norme définit les exigences en matière de qualité, de dimensions et de tolérances pour les tuyaux en acier et les raccords utilisés dans les systèmes de transport du pétrole brut et du gaz naturel.

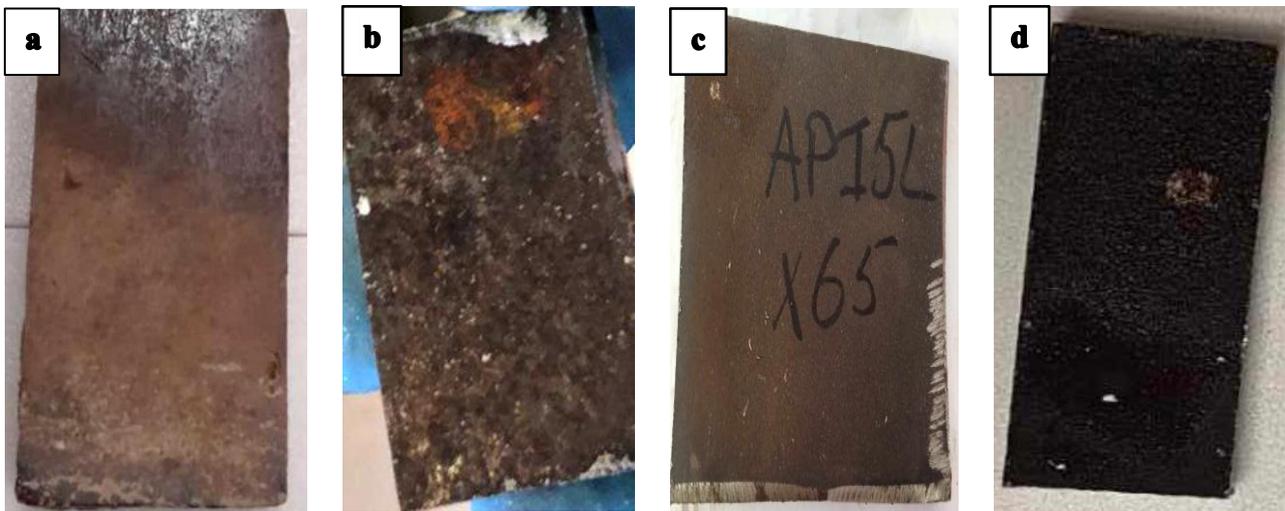


Figure II.1. Les aciers utilisés (a) A790, (b) A53, (c) X65 et (d) X52.

II.1.1. La composition chimique

A partir de l'appareillage (spectromètre) on obtient les résultats suivants :

Tableau II.1. La composition chimique des échantillons X52 et X65 en pourcentage massique

%	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Nb	Ti	V	W	Pb	N	Cu	Fe
X52	0.21	0.19	1	0.001	0.002	0.01	0.002	0.004	0.003	0.002	0.004	0.001	0.003	0.015	0.005	0.089	0.012	98.4
X65	0.09	0.15	1.45	0.009	0.003	0.01	0.006	0.005	0.032	0.027	0.069	0.014	0.047	0.008	0.017	0.36	0.013	97.5

Le tableau II.1 la composition chimique de deux types d'acier, X52 et X65, conformément à la norme américaine ASTM. Ces aciers sont principalement constitués de fer avec des pourcentages élevés : X52 contient 98,4 % de fer et X65 contient 97,5 % de fer. La teneur en carbone ne dépasse pas 0,22 % pour les deux types.

Tableau II. 2. La composition chimique des échantillons A53 et A790 en pourcentage massique

%	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N	V	Cu	Fe
A53	0.25	0.35	1.20	0.05	0.045	0.40	0.15	0.40	0.012	0.08	0.14	96.92
A790	0.03	1	2	0.03	0.02	23	3.50	6.50	0.20	0.05	0.18	63.49

Le tableau II.2 présente la composition chimique de deux types d'acier, A790 et A53, soumis à la classification américaine API 5L. Ainsi, le nombre d'éléments chimiques diffère de celui de l'ASTM, où le pourcentage de fer est également élevé et le carbone est faible, mais il existe un pourcentage élevé d'éléments chimiques comme le chrome, atteignant un pourcentage de 23% dans l'A790, ce qui renforce sa résistance à la rouille.

II.1.2. Classification des aciers utilisés

Grâce à la composition chimique mentionnée précédemment, les quatre échantillons d'acier peuvent être classés selon les éléments suivants:

- ASTM A790 C'est un acier inoxydable
- ASTM A53 C'est un acier faiblement allié
- API 5L X65 C'est un acier faiblement allié
- API 5L X52 C'est un acier faiblement allié

II.2. Préparation des échantillons

II.2.1. Découpage

Le processus de découpe a été effectué à l'aide de deux appareils.

II.2.1.1. Découpage par Scie ruban mécanique

La scie à ruban est un processus mécanique qui découpe les métaux en petites pièces en utilisant la technique de la pulvérisation d'eau. Cette opération est réalisée à haute pression et à grande vitesse sans affecter les propriétés du métal, permettant ainsi d'obtenir des pièces compatibles avec le métal d'origine dont elles ont été prélevées.

Le processus de découpe passe par deux étapes :

1- La première étape

Nous remplissons le réservoir de l'appareil avec un mélange spécial préparé précédemment d'eau et d'huile spéciale. Nous utilisons ce mélange pour protéger l'appareil de la corrosion et pour éviter les effets de la température sur l'acier.

2- La deuxième étape

Nous plaçons l'acier dans l'endroit de découpe et le fixons solidement en le pressant entre les deux plaques de l'appareil, puis nous procédons à la découpe.

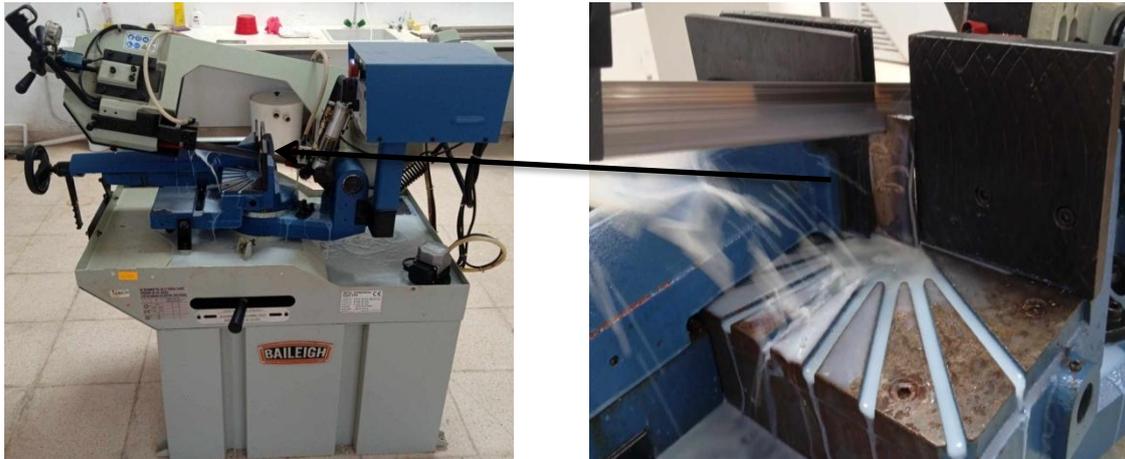


Figure II.2. Découpage par scie ruban mécanique

II.2.1.2. Découpage par tronçonneuse

C'est une machine qui effectue la découpe microscopique des matériaux solides, avec des disques de découpe d'un diamètre de 250 à 300 mm et une vitesse de rotation allant de 1000 à 4000 tours par minute. Cette machine permet de découper de petits échantillons d'acier d'une surface n'excédant pas 2cm^2 .



Figure II.3. Appareil tronçonneuse (Mecatome ST 310)

II.3. Préparation de l'électrode de travail

Le processus de préparation d'une électrode passe par cinq étapes :

II.3.1. Polissage

Le polissage est un processus qui affine la surface métallique des matériaux et des objets en éliminant les éventuelles marques, rayures.

Cette étape consiste à retirer la couche usée de l'acier en utilisant des feuilles abrasives de grade (80, 100, 180, 280 Jusqu'à 600).

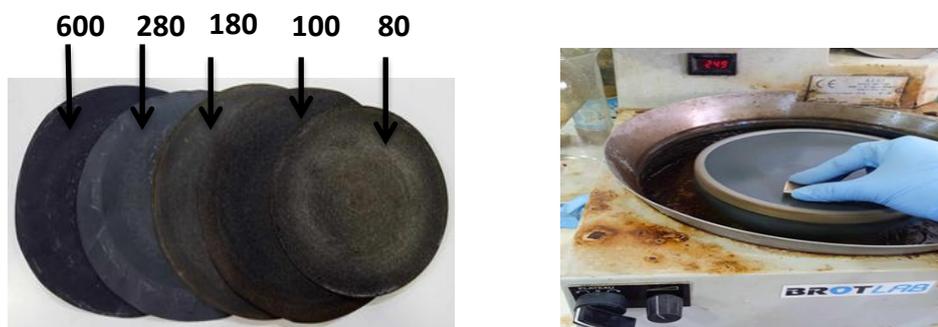


Figure II.4. Polissage

Un exemple montrant l'évolution de la surface de l'acier avant polissage et après polissage.

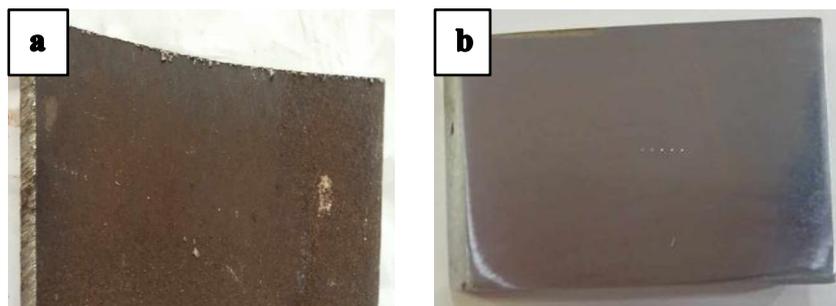


Figure II.5. Acier (a) avant pré polissage et acier (b) après pré-polissage

Remarque :

De l'eau est ajoutée à chaque étape du polissage pour éviter l'effet de la température sur les petits échantillons d'acier qui pourraient monter à cause du frottement. Cela permet de maintenir une température plus constante et d'éviter des déformations indésirables.

II.3.2. Soudage

Le processus de soudage de l'acier et du fil porteur de courant comprend la fusion (d'un l'étain) sur l'acier et le fil à l'aide d'un appareil de soudage. Nous fixons bien le fil puis le laissons refroidir.



Figure II.6. Soudage

II.3.3. Enrobage

L'enrobage est une technique importante où une poudre spéciale et de la bakélite (phénolique) sont utilisés. C'est une technique facile et peu coûteuse. Elle présente de bonnes propriétés de conservation des bords et de solidité des matériaux métalliques, se distinguant par une grande résistance et une résistance mécanique élevée. C'est une excellente technique pour les applications où la conservation des bords est cruciale, comme les échantillons d'acier.

II.3.3.1. But

Protéger l'acier, obtenir une précision idéale de la surface de l'acier et une manipulation plus sûre et plus pratique des échantillons de petite taille et de forme irrégulière pour obtenir les meilleurs résultats.

II.3.3.2. Processus d'enrobage à froid

Il s'agit d'un processus manuel simple et facile dans lequel nous suivons les étapes suivantes :

- L'échantillon préparé précédemment est placé à l'intérieur d'un moule approprié.
- Un mélange homogène est préparé avec une taille et une masse appropriées de résine. et le mélangeons bien.
- Le mélange est versé dans le moule contenant l'échantillon.
- Il est laissé refroidir pendant un certain temps, puis retiré du moule.

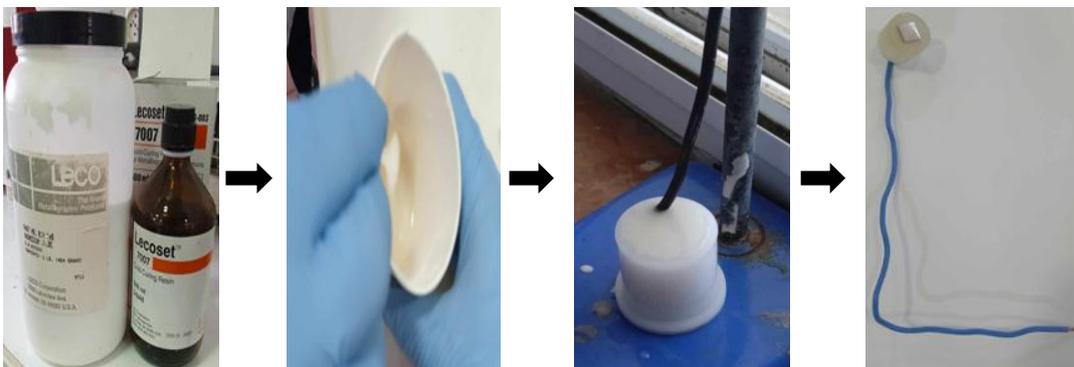


Figure II.7. Les étapes de processus de l'enrobage à froid

II.3.4. Polissage miroir

Le polissage miroir est le processus le plus important qui donne de la brillance à la surface de l'acier. Ce processus est réalisé en utilisant des papiers abrasifs de grains (1000 à 2000). Cette opération permet d'obtenir une surface d'échantillon parfaite et exempte de tous défauts.

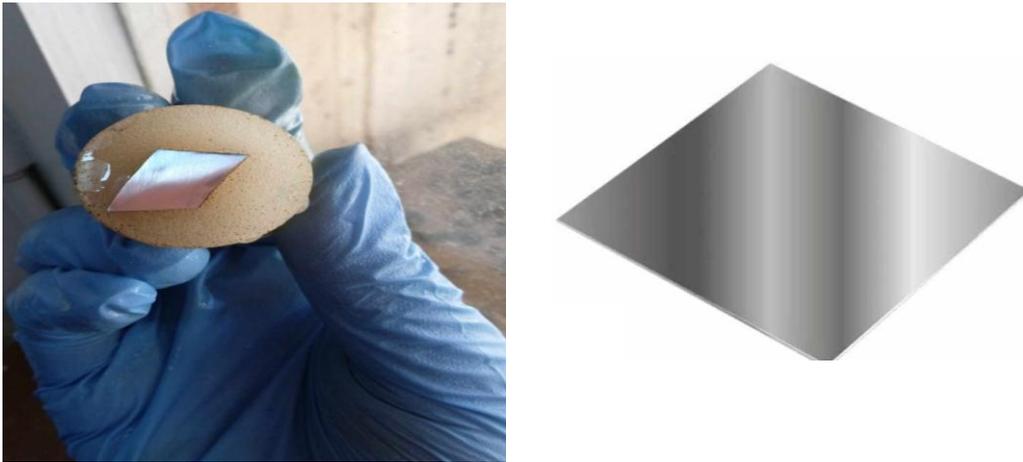


Figure II.8. Polissage miroir

II.3.5. Teste multimètre FLUKE

Multimètre fluke c'est un appareil qui mesure l'intensité du courant électrique qui traverse l'électrode de travail. Il se compose d'un petit écran qui affiche la valeur du courant qui passe et de deux fils conducteurs connectés aux deux extrémités de l'électrode.

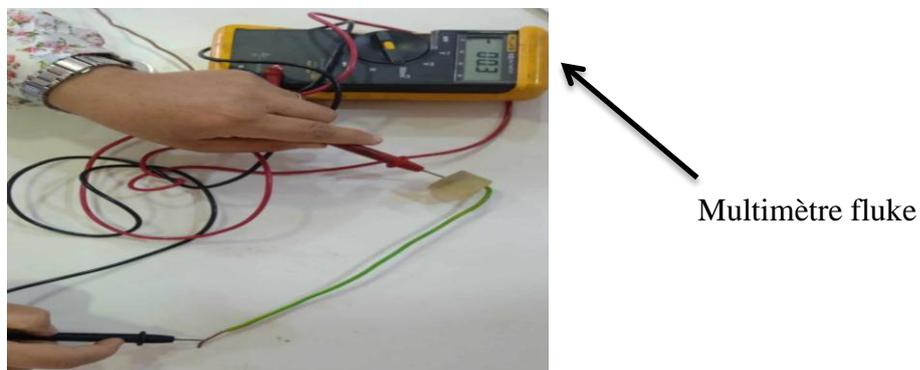


Figure II.9. Teste multimètre fluke

Après avoir effectué les étapes ci-dessus, l'électrode de travail est prête à être utilisée dans une chaîne électrochimique.

II.4. Techniques expérimentales d'étude de corrosion

L'électrochimie peut être caractérisée par l'ensemble des phénomènes impliqués dans le passage d'un courant électrique dans un conducteur ionique, indépendamment de son sens. Le passage de ce courant nécessite d'utiliser un système électrochimique constitué par deux

électrodes en contact électrique avec le conducteur ionique. La matière impliquée comporte donc des matériaux conducteurs électroniques et un milieu liquide rendu conducteur électrique grâce à la présence d'ions. La caractérisation physique des systèmes électrochimiques utilise principalement des mesures de courant ou de potentiel.

II.4.1. Chaîne électrochimique

Les mesures électrochimiques ont été faites grâce à un système à trois électrodes branchées à l'appareil (ACM Gill 8 Weld Tester), fonctionnant soit en mode potentiostatique soit en mode galvano-statique, piloté par un micro-ordinateur qui permet ensuite l'acquisition et le traitement des données. En générale la cellule électrochimique est une cellule double enveloppe en verre qui a un volume de (1000 ml) . La double-enveloppe permet la régulation de la température. La prise des mesures relative à l'aspect cinétique de la corrosion (d'après laquelle les performances des inhibiteurs est évaluée) et la caractérisation du comportement électrochimique des matériaux ont été réalisées par méthodes électrochimiques non-stationnaires et pseudo-stationnaires classiques (trace des courbes de polarisation, mesure de l'évolution de la résistance de polarisation (R_p) avec la variation de la concentration de l'inhibiteur et la spectroscopie d'impédance électrochimique). Les techniques électrochimiques effectuées pour ce mémoire ont nécessité l'usage des matériels de laboratoire suivant :

- potentiostat / galvanostat
- micro-ordinateur.
- électrode de travail.
- électrode de référence.
- électrode auxiliaire.
- cage de Faraday.

Pour les techniques électrochimiques, l'électrode de travail (l'acier enrobé), l'électrode de référence (calomel saturé) et l'électrode auxiliaire (platine) sont immergées dans une solution électrolytique et connectées à un potentiostat assisté par ordinateur.

Les courbes ($E=f(i)$; $E=f(t)$) sont tracées à l'aide du logiciel EC Lab. L'électrode de référence est placée de manière à ce qu'il soit le plus proche possible à l'électrode de travail, sans qu'il rentre en contact, et ceci pour éviter une baisse de la tension importante entre l'électrode de travail et l'électrode auxiliaire. L'électrode auxiliaire doit être une électrode inerte relative aux

matériaux et à l'électrolyte utilisé à des conditions opératoires adoptées, comme le graphite ou le platine.

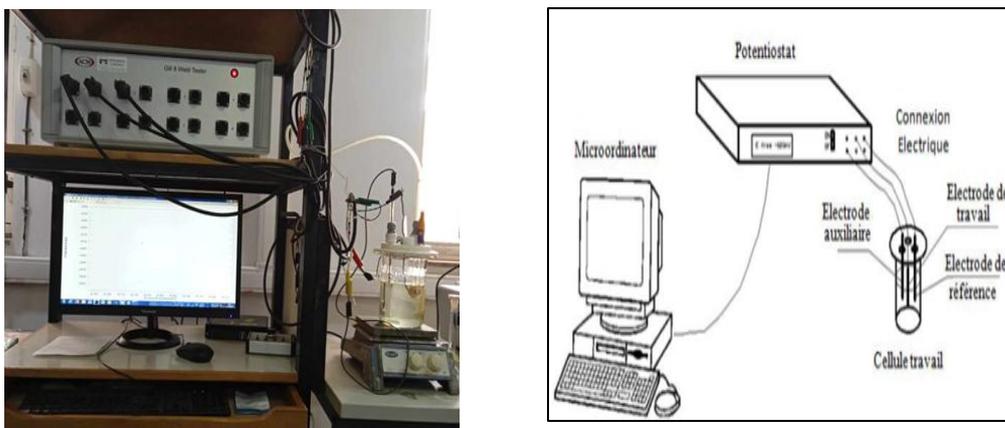


Figure II.10. Chaîne électrochimique

II.4.1.1. La cellule électrochimie

C'est une cellule double-enveloppe en verre pyrex qui a un volume de 1000 ml. La double-enveloppe permet la régulation de la température par thermostat, par l'utilisation d'un bain. La cellule est munie d'un couvercle à cinq orifices permettant de placer de façon fixe les différentes électrodes.

- L'orifice central est destiné au passage de l'électrode de travail en acier.
- Deux orifices parallèles, qui sont destinés aux passages des électrodes auxiliaires en platine.
- Un orifice pour le passage de l'électrode de référence.
- Un orifice pour le passage de l'évent du barboteur des gaz N₂ ou CO₂

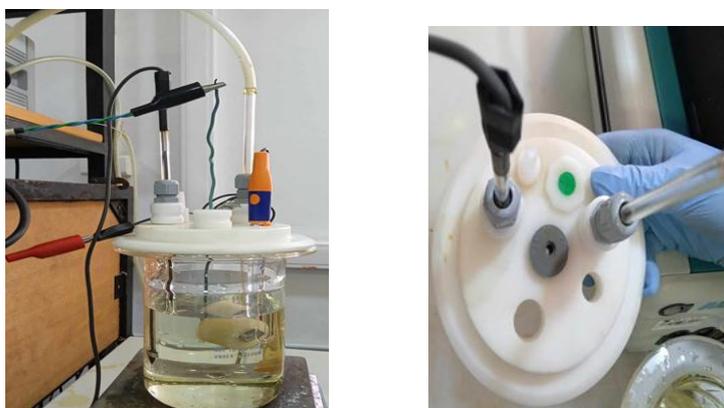


Figure II.11. Cellule électrochimique

La cellule électrochimique est composée de trois électrodes : une électrode de travail, deux contre électrodes et une électrode de référence.

➤ **Électrode de travail**

Il s'agit d'un échantillon d'étude, découpé aux dimensions appropriées et préparé à l'avance.

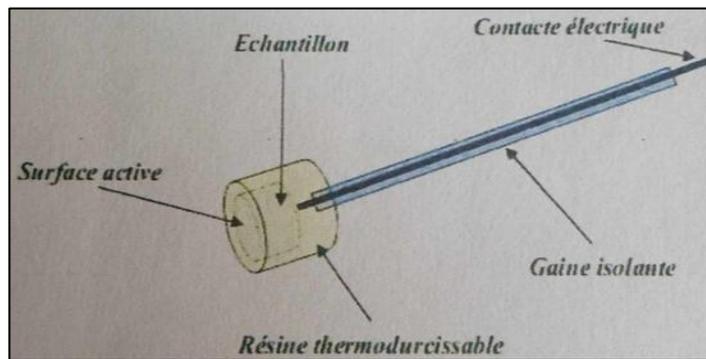


Figure II.12. Schéma d'un électrode de travail

Les électrodes étudiés dans cette recherche sont : A790, A53, X65 et X52.

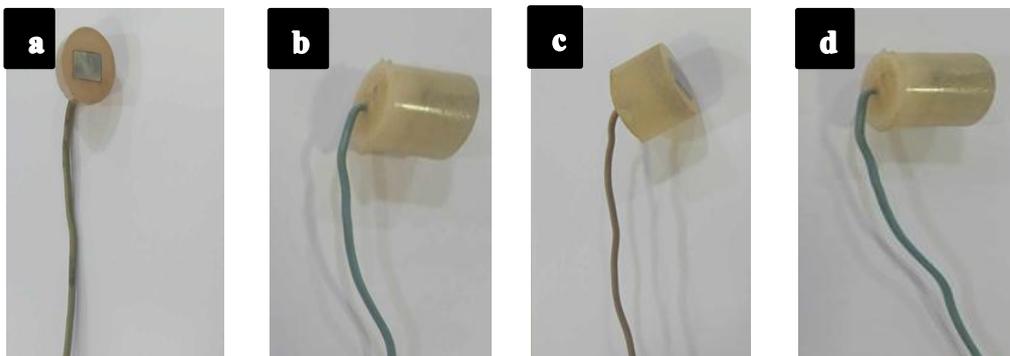


Figure II.13. les électrodes (a) A790, (b) A53, (c) X65 et (d) X52

Tableau II. 3. Le tableau montre la surface de contact de l'acier A790, A53, X65 et X52

Les aciers	La surface (cm ²)
A790	1.28
A53	1.54
X65	1.60
X52	1.56

➤ **Electrode de référence**

En Argent -Chlorure d'Argent (figure II.14) saturée en KCl, schématisée par la séquence électrochimique (Ag/AgCl / KCl sat). Celle-ci présente un potentiel de +0.21 V par rapport à l'électrode standard à hydrogène (ESH). Elle permet de mesurer ou de contrôler le potentiel de l'électrode de travail. Elle est placée près de l'électrode de travail ($\approx 2\text{mm}$) dans le but de minimiser la chute ohmique provoquée par l'électrolyte.



Figure II.14. Electrode de référence

➤ **Contre électrode**

Appelée aussi électrode auxiliaire elle est constituée d'une grille de platine d'une grande surface de contact, qui ferme le circuit et assure l'uniformité du courant électrique dans la solution.



Figure II.15. Contre électrode

➤ **Electrolyte**

La source d'électrolyte utilisée est l'eau de gisement (puits de pétrole et de gaz. TFT, ILLIZI). Afin de séparer l'eau des huiles et produits chimique, nous avons effectué une opération de décantation, puis une opération de filtration en utilisant des feuilles de filtration. 700 ml d'eau ont été préparés et déversés dans une cellule électrochimique.

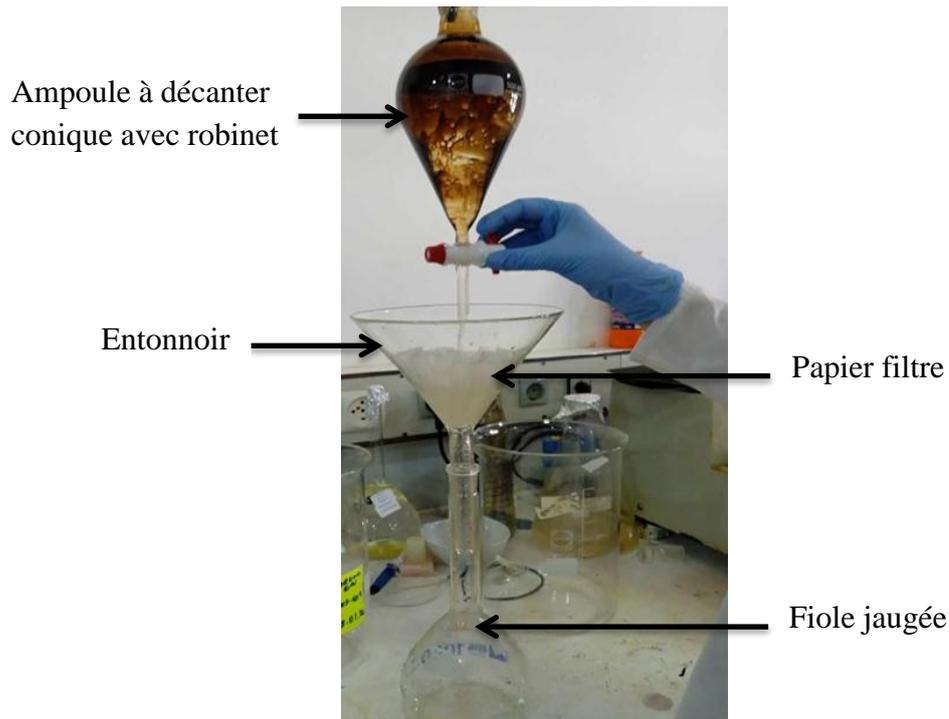


Figure II.16. Décantation et filtration de l'eau de gisement

1- Composition chimique de l'eau de gisement

Afin d'obtenir le pH de l'eau de gisement, nous avons utilisé un pH-mètre, qui a indiqué un pH de 1,20, rendant le milieu très acide et potentiellement corrosif pour l'acier. L'acidité élevée favorise la libération d'ions hydrogène qui réagissent avec les surfaces métalliques. Quant aux ions chlorure, calcium et magnésium, nous avons utilisé un dosimètre équipé de réactifs spécifiques pour détecter leur concentration dans l'eau. Comme l'EDTA (acide éthylène diamine tétra acétique), qui détecte les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} , et l' AgNO_3 (nitrate d'argent), qui détecte les ions Cl^- . Les concentrations d'électrolytes présents dans l'eau sont données en mg/l et sont indiquées dans le tableau suivant :

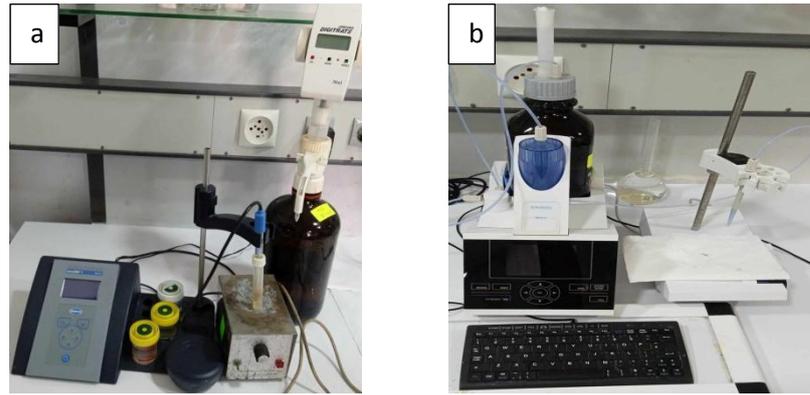


Figure II. 17. Les appareils PH-mètre (a) et dosimètre (b)

Tableau II.4. La composition chimique de l'eau de gisement

Les ions	Les paramètres donnés à l'appareil				Résulta
	V [ml]	N	D	PE	C [mg/l]
Cl ⁻	1.3	0.1	250	10	115235.25
Ca ²⁺	1.15	0.01	250	10	11523
Mg ²⁺	1.99	0.01	250	10	5107.2

La concentration en ions sulfate SO₄²⁻ est mesurée par un spectromètre UV, qui a donné une valeur de 2250 mg par litre.

Les résultats montrent que les concentrations des carbonates CO₃²⁻ et des bicarbonates HCO₃⁻ sont nulles, en raison de la faible valeur du pH de l'eau. Si le pH est compris entre 4,3 et 8,3, la concentration des ions carbonates est nulle, tandis que les bicarbonates ne sont pas. Si la valeur est inférieure à 4,3, la concentration des deux devient nulle. Ces résultats sont influencés par la faible valeur du pH de l'eau de gisement, qui est de 1,2. Avec ces résultats, commence la dégradation de fer de l'acier."

Nous utilisons un appareil (Spectroscopie d'adsorption atomique) pour mesurer la concentration de sodium et de potassium dans l'eau de gisement.



Figure II.18. Spectroscopie d'adsorption atomique

Tableau II.5. La composition chimique de l'eau de gisement

les ions	Na ⁺	K ⁺
Concentration [mg/l]	589.592	766.490

Les concentrations élevées en chlorure (Cl⁻), calcium (Ca²⁺), magnésium (Mg²⁺), sulfate (SO₄⁻), sodium (Na⁺), et potassium (K⁺) exacerbent ce risque en augmentant la conductivité électrique de l'eau, favorisant la formation de dépôts et augmentant la vitesse de corrosion des aciers.

➤ **L'inhibiteur Utilisée**

Le Produit A est un inhibiteur de corrosion organique dispersable à l'huile et soluble dans l'eau. C'est un mélange d'un sel d'imidazoline avec d'autres tensioactifs. Il a été formulé pour prévenir la corrosion du CO₂ et du H₂S dans les pipelines et les équipements de production dans les systèmes de traitement du pétrole et du gaz. Produit A a été spécifiquement développé pour les applications à turbulence élevées, généralement dans les systèmes de gaz. En outre, dans les essais effectués par un laboratoire indépendant, 50 ppm Produit A ont réduit la vitesse de corrosion à moins de 0,1 mm / an à des températures allant jusqu'à 120 ° C sous deux fois (3 bars CO₂) et des conditions acides (1 bar H₂S).

- Ppm : Partie par million

1- Propriétés physiques

Tableau II.6. Propriétés physiques d'inhibiteur A

Propriétés	Valeur
Apparence	Liquide marron claire
Densité (g/cm ³)	0.98-1.04
Point d'écoulement (°C)	-5
Point d'ignition (°C)	>63
PH (10% solution)	3.5-5.5
Solubilité	Soluble dans l'eau, dispensable dans l'huile
Masse volumique (mg/ml)	0.5

2- Préparation de solution fille de l'inhibiteur

On veut préparer une solution d'injection diluée d'une concentration de 10 ppm et de volume de 100ml à partir de la solution mère de l'inhibiteur A.

- On prélève 2ml de la solution mère à l'aide d'une micropipette
- On le verse dans une fiole jugée de 100ml et on continue avec de l'eau jusqu'au trait jugé.

Solution mère 10 ppm = 104 mg \longrightarrow 1000 ml

m mg \longrightarrow 100 ml

$$m = \frac{100 \times 10^4}{1000} \longrightarrow m = 10^3 \text{ mg}$$

$$P = \frac{m}{V} = 0.5 \text{ g/cm}^3 \longrightarrow V = \frac{m}{P} = \frac{10^3 \times 10^{-3}}{0.5} \longrightarrow V = 2 \text{ ml}$$

- Des volumes différents de la solution d'injection sont prélevés et ajoutés à la cellule électrochimique environ chaque heure.

Tableau II.7. Les volumes d'inhibiteur ajouté à la cellule électrochimique

Concentration	0	10	15	20	30	50	100
Volume (ml)	0	0.7	0.35	0.35	0.7	1.4	3.5

**Figure II.19.** Opération d'injection d'inhibiteur par micro pipette

II.5. Cinétique électrochimique

II.5.1. Potentiel libre

En générale il est aussi connu comme potentiel en circuit ouvert, potentiel spontané, potentiel d'abandon ou de repos [45]. Il s'agit de la grandeur électrochimique la plus immédiatement mesurable. Le potentiel en circuit ouvert est la seule mesure qui n'entraîne pas une perturbation de l'état du système sous étude [46]. L'intérêt du suivi du potentiel libre en fonction du temps est l'appréhension du comportement d'un matériau au contact d'un milieu agressif, permettant l'identification des transformations préliminaires et de la nature des phénomènes se déroulant à l'interface, comme la suite des phases temporaires continues d'oxydation et passivation des métaux [47-48].

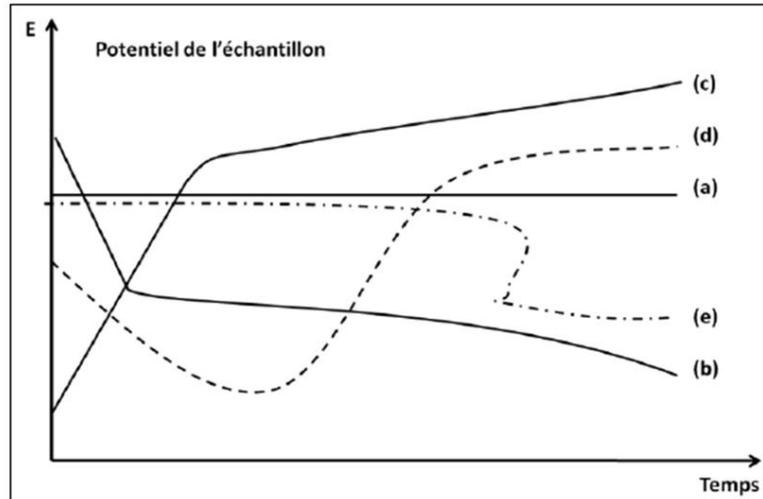


Figure II.20. Schéma de suivi du potentiel

- a): Le potentiel reste constant et l'interface ne se modifie pas avec le temps ;
- b) : Le potentiel diminue et le matériau devient moins noble progressivement sous l'influence d'une attaque persistente.
- c) : Le matériau se passive et s'anoblit finalement suite à l'augmentation du potentiel
- d) : La passivation est précédée d'une phase de corrosion accentuée
- e) : Bien que l'interface métal-environnement reste stable pour un certain temps, il peut se modifier subitement [49].

II.5.2. Mesures de La résistance de polarisation

L'obtention des courbes de polarisation est possible après l'installation d'une potentiostat ou d'une galvanostat branchée à un système à trois électrodes, avec une interface utilisateur bien-adaptée à l'instrumentation employée, Cette mesure de type électrochimique permet de suivre la corrosion en continu, Le principe de la méthode consiste à appliquer aux électrodes un voltage faible (± 30 mV) et à mesurer le courant correspondant : l'intensité du courant est reliée à la vitesse de corrosion

Les valeurs de résistance de polarisation ainsi obtenue sont automatiquement converties en vitesse de corrosion instantanée à partir d'étalonnage effectués au moyen de mesures gravimétrique.

II.5.3. Efficacités de l'inhibiteur

Par définition, un inhibiteur de corrosion est une substance chimique qui, lorsqu'elle est ajoutée en petite concentration à un environnement, diminue efficacement le taux de corrosion. L'efficacité de cet inhibiteur est ainsi exprimée par une mesure de cette amélioration. En général, l'efficacité d'un inhibiteur augmente avec une augmentation de la concentration d'inhibiteur, par ex. un inhibiteur typiquement bon donnerait 95% d'inhibition à une concentration de 0,008% et 90% à une concentration de 0,004%. Des inhibiteurs de corrosion nouveaux et de meilleure qualité ont été développés en raison de leurs performances dans des appareils de laboratoire élaborés, mais beaucoup n'ont pas obtenu des performances comparables sur le terrain. L'incapacité de transférer la performance de l'inhibiteur du laboratoire au champ reste un défi aujourd'hui. Cependant, la corrélation des performances en laboratoire et sur le terrain peut être possible une fois que les facteurs clés impliqués dans la chimie des inhibiteurs et la théorie de la corrosion sont pris en compte.

La valeur d'efficacité de l'inhibiteur est obtenue selon l'équation suivante :

$$Ef(\%) = \frac{R_{px} - R_{p0}}{R_{px}} \times 100$$

- R_{p0} : la solution blanche
- R_{px} : la solution d'une injection

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons bien préparé des échantillons d'acier A790, A53, X65 et X52. En utilisant les appareils et les produits appropriés, ainsi que toutes les étapes et procédures nécessaires, nous avons préparé une surface de contact qui contribue au succès de l'expérience et permet d'obtenir de bons résultats pour le rôle de l'inhibiteur sur les quatre échantillons d'acier.

***CHAPITRE III. Résultats et
discussions***

Dans ce chapitre, nous allons mettre en évidence, dans un premier lieu l'effet de l'ajout d'inhibiteur de corrosion en milieu agressif sur la protection des aciers au carbone (X52, X65, A53, A790). Ensuite, nous présenterons les différents résultats obtenus par les différentes techniques électrochimiques nécessaires pour évaluer l'efficacité d'inhibiteur de corrosion, telles que suivi de potentiel à circuit ouvert (OCP) et la mesure par la méthode de résistance de polarisation linéaire (R_p). Enfin, nous avons évalué l'effet d'inhibiteur a sur différents nuance d'acier.

III.1. Etude électrochimique des quatre aciers

III.1.1. Mesure de potentiel a circuit ouvert

Les figures (Figure III.1, Figure III.2, Figure III.3) représentent l'évolution du potentiel libre pour les aciers étudié. Les courbes obtenues durant l'essai sont des courbes à blanc (sans injection d'inhibiteur). L'évolution du potentiel libre pour l'essai réalisé sans injection de l'inhibiteur, caractérise la corrosion de l'échantillon avec formation d'un film de produits de corrosion dans milieu aqueux.

➤ **La courbe $E = f(T)$ de la nuance API 5L X52**

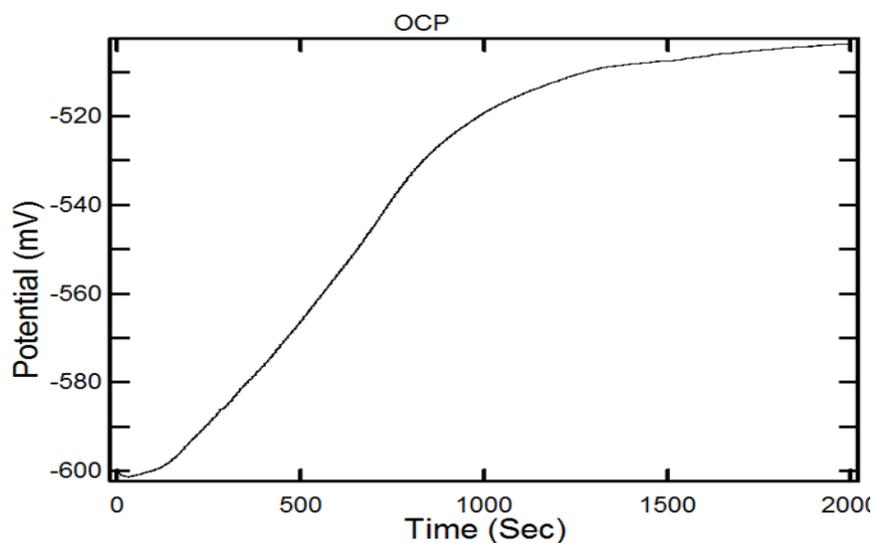


Figure III. 1. Potentiel de l'acier X52 en fonction du temps

➤ La courbe $E=f(T)$ de la nuance API 5L X65

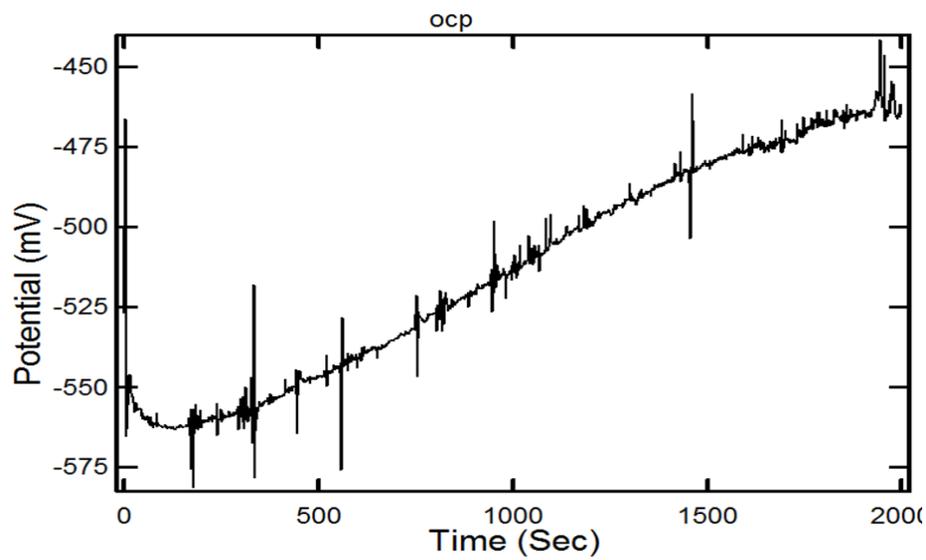


Figure III.2. Potentiel de l'acier X65 en fonction du temps

➤ La courbe $E=f(T)$ de la nuance ASTM A53

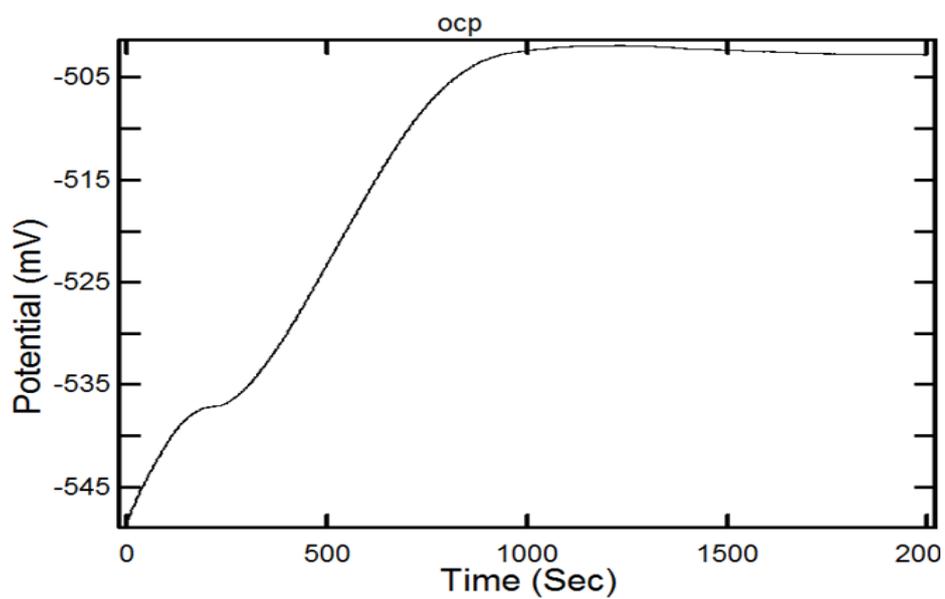


Figure III.3. Potentiel de l'acier A53 en fonction de temps

➤ Interprétations de potentiel libre

Les figures (Figure III.1, Figure III.2 et Figure III.3) montrent l'évolution du potentiel de corrosion libre des aciers dans le même milieu pendant 33 minutes d'immersion à température ambiante. Le potentiel de corrosion $E=E_{corr}$ est mesuré à courant nul ($I = 0$). En effet, le potentiel de corrosion augmente pendant les 2000 secondes. Ces évolutions sont attribuées à une dissolution initiale des aciers, suivie d'une stabilisation due à la formation d'un film protecteur de produits de corrosion sur la surface.

III.2.1. Technique de résistance de polarisation (LRP)

Cette technique permet de mesurer la vitesse de corrosion à partir de la résistance de polarisation, ainsi que les potentiels et les courants de corrosion. Les valeurs de la résistance de polarisation, obtenues en fonction de l'intensité du courant $E = f(I)$, pour un système comprenant une solution et des espèces chimiques de l'inhibiteur à différentes concentrations, appliquées sur des aciers au carbone de nuances X52, X65, A53 et A790, sont présentées dans les tableaux (Tableau III.1, Tableau III.2 et Tableau III.3). L'efficacité de l'inhibiteur est également reportée.

Les résistances de polarisation représentent l'aptitude d'un acier à empêcher le passage du courant dans un milieu donné dans un domaine de potentiel est égale ± 30 mV/ E_{corr} . Plus l'acier est résistant à la corrosion plus la résistance de polarisation est élevée. I_{corr} et R_p sont inversement proportionnels.

➤ Cas de l'acier X52

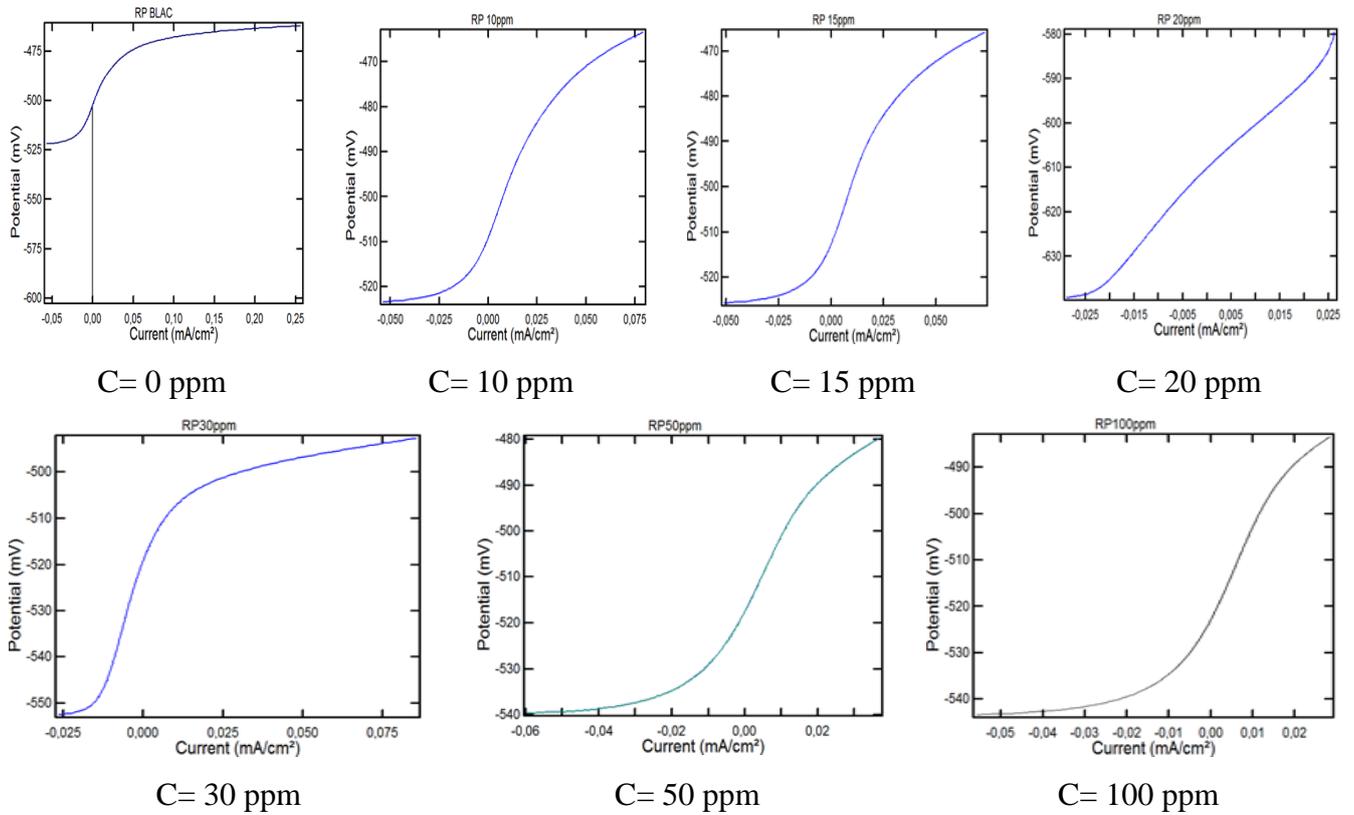


Figure III.4. Les courbes de LRP $E=f(I)$ à différent concentration de l'acier X52

Tableau III.1. Paramètres électrochimiques obtenus par la technique de la résistance de polarisation linéaire d'un acier au carbone nuance X52.

[C]	Rp	Vcorr	Icorr	Efficacité
ppm	Ohm.cm ²	Mm/an	Ma/cm ²	%
0	473.72	0.601	0.052	—
10	822.86	0.346	0.030	42.40
15	912.86	0.312	0.027	49.09
20	1084.4	0.262	0.023	56.32
30	1167.2	0.244	0.021	59.41
50	1323.7	0.215	0.019	64.21
100	1669	0.170	0.015	71.62

- **[C]** : la concentration de l'inhibiteur gaz en ppm.
- **R_p**: la résistance de polarisation en $K\Omega.Cm^2$.
- **V_{corr}**: la vitesse de corrosion en mm/ans.
- **I_{corr}**: le courant de corrosion en nA/cm^2 .
- Efficacité de l'inhibiteur de corrosion en (%).

➤ Cas de l'acier X65

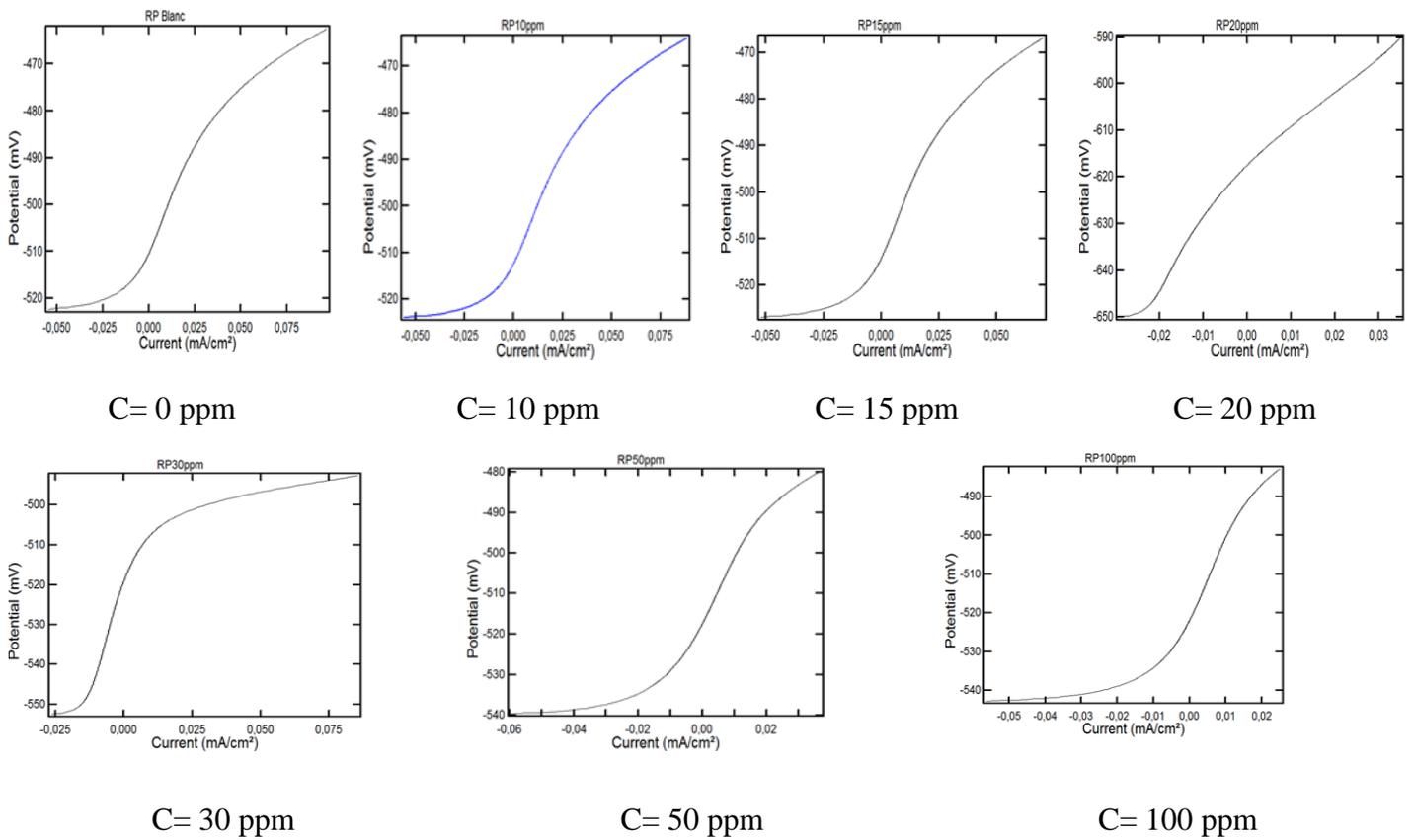


Figure III.5. Les courbes de LRP $E=f(I)$ à déferent concentration de l'acier X65

Tableau III.2. Tableau Paramètres électrochimiques obtenus par la technique de la résistance de polarisation linéaire d'un acier au carbone nuance X65

[C]	R _p	V _{corr}	I _{corr}	Efficacité
ppm	Ohm.cm ²	Mm/an	Ma/cm ²	%
0	650.13	0.438	0.038	–
10	710.25	0.401	0.035	8.46
15	865.34	0.329	0.028	24.86
20	978.37	0.291	0.025	33.54
30	1167.2	0.244	0.021	44.30
50	1323.7	0.215	0.019	50.89
100	1748.6	0.163	0.014	62.82

➤ Cas de l'acier A53

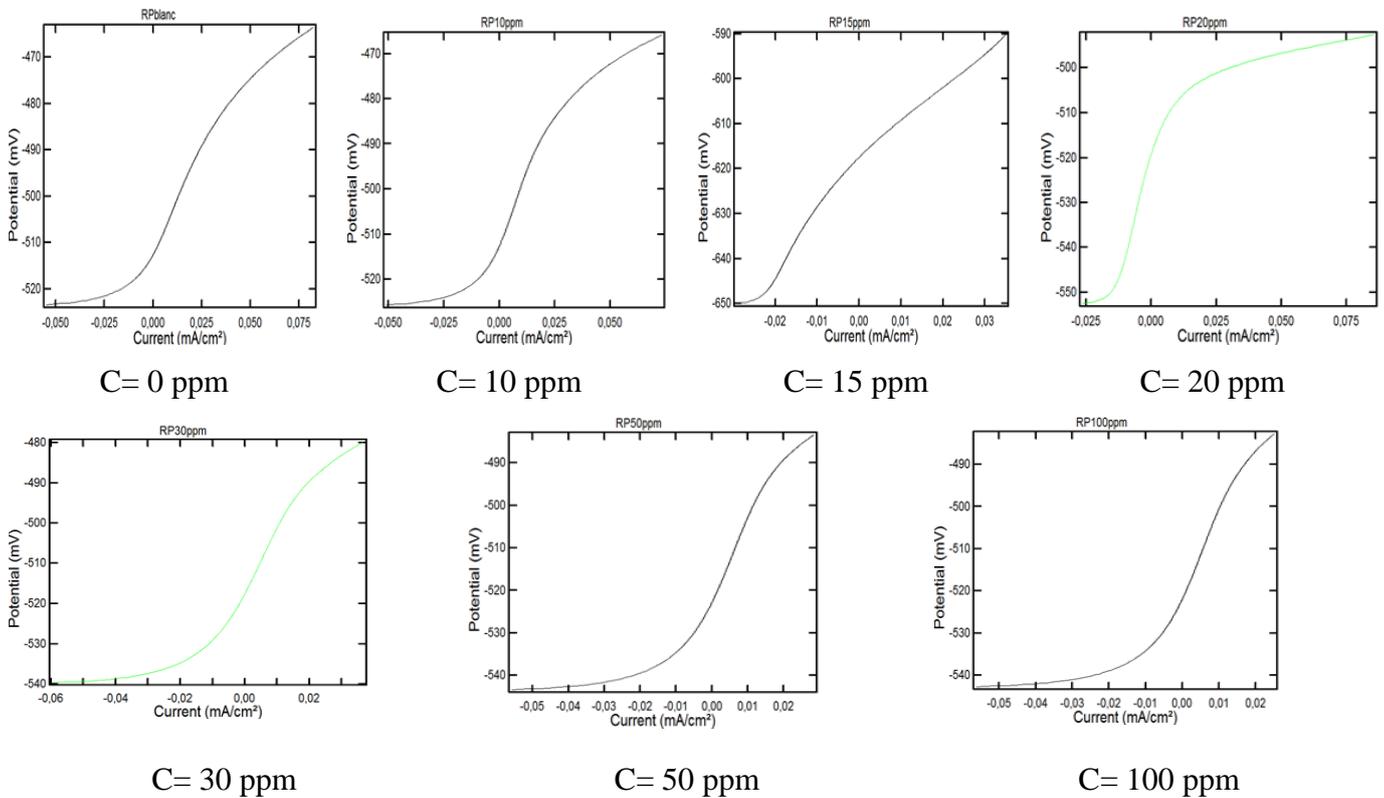


Figure III.6. Les courbes de LRP $E=f(I)$ à différent concentration de l'acier A53**Tableau III.3.** Paramètres électrochimiques obtenus par la technique de la résistance de polarisation linéaire d'un acier au carbone nuance A53

[C]	Rp	V corr	I corr	Efficacité
ppm	Ohm.cm ²	Mm/an	Ma/cm ²	%
0	743.71	0.383	0.033	–
10	908.16	0.313	0.027	18.11
15	1099.9	0.259	0.022	32.38
20	1214.9	0.234	0.020	38.78
30	1425.7	0.1996	0.017	47.84
50	1689.6	0.168	0.015	55.98
100	1834.5	0.155	0.013	59.46

Afin de faire une bonne comparaison entre les types d'acier étudiés, nous avons tracé les courbes graphiques suivantes, qui montrent l'évolution de la résistance de polarisation (Figure III.7), la vitesse de corrosion (Figure III.8), et l'efficacité de l'inhibiteur (Figure III.9, Figure III.10 et Figure III.11) en fonction de ce dernier pour les aciers X52, X65 et A53.

III.1.2.1. La résistance de polarisation

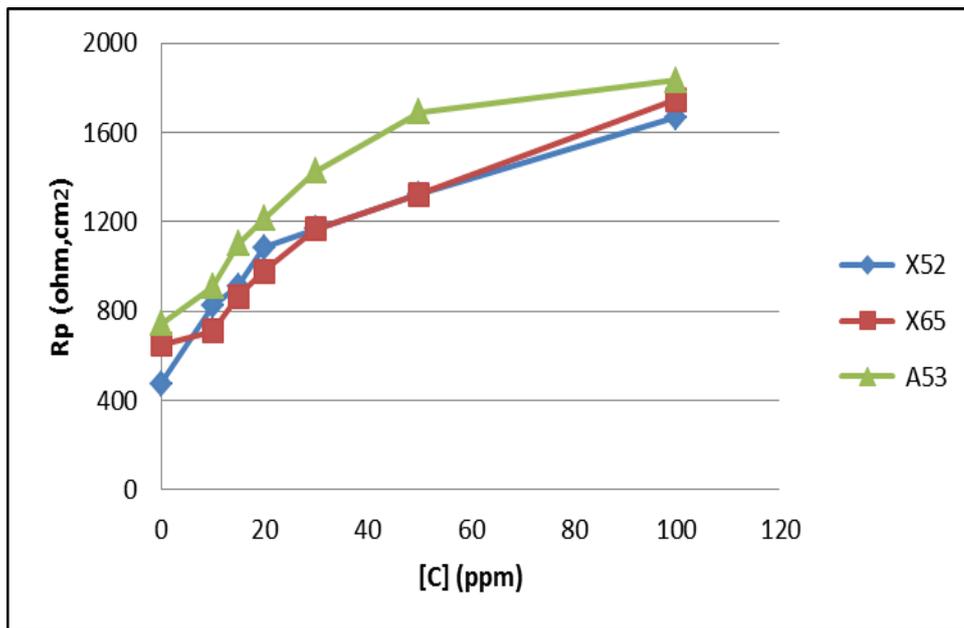


Figure III.10. La résistance de polarisation en fonction de concentration d'inhibiteur

Les résultats ont montré une légère différence entre les trois types d'acier, ce qui nous a permis d'atteindre les interprétations suivantes :

➤ **Interprétation :**

1- Avant l'injection de l'inhibiteur

L'acier A53 montre une résistance plus élevée de 743,71 ohms/cm² à 0 ppm, par rapport aux aciers X65 et X52, qui présentent respectivement des résistances de 650,13 ohms/cm² et 473,72 ohms/cm². Cela indique que l'acier A53 est le plus résistant à la corrosion parmi les échantillons étudiés.

2- Après l'injection

L'ajout d'inhibiteur a considérablement augmenté la résistance des échantillons, atteignant 1834,5 ohms/cm² pour l'acier A53, 1748,6 ohms/cm² pour l'acier X65, et 1669 ohms/cm² pour l'acier X52 à 100 ppm. Cette remarquable augmentation de la résistance de polarisation montre l'efficacité de l'inhibiteur utilisé.

III.1.2.2. La vitesse de corrosion

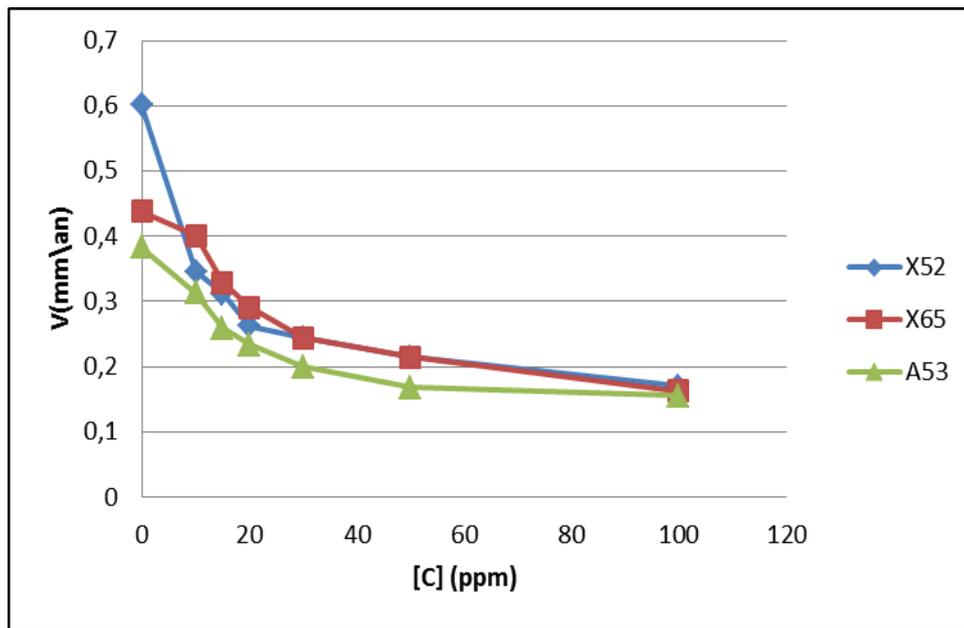


Figure III.11. La vitesse de corrosion en fonction de concentration d'inhibiteur

X52

Figure III.12. L'efficacité l'inhibiteur en fonction de concentration d'inhibiteur de l'acier X52

➤ **Interprétation :**

1- Avant l'injection de l'inhibiteur

L'acier A53 présente une vitesse de corrosion plus faible, avec une valeur de 0,383 (mm/an), comparativement aux aciers X65 et X52, qui montrent respectivement des vitesses de 0,438 (mm/an) et 0,601(mm/an). Cette différence est attribuée à la plus grande résistance de l'acier A53.

2- Après l'injection

La vitesse de corrosion a diminué pour les aciers X52, X65 et A53 avec l'injection d'inhibiteur. Pour X52, la vitesse de corrosion était la plus élevée à 0.601(mm/an), comparée aux autres échantillons, avant de chuter à 0.17 (mm/an) à 100 ppm. La vitesse de corrosion de X65 est passée de 0.438(mm/an) à 0.163(mm/an) entre 0 ppm et 100 ppm. Quant à l'acier A53, sa vitesse de corrosion a diminué pour atteindre 0.155 (mm/an), marquant la plus grande baisse parmi les échantillons. Ces résultats montrent l'efficacité de l'inhibiteur dans la réduction des vitesses de corrosion pour tous les types d'acier étudiés.

III.1.2.3. L'efficacité de l'inhibiteur

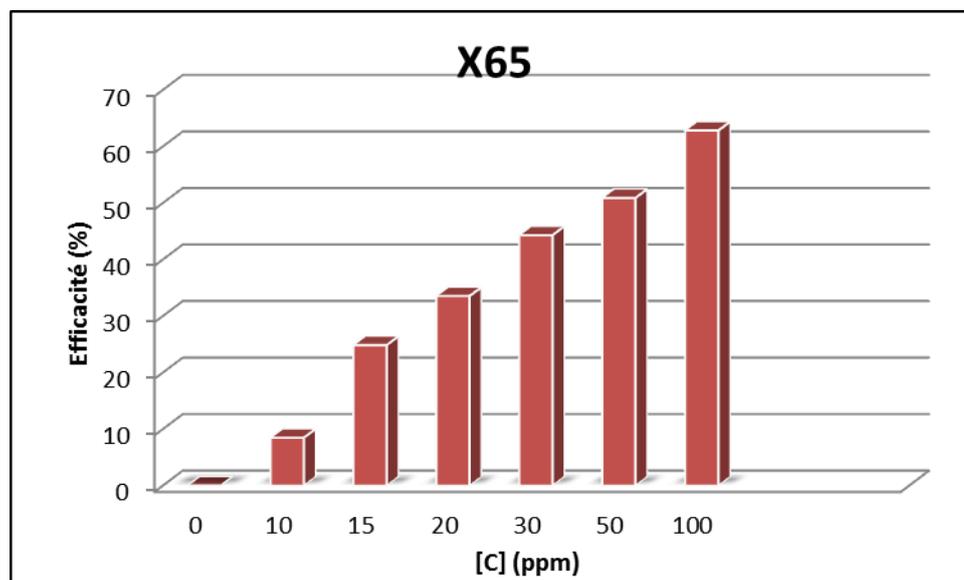


Figure III.13. L'efficacité l'inhibiteur en fonction de concentration d'inhibiteur de l'acier X65

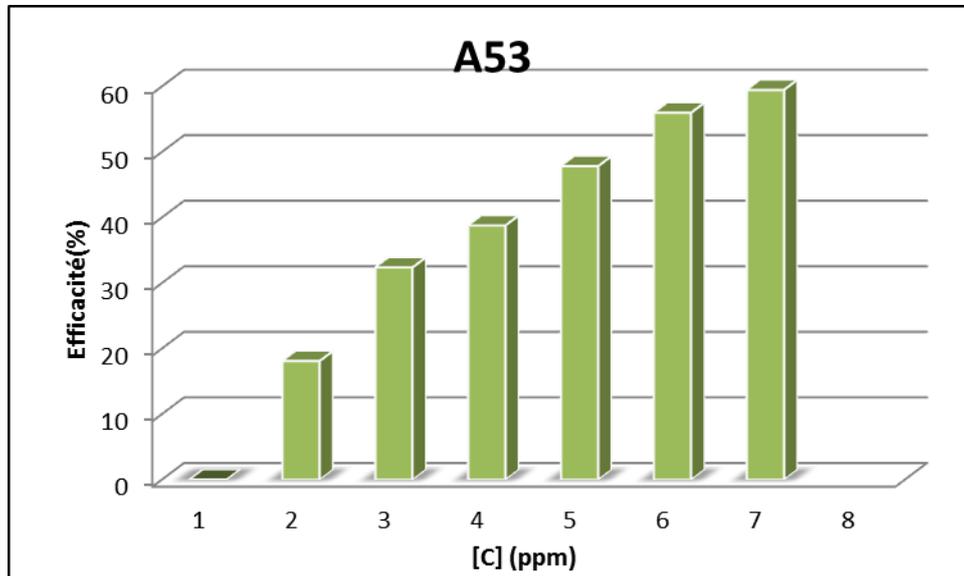


Figure III.14. L'efficacité l'inhibiteur en fonction de concentration d'inhibiteur de l'acier A53

➤ **Interprétation :**

L'efficacité de l'inhibiteur a montré une augmentation linéaire pour les trois aciers étudiés. L'acier X52 a présenté la plus grande efficacité de l'inhibiteur, atteignant 71,62% à 100 ppm. Les résultats pour les aciers X65 et A53 étaient initialement faibles, avec des efficacités de 8,46% et 18,11% respectivement, mais ont rapidement augmenté pour atteindre 62,82% et 59,46% à 100 ppm. L'efficacité inférieure de l'inhibiteur pour les aciers X65 et A53, comparée à l'acier X52, est due à leur plus grande résistance à la corrosion.

➤ **Cas de l'acier A790**

En raison de sa très haute résistance à la corrosion, l'acier A790 nécessite un temps considérable pour que les courbes d'efficacité des inhibiteurs correspondant à ce type d'acier se développent. Par conséquent, les résultats obtenus n'ont pas pu être utilisés de manière significative pour l'étude et l'interprétation.

III.2. Conclusion

Sur la base des résultats obtenus, après évaluation de l'efficacité de l'inhibiteur de corrosion produit sur quatre nuances d'acier de la région de GTFT (Gisement Tin Fouyé Tabankort) située à ILLIZI, en présence d'eau de gisement, nous constatons ce qui suit :

Pour les trois nuances d'acier au carbone (X52, X53 et X65), le produit testé atteint un taux de protection contre la corrosion entre 59.46% et 71.62% à une concentration de 100ppm. Les vitesses de corrosion obtenues par l'injection de 100 ppm d'inhibiteur de corrosion testé sont considérées comme étant modérée (selon la norme NACE SP0775-2013). Pour ce qui est des résultats concernant l'acier A790, l'essai n'a pas été concluant en raison de sa grande résistance à la corrosion.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons étudié le comportement électrochimique d'un inhibiteur de corrosion appliqué à trois types d'aciers : X52, X65 et A53, dans un environnement corrosif simulant l'eau de gisement. Les mesures ont été effectuées à l'aide de tests électrochimiques stationnaires, incluant la mesure du potentiel à circuit ouvert (OCP) et la résistance de polarisation linéaire (LRP).

La LRP est une méthode cruciale qui permet de quantifier des paramètres électrochimiques essentiels tels que la vitesse de corrosion et le courant de corrosion. Ces données sont essentielles pour évaluer l'efficacité de l'inhibiteur à prévenir la corrosion dans des conditions environnementales et industrielles spécifiques.

Les résultats obtenus par les méthodes électrochimiques ont montré que la vitesse de corrosion, liée à la densité de courant, diminuait avec l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur et avec le temps d'immersion. Cela met en évidence l'efficacité remarquable de l'inhibiteur de corrosion utilisé, où la cinétique des processus de corrosion est influencée par le transfert de charges. Pour les trois aciers au carbone X52, X65 et A53, l'inhibiteur utilisé a atteint un taux de protection contre la corrosion respectivement de 71,62%, 62,82% et 59,46% à une concentration de 100 ppm. Les vitesses de corrosion observées après l'ajout de 100 ppm d'inhibiteur de corrosion sont jugées acceptables, conformément à la norme NACE SP0775-2013. En ce qui concerne l'acier A790, l'essai n'a pas été concluant en raison de sa grande résistance à la corrosion.

L'avancement vers de nouvelles approches dans le domaine des inhibiteurs de corrosion non polluants devrait être encouragé, compte tenu de leur compatibilité et de leur coût potentiellement réduit. Ce domaine constitue un champ de recherche émergent pour mieux comprendre les mécanismes d'action des inhibiteurs de corrosion et pour déterminer leurs limites d'utilisation possibles, en particulier sous diverses conditions de température.

Cette étude souligne l'importance continue de la recherche pour développer des solutions de protection contre la corrosion plus efficaces et respectueuses de l'environnement, répondant ainsi aux besoins croissants des industries modernes.

Références bibliographiques

Références

[1] : Article : transport par canalisation qu'est-ce qu'un pipeline Posted on juillet 19, 2008 by sabcom

[2]: Pipeline Rules of Thumb Handbook: A Manual of Quick, Accurate Solutions to Everyday Pipeline Engineering Problems" de E.W. McAllister2005.page 525-546 / 417 474

[3] : A, KOUACHE. << Ammonium quaternaire du plat format : synthèse et application l'inhibition de la corrosion acide d'acier>>. Mémoire de magister, faculté des sciences de l'ingénieur, Université SAAD DAHLAB de BLIDA, ALGERIE (2011).107 P (7-24).

[4]: A.Samimi «Causes of Increased Corrosion in Oil and Gas Pipelines in the Middle East»
International Journal of Basic and Applied Science, Vol. 01, No. 03, Jan 2013, pp. 572-577

[5]: Brahim Takheroubt, nappe albiennne et ses mystères ». Le journal l'expression, le 13 novembre 2022.

[6] A, ACHOURI. «Caractérisations mécaniques et structurales d'un acier de construction des pipelines (API 5L X60) » Mémoire fin d'étude, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université de BISKRA, ALGERIE (2007) 46 p (p 6, 7,8)

[7] : G. Murry, « Aide-mémoire Métallurgie 2e édition Metaux. Alliages. Propriétés, Dunod, Paris, 2004, 2010.

[8] : J. Baralis & G. Maeder : Précis métallurgie, Nathan, Paris, 1997

[9] : AMY Zahia Caractérisation de l'acier inoxydable X5CrNi18-10 et étude de son oxydation à température. UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU 2

[10]: K. SAADI, « L'étude de l'effet thermique sur une soudure d'un pipeline; mémoire de master unive de biskra: 2012.

[11] : [http://cte.univ-setif.dz/cours en ligne/hamidouche1/metaux.html](http://cte.univ-setif.dz/cours%20en%20ligne/hamidouche1/metaux.html).5\4\2016 15:32

[12]: « Chemical Composition of Structural Steels » MIT Department of Civil and Environmental Engineering. Spring Semester, 1999

Références bibliographiques

[13] : K. mokrani « microstructure et caractérisation d'un acier BS2 » université de biskra juillet 2019

[14]: hu Yan, Tianle Li, Zigan m

edium-Mn steel School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Chine, 3 mars 2022.

[15]: Songyang Jing, Hua Ding a, b, Mingzhu Liu, « Rôle de l'élément Al dans l'adaptation de la stabilité mécanique austénitique et des propriétés de traction des aciers au Mn moyen » une école de science et d'ingénierie des matériaux, Northeastern University, Shenyang, 110819, Chine. , 5 juin 2022.

[16] : Bin Wang, Zhenyu Liu, Xiaoguang Zhou, Guodong Wang. R.D.K. Misra Comportement de précipitation de la cémentite à l'échelle nanométrique dans de l'acier au carbone à 0,17 % pendant un refroidissement ultra rapide (UFC) et un traitement thermomécanique (TMT) » State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, Chine, 20 décembre 2013.

[17] : Mingming Wang, Fucheng Zhang, Zhinan Yang Effets de la déformation à haute température et du processus de refroidissement sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un acier perlite à ultra haute résistance >> Laboratoire clé d'État de science et technologie des matériaux métastables, Université de Yanshan, Qinhuangdao 066004, Chine, 15 janvier 2017.

[18] : N. dokhan « cours: Diagramme binaire et applications» Université de boumerdès 2017-2018

[19] : C. Guedjali «étude de la formation des textures d'une tole mince d'acier doux destinee a la deformation complexe » universite scientifique mohamed seddik ben yahia –jijel 2019

[20] : A. Bouatrous « comportement à la corrosion d'un joint soudé en acier inoxydable super duplex a790 s32750 » ecole nationale superieure des mines et metallurgie ensmm-annaba. 2017

[21]: lksteelpipe.com <http://m.fr.lksteelpipe.com> › astm-a...ASTM A53 Gr.B Tubes en acier au carbone <https://www.google.com/url?q=http://m.fr.lksteelpipe.com/astm-a53-grb-carbon->

steel-pipe&sa=U&ved=2ahUKEwiazeOdLL

GAXUp9LsIHZY4Cz0QFnoECDIQAQ&usg=AOvVaw3eAthfpAg_0YJTAJ-elUbP

[22]: S.Gougue, S. Zidelmel, A.Rouibah, H.Tassi. «Comparative study on electrochemical corrosion of boronized X52 steel in 1M HCl and H₂SO₄ solutions» Metallurgical and Materials Engineering Association of Metallurgical Engineers of Serbia AMES. Research paper <https://doi.org/10.30544/829> .2022

[23]: M.ROBINEAU «Risques de corrosion associés à une interface hétérogène acier/matériau de remplissage/argilites : couplages galvaniques, cinétique et évolution dans le temps » Docteur de l'Université de La Rochelle, 12/12/2018

[24]: (Dr.Hakim BENSABRA) (cours de corrosion et protection des métaux) université de JIJEL 2016

[25] : BARBOURI « Essais de corrosion électrochimiques du monel dans l'eau de mer et l'étude préventive contre la corrosion dans l'unité de dessalement au complexe pétrochimique de SKIKDA » Mémoire fin d'étude, Institut national des industries alimentaires, ALGERIE (1995) 92 p.

[26] : Y.BERGER, « Corrosion et inhibiteurs des puits et collectes », Edition Technip, Paris, (1981).

[27]: X. Zhang, K. Xiao, C. Dong, J. Wu, X. Li Y. Huang, In situ Raman spectroscopy study of corrosion products on the surface of carbon steel in solution containing Cl⁻. Engineering Failure Analysis, Vol. 18 (2011), pp.1981-1989.

[28] : A, KOUACHE. << Ammonium quaternaire du plat format synthèse et application à l'inhibition de la corrosion acide d'acier >> Mémoire de magister, faculté des sciences de l'ingénieur, Université SAAD DAHLAB de BLIDA, ALGERIE (Octobre 2011) 107 P (p 7, 8, 10, 12, 16, 18, 19, 24).

[29] : B. Normand, N. Pébére, C. Richard, M.Wery, prévention et lutte contre la Corrosion, une approche scientifique et technique, édition presses polytechniques Et universitaires romandes, Italie (2004).

Références bibliographiques

- [30]: Boukhatalah .w et kharkhache. b Effet de la corrosion sur le transport et le stockage des hydrocarbures: Cas la station SP3à M'sila en Algérie N° /Ph ENR 09/2019.
- [31] : Sarala prasanna pattanaik. « Factures affecting corrosion & Corrosion Control Measures » 15 févr. 2021.
- [32] : Dr K. BOUHRIA «CORROSION ET PROTECTIONS DES METAUX» ; Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF 2022
- [33] : J. Benard, A. Michel, J. Philibert, J. Talbot. Métallurgie générale, Masson 329, 436(1969).
- [34]: C. natividad, r. garcia, v. h. lopez, r. galvan-martinez, m. salazar and a. contreras stress corrosion cracking assessment of api x65 steel non-conventionally heat treated 016, 67, no. 4. doi:10.1002/maco.201508566
- [35] : S, AOUALI et S, MEHALHAL. <<< Inhibition de la corrosion de l'acier ou carbone par l'extraite de déchets valorisable (noyaux d'olive) >>. Mémoire fin d'étude, faculté des sciences, université Dr. MOULAY TAHAR de SAÏDA, ALGERIE (2014). 47p (p6).
- [36] : P, BOMMERSBACH. << Évaluation des propriétés d'un film inhibiteur de corrosion ». Édition université européenne. P16.
- [37] : P, BOMMERSBACH. << Evolution des propriétés d'un film inhibiteur de corrosion sous l'influence de la température et des conditions hydrodynamiques ». Thèse de doctorat, école doctorale: Ecole doctorale Matériaux de LYON l'institut National des Sciences Appliquées de LYON, FRANCE. P (16-40.P154).
- [38] : M, Pakiet, Bogumil E, Brycki ,A, Szulc et O, Kaczerewska et I, H. kowalczyk « inhibiteurs de corrosion organiques.
- [39]: Khan G, Basirun WJ, Kazi SN, Ahmed P, Magaji L, Ahmed SM et al. Enquête électrochimique sur l'inhibition de la corrosion de l'acier doux par les composés de base Quinazoline Schiff dans une solution d'acide chlorhydrique. Journal de la science des colloïdes et des interfaces. septembre 2017;502:134- 145
- [40] : Oguzie EE, Li Y, Wang SG, Wang F. Comprendre les mécanismes d'inhibition de la corrosion - Approche expérimentale et théorique. Avances RSC. 2011;1(5):866

[41]: E. Abd El Aal, S. Abd El Wanees, A. Farouk, S. Abd El Haleem, Factors affecting the corrosion behaviour of aluminium in acid solutions. II. Inorganic additives as corrosion inhibitors for Al in HCl solutions, *Corrosion Science*, vol. 68, 14–24, 2013:

[42]: B. Mezhoud. << synthèse des inhibiteurs contre la corrosion des aciers >>. Mémoire de magister, faculté des sciences exactes, université mentouri de constantine, algerie (2011). 89p (p14).

[43] : N.DJEDDI «Adsorption des inhibiteurs à base d'extraits de plante sur une surface d'acier doux» SONATRACH-Division Production-Hassi-Messaoud, Algérie. Csc, Annaba, 09-11 Novembre 2014

[44]: X. Li, D. Shuduan, F. H. M. Guannan, Inhibition effect of 6-benzylaminopurine on the corrosion of cold rolled steel in H₂SO₄ solution. *Corros. Sci.*, 51 (2009) 620-634

[45] : AUDISIO, S., MAZILLE, H., SINICKI, C. (1984). Corrosion des métaux et alliages: corrosion et génie industriel (document de stage, formation continue), Centre d'actualisation scientifique et technique INSA-Lyon

[46]: KEDDAM, M., OLTRA, R., DURET-THUAL C. (2004). Contrôle et suivi de la corrosion: Tests et méthodes In NORMAND, B., PEBERE, N., RICHARD, C., WERY, M. Prévention et lutte contre la corrosion, Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 445-482, ISBN 2-88074-543-8

[47] : MENDIBIDE, C. (2003). Caractérisation de revêtements PVD nanostructurés à base de nitrures de métaux de transition pour application mécanique, Thèse génie de matériaux, Lyon: INSA de Lyon, 179pp, N° 05 ISAL 0039

[48]: BOMMERSBACH, P., ALEMANY-DUMONT C., MILLET J.P., NORMAND B. (2005). Formation and behaviour study of an environment-friendly corrosion inhibitor by electrochemical methods, *Electrochimica Acta*, 51, 6, 1076-1084.

[49] KEDDAM, M., MILLET, J.P. (2002). Caractérisation électrochimique de la corrosion, In BERANGER, G., MAZILLE, H., Corrosion des métaux et alliages-Mécanismes et phénomènes, Hermès Science Publication Paris: Lavoisier, 139-160, ISBN 2-7462-0466-5.