



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 20 août 1955 -SKIKDA
Faculté de Technologie
Département de Pétrochimie



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

Master

Filière: Industries Pétrochimiques

Spécialité: Génie Pétrochimique

Thème:

Inhibition de la corrosion de l'acier au carbone AISI 1020 par la Trimebutine et la Glutamine.

Réalisé par:

- Abdesselem Imad eddine
- Fernnana Rania

Encadré par:

.Dr-Kherraf Sihem

Année Universitaire 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

1438

Remerciements

Nous exprimons toutes nos gratitudees et nos sincères remerciements à Dieu, le tout puissant, qui grâce à lui nous avons pu réaliser cet humble travail.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et notre rapporteur M^{elle} Kherraf Sihem , docteur et maitre de conférences grade A à l'université de Skikda, on la remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire, nous la remercie d'avoir mis à notre disposition son temps et sa compétence.

Nous remercions très sincèrement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger ce travail.

Nous voudrions de même, exprimer nos sincères remerciements à madame Ladaycia Sana , ingénieur au laboratoire de Génie chimique et Environnement de Skikda (LGCES) et Madame Amira, ingénieur de laboratoire n°11 du Hall technologique pour leur aide.

Nous n'oublierons pas de remercier nos enseignants du département de pétrochimie qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à tous.



Dédicace

Je dédie ce travail à mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci beaucoup mes parents.

À mes tantes et mes oncles.

À mes cousins et cousines.

À tous mes chères amies proches.

Et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.



Rania

The page is decorated with watercolor-style floral illustrations. Large, light blue flowers with detailed centers are positioned in the top-left and top-right corners. In the bottom-left and bottom-right corners, there are smaller, more delicate flowers with purple and white petals and green leaves. The background is a plain, light color.

Dédicace

Je dédie ce travail

À mes chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin.

À mon oncle O. Amarra, et à toute ma famille.

À mes chers amis Amir, Raid, Rahim, Jalal, Khaled, Anoir, Samy, kadhero, Rayene, Manou, Pixou

Et bien sûr a moi pour toutes mes souffrances durant mes études.

Imad

المخلص

يعد استخدام المثبطات من أكثر الطرق استخدامًا لحماية المعادن من التآكل. الهدف من هذا العمل هو دراسة تثبيط تآكل الفولاذ AISI 1020 في وسط كلوريد الصوديوم بواسطة مثبطين قابلين للتحلل الحيوي هما الجلوتامين وتريمبوتين. أجريت هذه الدراسة بالطرق الكهروكيميائية (مطيافية المعاوقة الكهروكيميائية (EIS) ومنحنيات الاستقطاب) وطريقة الكتلة المفقودة. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن الفعالية التثبيطية للمثبطات المختبرة تعتمد على زمن الغمر وتركيز المثبط ودرجة الحرارة Trimebutine. هو أفضل مثبط، تصل كفاءته التثبيطية القصوى إلى حوالي 83.10٪ في وجود 5.326 جم / لتر في وسط التآكل. يلعب Trimebutine دور مثبط انوديك بينما يتمتع الجلوتامين بطابع كاثودي. تم تحقيق امتزاز جزيئات مثبط Trimebutine على سطح المعدن من خلال التفاعلات الكهروستاتيكية (الامتزاز المادي) عن طريق تكوين طبقة أحادية في واجهة المعدن / المحلول.

الكلمات المفتاحية: التآكل، الفولاذ الكربوني، درجة حرارة الامتزاز، فقدان الكتلة، مانع التآكل.

Résumé

L'emploi des inhibiteurs est l'une des méthodes les plus utilisées pour protéger les métaux contre la corrosion. L'objectif de ce travail est d'étudier l'inhibition de la corrosion de l'acier AISI 1020 dans le milieu de chlorure de sodium par deux inhibiteurs biodégradables à savoir la Glutamine et la Trimebutine. Cette étude a été réalisée par les méthodes électrochimiques (la spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) et les courbes de polarisation) et la méthode de la masse perdue. Les résultats obtenus montrent que l'efficacité inhibitrice des inhibiteurs testés dépend du temps d'immersion, de la concentration de l'inhibiteur et de la température. La Trimebutine est le meilleur inhibiteur, son efficacité inhibitrice maximale atteint une valeur de l'ordre de 83,10% en présence de 5.326 g/L dans le milieu corrosif. La Trimebutine joue le rôle d'un inhibiteur anodique alors que la Glutamine présente un caractère cathodique. L'adsorption des molécules inhibitrices de la Trimebutine sur la surface métallique est réalisée par des interactions électrostatiques (adsorption physique) en formant une monocouche à l'interface métal/ solution.

Mots clés : corrosion, acier au carbone, isotherme d'adsorption, perte de masse, inhibiteur de corrosion.

Abstract

The use of inhibitors is one of the most widely used methods to protect metals against corrosion. The objective of this work is to study the inhibition of corrosion of AISI 1020 steel in sodium chloride medium by two biodegradable inhibitors namely Glutamine and Trimebutine. This study was carried out by electrochemical methods (electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and polarization curves) and the lost mass method. The results obtained show the inhibitory effectiveness of the inhibitors tested depends on the immersion time, the concentration of the inhibitor and the temperature. Trimebutine is the best inhibitor, its maximum inhibitory efficiency reaches a value of around 83.10% in the presence of 5.326 g/L in the corrosive medium. Trimebutine plays the role of an anodic inhibitor while Glutamine has a cathodic character. Adsorption of Trimebutine inhibitor molecules on the metal surface is achieved by electrostatic interactions (physical adsorption) by forming a monolayer at the metal/solution interface.

Key words: corrosion, carbon steel, adsorption isotherm, mass loss, corrosion inhibitor.

Liste des symboles et des abréviations

PIB : Produit intérieur brut.

Ox : L'espèce oxydée (un oxydant) existant en solution.

Red : La forme réduite (réducteur).

pH : Potentiel d'hydrogène.

CSC : La corrosion sous contrainte.

E_{pass} : Potentiel de passivation.

E_{pit} : Potentiel de dépassivation ou de piqûration.

ISO 8044 : Organisation internationale de normalisation.

NACE : National Association of Corrosion Engineers.

C_{inh} : Concentration de l'inhibiteur.

K : Constante d'adsorption.

θ : Taux de recouvrement.

CE : Contre électrode.

R_p : Résistance de polarisation.

ER : Electrode de référence.

ECS : L'électrode au calomel saturée.

KHz : Kilo hertz.

mV : Milivolt.

R_s : Résistance de la solution corrosive.

CPE_{film} : L'élément à phase constante.

R_{film} : La résistance.

R_{tc} : Résistances de transfert de charge en absence de l'inhibiteur dans la solution corrosive.

R_{tc}^{inh} : Résistances de transfert de charge en présence de l'inhibiteur dans la solution corrosive.

i_{corr} , i_{corr}^{inh} : densité de courant de corrosion de l'acier.

v_{corr} : vitesse de corrosion sans inhibiteur.

Δm : Perte de masse (la différence entre la masse initiale m_1 et la masse finale m_2).

t : Temps d'immersion.

S : Surface du métal exposée à la solution d'étude.

$E_{gra}\%$: L'efficacité inhibitrice.

v_{corr}^{inh} : La vitesse de corrosion en présence d'inhibiteur.

ΔG_{ads}° : L'enthalpie libre standard d'adsorption.

.

.

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma récapitulatif de la corrosion	04
Figure I.2 : taux de corrosion dans les différents secteurs concernés par l'étude N.A.C.E.....	05
Figure I.3 : Mécanisme de la corrosion atmosphérique : exemple de la corrosion d'un collecteur d'échappement	06
Figure I.4 : Mécanisme de l'oxydation d'un métal à haute température.....	06
Figure I.5 : Réactions d'oxydo-réduction.....	07
Figure I.6 : Exemple de bactéries responsable de la corrosion bactérienne et corrosion dentaire.....	08
Figure I.7 : La corrosion généralisée.....	10
Figure I.8 : principe de la corrosion généralisée.....	10
Figure I.9 : La corrosion localisée	10
Figure I.10 : Corrosion inter granulaire.....	11
Figure I.11 : Corrosion par piqûres d'un acier inoxydable.....	12
Figure I.12 : Les différents aspects de la piqûre	12
Figure I.13 : Corrosion Caverneuse	13
Figure I.14 : Corrosion par aération différentielle	13
Figure I.15 : Corrosion galvanique	14
Figure I.16 : Exemple d'une pile galvanique	14
Figure II.17 : Potentiel de dissolution des métaux et alliages.....	14
Figure I.18 : Corrosion sélective du laiton (Cu-Zn)	15
Figure I.19 : principe de la Corrosion sélective du laiton (Cu-Zn)	15
Figure I.20 : Corrosion sous contrainte	16
Figure I.21 : Corrosion érosion d'un tube en cuivre véhiculant de l'eau	16
Figure I.22 : La fragilisation par hydrogène d'une pièce métallique	17
Figure I.23 : principe de la corrosion-frottement	17
Figure II.1 : Principe de corrosion, de passivation et d'immunité selon le diagramme de Pourbaix	20
Figure II.2 : Principes de la protection par anodes sacrificielles	21
Figure II.3 : exemple de la protection cathodique par anode sacrificielle	21

Figure II.4 : Exemple de la protection cathodique par courant imposé	23
Figure II.5 : Principe de la protection anodique passivable : déplacement. Du potentiel dans le domaine passif correspondant à : $E_{pass} < E < E_{pit}$	23
Figure II.6 : Schéma représentatif des différents types de revêtement	24
Figure II.7 : Cas de revêtement cathodique	25
Figure II.8 : Cas de revêtement anodique	26
Figure II.9 : Représentation schématique des modes d'adsorption de molécules organiques inhibitrices sur une surface métallique	31
Figure II.10 : Représentation en milieu « acide » du rôle d'un inhibiteur anodique : (a) sans inhibiteur, (b) avec inhibiteur	32
Figure II.11 : Représentation du rôle d'un inhibiteur cathodique, (a) sans inhibiteur, (b) avec inhibiteur	33
Figure II.12 : Inhibiteur formant une couche tridimensionnelle	33
Figure II.13 : diagramme d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion due à la présence d'un inhibiteur anodique, cathodique ou mixte	34
Figure II.14 : Schéma descriptif de l'adsorption physique	35
Figure III.1 : Courbes potentiel/temps d'immersion : $E=f(t)$	39
Figure III.2 : Courbe de polarisation $i=f(E)$ linéaire	40
Figure III.3: Courbe courant – tension donnant les droites de Tafel	41
Figure III.4 : Mesure de la résistance de polarisation	42
Figure III.5: Spectre d'impédance électrochimique dans le plan de Nyquist	42
Figure III.6: préparation de la solution corrosive.....	43
Figure III.7 : La Trimebutine.....	44
Figure III.8 : La Glutamine.....	44
Figures III.9 : Polissage des pièces métalliques.....	45
Figure III.10 : Essai de perte de masse d'un échantillon.....	46
Figure III.11 : Montage électrochimique	47
Figure IV.1 Diagrammes de Nyquist de l'acier AISI 1020 immergé dans la solution de NaCl 3% à en présence de différentes concentrations de a) la glutamine et b) la Trimebutine à 25°C.....	50
Figure IV.2 : circuit équivalent à l'interface métal/solution.....	51
Figure IV.3: courbes de polarisation de l'acier au carbone AISI 1020 dans la solution de chlorure de sodium 3% en absence et en présence de différentes concentrations de a) la	

glutamine et b) la Trimebutine à 25°C.....	53
Figure IV.4: Variation de la vitesse de corrosion de l'acier au carbone AISI 1020 en fonction de la concentration de a) la Glutamine et b) la Trimebutine et en fonction du temps d'immersion.....	56
Figure IV.5 : Variation du taux d'inhibition de a) la Glutamine et b) la Trimebutine en fonction de la concentration de l'inhibiteur à différents temps d'immersion.....	57
Figure IV.6 : Isothermes d'adsorption de de l'acier AISI 1020 en présence de la Trimebutine dans le milieu corrosif à 25°C.....	58
Figure IV.7: variation de la vitesse de corrosion en fonction de la température et la concentration de Trimebutine pendant une heure d'immersion dans la solution de chlorure de sodium.....	60
Figure IV.8: variation de l'efficacité inhibitrice en fonction de la température et la concentration de la Trimebutine pendant une heure d'immersion dans le milieu de chlorure de sodium.....	61

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Facteurs de la corrosion.....	09
Tableau III.1 : Composition chimique de l'acier au carbone AISI 1020.....	43
Tableau IV.1. Paramètres électrochimiques et efficacités inhibitrices déduits des diagrammes d'impédance de l'acier AISI 1020 dans NaCl 3% sans et avec addition des inhibiteurs.....	51
Tableau IV.2 : Les paramètres électrochimiques et l'efficacité inhibitrice déduits des courbes de polarisation de l'acier au carbone AISI 1020 immergé dans la solution NaCl 3% avant et après addition des inhibiteurs à différentes concentrations à 25 °C.....	54
Tableau IV.3 : coefficients de corrélation des isothermes d'adsorption.....	59
Tableau IV.4 : paramètres thermodynamiques relatives à l'adsorption de l'inhibiteur de Trimbutine sur l'acier AISI 1020.....	59

Sommaire

Introduction générale	01
Chapitre I : Généralités sur la corrosion	
I.1. introduction	03
I.2 Définition de la corrosion	03
I.3 Importance économique de la corrosion	04
I.4 Types de corrosion	05
I.4.1 La corrosion chimique	05
I.4.2 La corrosion électrochimique	06
I.4.3 La corrosion bactérienne	07
I.5. Facteurs de corrosion	09
I.6 Formes de corrosion	09
I.6.1 La corrosion généralisée	09
I.6.2 La corrosion localisée	10
I.6.2.1 Corrosion intergranulaire	11
I.6.2.2 Corrosion par piquêre	11
I.6.2.3 La corrosion caverneuse	12
I.6.2.4 Corrosion galvanique.....	13
I.6.2.5 La corrosion sélective	15
I.6.2.6. La corrosion sous contrainte (CSC)	15
I.6.2.7. Corrosion érosion	16
I.6.2.8 La corrosion par fatigue	16
I.6.2.9 La corrosion par fragilisation d'hydrogène	17
I.6.2.10 La corrosion-abrasion	17
I.6.2.11 La corrosion-frottement	17
I.7 Conclusion	18
Chapitre II : Méthodes de protection contre la corrosion	
II.1 Introduction	19
II.2 Méthodes de protection contre la corrosion	19
II.2.1 Prévention par un choix judicieux des matériaux	19
II.2.2 Protection par une forme adaptée des pièces	20
II.2.3 La protection électrochimique	20
II.2.3.1 Protection cathodique	20

II.2.3.1.1 protection cathodique par anode sacrificielle ou anode galvanique.....	21
II.2.3.1.2 Protection par courant imposé	22
II.2.3.2 Protection anodique	23
II.2.4 Protection par revêtements	24
II.2.4.1 Types de revêtement	24
II.2.4.1.1 Revêtements métalliques	25
a) Les revêtements cathodiques	25
b) Les revêtements anodiques	25
II.2.4.1.2 Les revêtements organiques	26
II.2.4.1.3 Revêtements non métalliques	27
II.2.5 Inhibition de la corrosion	27
II.2.5.1 Historique de l'inhibiteur	27
II.2.5.2 Définition d'un inhibiteur de corrosion	28
II.2.5.3 Fonctions essentielles	29
II.2.5.4 Conditions d'utilisation	29
II.2.5.5 Mode d'action des inhibiteurs de corrosion	29
II.2.5.6 Domaines d'utilisation des inhibiteurs	30
II.2.5.7 Classifications d'inhibiteurs	30
II.2.5.7.1 Classification selon la nature des molécules.....	30
a) Inhibiteurs organiques	30
b) Les inhibiteurs minéraux	31
II.2.5.7.2 Classification selon la réaction partielle	32
a) Inhibiteurs anodiques	32
b) Inhibiteurs cathodiques.....	32
c) Inhibiteurs mixte.....	33
II.2.5.7.3 Classification par mécanisme réactionnel.	34
a) Inhibiteurs d'adsorption.....	34
b) Inhibiteur agissant par passivation.....	36
c) Inhibiteurs de précipitation	36
II.2.5.7.4 Classification selon le domaine d'application	36
a) Inhibiteurs en milieu acide	36

b) Inhibiteurs en milieu neutre ou basique	37
II.2.5.9 Conclusion.....	37
Chapitre III : Conditions opératoires	
III.1 Introduction	38
III.2 Méthodes d'étude des inhibiteurs de corrosion	38
III.2.1 Méthode gravimétrique.....	38
III.2.2 Méthodes électrochimiques	38
III.2.2.1 Potentiel d'abandon ou de dissolution	38
III.2.2.2 Courbes de polarisation	39
III.2.2.2.1 Droites de Tafel	40
III.2.2.3 Résistance de polarisation	41
III.2.2.4 Spectroscopie d'impédance électrochimique	42
III.3 Conditions opératoires	43
III.3.1 Le substrat métallique	43
III.3.2 Milieu corrosif	43
III.3.3 Les inhibiteurs utilisés	43
III.3.4 Les essais de corrosion.....	45
III.3.4.1 Méthode gravimétrique (perte de masse)	45
III.3.4.1.1 Préparation des échantillons métalliques.....	45
III.3.4.1.2 Essai de perte de masse	45
III.3.4.2 Techniques électrochimiques	46
III.3.4.2.1 Appareillage utilisé	46
III.3.4.2.2 Conditions expérimentales	48
Chapitre IV : Résultats et discussions	
IV.1 Introduction	49
IV.2 Étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier au carbone AISI 1020 dans la solution de chlorure de sodium 3%	49
IV.2.1 Spectroscopie d'impédance électrochimique.....	49
IV.2.2 Courbes de polarisation	52
IV.2.3 Méthode de la perte de masse	55
IV.2.3.1 Effet de la concentration de l'inhibiteur et le temps d'immersion sur la vitesse de corrosion de l'acier au carbone AISI 1020	55

IV.2.4 Isotherme d'adsorption	58
IV.2.5 Effet de la température	60
IV.3 Conclusion.....	61
Conclusion générale.....	62

Introduction générale

Introduction générale

La corrosion métallique est un phénomène qui existe depuis que l'homme a réussi à préparer des métaux qui ne se trouvaient pas à l'état pur dans la nature. Elle résulte d'une action chimique ou électrochimique d'un environnement sur les métaux et les alliages. On peut d'ailleurs noter que la corrosion ne fait que conduire à l'état originel du métal, celui-ci existant dans la nature sous forme d'oxydes, de sulfures ou de carbonates, à l'exception de ceux qui, comme le platine, l'or, peuvent être trouvés dans le sol à l'état métallique. Ces phénomènes d'altération engendrent une dégradation rapide des ouvrages métalliques. En conséquence, l'industrie subit des pertes économiques énormes pour le remplacement des pièces endommagées. Les coûts directs et indirects associés aux effets de la corrosion sont difficiles à évaluer. Ils incluent notamment ceux liés à l'augmentation de l'entretien des structures altérées et la perte de temps de production de certaines entreprises [1].

En raison de l'importance des dommages causés par la corrosion, de nouveaux défis se présentent aujourd'hui, à savoir le développement de technologie de protection plus sûre non nuisible à l'environnement et économiquement rentable. La protection contre cette dernière comprend une panoplie de traitements telle que la protection cathodique, les traitements de surface ou encore la modification du milieu corrosif par ajout d'inhibiteurs de corrosion. Ce sont des substances qui, lorsqu'elles sont ajoutées à de faibles concentrations dans des milieux corrosifs, diminuent ou empêchent la réaction du métal avec son environnement [2]. Ils peuvent être destinés soit à une protection permanente de la pièce, soit à une protection provisoire, notamment lorsque la pièce est particulièrement sensible à la corrosion ou lorsqu'elle est exposée à un milieu très agressif [3]. Les performances recherchées des inhibiteurs de corrosion s'évaluent en termes de protections à la fois métallique et environnementale. En effet, les nouvelles directives européennes concernant les rejets industriels étant de plus en plus sévères en termes d'écologie. La mise au point d'inhibiteurs de corrosion éco-compatibles et biodégradables devient de nos jours un enjeu important.

Introduction générale

L'objectif de notre travail est d'étudier l'inhibition de la corrosion de l'acier au carbone AISI 1020 dans le milieu de chlorure de sodium (NaCl 3%) par deux inhibiteurs biodégradables et non toxiques, à savoir la Trimebutine et la Glutamine.

Le travail présenté dans ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente des généralités sur la corrosion.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des méthodes de protection contre la corrosion.
- Le troisième chapitre décrit tous les conditions expérimentales adoptées pour réaliser ce travail.
- Le quatrième chapitre rassemble les résultats obtenus et leurs interprétations.
- Le travail est terminé par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus.

Chapitre I

Généralités sur la corrosion

I.1. introduction

La corrosion sur toutes ses formes constitue un enjeu majeur pour nos civilisations industrielles pour plusieurs raisons. Son impact économique, prenant en compte le coût engendré par les dégradations et le remplacement des équipements hors d'usage, a été évalué à 3% du PIB. Par ailleurs les conséquences directes ou indirectes de la corrosion peuvent impacter durablement notre environnement et notre santé.

Par exemple les conséquences de la rupture de composants dans les industries ou dans les installations chimiques ont malheureusement alimenté à maintes reprises les rubriques « dommage majeurs » de nos écosystèmes planétaires. Plus proche de chacun, nos ustensiles de cuisson doivent être conçus pour éviter des relargages d'éléments pouvant influencer sur notre santé, enfin, la résistance à la corrosion est devenue un impératif pour le développement de la plupart des technologies nouvelles [4].

I.2 Définition de la corrosion

Selon le point de vue de l'ingénieur constructeur, la corrosion est une dégradation du matériau ou de ses propriétés par réaction chimique avec l'environnement. Cette définition admet que la corrosion est un phénomène nuisible: elle détruit le matériau ou réduit ses propriétés, le rendant inutilisable pour une application prévue [5].

La corrosion est maintenant définie par la norme ISO 8044 comme une « interaction physico chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et pouvant conduire à une dégradation significative de la fonction du métal, du milieu environnant ou du système technique dont ils font partie [6].

Les produits de corrosion peuvent être solides, liquides ou gazeux. Les propriétés physiques et chimiques de ces produits sont importantes, car elles influencent ensuite la vitesse de la réaction [7].

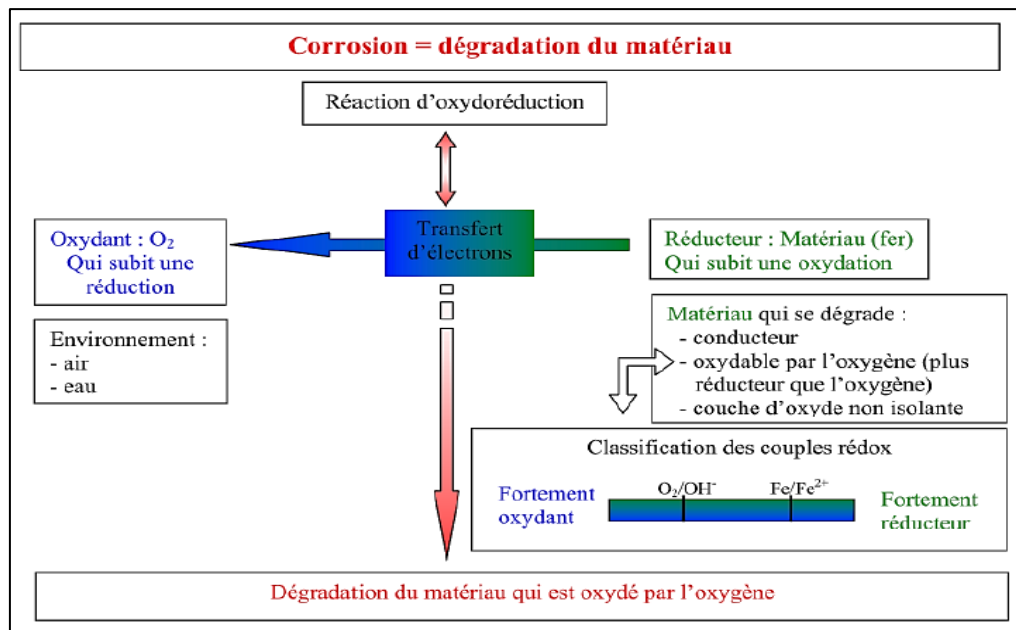


Figure I.1 : Schéma récapitulatif de la corrosion [8].

I.3 Importance économique de la corrosion

La corrosion des métaux implique plusieurs conséquences techniques et économiques dommageables. La plus évidente réside dans le gaspillage de matière entraîné par la corrosion elle-même, ou indirectement par la nécessité de surdimensionner des installations pour garantir le maintien des propriétés mécaniques inscrites au cahier des charges [9].

- **les pertes directes**

Le remplacement des matériaux corrodés et des équipements dégradés par la corrosion;

- **les pertes indirectes**

- réparations, pertes de production;
- les mesures de protection; utilisation de matériaux plus chers résistant à la corrosion, de revêtements et de protection cathodique;
- les mesures de prévention; surdimensionnement des structures porteuses, inspections, entretiens [6].

Les dégâts causés par la corrosion semblent donc inévitables et sont extrêmement élevés :

- Perte mondiale de matériaux de 5 tonnes par seconde due seulement à la corrosion humide.

- 138 milliards aux Etats Unis d'Amérique en 1998 ! Ce chiffre (publié par la N.A.C.E) incluent seulement les secteurs réellement concernés par l'étude ; soit :

- Production industrielle et agriculture: 12.8% ;
- Transport : 21.5% ;
- Infrastructures : 16.4% ;
- Distributions : 34.7% ;
- Gouvernement : 14.6%.

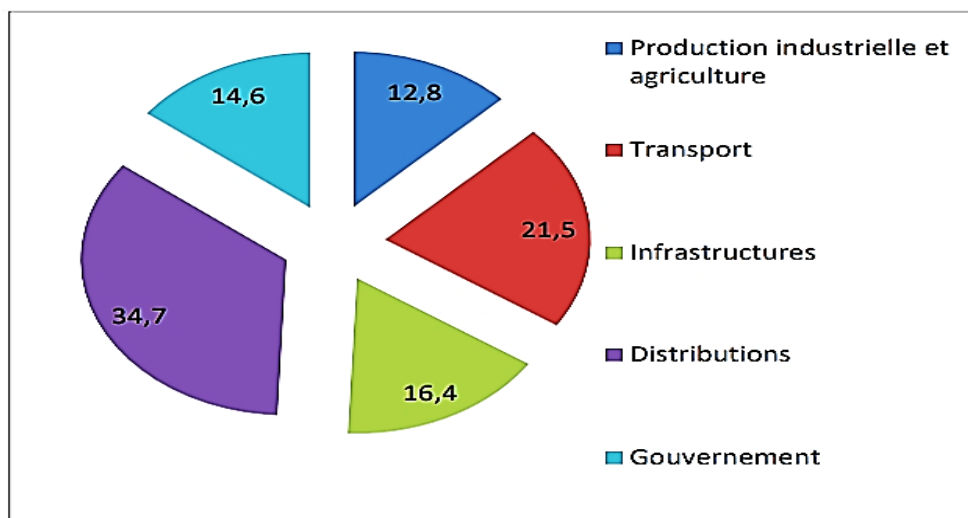


Figure I.2 : taux de corrosion dans les différents secteurs concernés par l'étude N.A.C.E [10].

Par extrapolation à l'ensemble de l'industrie Américaine, la N.A.C.E estime que le cout total de la corrosion atteint le chiffre de 276 milliards de dollars, soit 3.14% du P.N.B (8.79 trillion de dollars). Ces deux chiffres suffisent à eux seuls à démontrer l'ampleur des pertes occasionnées par la corrosion [10].

I.4 Types de corrosion

En général on peut résumer les différents processus de la corrosion comme ci-dessous :

I.4.1 La corrosion chimique

Il s'agit d'une réaction purement chimique entre la surface d'un matériau et un gaz ou un liquide non électrolyte [11].

Ce type de corrosion ne fait pas intervenir un passage de courant, elle se développe sans échange d'électrons entre un métal et un oxydant [9,12].

Au cours de la corrosion chimique, l'oxydation du métal et la réduction de l'oxydant se font en une seule action, c'est-à-dire les atomes du métal forment directement des liaisons chimiques avec l'oxydant qui arrache les électrons de valence des atomes métalliques [13].



Figure I.3 : Mécanisme de la corrosion atmosphérique : exemple de la corrosion d'un collecteur d'échappement [14].

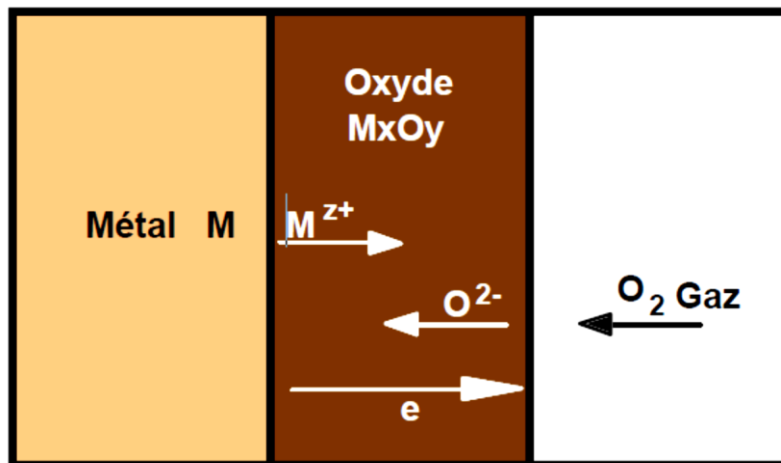


Figure I.4 : Mécanisme de l'oxydation d'un métal à haute température [10].

1.4.2 La corrosion électrochimique

La corrosion électrochimique est essentiellement l'oxydation d'un métal sous forme d'ions ou d'oxydes. Elle se produit par des transferts électroniques entre un métal et une solution électrolytique à son contact (circulation d'un courant électrique). Elle nécessite la présence d'un oxydant ; H_2O , $H_2...$. Sans celui-ci, la corrosion du métal (réaction anodique) ne peut se produire.

Dans la corrosion électrochimique la réaction cathodique et la réaction anodique sont indissociables. Elles se produisent simultanément.

Dans la zone anodique, il se produit la réaction d'oxydation du métal avec formation de cations (dissolution) selon la réaction (I.1) [15,16].



Dans la zone cathodique, il se produit la réaction de réduction de l'oxydant selon la réaction suivante [12]:

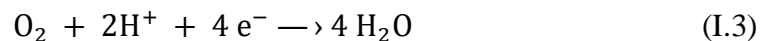


Les réactions cathodiques possibles sont :

- Dans le milieu acide (pH < 5) désaéré



- Dans le milieu acide aéré:



- Dans les milieux alcalins ou neutres (6.5 < pH < 8.5) aérés [16]:

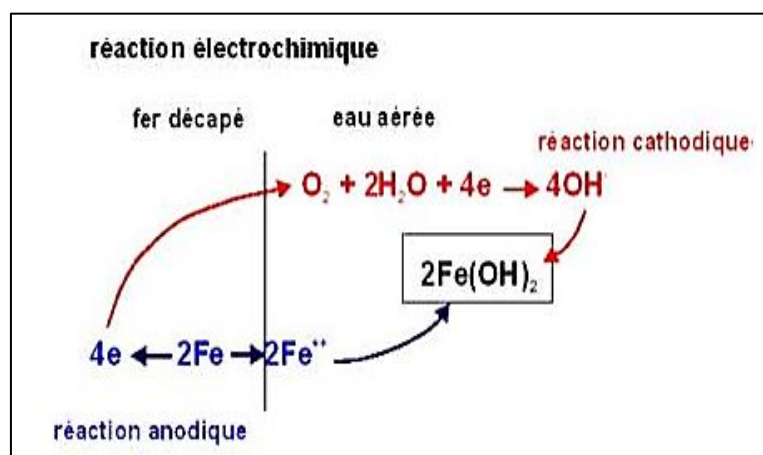


Figure I.5 : Réactions d'oxydo-réduction [17].

1.4.3 La corrosion bactérienne

La corrosion bactérienne est due à la présence de colonies importantes de bactéries dites anaérobiques qui se développent dans les eaux contenant des sulfates [18].

C'est le type d'attaque des matériaux métalliques, en particulier dans les canalisations enterrées et les réservoirs [6].

Les microorganismes agissent sur le procédé de corrosion, d'une ou de plusieurs façons :

- Par action directe sur le taux de réaction anodique ou cathodique.
- Par création des milieux corrosifs.
- Par croissance et multiplication des micro-organismes, qui favorisent la création des cellules électrolytiques à la surface [17].

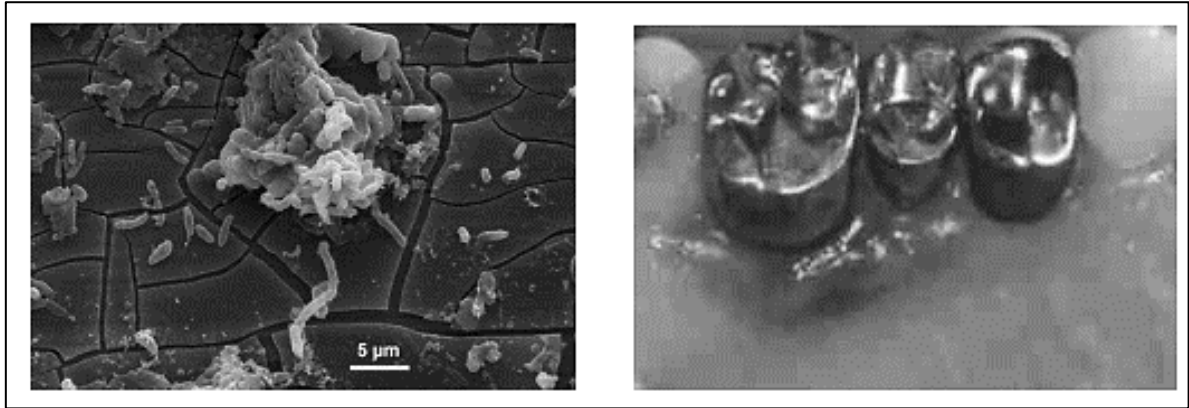


Figure I.6 : Exemple de bactéries responsable de la corrosion bactérienne et corrosion dentaire [14].

1.5. Facteurs de corrosion

Quelques facteurs influençant la corrosion :

Tableau I.1 : Facteurs de la corrosion [19].

Facteurs définissant le mode d'attaque	Facteurs métallurgiques	Facteurs définissant les conditions d'emploi.	Facteur dépendant du temps.
- Concentration du réactif. - teneur en oxygène - pH du milieu -addition d'inhibiteurs - température - pression	- composition de l'alliage -procédé d'élaboration -impuretés -traitements thermiques -traitements mécaniques -addition protectrice.	- état de surface -forme des pièces -sollicitations mécaniques -emploi d'inhibiteurs -procédés d'assemblage	- Vieillessement -tension mécanique -température -modification des revêtements protecteurs

1.6 Formes de corrosion

1.6.1 La corrosion généralisée

La corrosion généralisée est la forme de corrosion la plus répandue et peut être détectée longtemps avant qu'un ennui vienne interrompre la vie de la structure métallique [20].

Ce type de corrosion constitue la dissolution quasi uniforme de tous les points constitutifs de la surface d'un matériau qui sont attaqués sensiblement à la même vitesse par le milieu corrosif. Dans ce mode de corrosion on ne distingue pas, à l'échelle macroscopique, les lieux cathodiques des lieux anodiques. La conséquence de la corrosion uniforme est une diminution régulière de l'épaisseur [17,21].



Figure I.7 : La corrosion généralisée [3].

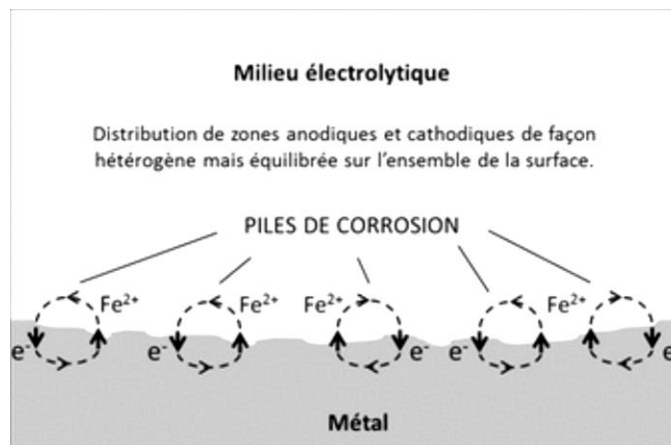


Figure I.8 : principe de la corrosion généralisée [10].

1.6.2 La corrosion localisée

La corrosion localisée est la forme la plus insidieuse. Elle survient sur une partie du métal qui représente un lieu spécifiquement anodique, clairement distingué, dont la surface est très faible devant le reste de la structure métallique qui constitue la zone cathodique.

En pratique, la corrosion localisée provient d'une hétérogénéité du matériau ou de l'environnement. Elle pose souvent plus de problèmes que la corrosion uniforme [21].

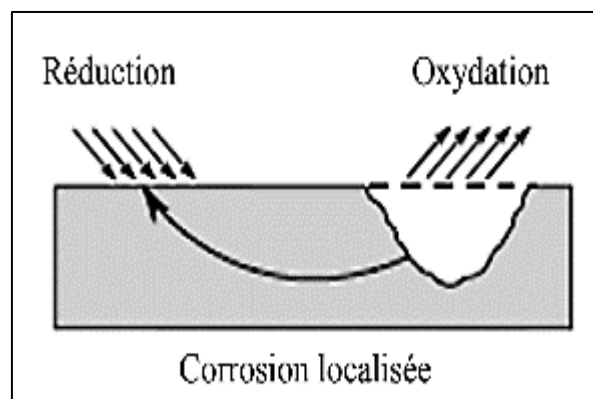


Figure I.9 : La corrosion localisée [3].

1.6.2.1 Corrosion intergranulaire

Elle se manifeste aux joints de grains. Elle est due en général à la précipitation d'une phase ou à la formation préférentielle d'un produit de corrosion aux joints de grains [22]. C'est un type de corrosion particulièrement dangereux car, bien que la quantité de métal attaquée soit faible, les caractéristiques mécaniques du métal sont altérées car les fissures ainsi produites affaiblissent le métal [20].

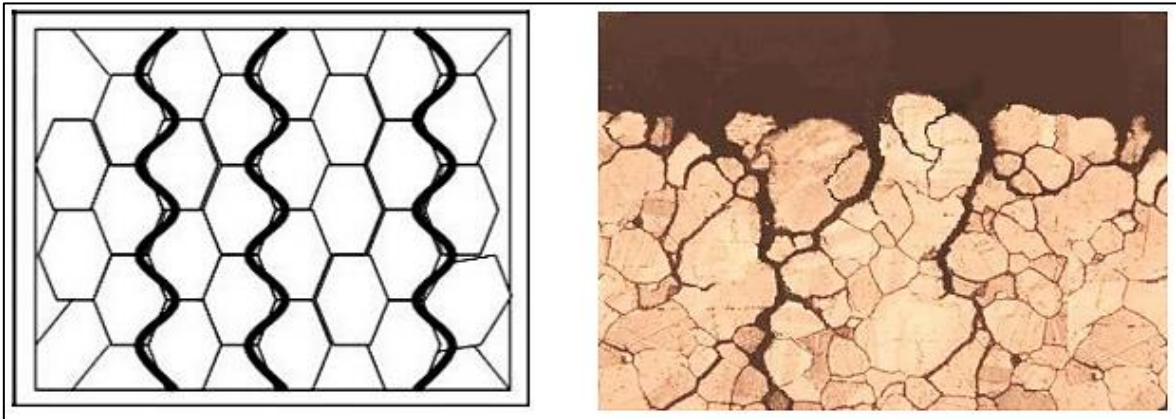


Figure I.10 : Corrosion inter granulaire [3].

1.6.2.2 Corrosion par piqûre

C'est une forme de corrosion localisée produite par certains anions, notamment les halogènes et plus particulièrement les chlorures, sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince [11,20]. Elle induit typiquement des cavités de quelques dizaines de micromètres de diamètre [21]. Le nombre et la forme des piqûres de corrosion varient selon les conditions expérimentales où se trouvent des piqûres profondes montrant une attaque cristalline, des piqûres occluses et des piqûres hémisphériques brillantes. La dimension de piqûres varie de quelques micromètres à quelques millimètres [23].

La corrosion par piqûres affecte en particulier les métaux ou les alliages passivés (aciers inoxydables, les alliages d'aluminium). Cette forme de corrosion comprend au moins deux étapes, l'amorçage qui se produit lors de la rupture locale de la passivité et la croissance ou propagation [11]. La corrosion par piqûres est particulièrement insidieuse. L'attaque se limite à des trous de très petit diamètre, et pouvant progresser rapidement en profondeur alors que le reste de la surface reste indemne. Une installation perforée en quelques jours sans qu'une perte en poids appréciable de l'ensemble de la structure apparaisse [24].



Figure I.11 : Corrosion par piqûres d'un acier inoxydable [25].

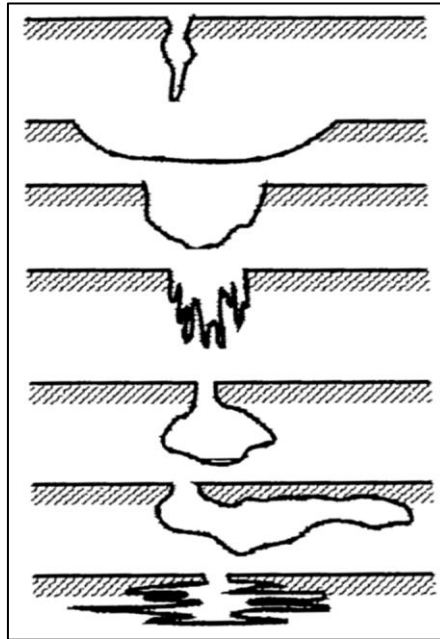


Figure I.12 : Les différents aspects de la piqûre [10].

1.6.2.3 La corrosion caverneuse

La corrosion caverneuse peut se produire à l'intérieur de zones confinées créées par la conception de la pièce ou par les conditions d'utilisation, le mécanisme de la corrosion caverneuse est relativement complexe. L'étape d'initiation est la formation d'une pile d'aération différentielle due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux zones d'une structure métallique. Entre la zone confinée et la zone externe, il y a alors une attaque des parties métalliques les moins accessibles à l'oxygène [22,26].

La première recommandation pour éviter la corrosion caverneuse est d'optimiser la conception de la pièce de façon à éviter toute caverne artificielle. Une caverne artificielle peut être créée par un joint mal fixé, une soudure non abrasée ou mauvaise, des dépôts, des interstices entre deux tôles etc... [23].



Figure I.13 : Corrosion Caverneuse [3].

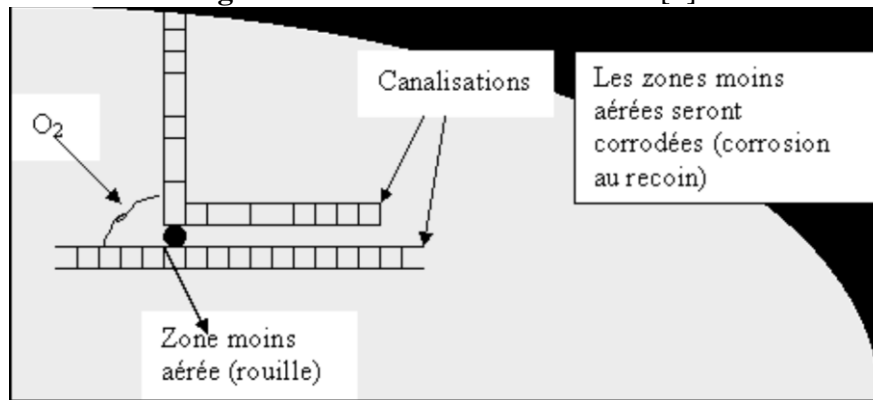


Figure I.14 : Corrosion par aération différentielle [10].

1.6.2.4 Corrosion galvanique

La corrosion galvanique est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux différents plongés dans un électrolyte. Si ces métaux sont en contact (c'est-à-dire connectés électriquement), un courant électrique s'établit. Le métal le moins noble (polarisé négativement) joue le rôle d'anode et se corrode [3].

Dans la très grande majorité des cas, cette configuration correspond à une augmentation de la vitesse de corrosion du métal le plus corrodable (le plus négatif) et à une diminution de la vitesse de corrosion du métal le moins corrodable (le plus positif) [22]. L'attaque peut être considérée comme localisée à un endroit précis, mais la forme de l'usure est généralisée [3].

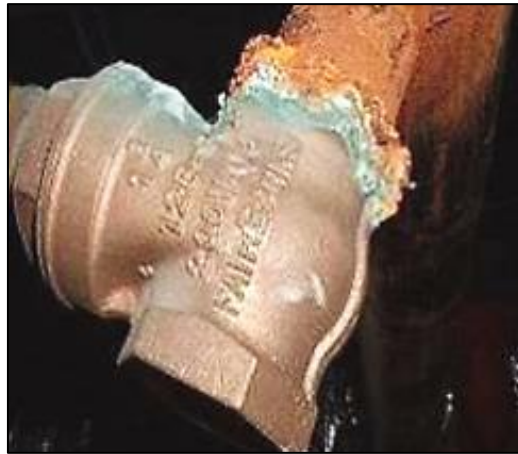


Figure I.15 : Corrosion galvanique [17].

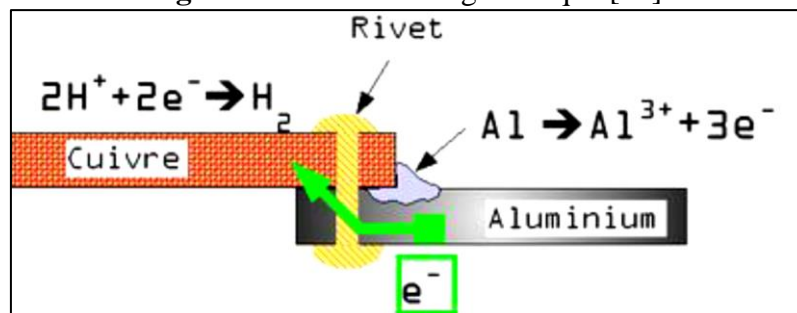


Figure I.16 : Exemple d'une pile galvanique [10].

Réaction	Potentiel standard d'équilibre E_0 par rapport à l'électrode à hydrogène, à 25°C (V)
$Au \rightleftharpoons Au^{3+} + 3 e$	+ 1,50
$2 H_2O \rightleftharpoons O_2 + 4 H^+ + 4 e$	+ 1,23
$Pt \rightleftharpoons Pt^{2+} + 2 e$	+ 1,19
$Ag \rightleftharpoons Ag^+ + e$	+ 0,80
$4 OH^- \rightleftharpoons O_2 + 2 H_2O + 4 e$	+ 0,40
$Cu \rightleftharpoons Cu^{2+} + 2 e$	+ 0,34
$H_2 \rightleftharpoons 2 H^+ + 2 e$	0
$Pb \rightleftharpoons Pb^{2+} + 2 e$	- 0,13
$Sn \rightleftharpoons Sn^{2+} + 2 e$	- 0,14
$Ni \rightleftharpoons Ni^{2+} + 2 e$	- 0,25
$Cd \rightleftharpoons Cd^{2+} + 2 e$	- 0,40
$Fe \rightleftharpoons Fe^{2+} + 2 e$	- 0,44
$Cr \rightleftharpoons Cr^{3+} + 3 e$	- 0,74
$Zn \rightleftharpoons Zn^{2+} + 2 e$	- 0,76
$Al \rightleftharpoons Al^{3+} + 3 e$	- 1,67
$Mg \rightleftharpoons Mg^{2+} + 2 e$	- 2,37
$Na \rightleftharpoons Na^+ + e$	- 2,71

Figure II.17: Potentiel de dissolution des métaux et alliages.

1.6.2.5 La corrosion sélective

La corrosion sélective correspond à l'oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse [3].

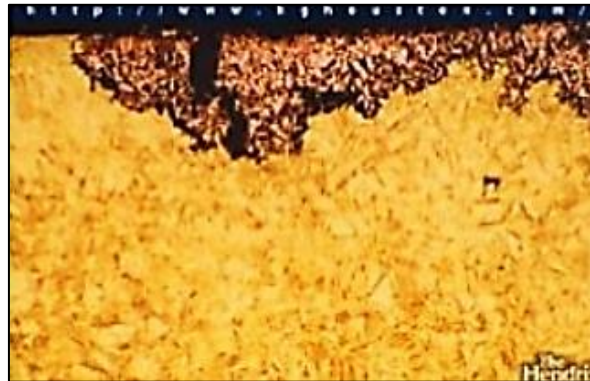


Figure I.18 : Corrosion sélective du laiton (Cu-Zn) [23].

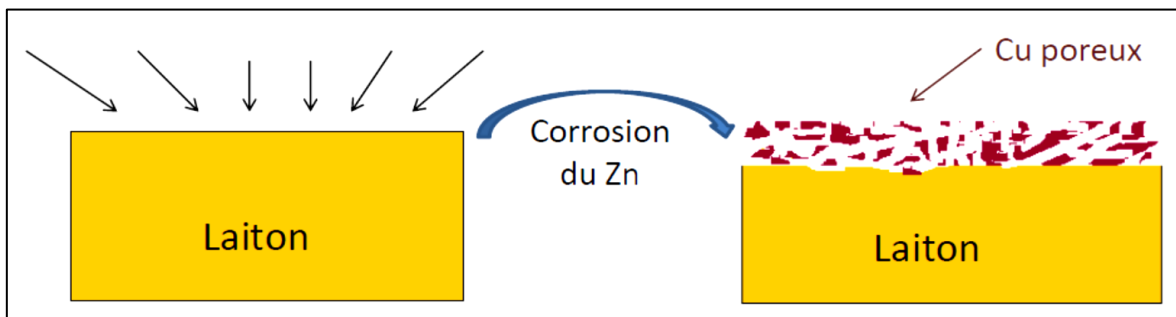


Figure I.19 : principe de la Corrosion sélective du laiton (Cu-Zn) [10].

1.6.2.6. La corrosion sous contrainte (CSC)

Ce type de corrosion résulte de l'action combinée d'une tension mécanique (contrainte mécanique) et d'un milieu corrosif (réaction électrochimique). Elle se définit comme un processus de développement de fissures, pouvant aller jusqu'à la rupture complète de la pièce [25].

En outre, cette corrosion se produit par effets combinés de 3 paramètres:

- La température: la corrosion sous contrainte se développe rarement en dessous de 50°C;
- Les contraintes appliquées ou résiduelles subies localement par la pièce;
- La corrosivité du milieu: présence de Cl^- , H_2S ou milieux caustiques NaOH , les milieux chlorurés et meilleurs même dans les milieux H_2S [23].

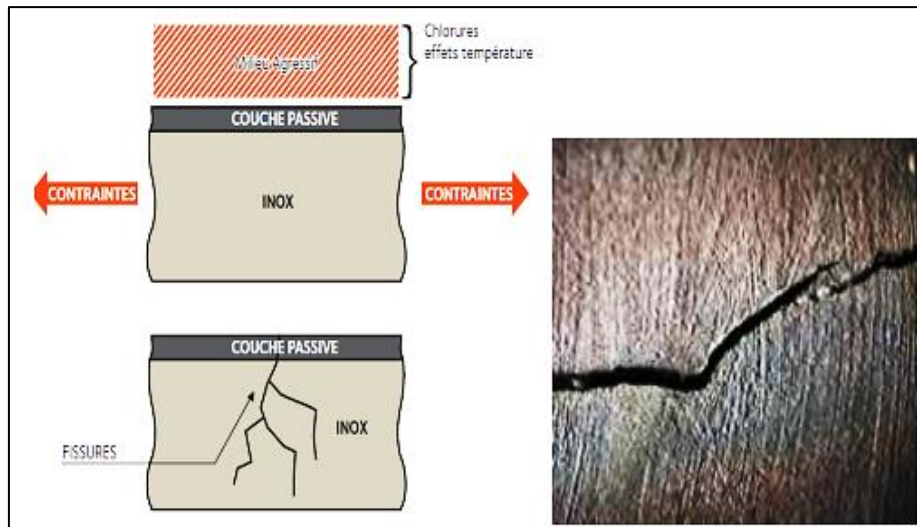
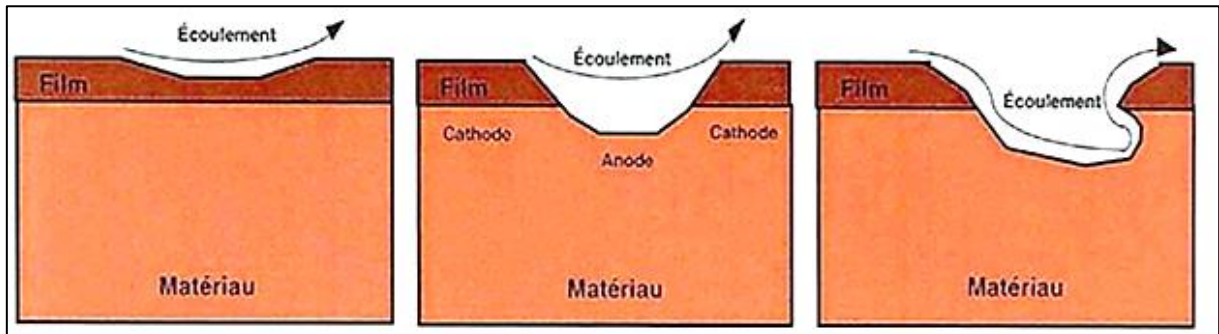


Figure I.20: Corrosion sous contrainte [23].

1.6.2.7. Corrosion érosion

La corrosion érosion est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de la matière. Elle est souvent favorisée par l'écoulement rapide d'un fluide [21]. Elle se développe progressivement selon trois étapes telles que cela est représenté dans la figure ci-dessous :



1 : Erosion du film 2 : Corrosion du matériau 3 : Evolution de l'attaque

Figure I.21 : Corrosion érosion d'un tube en cuivre véhiculant de l'eau [3].

1.6.2.8 La corrosion par fatigue

Lorsqu'un métal est soumis à des contraintes qui varient ou qui alternent, il peut se développer des fissures qui se propagent progressivement à travers le matériau [7]. Dans ce mode de corrosion, les contraintes appliquées ne sont plus statiques mais cycliques par exemple contraintes périodiques alternées [24].

1.6.2.9 La corrosion par fragilisation d'hydrogène

La présence d'hydrogène dans le réseau métallique peut entraîner d'importantes détériorations du métal dues à une chute catastrophique de ses propriétés mécaniques, pouvant alors conduire à la rupture de pièces ou de structures [24].



Figure I.22 : La fragilisation par hydrogène d'une pièce métallique [17].

1.6.2.10 La corrosion-abrasion

Si le fluide est diphasé (présence de particules solides en suspension ou de bulles gazeuses), les particules peuvent détériorer, voire éliminer les couches protectrices ou les films passifs normalement stables dans le milieu [24].

1.6.2.11 La corrosion-frottement

La corrosion-frottement concerne les dommages provoqués par la corrosion au niveau du contact de deux surfaces métalliques en petit mouvement l'une par rapport à l'autre.

Elle se produit essentiellement lorsque l'interface est soumise à des vibrations (mouvement relatif répété de deux surfaces en contact) [24].

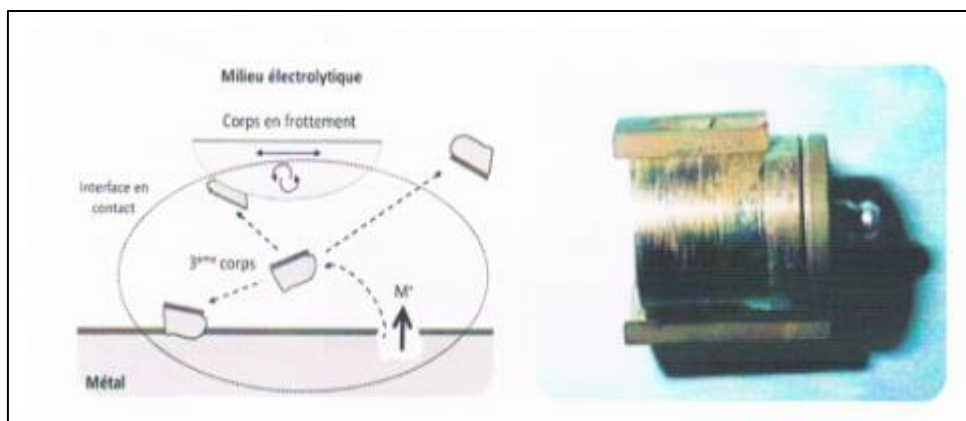


Figure I.23 : principe de la corrosion-frottement [27].

I.7 Conclusion

La corrosion est un phénomène très complexe d'une importance primordiale. La corrosion ne se limite pas à l'acier, mais affecte tous les métaux ainsi que les polymères et céramiques et elle touche tous les domaines de l'économie du circuit intégré au pont en béton armé. Le phénomène de corrosion dépend de nombreux facteurs liés au métal lui-même, au milieu dans lequel il est placé et aux conditions d'emploi. Elle peut se manifester selon plusieurs formes.

Chapitre II :

Méthodes de protection contre la corrosion

II.1 Introduction

La résistance à la corrosion n'est pas une propriété intrinsèque d'un métal donné, mais plutôt une propriété de l'interface métal / milieu. D'où la nécessité de caractériser la composition chimique et la microstructure de celle-ci, ainsi que son comportement électrochimique.

De plus, le comportement à la corrosion dépend des sollicitations diverses auxquelles le matériau est soumis qu'elles soient physicochimiques, thermiques ou mécaniques. On en déduit que tout moyen d'action de prévention et / ou lutte contre la corrosion concernera l'un des trois éléments du système étudié voire son ensemble [28].

La lutte contre la corrosion est une préoccupation constante dans beaucoup de domaines industriels, elle doit être prise en considération depuis le début d'un projet, jusqu'à sa réalisation et durant son exploitation [8].

II.2 Méthodes de protection contre la corrosion

Elle représente toutes les mesures qu'on peut prendre pour protéger les matériaux métalliques contre l'action destructive du milieu et d'augmenter leur durée de vie [29].

Plusieurs techniques de protection existent que l'on peut classer comme ci-dessous :

- Prévention par le choix du matériau ;
- Prévention par une forme adaptée des pièces ;
- La protection électrochimique ;
- Protection par revêtements (peinture, tout type de traitement de surface) ;
- Protection par des inhibiteurs [30].

II.2.1 Prévention par un choix judicieux des matériaux

Il sera possible de lutter contre les risques de corrosion en agissant sur le choix judicieux du matériau. Le choix des matériaux prend en compte les facteurs suivants :

- domaine d'utilisation ;
- nature et niveau des sollicitations mécaniques et thermiques ;
- traitements sélectionnés ;
- prix et disponibilité des matériaux.

II.2.2 Protection par une forme adaptée des pièces

Il est possible de diminuer les risques de corrosion en donnant aux objets une forme adaptée aux conditions d'utilisation, et ainsi d'influencer notablement leur durée de vie. Nous aborderons quelques solutions types couramment employées pour limiter les risques de corrosion [31].

II.2.3 La protection électrochimique

La corrosion électrochimique est le résultat du passage d'un courant entre une anode et une cathode. Ainsi, pour stopper la corrosion, il faut agir sur la pile formée [30]. Les deux méthodes de protection électrochimiques sont: la protection cathodique et anodique [8].

II.2.3.1 Protection cathodique

La protection cathodique est une technique de « protection active » contre la corrosion d'un matériau métallique au contact d'un électrolyte. Il s'agit d'un système de prévention électrochimique basé sur la diminution du potentiel (métal – milieu) de manière à l'amener dans sa zone d'immunité où la vitesse de corrosion du métal est réduite de manière significative [8].

Cette protection repose sur le principe du diagramme potentiel – pH (appelé diagramme de Pourbaix). Ce dernier est représenté dans (la figure II. 1) ci-dessous :

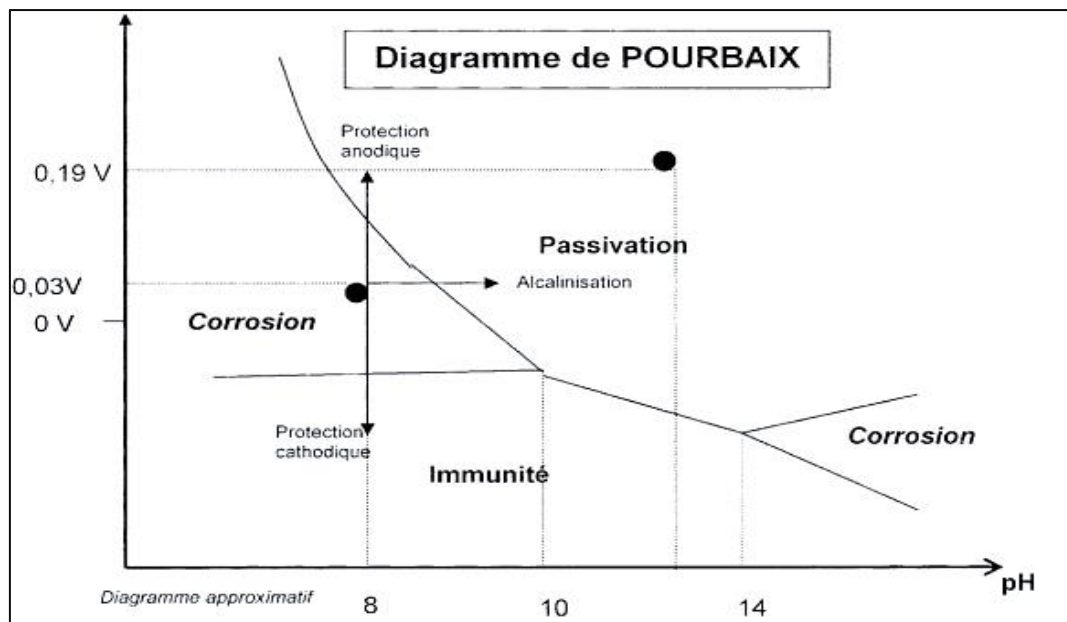


Figure II.1 : Principe de corrosion, de passivation et d'immunité selon le diagramme de Pourbaix [8].

Zone d'immunité : zone de stabilité thermodynamique du métal ;

Zone de corrosion : zone d'attaque du métal avec formation d'ions ;

Zone de passivation : zone de protection du métal par la formation d'oxyde ou d'hydroxydes à sa surface [8].

II.2.3.1.1 protection cathodique par anode sacrificielle ou anode galvanique

Dans ce type de protection, le métal à protéger est relié électriquement avec un autre métal moins noble que lui [32].

Celui-ci devient alors l'anode et la structure à protéger la cathode du système. L'anode se corrode alors et il faut la remplacer périodiquement [33].

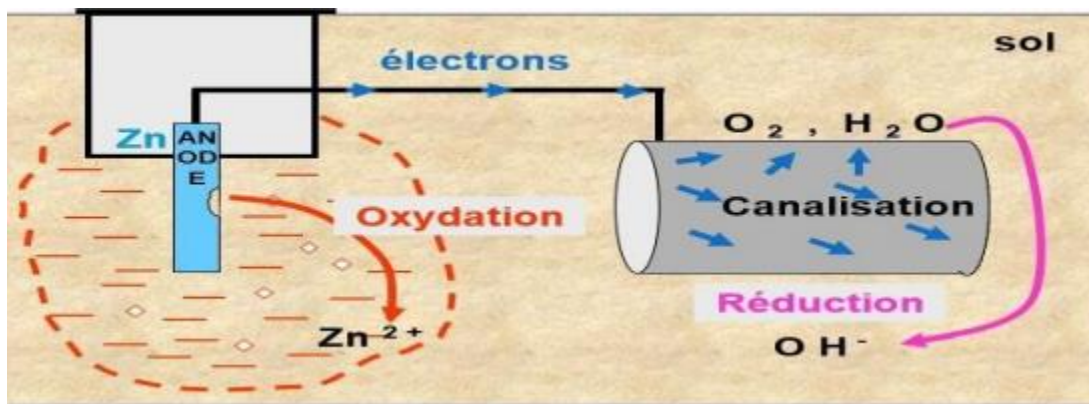


Figure II.2 : Principes de la protection par anodes sacrificielles [3].

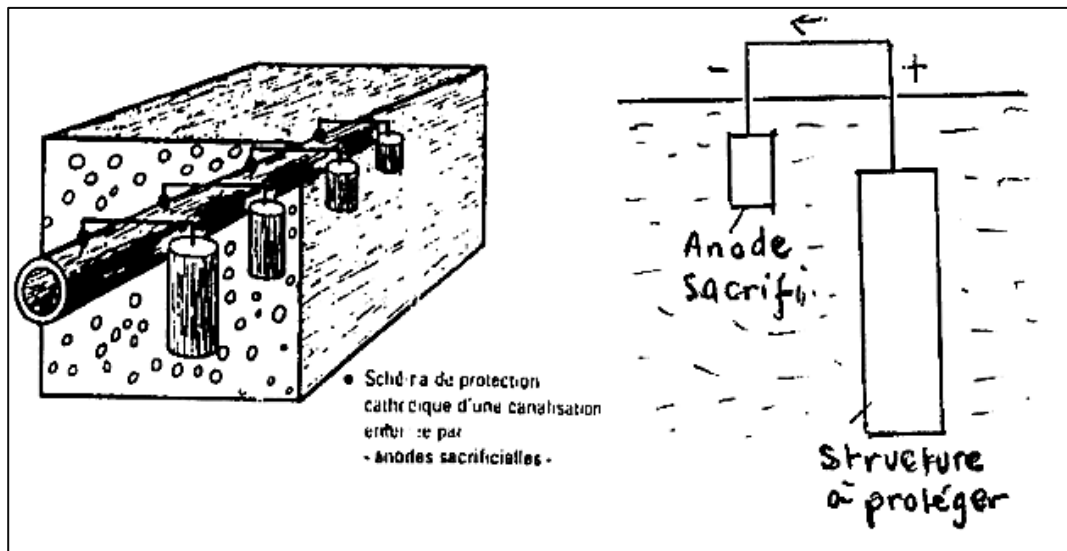


Figure II.3 : exemple de la protection cathodique par anode sacrificielle [34].

▪ Choix des anodes sacrificielles

Les anodes sacrificielles doivent satisfaire aux conditions suivantes :

1. Avoir un potentiel d'électrode suffisamment négatif pour pouvoir polariser rapidement le matériau à une valeur suffisante;
2. Elles ne doivent pas se polariser lors du passage du courant. En particulier, les produits de corrosion ne doivent pas former de film adhérent susceptible de modifier la valeur du potentiel;
3. Elles doivent se corroder de manière uniforme dans le milieu considéré, et ne pas être fortement attaquées en l'absence de courant;
4. Elles doivent avoir une bonne conductibilité, une bonne résistance mécanique, et pouvoir être obtenues facilement dans des formes et des dimensions variées;
5. Elles doivent enfin avoir un coût économiquement supportable.

Dans la pratique, seuls trois matériaux satisfont ces critères : ce sont le zinc, l'aluminium, et le magnésium [35].

II.2.3.1.2 Protection par courant imposé

Dans certaines situations de protection, les anodes sacrificielles ne peuvent pas délivrer suffisamment de courant pour une protection idéale. Cette situation est souvent rencontrée dans les cas de longues conduites ayant un grand diamètre et des conduites présentant un problème d'isolation [3].

Dans cette méthode, le courant de protection nécessaire est obtenu à partir d'une source extérieure de courant continu, ce qui implique l'utilisation d'un redresseur. Donc la différence de potentiel entre l'anode et la structure à protéger n'est pas naturelle. Le métal est polarisé cathodiquement.

L'intensité du courant doit être suffisante pour porter le métal à protéger à un potentiel où la réaction élémentaire anodique n'a pas lieu. Cette méthode a l'avantage de pouvoir régler la tension (ou le courant), en fonction des besoins.

Ceci permet d'optimiser le système et de protéger de grandes surfaces. (qui donne le critère de protection en tous points) [34].

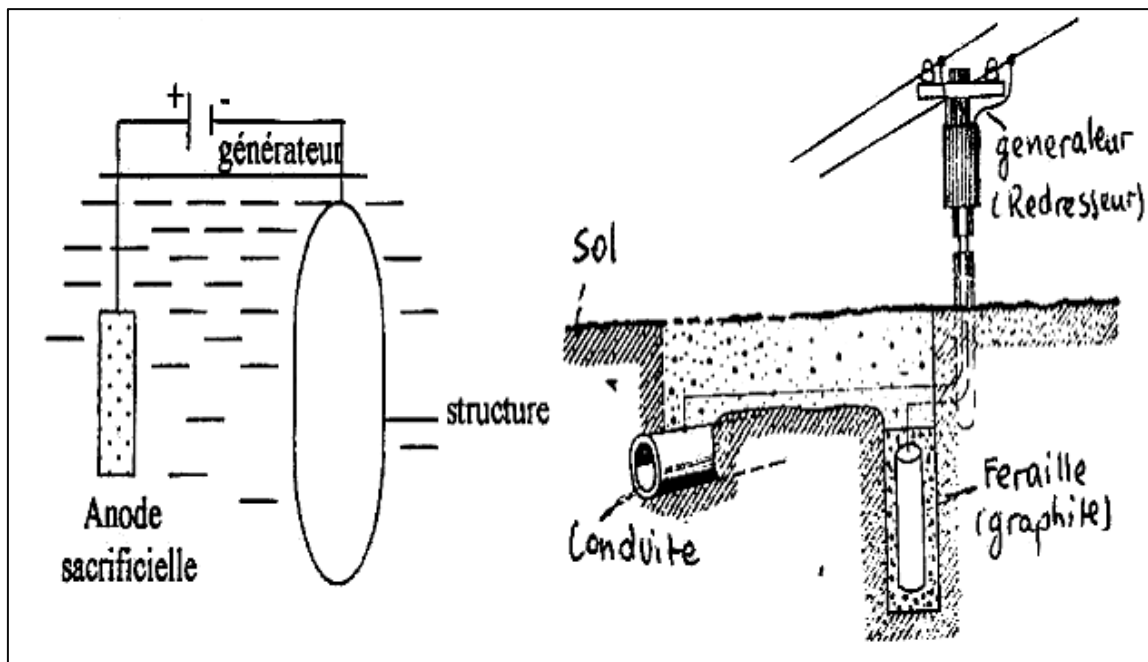


Figure II.4 : Exemple de la protection cathodique par courant imposé [34].

II.2.3.2 Protection anodique

Ce type de protection est utilisé dans le cas de matériaux passifs ou passivables. Elle consiste à réduire la vitesse de dissolution du métal en maintenant la valeur de son potentiel de corrosion dans son domaine de passivité [36].

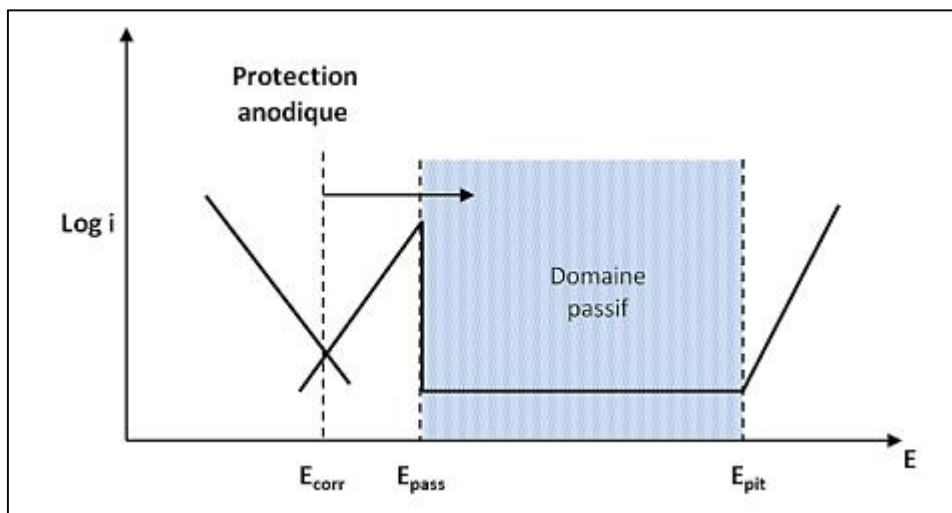


Figure II.5 : Principe de la protection anodique passivable : déplacement. Du potentiel dans le domaine passif correspondant à : $E_{pass} < E < E_{pit}$ [35].

II.2.4 Protection par revêtements

La protection par revêtements a pour objectif de supprimer tout contact entre le métal et le réactif. Ils constituent une barrière physique entre le milieu agressif et le métal à protéger. Leur efficacité dépend de leur propre comportement vis-à-vis du milieu agressif ainsi que de l'intégrité du revêtement. Plusieurs types de revêtements sont utilisés et nécessitent tous une préparation de la surface du métal de base, de façon à ce que le revêtement soit adhérent.

Les principales qualités d'un revêtement anticorrosion sont :

- Une bonne résistance aux acides, aux bases et aux sels ;
- Une bonne résistance à l'humidité et aux rayons solaires ;
- Une bonne adhérence sur supports;
- Une application facile;
- Une épaisseur suffisante (au moins 40 μm);
- Un séchage rapide pour éviter la détérioration par les agents chimiques;
- L'application en plusieurs couches pour assurer une bonne protection [17].

II.2.4.1 Types de revêtement

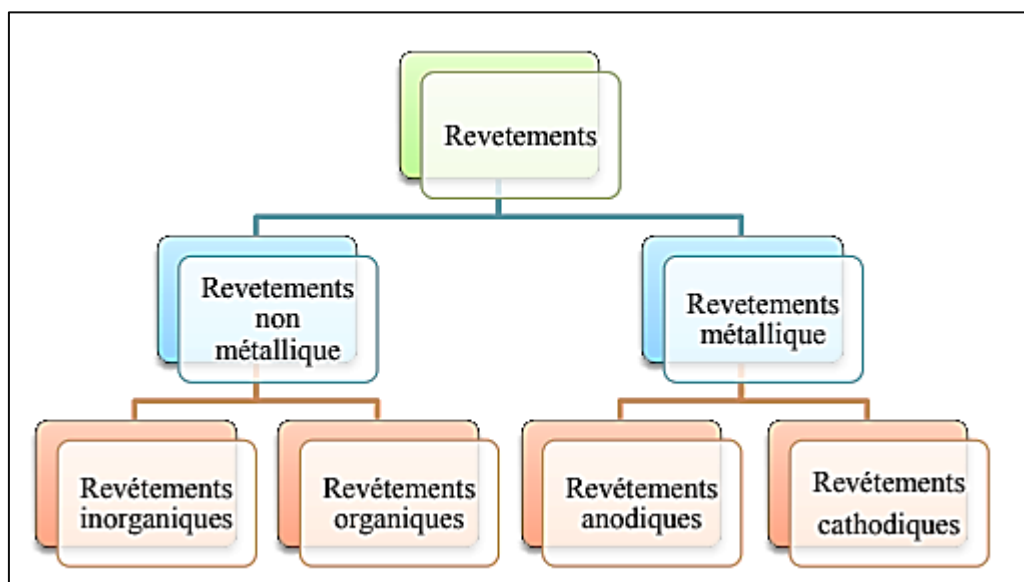


Figure II.6 : Schéma représentatif des différents types de revêtement [17].

II.2.4.1.1 Revêtements métalliques

Selon leur comportement, il existe deux types de revêtements métalliques:

- revêtements nobles ou cathodiques.
- revêtements moins nobles anodiques ou sacrificiels [37].

a) Les revêtements cathodiques

Le métal protecteur est plus noble que le métal à protéger. C'est le cas par exemple d'un revêtement de nickel ou de cuivre sur de l'acier.

En cas de défaut du revêtement, la pile de corrosion qui se forme peut conduire à une perforation rapide du métal de base, aggravée par le rapport "petite surface anodique" sur "grande surface cathodique". Dans ce cas, la continuité du revêtement est donc le facteur primordial [38].

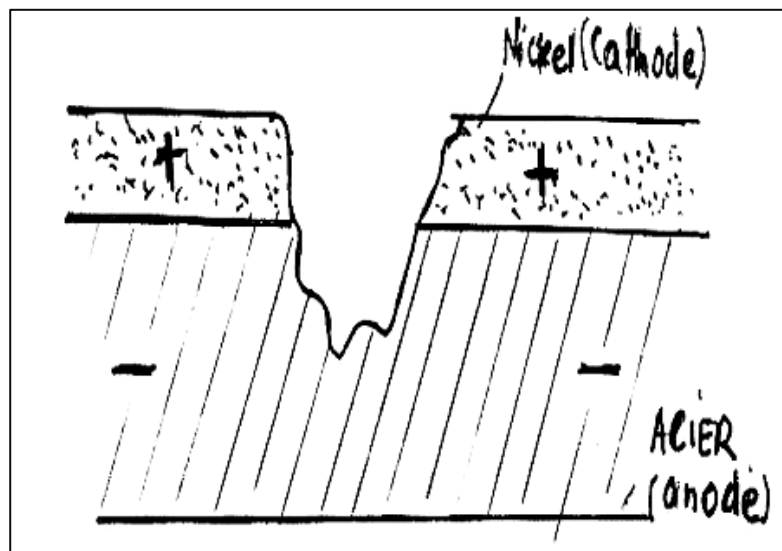


Figure II.7 : Cas de revêtement cathodique [34].

b) Les revêtements anodiques

Dans ce type de revêtement, le métal protecteur doit être moins noble que le métal à protéger. En cas de défaut du revêtement, il y a formation d'une pile locale et ce dernier se corrode en protégeant cathodiquement le métal de base. La protection reste donc assurée tant qu'une quantité suffisante de revêtement est présente [39].

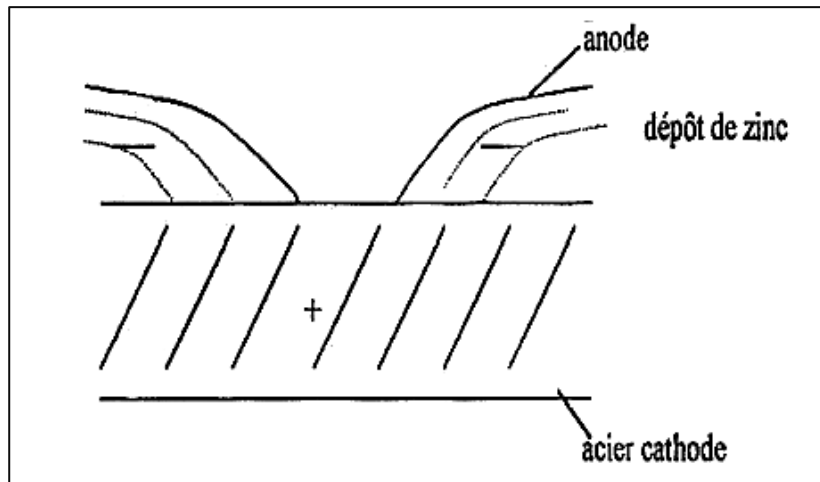


Figure II.8 : Cas de revêtement anodique [34].

II.2.4.1.2 Les revêtements organiques

Les revêtements organiques forment une barrière plus ou moins imperméable entre le matériau et le milieu. Ils se divisent en trois familles :

- Les peintures et vernis;
- les bitumes;
- Les revêtements polymériques.

➤ Les peintures

On peint les métaux pour les protéger contre la corrosion et les rendre visuellement attractifs [38].

Une peinture est un mélange composé de :

- les pigments qui assurent l'inhibition de la corrosion et peuvent également avoir une fonction décorative ;
- le liant : assure la cohésion du film et son adhérence au substrat métallique ;
- le solvant qui permet d'appliquer la peinture à l'état liquide ;
- Le diluant qui diminue la viscosité pour rendre l'application plus aisée ;
- des siccatifs qui accélèrent l'oxydation pour passer de état liquide a une peau dure.

➤ Les bitumes

On les utilise principalement pour protéger des structures enterrées en acier ou en fonte. Ils se présentent en général sous la forme d'un revêtement épais (de l'ordre de 5 mm) [38].

➤ Les revêtements polymériques

Il y a une grande variété de revêtements polymériques pour protéger des métaux contre le milieu corrosif :

- les thermoplastes (PVC, propylène, etc.) ;
- les caoutchoucs (naturels ou synthétiques) ;
- les thermodurcissables (époxydes, polyesters, etc.) [2].

L'utilisation des revêtements plastiques pour les métaux représente beaucoup d'avantages par rapport aux peintures, tels que l'épaisseur de la couche (100 à 500 µm), en même temps, il joue le rôle d'isolateur. L'inconvénient des plastiques, réside dans la faible résistance à la température et leur instabilité dans plusieurs solvants organiques [38].

II.2.4.1.3 Revêtements non métalliques

Parmi les revêtements inorganiques, on distingue deux types :

➤ Les couches de conversion

- elles sont obtenues par une réaction du métal avec un milieu Choisi;
- elles contiennent donc toujours des ions prévenant du substrat;
- elles sont des oxydes, des phosphates et des chromates [40,41].

➤ Les couches étrangères aux substrats :

Elles sont en revanche, fabriquées par des procédés de déposition qui n'impliquent pas une réaction du substrat, la composition des couches est alors indépendante de celle du substrat [41].

Ce type de couches inclut les revêtements suivants : les émaux, les revêtements en ciment et les revêtements en céramique, et réfractaire [40].

II.2.5 Inhibition de la corrosion

II.2.5.1 Historique de l'inhibiteur

L'étude de la corrosion a débuté aux environs du 17^{ème} Siècle, mais ce n'est qu'au cours du 19^{ème} siècle que l'on a étudié scientifiquement les moyens de protection contre cette corrosion [36].

L'idée d'inhiber la corrosion est très ancienne et remonte au moyen âge où les maîtres armuriers ajoutaient de la farine ou de la levure pour éviter la fragilisation des armes lors d'un décapage acide. Le mot inhibition a été employé en chimie et en science de la corrosion depuis 1907. En 1945, on comptait moins de 30 articles traitant l'inhibition de la corrosion.

Dans un article de 1948, Waldrip se référait à un rapport datant de 1943 portant sur la protection contre la corrosion des puits de pétrole. De nombreux articles concernant l'inhibition ont été rédigés durant la période couvrant 1945 à 1954: ceux-ci traitaient entre autres de l'inhibition dans les domaines de l'aviation, des chaudières, des circuits de refroidissement, des moteurs diesel, des sels de déneigement, des raffineries de pétrole, des pétroliers...etc. Les articles publiés durant cette période témoignent d'un grand développement technologique en matière d'inhibition.

En 1970, 647 articles traitant l'inhibition de la corrosion sont dénombrés [42].

II.2.5.2 Définition d'un inhibiteur de corrosion

Les inhibiteurs de corrosion constituent un moyen de lutte originale contre la corrosion des métaux et des alliages. L'originalité vient du fait que le traitement anticorrosion ne se fait pas sur le métal lui-même mais par l'intermédiaire du milieu corrosif [43].

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

Selon NACE, un inhibiteur est une substance qui retarde la corrosion lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration [22].

Celle-ci entraîne une diminution de la vitesse de corrosion du métal sans modifier de manière significative la concentration d'aucun agent corrosif contenu dans le milieu agressif [42].

II.2.5.3 Fonctions essentielles

D'une manière générale un inhibiteur doit :

- abaisser la vitesse de corrosion d'un métal, sans en affecter les caractéristiques physico- chimiques, en particulier la résistance mécanique (par exemple, risque de fragilisation par l'hydrogène en milieu acide);
- être stable en présence des autres constituants du milieu, en particulier vis-à-vis des oxydants ;
- être stable aux températures d'utilisation;
- être efficace à faible concentration;
- être compatible avec les normes de non-toxicité;
- être peu onéreux [44].
- être non toxique; Il faut noter que la non-toxicité est le point faible des molécules inhibitrices actuellement utilisées. C'est pour cela que les recherches scientifiques tendent à proposer des molécules moins dangereuses pour l'environnement [17].

II.2.5.4 Conditions d'utilisation

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

- ❖ Soit comme protection permanente : l'inhibiteur permet alors l'utilisation de matériaux métalliques (ferreux non alliés, par exemple) dans des conditions satisfaisantes de résistance à la corrosion; une surveillance de l'installation s'impose.
- ❖ Soit comme protection temporaire: pendant une période où la pièce ou l'installation est particulièrement sensible à la corrosion (stockage, décapage, nettoyage). Dans ce cas, le contrôle du système est à priori plus simple, la prévision du comportement de l'inhibiteur dans le temps étant plus facile à faire [3].

II.2.5.5 Mode d'action des inhibiteurs de corrosion

On peut concevoir l'action de l'inhibiteur de corrosion comme :

- L'interposition d'une barrière entre le métal et le milieu corrosif; c'est le cas des milieux acides.
- Le renforcement d'une barrière préexistante, en général la couche d'oxyde ou d'hydroxyde formée naturellement en milieu neutre ou alcalin.

- La formation d'une barrière par interaction entre l'inhibiteur de corrosion avec une ou plusieurs espèces du milieu corrosif, ce type de mécanisme est également spécifique aux milieux alcalins ou neutres [45].

II.2.5.6 Domaines d'utilisation des inhibiteurs

- le traitement des eaux des systèmes de refroidissement, eaux d'alimentation des chaudières, eau de condensat
- protection des pipelines et des installations dans l'industrie du pétrole ;
- protection des conduites de transport d'eau ;
- industrie de l'emballage : l'inhibiteur est employé pour le transport de machines, composants et équipements par mer ;
- protection des barres d'armature dans le béton [46].

II.2.5.7 Classifications d'inhibiteurs

II.2.5.7.1 Classification selon la nature des molécules

a) Inhibiteurs organiques

Les inhibiteurs organiques sont généralement utilisés en milieu acides. Ils sont généralement constitués de sous-produits de l'industrie pétrolière [47]. Leur utilisation est actuellement plus préférée à celle d'inhibiteur inorganique pour des raisons d'écotoxicité essentiellement.

Les inhibiteurs organiques possèdent au moins un atome servant de centre actif pour leur fixation sur le métal tel que l'azote (amines, ammoniums quaternaires, amides, imidazoles, triazoles...), l'oxygène (alcools acétyléniques, carboxylates, oxadiazoles...), le soufre (dérivé de la thio-urée, mercaptans, sulfoxydes, thiazoles...) ou le phosphore (phosphonates).

L'une des limitations dans l'utilisation de ces produits peut être l'élévation de la température, les molécules organiques étant souvent instables à chaud. Les groupes fonctionnels usuels, permettant leur fixation sur le métal, sont :

- ❖ La radicale amine (-NH₂),
- ❖ Le radical hydroxyle (-OH),
- ❖ Le radical carboxyle (-COOH),
- ❖ Le radical mercapto (-SH) [3].

Les inhibiteurs organiques s'adsorbent à la surface du métal et ralentissent ainsi la corrosion. Elles contiennent une partie non polaire, hydrophobe et relativement volumineuse, constituée principalement d'atomes de carbone et d'hydrogène, et une partie polaire hydrophile, constituée d'un ou plusieurs groupes fonctionnels, tels $-NH_2$ (amine), $-SH$ (mercapto), $-OH$ (hydroxyle), $-COOH$ (carboxyle), PO_3 (phosphate), et leurs dérivés. La molécule se lie (par adsorption) à la surface du métal avec son groupe fonctionnel, alors que sa partie non polaire bloque partiellement la surface active.

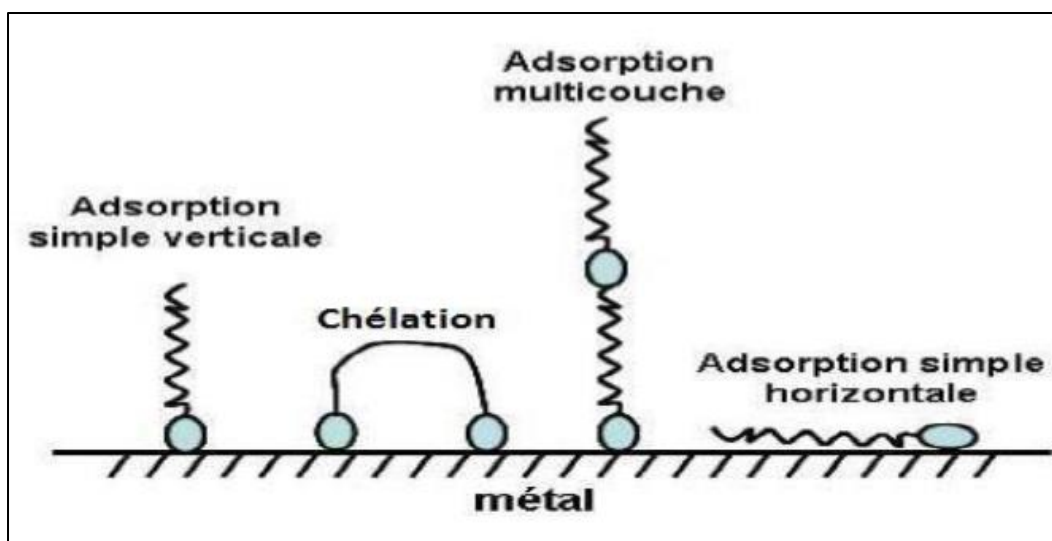


Figure II.9 : Représentation schématique des modes d'adsorption de molécules organiques inhibitrices sur une surface métallique [1].

b) Les inhibiteurs minéraux

Ce sont généralement des substances oxydantes souvent appelées agents de passivation (chromates, nitrates, phosphates, Etc.) qui passivent le métal et relèvent fortement le potentiel de corrosion vers des valeurs plus nobles, tout en réduisant la vitesse de corrosion [48].

Les inhibiteurs minéraux sont généralement utilisés en milieu neutre/alcalin mais rarement en milieu acide. Ce sont souvent leurs produits de dissociation (anion ou cation) qui sont efficaces en tant qu'inhibiteurs de corrosion. Sont de moins en moins utilisés en raison de leur toxicité. Leur emploi se limite à certains systèmes en circuit fermé [47].

II.2.5.7.2 Classification selon la réaction partielle

a) Inhibiteurs anodiques

Si l'inhibiteur s'adsorbe préférentiellement sur les sites anodiques de dissolution du métal où la réaction suivante se déroule, il s'agit d'un inhibiteur anodique [19].

Les inhibiteurs anodiques augmentent la polarisation anodique ce qui déplace le potentiel de corrosion du matériau dans la direction des valeurs les plus positives afin de l'amener à une valeur pour laquelle il y a formation d'un film passif protecteur du matériau [3].

Même si les inhibiteurs anodiques sont très efficaces et souvent utilisés, ils ont généralement une propriété indésirable : si la teneur en inhibiteur baisse de manière progressive, la surface métallique n'est plus entièrement couverte, et elle fonctionne comme une anode, obtenant ainsi une combinaison dangereuse, une petite anode et une grande cathode, conduisant à la corrosion par piqûres.

Dans ce cas, l'inhibiteur fait plus de mal que de bien. C'est pour cela que les inhibiteurs anodiques sont souvent désignés comme dangereux [48].

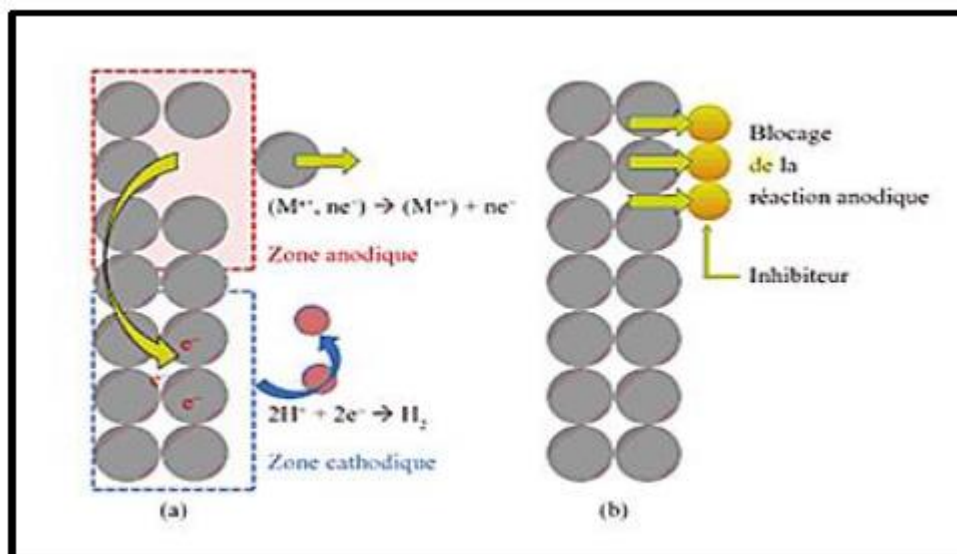


Figure II.10 : Représentation en milieu « acide » du rôle d'un inhibiteur anodique :

(a) sans inhibiteur, (b) avec inhibiteur [19].

b) Inhibiteurs cathodiques

Si l'inhibiteur s'adsorbe préférentiellement sur les sites cathodiques de réduction d'un oxydant contenu dans la solution. Il s'agit d'un inhibiteur cathodique [19].

Ces inhibiteurs réduisent la réaction cathodique en empêchant l'oxygène d'atteindre la

surface à protéger et déplacent le potentiel de corrosion dans le sens négatif [48].

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].

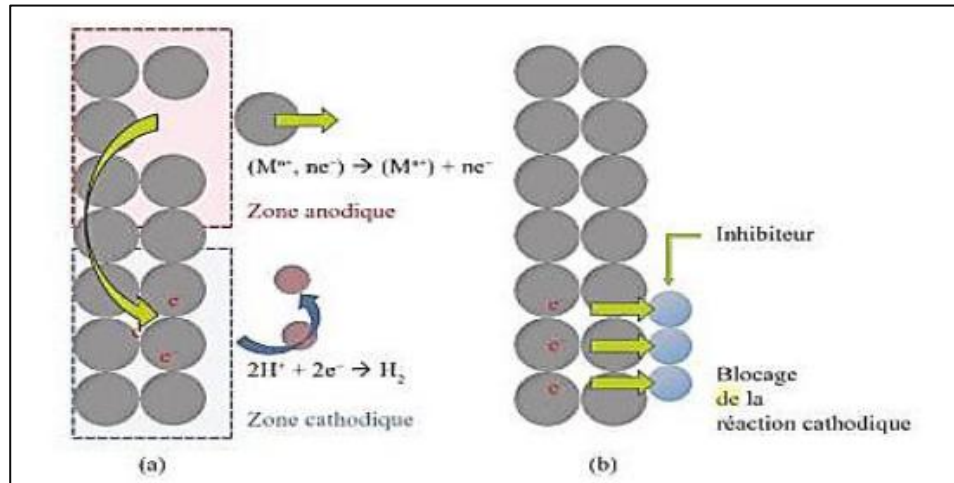


Figure II.11 : Représentation du rôle d'un inhibiteur cathodique, (a) sans inhibiteur, (b) avec inhibiteur [19].

c) Inhibiteurs mixte

Les inhibiteurs mixtes ont une action multiple, ils diminuent la vitesse de deux réactions partielles, et s'adsorbent indifféremment sur les deux types de sites. Ils modifient légèrement la valeur de potentiel [49].

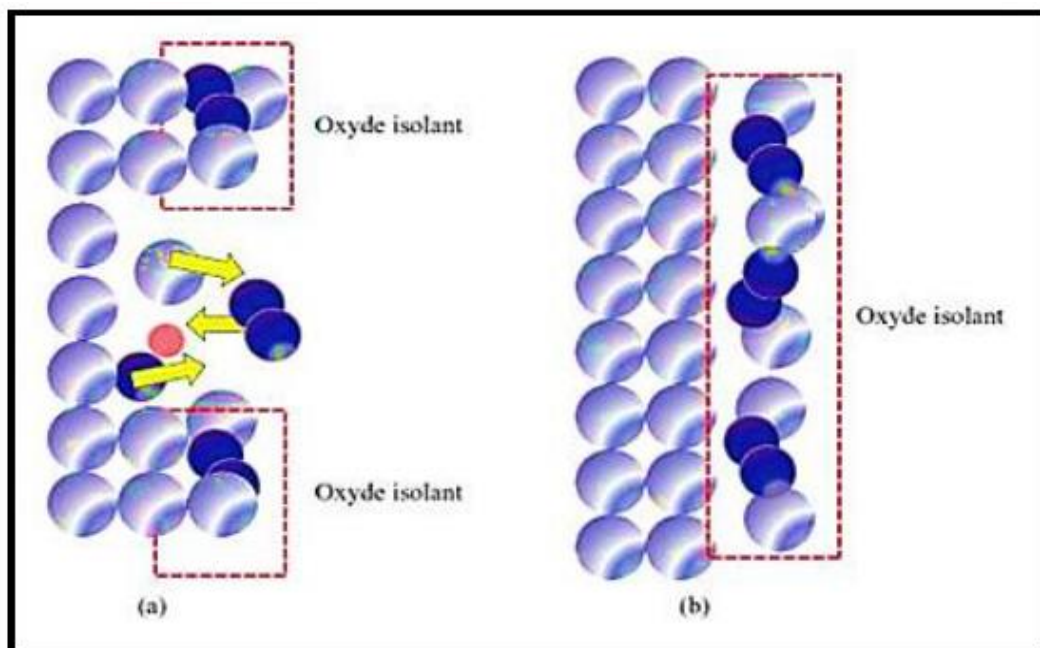


Figure II.12 : Inhibiteur formant une couche tridimensionnelle [19].

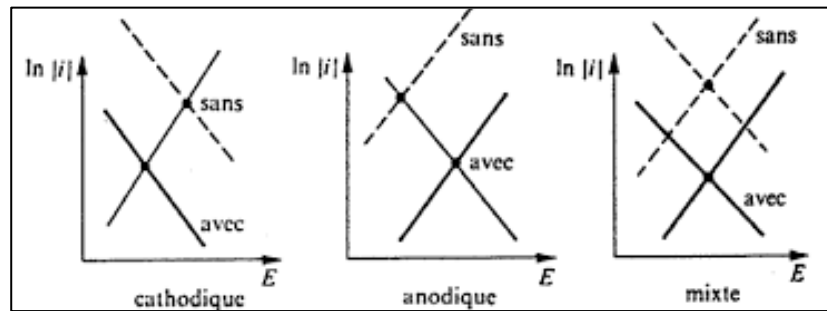


Figure II.13 : diagramme d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion due à la présence d'un inhibiteur anodique, cathodique ou mixte [50].

II.2.5.7.3 Classification par mécanisme réactionnel

d) Inhibiteurs d'adsorption

L'adsorption est un phénomène de surface universel, car toute surface est constituée d'atomes n'ayant pas toutes leurs liaisons chimiques satisfaites. Cette surface a donc tendance à combler ce manque en captant atomes et molécules se trouvant à proximité. La liaison entre l'espèce adsorbée et la surface métallique peut être essentiellement de deux types : la physisorption et la chimisorption.

➤ Adsorption physique

L'adsorption physique ne modifie pas la structure des molécules ; elle met en jeu trois types de forces :

- les forces de Van Der Waals qui ne sont pas suffisamment énergétiques pour assurer un ancrage assez fort de l'inhibiteur à la surface du métal;
- les liaisons hydrogène assurées par les groupements hydroxyle ou amine;
- les forces polaires résultant de la présence de champs électriques.

Dans ce type d'adsorption il est bien entendu que l'inhibiteur doit porter une charge globale : anion, cation ou molécule dipolaire. La force de la physisorption dépendra de la différence de charges portées d'une part par l'inhibiteur et par la surface métallique d'autre part [31].

Les inhibiteurs qui s'adsorbent physiquement interagissent facilement mais ils se détachent également facilement de la surface [19].

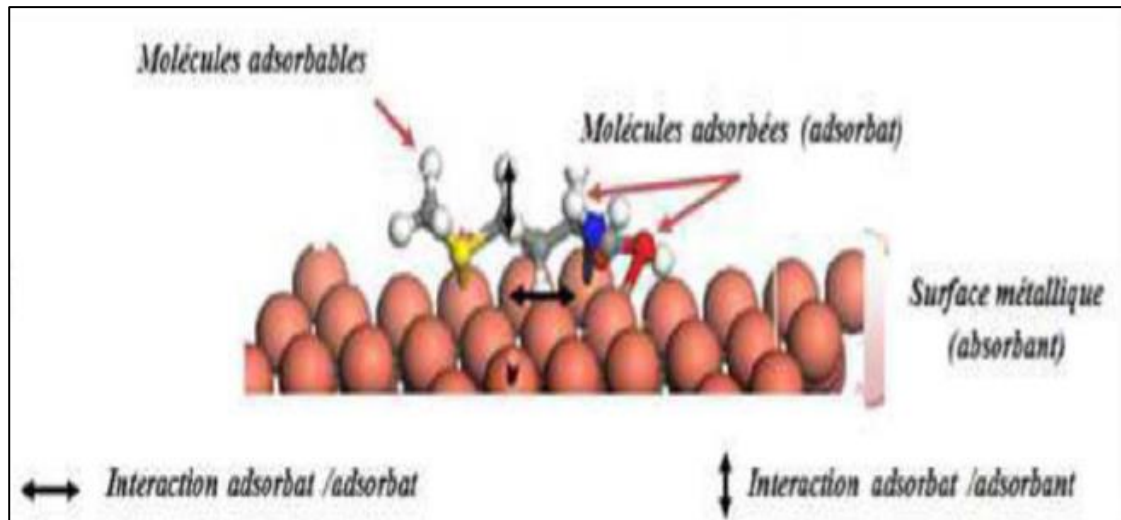


Figure II.14 : Schéma descriptif de l'adsorption physique [1].

➤ Adsorption chimique (chimisorption)

Ce type d'adsorption consiste la mise en commun d'électrons entre la partie polaire de la molécule inhibitrice et la surface métallique, ce qui engendre la formation de liaisons chimiques bien plus stables. Les électrons proviennent en grande majorité des doublés libres des molécules inhibitrices tels que O, N, S, P [51].

a.1) Isotherme d'adsorption

Les lois de variation de la quantité adsorbée en fonction de la concentration en inhibiteur peuvent souvent être représentées par l'une des deux isothermes classiques suivantes: Langmuir, Temkin et Frumkin....

• Isotherme de Langmuir

Le modèle de Langmuir suppose qu'il existe à la surface un nombre fixe de sites. Chacun de ces sites ne peut adsorber qu'une seule particule. De plus, comme on néglige les interactions entre particules adsorbées, l'énergie d'adsorption est constante. L'équation de l'isotherme de Langmuir est :

$$\theta = \frac{C_{inh}}{K + C_{inh}} \quad [52]. \quad (II.1)$$

Où

C_{inh} : concentration de l'inhibiteur ;

K : constante d'adsorption ;

θ : taux de recouvrement

- **Isotherme de Temkin**

Dans le modèle de Temkin, l'enthalpie libre d'adsorption de l'adsorbat est une fonction linéaire du taux de recouvrement θ et les constantes de vitesse chimiques sont fonction de θ . Il y a attraction ou répulsion entre les espèces adsorbées à la surface. L'équation de l'isotherme de Temkin est:

$$\theta = \frac{1}{n} \ln KC \quad [52]. \quad (\text{II.2})$$

- **Isotherme de Freundlich**

En 1962, Freundlich a proposé un autre modèle pour décrire l'adsorption en milieu gazeux ou liquide. Ce modèle est représenté par l'équation suivante :

$$\ln \theta = \ln K + n \ln C_{\text{inh}} \quad [53]. \quad (\text{II.3})$$

Où n est une constante

b) Inhibiteur agissant par passivation

Les inhibiteurs agissant par passivation sont en général les inhibiteurs minéraux. Ils provoquent la passivation spontanée du métal en renforçant la couche d'oxyde formée naturellement sur la surface du métal [54].

c) Inhibiteurs de précipitation

Certains inhibiteurs de corrosion réagissant avec les ions ou les composés organiques, contenus dans le milieu corrosif, pour former respectivement des sels ou des complexes organiques. Ces composés se précipitent sur la surface de métal formant un film protecteur superficiel [19].

II.2.5.7.4 Classification selon le domaine d'application**c) Inhibiteurs en milieu acide**

Les inhibiteurs en milieu acide sont employés pour éviter l'attaque de l'acier lors du décapage acide. Dans l'industrie pétrolière, on les ajoute aux fluides de forage. Les inhibiteurs les plus fréquemment utilisés sont des molécules de type organique [55].

d) Inhibiteurs en milieu neutre ou basique

La plupart des inhibiteurs capables d'agir en milieu neutre ou basique sont des composés de type inorganique (mais certains composés organiques peuvent également être efficaces) [19].

II.2.5.9 Conclusion

La protection des matériaux métalliques dans les milieux corrosifs peut être réalisée par plusieurs méthodes de protection à savoir le choix judicieux des matériaux, la forme adaptée des pièces, l'utilisation des revêtements, l'utilisation des inhibiteurs, la protection cathodique. Dans certains cas, il est préférable d'associer plusieurs techniques de protections afin d'optimiser la protection.

Chapitre III :

Conditions opératoires

III.1 Introduction

Ce chapitre a pour but de décrire les méthodes de préparation des échantillons et les différentes techniques de caractérisation. Les essais gravimétriques ont été réalisés au laboratoire N°11 du Hall technologique et les essais électrochimiques sont faites au laboratoire de Génie chimique et Environnement de Skikda (LGCES), Faculté de Technologie, Université de 20 Aout 1955- Skikda.

III.2 Méthodes d'étude des inhibiteurs de corrosion

La complexité des phénomènes de corrosion nécessite l'utilisation d'un grand nombre des méthodes expérimentales pour déterminer le taux de corrosion et la nature des mécanismes qui interviennent au cours de l'attaque du métal.

III.2.1 Méthode gravimétrique

Cette méthode présente l'avantage d'être d'une mise en œuvre simple et non coûteuse, ne nécessitant pas un appareillage important, mais ne permet pas l'approche des mécanismes mis en jeu lors de la corrosion. Son principe repose sur la mesure de la perte de poids subie par un échantillon de surface S , pendant un temps d'immersion « t » dans une solution corrosive.

III.2.2 Méthodes électrochimiques

Parmi les méthodes de contrôle du phénomène de corrosion, les méthodes électrochimiques s'avèrent d'une importance capitale pour la compréhension du phénomène étant donné les informations qu'elles fournissent [40].

III.2.2.1 Potentiel d'abandon ou de dissolution

Lorsqu'un métal est plongé dans un électrolyte quelconque, il prend un potentiel qui évolue en fonction du temps pour se stabiliser à une certaine valeur appelée : potentiel de corrosion ou de dissolution.

La figure (III.1), montre les formes des courbes du potentiel de dissolution ou potentiel d'abandon en fonction du temps d'immersion [51].

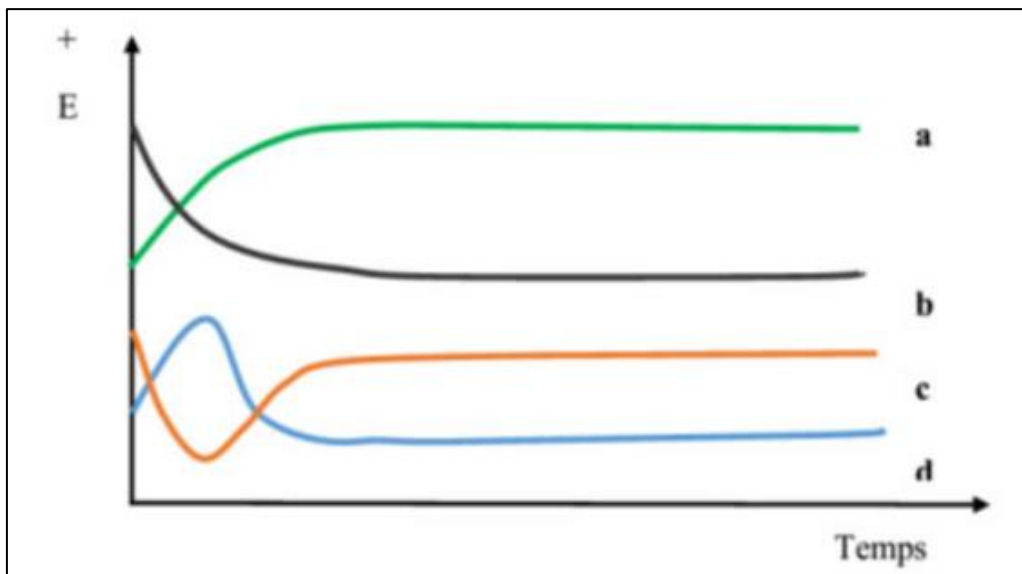


Figure III.1 : Courbes potentiel/temps d'immersion : $E=f(t)$ [40].

Courbe a : le potentiel augmente au cours du temps (devient de plus en plus noble), c'est le cas d'une réaction de passivation conduisant par exemple à la formation sur la surface du métal d'un produit de corrosion insoluble, adhérent, compact et par conséquent d'une couche protectrice.

Courbe b : le potentiel devient de plus en plus anodique, c'est le cas d'une attaque par dissolution continue du métal (le potentiel de l'électrode devient de moins en moins noble).

Courbe c : le potentiel devient d'abord négatif (anodique) puis tend vers des valeurs plus positives, C'est le cas d'un début d'attaque suivie d'une passivation.

Courbe d : le potentiel devient d'abord plus noble puis tend vers de valeurs plus négatives. Il s'agit d'un métal qui se passive mais la couche de passivation formée est instable ; elle se détruit après un certain temps (disparition d'un film protecteur préexistant à l'immersion) [40].

III.2.2.2 Courbes de polarisation

Les courbes de polarisation sont déterminées en appliquant un potentiel entre l'électrode de travail et l'électrode de référence. Un courant stationnaire s'établit après un certain temps. Il est mesuré entre l'électrode de travail et une électrode auxiliaire (ou contre électrode CE) [57].

La courbe de polarisation d'un métal dans un électrolyte présente deux branches : la branche anodique et la branche cathodique (Figure III.2).

- Une branche anodique correspondant à la superposition des courants résultant des réactions d'oxydations. La densité de courant du domaine anodique est positive.
- Une branche cathodique correspondant à la superposition des courants résultant des réactions de réduction. La densité de courant est négative dans ce domaine [40].

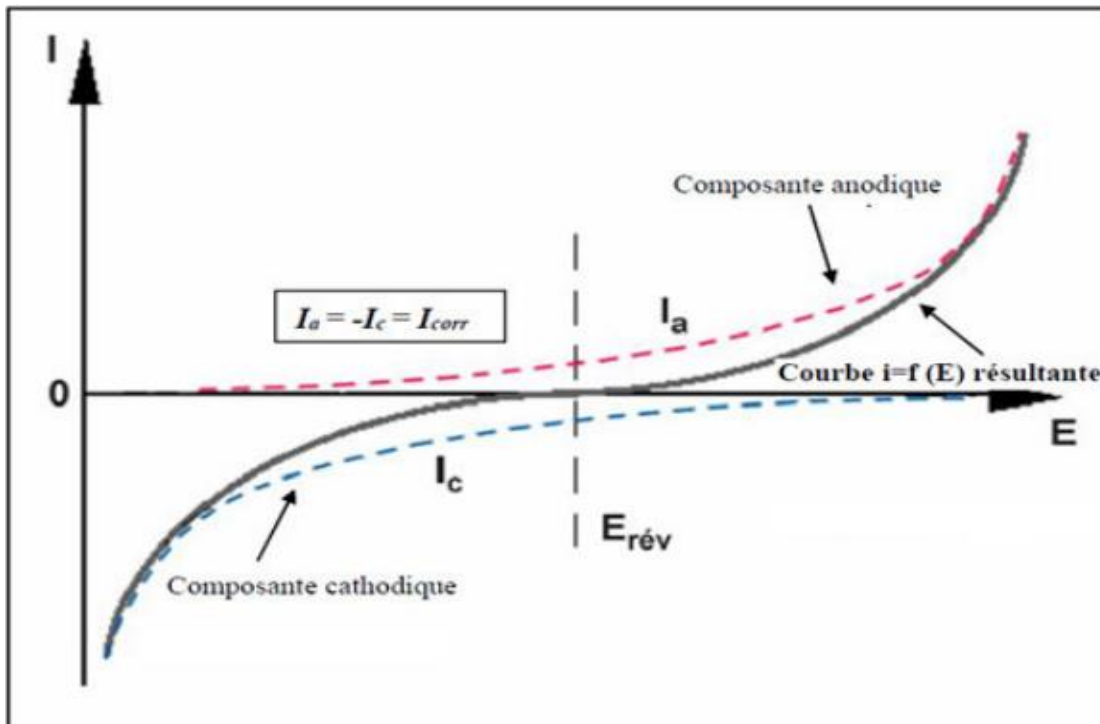


Figure III.2 : Courbe de polarisation $i=f(E)$ linéaire [40].

D'un point de vue cinétique, deux modes de contrôle sont distingués selon l'étape réactionnelle limitant :

- Le transfert de charge à l'interface métal/électrolyte.
- Le transport de masse de l'espèce électroactive ou de produit de réaction [57].

III.2.2.2.1 Droites de Tafel

La courbe $\log i = f(E)$ qui représente la variation du logarithme de la densité de courant en fonction du potentiel présente deux droites dites « droites de Tafel ».

Pour déterminer les valeurs des paramètres électrochimiques, Il suffira d'extrapoler jusqu'au potentiel de dissolution les tronçons rectilignes de la courbe.

La cote d'abscisse du point d'intersection sera le potentiel de corrosion E_{corr} et la cote d'ordonnée correspondante au logarithme du courant de corrosion [17].

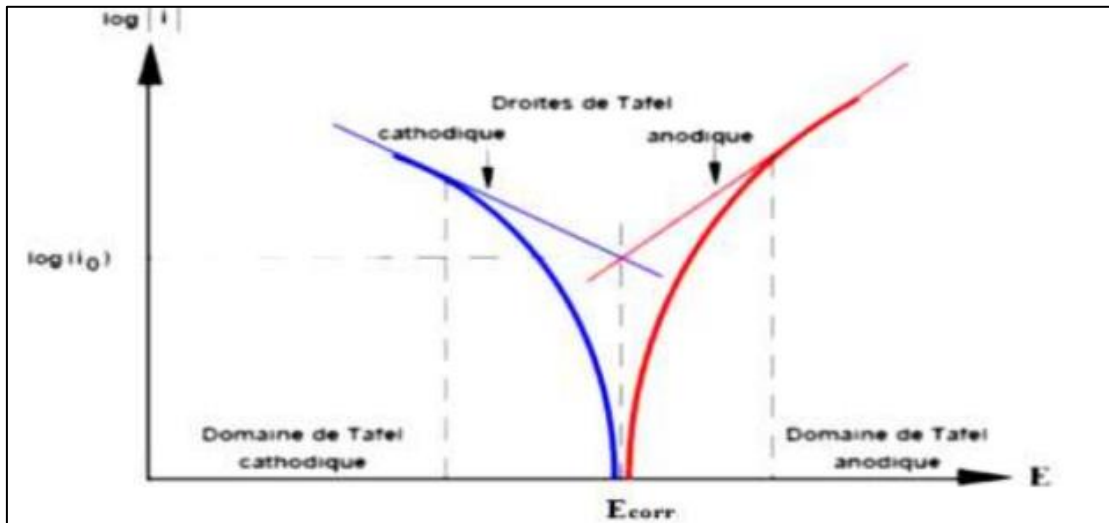


Figure III.3: Courbe courant – tension donnant les droites de Tafel [17].

III.2.2.3 Résistance de polarisation

La mesure de la pente au voisinage immédiat du potentiel de corrosion des courbes de polarisation (i - E) permet de déduire la résistance de polarisation (Figure III.4).

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} \text{ en } (\Omega. \text{cm}^2)$$

La théorie électrochimique montre qu'en première approximation, cette résistance de polarisation (R_p) est inversement proportionnelle à la vitesse de la corrosion i_{corr} on a [40] :

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} = \frac{\beta a \beta c}{2.3(\beta a + \beta c).i_{corr}}$$

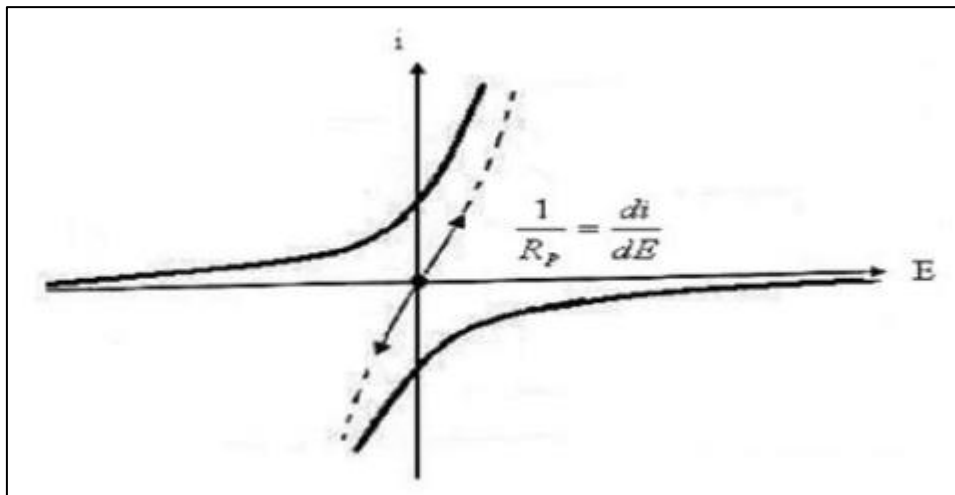


Figure III.4 : Mesure de la résistance de polarisation [40].

III.2.2.4 Spectroscopie d'impédance électrochimique

La spectroscopie d'impédance électrochimique est très utile pour la caractérisation du comportement d'une électrode face à la corrosion [58].

La spectroscopie d'impédance électrochimique consiste à mesurer la réponse de l'électrode face à une modulation sinusoïdale de faible amplitude du potentiel en fonction de la fréquence. Les diagrammes de Nyquist et de Bode sont le résultat de la méthode de la spectroscopie d'impédance électrochimique.

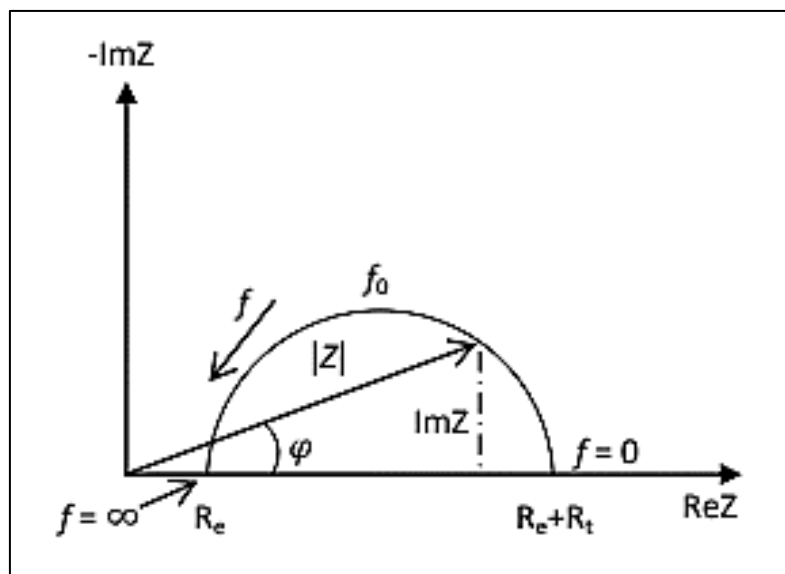


Figure III.5: Spectre d'impédance électrochimique dans le plan de Nyquist [57].

L'impédance est représentée dans le plan de Nyquist comme suit [57]:

$$Z(\omega) = Z_{Re}(\omega) + j Z_{Im}(\omega)$$

III.3 Conditions opératoires

III.3.1 Le substrat métallique

Le matériau métallique utilisé dans notre étude est l'acier au carbone AISI 1020 de la composition chimique suivante (tableau III.1).

Tableau III.1 : Composition chimique de l'acier au carbone AISI 1020.

Grade	C	Si	Mn	P	S
AISI 1020	0.18-0.23	0.15-0.35	0.30-0.60	≤0.04	≤0.05

III.3.2 Milieu corrosif

La solution corrosive est une solution de chlorure de sodium 3%.

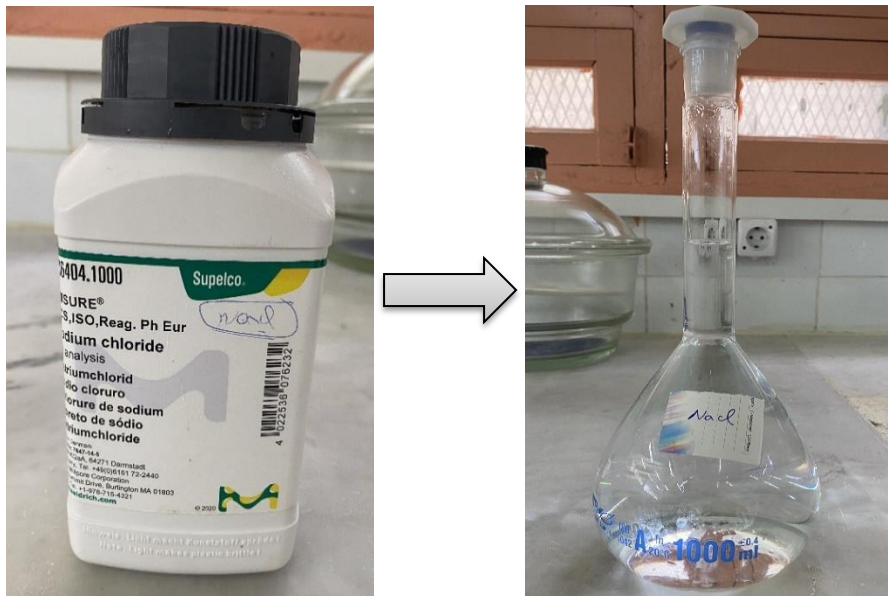


Figure III.6: préparation de la solution corrosive.

III.3.3 Les inhibiteurs utilisés

Les inhibiteurs utilisés dans ce travail sont : le Trimebutine et la Glutamine.

- **La Trimebutine** $C_{22}H_{29}NO_5$



Figure III.7 : La Trimebutine.

La trimébutine est un antispasmodique musculotrope, et léger antispasmodique anticholinergique, agissant en tant qu'agoniste enképhalinergique faible. Elle régule la motricité intestinale et elle est utilisée comme médicament pour traiter les troubles douloureux du transit intestinal ainsi que les troubles fonctionnels digestifs.

- **La Glutamine** $C_5H_{10}N_2O_3$



Figure III.8 : La Glutamine.

La glutamine est l'acide aminé libre le plus abondant du sang humain. Tout comme les autres acides aminés, elle joue un rôle biochimique important en tant que constituant des protéines.

Elle est également un élément crucial de la métabolisation de l'azote : l'ammoniac formé

par la fixation de l'azote est assimilé en composé organique par la conversion de l'acide glutamique en glutamine. L'enzyme qui permet cette conversion s'appelle la glutamine

- Sert comme supplément dans l'alimentation des assidus de musculation.
- Traitement des crampes musculaires chez les personnes âgées.
- Une meilleure récupération lors d'efforts physiques importants.
- Participe à la reconstruction du tissu musculaire endommagé.
- Elle diminuerait la fréquence des crises de la drépanocytose.

III.3.4 Les essais de corrosion

III.3.4.1 Méthode gravimétrique (perte de masse)

III.3.4.1.1 Préparation des échantillons métalliques

Les échantillons métalliques utilisés dans les essais de perte de masse sont découpés dans une forme rectangulaire de dimensions $2 \times 1 \times 0,4 \text{ cm}^2$ et subissent les étapes suivantes :

1. Un polissage avec du papier abrasif de granulométrie décroissante allant jusqu'à 1200, c'est une opération qui consiste à rendre la surface lisse et brillante ayant un aspect d'un miroir en supprimant les fissures, les aspérités et toutes les impuretés ;
2. Rinçage à l'eau distillée pour éliminer les traces de l'abrasion mécanique ;
3. Rinçage à l'éthanol pour éliminer les corps indésirables ;
4. Séchage des échantillons métalliques.



Figures III.9 : Polissage des pièces métalliques.

III.3.4.1.2 Essai de perte de masse

Après la préparation de la surface métallique des échantillons, ces derniers sont pesés et immergés à différentes durées d'immersions dans des béchers contenant 100 ml de la solution de chlorure de sodium (3% NaCl) et les différentes concentrations de l'inhibiteur.

Une fois la durée d'immersion est achevée, l'échantillon est retiré de la solution corrosive, rincé à l'eau distillée, séché et repesé.

Les essais de perte de masse sont réalisés à différentes températures allant de 25°C jusqu'à 45°C. La variation de la température du milieu corrosif est réalisée à l'aide d'un bain marie.

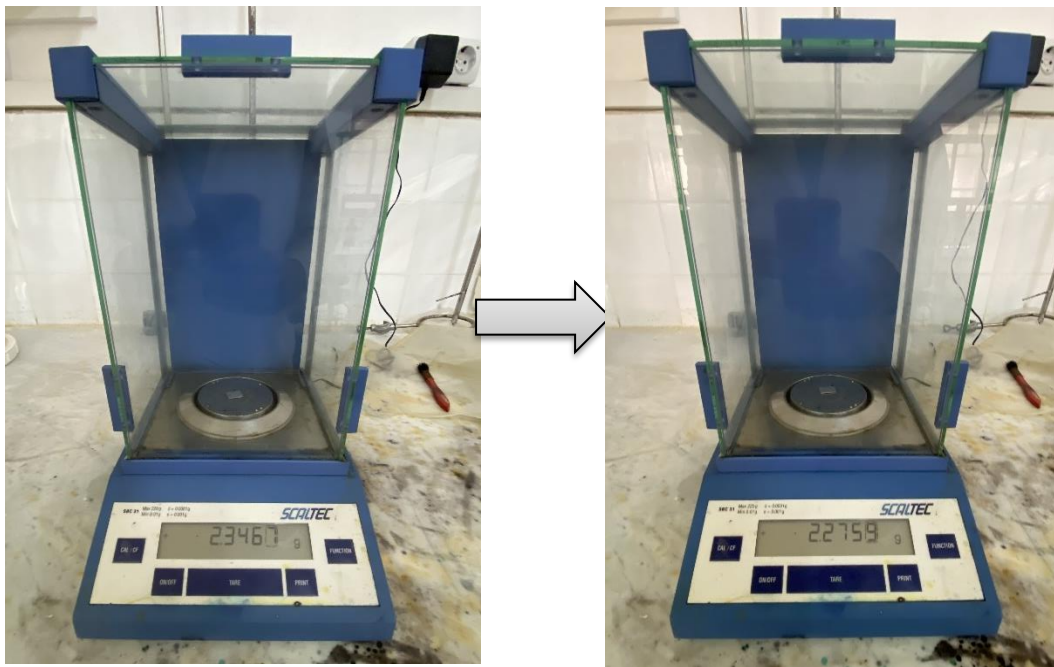


Figure III.10 : Essai de perte de masse d'un échantillon.

III.3.4.2 Techniques électrochimiques

III.3.4.2.1 Appareillage utilisé

Les mesures électrochimiques ont été faites grâce à un système à trois électrodes branchées à l'appareil VOLTALAB de marque Radiometer, piloté par un micro-ordinateur qui permet ensuite l'acquisition et le traitement des données (Figure III.9).



Figure III.11 : Montage électrochimique.

- **Montage classique à trois électrodes**

Dans toutes les expériences électrochimiques on a utilisé le montage à trois électrodes : une électrode de référence, une contre-électrode et une électrode de travail (le substrat). La cellule électrochimique est une cellule en verre de volume 200 ml.

- **Electrode de référence (ER)**

Cette électrode possède un potentiel spécifique et constant, ce qui permet d'imposer un potentiel précisément défini à l'électrode de travail. L'électrode de référence que nous avons utilisée pour mesurer la tension de l'électrode de travail est une électrode au calomel saturée (ECS) : $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2/\text{KCl}_{\text{sat}}$.

- **La contre électrode (CE)**

La contre électrode est un conducteur métallique qui ferme le circuit de la cellule et permet la circulation du courant électrique dans l'électrode de travail à travers la solution. Elle est constituée d'un métal inerte comme le platine.

- L'électrode de travail

L'électrode de travail est réalisée comme suit :

Les échantillons métalliques sont découpés en petits morceaux de dimension (1cm.1cm.0.4cm). Par la suite, ils sont reliés à un fil électrique et enrobés dans une résine inerte chimiquement de façon à présenter précisément 1cm² de surface.

Avant l'immersion dans la solution corrosive, L'électrode de travail subit un polissage mécanique à l'aide du papier abrasif de granulométrie décroissante allant jusqu'à 1200, suivi d'un rinçage à l'eau distillée et d'un dégraissage avec l'éthanol puis un rinçage à l'eau distillée.

III.3.4.2.2 Conditions expérimentales

Les courbes de polarisation sont obtenues avec une vitesse de balayage égale à 0,6 mV/s, de -1000 à -400 mV vs ECS.

Pour les spectres d'impédance électrochimique, le balayage des fréquences a été effectué des hautes fréquences (100 KHz) vers les basses fréquences (10 mhz) avec une perturbation sinusoïdale de 20 mV d'amplitude autour du potentiel libre.

Chapitre IV :

Résultats et discussions

IV.1 Introduction

Dans le but d'étudier, le pouvoir inhibiteur de la glutamine et la Trimebutine sur le comportement à la corrosion de l'acier au carbone AISI 1020 dans le milieu de chlorure de sodium 3%, nous avons utilisé les techniques gravimétrique et électrochimique à savoir: la spectroscopie d'impédance électrochimique et la méthode de polarisation potentiodynamique. Pour déterminer le mode d'action de ces inhibiteurs sur la surface métallique, nous avons calculé l'enthalpie libre à partir des isothermes d'adsorption. L'effet de la température sur le pouvoir inhibiteur des inhibiteurs testés a été également étudié. Les résultats obtenus sont présentés sous forme des tableaux et des graphes.

IV.2 Étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier au carbone AISI 1020 dans la solution de chlorure de sodium 3%

IV.2.1 Spectroscopie d'impédance électrochimique

Pour étudier l'action inhibitrice de la glutamine et la Trimebutine sur la corrosion de l'acier AISI 1020 dans le milieu NaCl 3%, on a fait recours aux mesures d'impédance électrochimique. Les résultats de cette méthode sont obtenus sous forme de diagrammes de Nyquist (figure IV.1). L'examen de la figure IV.1 montre que les représentations de Nyquist obtenues ne sont pas des demi-cercles parfaits. La dépression des boucles peut être attribuée à l'hétérogénéité de la surface de l'électrode de travail. Cette hétérogénéité peut résulter de la rugosité, des impuretés, de l'adsorption de l'inhibiteur et de la formation des couches d'oxydes [51]. Nous remarquons aussi de la figure IV.1 que le diamètre des boucles qui représentent la résistance de transfert de charge augmente avec l'accroissement de la concentration des inhibiteurs dans le milieu corrosif [8]. Ce résultat confirme la formation d'une couche protectrice à l'interface métal/solution.

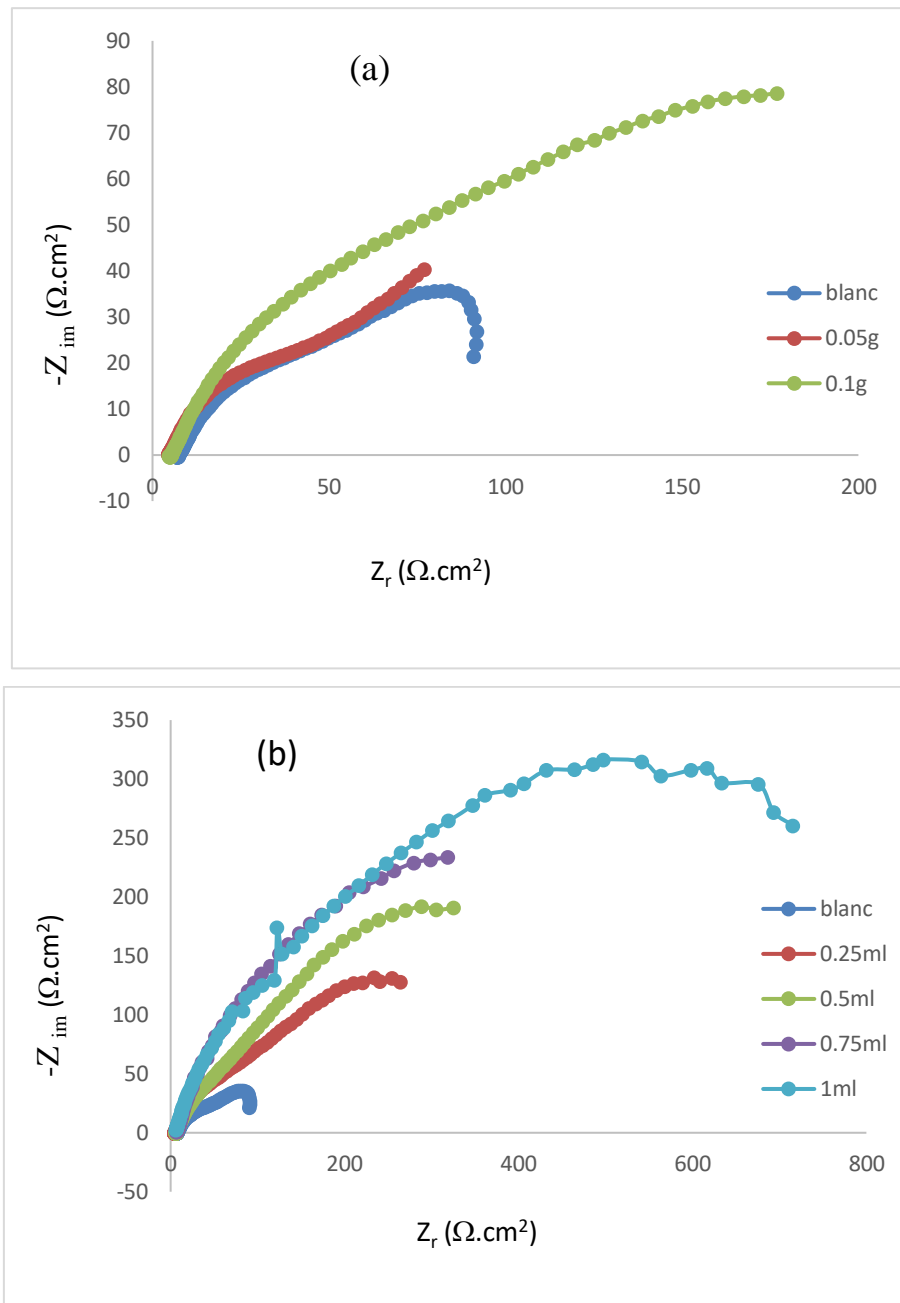


Figure IV.1 Diagrammes de Nyquist de l'acier AISI 1020 immergé dans la solution de NaCl 3% à en présence de différentes concentrations de a) la glutamine et b) la Trimebutine à 25°C.

Pour décrire l'ensemble des phénomènes mis en jeu à l'interface métal/solution, nous avons utilisé le circuit électrique présenté dans la figure (IV.2). Ce circuit équivalent est constitué de deux groupes de composants identiques branchés en série avec la résistance de la solution corrosive (R_s). Le premier groupe, constitué d'un élément à phase constante (CPE_{film}) et une résistance (R_{film}), caractérise le film formé à la surface métallique. Le second groupe, composé des éléments R_{dl} et CPE_{dl} , traduit les processus déroulant à l'interface métal /solution. Dans ce circuit électrique, les capacités idéales C_{film}

et C_{dl} sont substituées par CPE_{film} et CPE_{dl} .

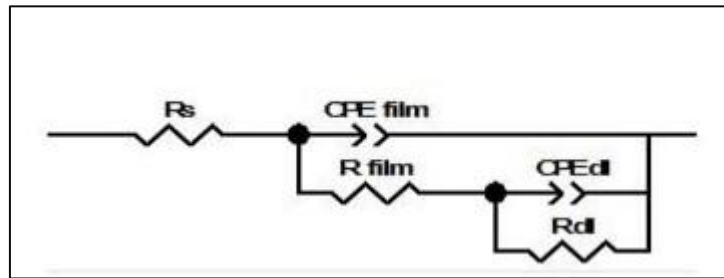


Figure IV.2 : circuit équivalent à l'interface métal/solution.

Les valeurs des paramètres électrochimiques et de l'efficacité inhibitrice pour la corrosion de l'acier AISI 1020 dans le milieu NaCl (3%) en absence et en présence de différentes concentrations des inhibiteurs testés sont données dans le tableau IV.1. L'efficacité inhibitrice est calculée à partir de la résistance de transfert de charge selon la relation suivante :

$$IE_{SIE} = \frac{R_{tc}^{inh} - R_{tc}}{R_{tc}^{inh}} \quad (IV.1)$$

Tableau IV.1. Paramètres électrochimiques et efficacités inhibitrices déduits des diagrammes d'impédance de l'acier AISI 1020 dans NaCl 3% sans et avec addition des inhibiteurs.

C_{inh} (g/L)	R_s ($\Omega.cm^2$)	CPE_{film} (F/cm ²)	a_1	R_{film} ($\Omega.cm^2$)	CPE_{dl} (F/cm ²)	a_2	R_{tc} ($\Omega.cm^2$)	IE%	θ
Blanc	5,179	0.003557	0.66	12,37	0,012 86	0,5	178,4		
Trimebutine									
1,3315	4,907	0.004285	0,688	41,76	0.009257	0,604	469,9	62,03	0,6203
2,6630	6,646	0.006266	0,784	96,94	0.007015	0,666	502,7	64,51	0,6451
3,9945	6,553	0.000867	0.89	100,759	0.004406	0,760	661,2	73,01	0,7301
5,3260	5,298	0.004326	0,977	156,38	0.003391	0,806	1379,8	87,07	0,8707
Glutamine									
0,25	4,076	0.002615	0,8832	44,06	0,019 14	0,6176	390,2	54,27	0,5427
0,5	4,076	0.002585	0,8972	63,71	0,018 98	0,638	494	63,88	0,6388

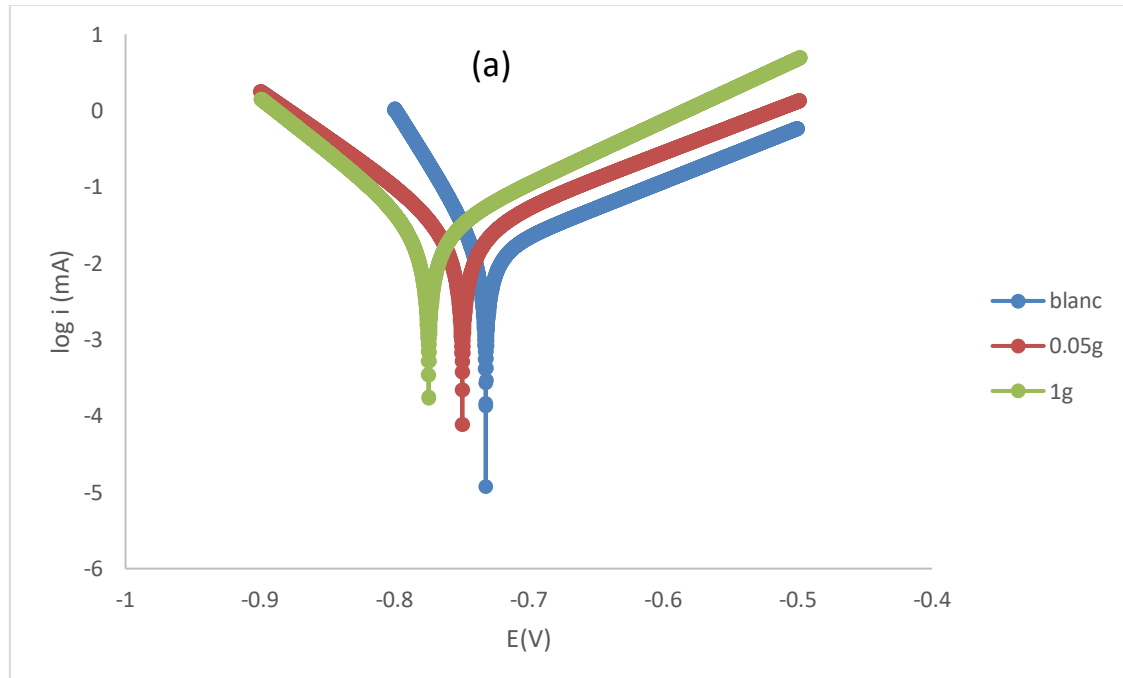
L'examen du tableau IV.1 montre que l'addition des inhibiteurs à la solution corrosive a pour effet d'augmenter les valeurs des résistances R_{tc} et R_{film} et de diminuer les valeurs de

CPE_{film} et CPE_{dl} . Ce comportement peut être attribué à la diminution de la constante diélectrique locale ou à une augmentation de l'épaisseur de la double couche électrique, suggérant que les molécules des inhibiteurs étudiés fonctionnent par adsorption à l'interface métal /solution. De ce fait la surface métallique montre des surfaces de moins en moins actives et un transfert de charge à l'interface métal–solution devient de plus en plus difficile (augmentation de la résistance de transfert de charge) [39].

L'examen du tableau IV.1 révèle aussi que l'efficacité inhibitrice augmente avec l'augmentation de la concentration de chaque inhibiteur. Elle atteint une valeur maximale de l'ordre de 87,07% en présence de 5,3260 g/l de Trimebutine et 63,88% en présence de 0,5 g/L de Glutamine dans le milieu corrosif. Ce résultat indique que le Trimebutine est plus efficace que la Glutamine.

IV.2.2 Courbes de polarisation

La figure IV.3 représente les courbes de polarisation potentiodynamique de l'acier AISI 1020 dans le milieu NaCl 3% en absence et en présence de différentes concentrations de la Trimebutine et de la glutamine.



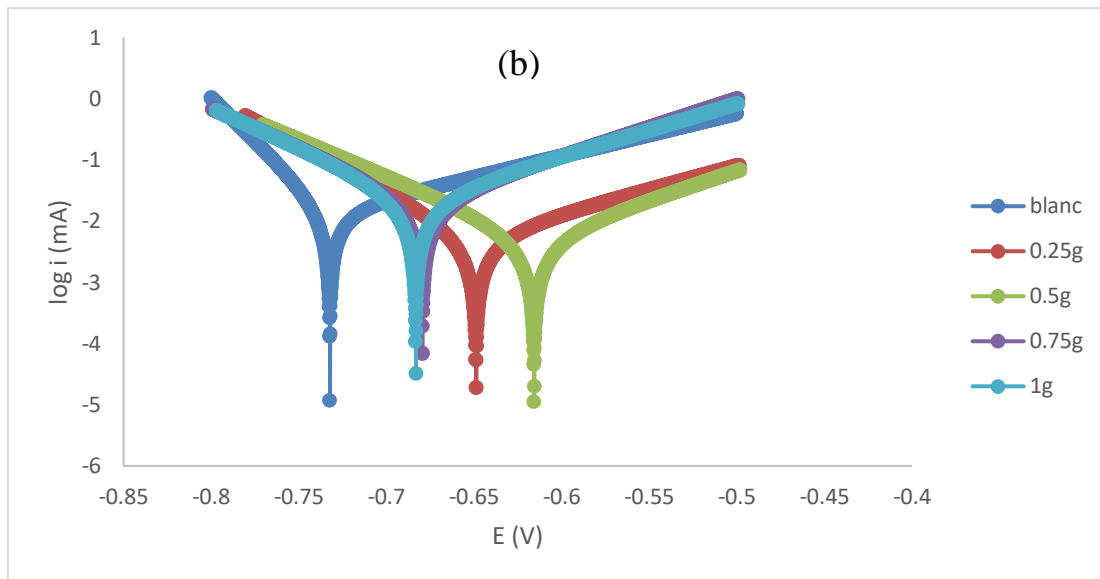


Figure IV.3: courbes de polarisation de l'acier au carbone AISI 1020 dans la solution de chlorure de sodium 3% en absence et en présence de différentes concentrations de a) la glutamine et b) la Trimebutine à 25°C.

L'examen de la figure IV.3 montre que l'allure globale des courbes de polarisation obtenues est presque identique pour toutes les concentrations. Les branches anodiques et cathodiques de l'ensemble des courbes se présentent sous forme de droites de Tafel.

Les valeurs de la densité de courant de corrosion (i_{corr}), le potentiel de corrosion (E_{corr}), les pentes de Tafel cathodique et anodique (b_a et b_c), l'efficacité inhibitrice $IE_{pot}\%$ pour différentes concentrations des inhibiteurs en milieu NaCl 3% à 25°C sont rassemblées dans le tableau IV.2. L'efficacité inhibitrice est définie comme suit (équation IV.2) :

$$IE_{pot}(\%) = \frac{i_{corr} - i_{corr}^{inh}}{i_{corr}} \cdot 100 \quad (IV.2)$$

Où i_{corr} et i_{corr}^{inh} sont respectivement les valeurs de densité de courant de corrosion de l'acier au carbone AISI 1020 déterminées par extrapolation des droites de Tafel au potentiel de corrosion, après immersion dans la solution corrosive, sans et avec addition des inhibiteurs à différentes concentrations.

Tableau IV.2 : Les paramètres électrochimiques et l'efficacité inhibitrice déduits des courbes de polarisation de l'acier au carbone AISI 1020 immergé dans la solution NaCl 3% avant et après addition des inhibiteurs à différentes concentrations à 25 °C.

C_{inh} (g/L)	E_{corr} (mV)	i_{corr} (μ V)	ba (mV)	bc (mV)	E_{pot} (%)
Blanc	-732,131	13,912	143,4	36,1	
Trimebutine					
1,3315	-653,232	5,698	129,2	66,9	59,0425
2,6630	-615,577	5,358	105,7	83,7	61,4864
3,9945	-670,105	4,1502	46,2	57,0	70,1682
5,3260	-673,724	2,197	20,1	13,3	84,2078
Glutamine					
0,25	-742,441	6,931	30,2	35,4	50,1797
0,5	-769,647	5,594	24,3	27,1	59,7901

L'analyse du tableau IV.2 montre que :

- L'augmentation de la concentration des inhibiteurs testés dans le milieu corrosif a pour effet de diminuer la densité de corrosion. Cette diminution résulte de l'interaction des molécules inhibitrices de chaque inhibiteur avec la surface du métal, en effet l'inhibiteur s'adsorbe davantage à la surface du métal et couvre les sites actifs ce qui provoque la formation d'une couche barrière qui réduit la réactivité du métal [22].
- En présence de la Trimebutine dans le milieu corrosif, le potentiel de corrosion se déplace vers des valeurs plus anodiques, alors qu'en présence de la Glutamine, le potentiel de corrosion se déplace vers des valeurs plus négatives. Ce résultat indique que la Trimebutine joue le rôle d'un inhibiteur anodique alors que la Glutamine joue le rôle d'un inhibiteur cathodique.
- L'efficacité inhibitrice (IE) augmente avec l'augmentation de la concentration des inhibiteurs testés et atteint approximativement 84.20% à 5.3260 g/L pour la Trimebutine et 59.79 % à 0.5 g/L pour la Glutamine.

IV.2.3 Méthode de la perte de masse

Dans cette partie, nous avons présenté les résultats des essais de la méthode gravimétrique et les propriétés qui influent la vitesse de corrosion en absence et en présence des inhibiteurs notamment la concentration, et le temps d’immersion.

La vitesse de la corrosion est calculée par les formules (IV.3 et IV.4) :

$$v_{\text{corr}} = \Delta m / (S \cdot t) \tag{IV.3}$$

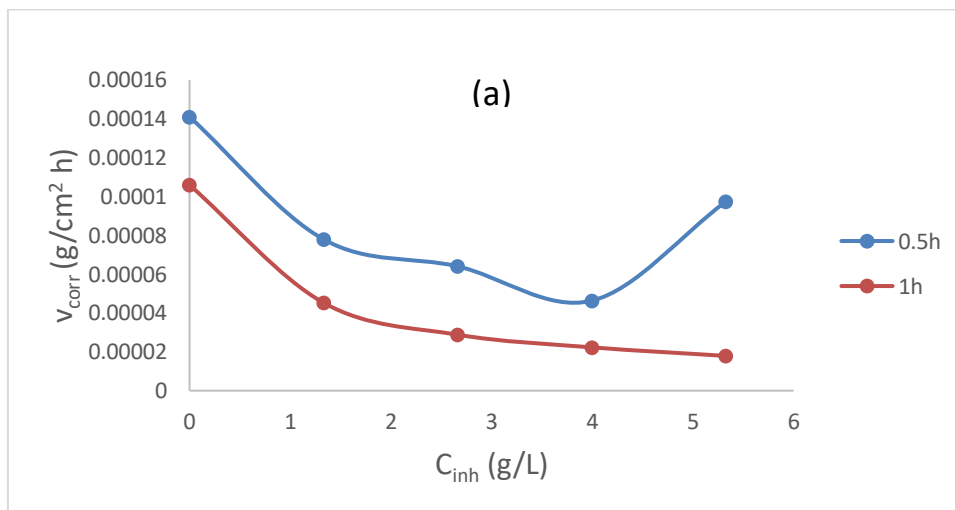
$$\Delta m = m_1 - m_2 \tag{IV.4}$$

($E_{\text{gra}}\%$) des composés étudiés est calculée en utilisant la relation suivante (IV.5) :

$$E_{\text{gra}} \% = [(v_{\text{corr}} - v_{\text{corr}}^{\text{inh}}) / v_{\text{corr}}] \times 100 \tag{IV.5}$$

IV.2.3.1 Effet de la concentration de l’inhibiteur et le temps d’immersion sur la vitesse de corrosion de l’acier au carbone AISI 1020

Les figures IV. 4 et IV.5 représentent la variation de la vitesse de corrosion et l’efficacité inhibitrice en fonction de la concentration de la Glutamine et la Trimebutine et en fonction du temps d’immersion.



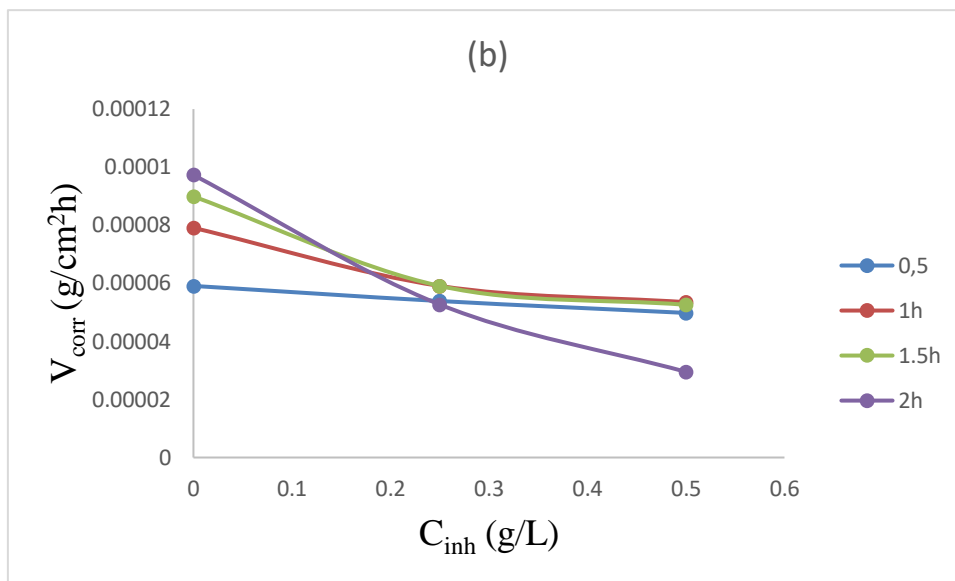
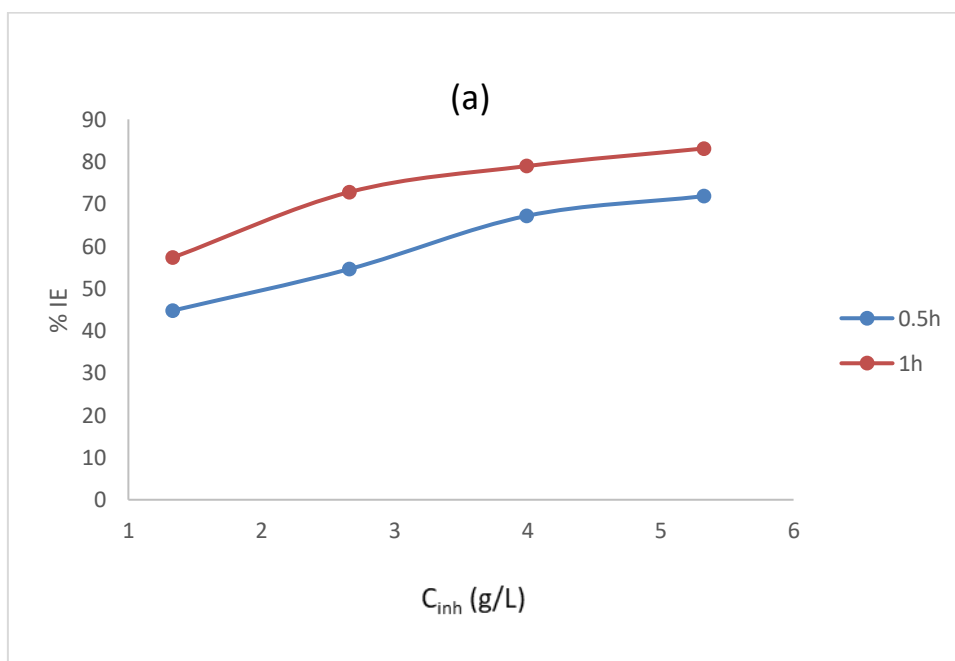


Figure IV.4: Variation de la vitesse de corrosion de l’acier au carbone AISI 1020 en fonction de la concentration de a) la Glutamine et b) la Trimebutine et en fonction du temps d’immersion.



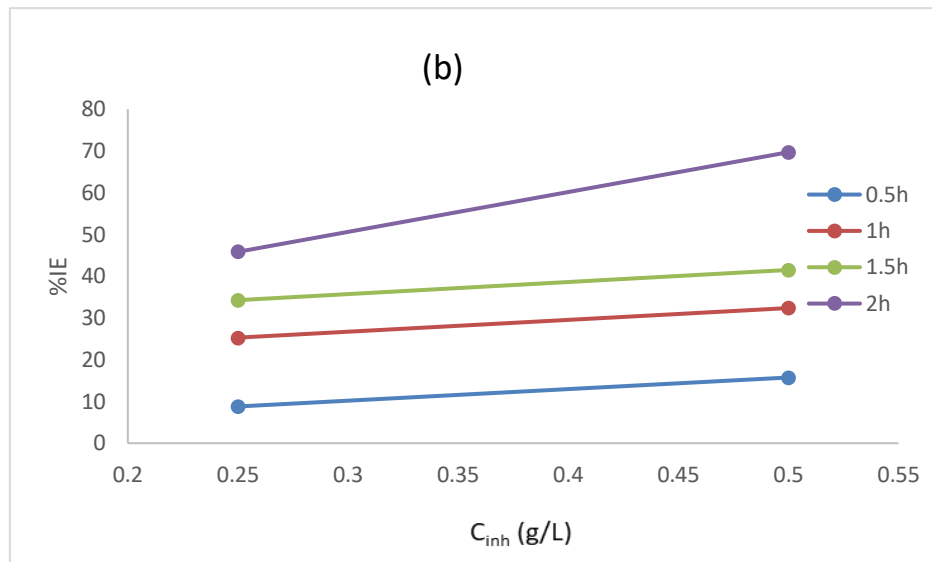


Figure IV.5 : Variation du taux d'inhibition de a) la Glutamine et b) la Trimebutine en fonction de la concentration de l'inhibiteur à différents temps d'immersion.

L'analyse des résultats obtenus (figure IV.4 et IV.5) montre que l'augmentation de la concentration de chaque inhibiteur dans le milieu corrosif a pour effet de diminuer la vitesse de corrosion de l'acier testé et d'augmenter l'efficacité inhibitrice. Ce résultat peut être interprété par l'adsorption des molécules inhibitrices de chaque inhibiteur sur la surface métallique et la formation d'un film protecteur qui permet de protéger l'acier au carbone AISI 1020 contre la corrosion [15]. L'examen des figures IV.4 et IV.5 montre aussi que l'efficacité inhibitrice augmente avec l'augmentation du temps d'immersion. Ce comportement peut être attribué à l'amélioration des caractéristiques du film protecteur formé à la surface métallique.

Nous remarquons aussi d'après les figures IV.4. IV.5 que l'efficacité inhibitrice maximale de la Trimebutine et de la glutamine est de l'ordre de 83.10 % et 69.68% respectivement. Ce résultat indique que la Trimebutine est l'inhibiteur le plus efficace vis-à-vis de la corrosion de l'acier au carbone AISI 1020 dans la solution de chlorure de sodium.

Enfin, à l'issue des résultats obtenus par la spectroscopie d'impédance électrochimique, les courbes de polarisation, et la perte de masse, nous remarquons que les efficacités inhibitrices obtenues par les trois méthodes sont en bon accord. On obtient bien, à partir des résultats de la perte de masse, le même classement du pouvoir inhibiteur des deux inhibiteurs que celui déduit des méthodes électrochimiques Glutamine < Trimebutine

IV.2.4 Isotherme d'adsorption

L'inhibition de la corrosion des métaux par les composés organiques est expliquée par leur adsorption sur la surface métallique. Les isothermes d'adsorption sont alors un complément important susceptible de déterminer le mécanisme d'adsorption de ces composés organiques sur la surface de l'alliage métallique.

Au cours de cette étude, différentes isothermes comprenant : Langmuir, Temkin et Freundlich ont été testés (figure IV.6) afin de trouver l'isotherme d'adsorption la plus convenable. La figure (IV.10) représente l'ensemble des isothermes calculées. Le choix de l'isotherme convenable a été effectué par l'utilisation du coefficient de corrélation (R^2) (Tableau III.3) [23]. Le taux de recouvrement utilisé pour tracer les isothermes d'adsorption est calculé par la relation suivante :

$$\theta = \frac{EI(\%)}{100} \quad (IV.6)$$

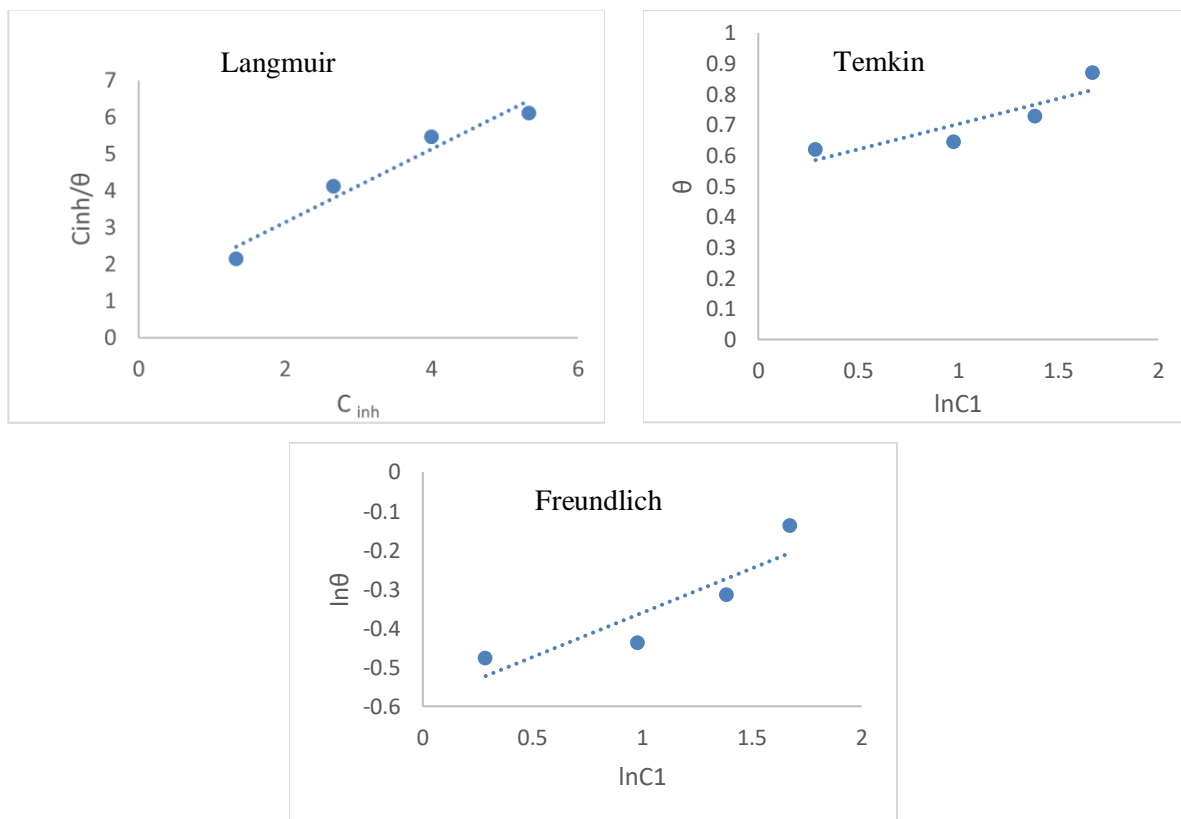


Figure IV.6 : Isothermes d'adsorption de de l'acier AISI 1020 en présence de la Trimebutine dans le milieu corrosif à 25°C.

Tableau IV.3 : coefficients de corrélation des isothermes d'adsorption.

Type d'isotherme d'adsorption	R ²
Langumir	0,9517
Temkin	0,7718
Freundlich	0,8009

L'analyse des résultats obtenus montre que seule la courbe C_{inh}/θ en fonction de la concentration de l'inhibiteur est linéaire, son coefficient de corrélation linéaire est proche de 1, cela montre que l'adsorption de la Trimebutine sur la surface de l'acier obéit à l'isotherme d'adsorption de Langmuir. Cela indique que les molécules inhibitrices de la Trimebutine forment une couche monomoléculaire sans interactions intermoléculaires [25].

(ΔG°_{ads}) peut être calculée d'après la relation suivante [17]:

$$\Delta G^{\circ} = - RT \ln (55.5 K) \tag{IV.7}$$

K : désigné la constante d'adsorption ;

C_{inh} : la concentration de l'inhibiteur dans la solution ;

R : la constante de gaz parfait en ($J. mol^{-1}.K^{-1}$) ;

La valeur 55,5 est la concentration de l'eau en solution ($mol .l^{-1}$).

T : la température en (K).

La valeur de la constante d'adsorption est calculé à partir de la valeur de l'intersection de la courbe $C_{inh}/\theta = f (C_{inh})$ avec l'axe des ordonnées. Les valeurs des enthalpies libres d'adsorption et la constante d'adsorption K_{ads} sont regroupées dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4 : paramètres thermodynamiques relatives à l'adsorption de l'inhibiteur de Trimbutine sur l'acier AISI 1020.

R ²	K_{ads} ($L.g^{-1}$)	ΔG° ($KJ.mol^{-1}$)
0,9517	0,8679	-9,5952

En général, si les valeurs de ΔG° de moins de -20 kJ / mol, on a une adsorption physique de l'inhibiteur sur la surface du métal tandis que ceux qui l'entourent de -40 kJ /mol ou supérieur signifient que l'adsorption est une adsorption chimique [59]. Dans notre cas on peut remarquer que la valeur de l'enthalpie libre d'adsorption est moins négative que -20 kJ /mol. Ce résultat indique que les molécules testées s'adsorbent à la surface métallique par des interactions physiques.

IV.2.5 Effet de la température

La température est l'un des facteurs pouvant modifier le comportement des matériaux dans un milieu corrosif donné ainsi que l'efficacité inhibitrice d'un composé. Etant donné l'importance de ce facteur, nous avons effectué une série de mesures gravimétriques en absence et en présence de différentes concentrations de la Trimebutine, à différentes températures (25°C - 35°C) et après 1h d'immersion. Les valeurs de la variation de la vitesse de corrosion et de l'efficacité inhibitrice en fonction de la température sont représentées dans les Figures (IV.7, IV8) [56].

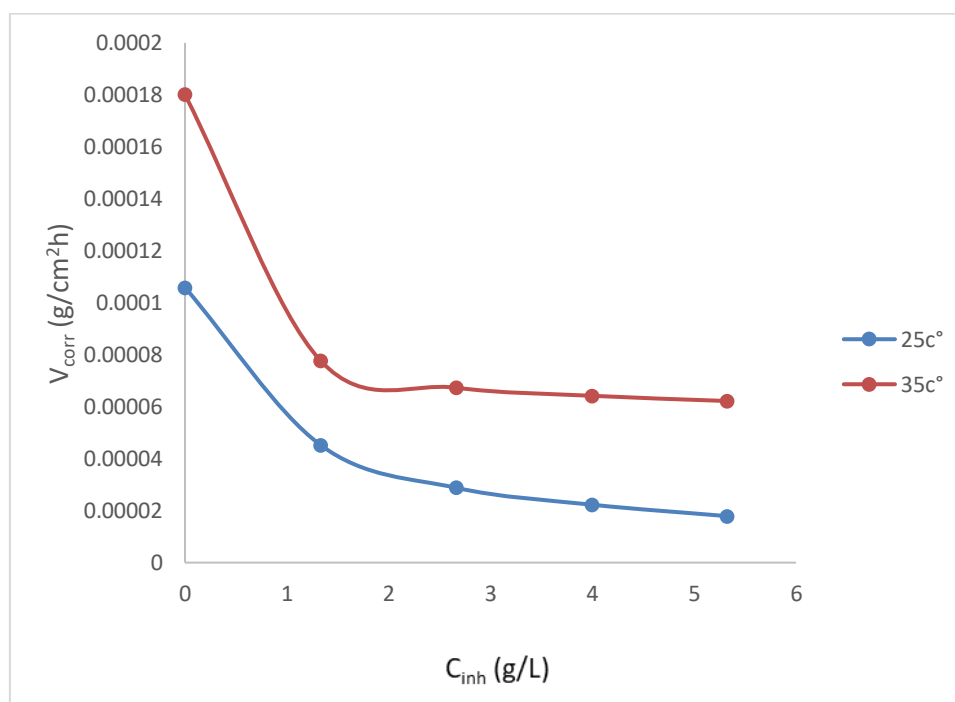


Figure IV.7: variation de la vitesse de corrosion en fonction de la température et la concentration de Trimebutine pendant une heure d'immersion dans la solution de chlorure de sodium.

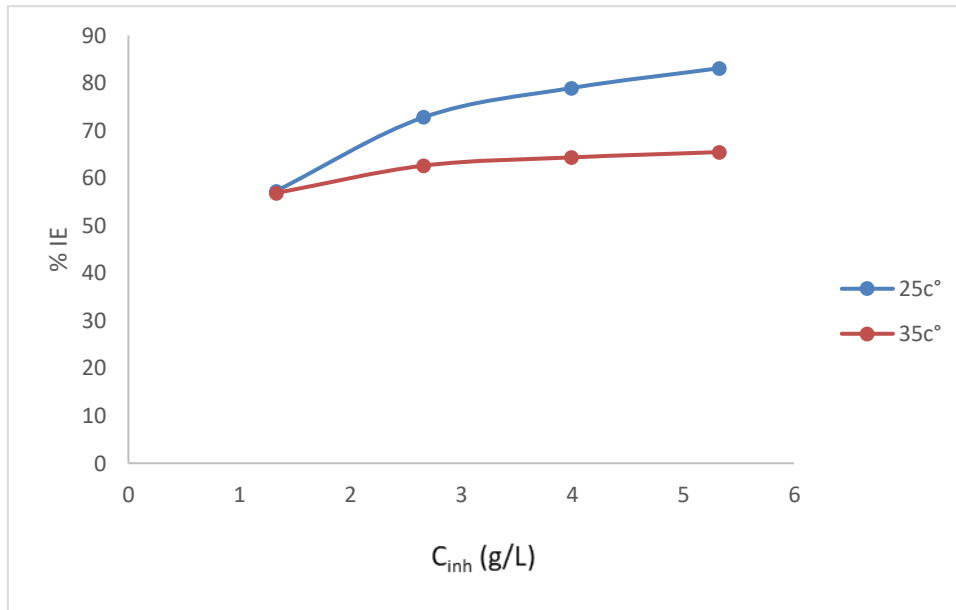


Figure IV.8: variation de l'efficacité inhibitrice en fonction de la température et la concentration de la Trimebutine pendant une heure d'immersion dans le milieu de chlorure de sodium.

L'analyse des figures IV.7 et IV.8 montre que l'augmentation de la température du milieu provoque l'augmentation de la vitesse de corrosion et la diminution de l'efficacité inhibitrice. Ce comportement peut être attribué à la désorption des molécules de l'inhibiteur de la surface métallique [2].

IV.3 Conclusion

Les résultats obtenus permettent de conclure que :

- Le taux d'inhibition de la Trimebutine et de la Glutamine est en fonction de la concentration en inhibiteur, le temps d'immersion et la température.
- la Trimebutine a un pouvoir inhibiteur très important vis-à-vis de la corrosion de l'acier au carbone AISI 1020 dans le milieu de chlorure de sodium 3%.
- L'efficacité inhibitrice de la Trimebutine est due à l'adsorption physique de ces molécules sur la surface métallique.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de notre travail est d'étudier l'action inhibitrice des deux inhibiteurs biodégradables à savoir : la Trimebutine et la Glutamine sur la corrosion de l'acier au carbone AISI 1020 dans la solution de chlorure de sodium NaCl 3%. Pour déterminer la cinétique du phénomène de corrosion, des méthodes basées essentiellement sur l'étude gravimétrique et l'étude électrochimique telle que la spectroscopie d'impédance électrochimique et la méthode de polarisation ont été employées.

Les résultats obtenus permettent de conclure que :

- L'augmentation de la concentration de la Trimebutine et la Glutamine dans le milieu corrosif conduit à la diminution de la vitesse de corrosion de l'acier au carbone AISI 1020 et à un accroissement de l'efficacité inhibitrice indiquant une bonne propriété inhibitrice contre la corrosion
- La Trimebutine est le meilleur inhibiteur vis à vis de la corrosion de l'acier au carbone AISI 1020 dans NaCl 3%, son efficacité inhibitrice atteint 83.10 % à 5.3260 g/ L.
- L'augmentation de la concentration des inhibiteurs testés dans le milieu corrosif conduit à l'augmentation des valeurs de la résistance de transfert de charge et la diminution des valeurs de la capacité de la double couche.
- Les courbes de polarisation montrent que la Trimebutine présente joue le rôle d'un inhibiteur anodique alors que la Glutamine présente un caractère cathodique.
- Le tracé des différentes isothermes (Langumir, Temkin , Freundlich) a montré que L'adsorption la Trimebutine sur la surface métallique obéit à l'isotherme d'adsorption de Langmuir, ce qui confirme la formation d'une monocouche à l'interface métal/solution.
- L'adsorption des molécules inhibitrices de la Trimebutine sur la surface métallique est réalisée par des interactions physiques.
- L'augmentation de la température du milieu corrosif conduit à l'augmentation de la vitesse de corrosion et à la diminution de l'efficacité inhibitrice.

Références bibliographiques

- [1]. Saad Guermeche Mouna, Lemrabet Amira. (2022). Etude d'efficacité inhibitrice d'extrait « myrte commun » par l'acier au carbone dans H_2SO_4 . Université 20 Août 1955–Skikda.
- [2]. Meguiba Khawla, Boufrioua Rayene. (2022). Utilisation de l'extrait du gingembre comme inhibiteurs de corrosion d'un alliage d'acier au carbone ASTM A106 grade B dans le milieu H_2SO_4 0.5M par la méthode de perte de masse. Université 20 Août 1955 –Skikda.
- [3]. Mansouri Mohamed el Mokhtar. (2020). Etude de corrosion en utilisant les inhibiteurs, Université Mouhamed Khider de Biskra
- [4]. Bernard Baroux. (2014). La corrosion des métaux Passivité et corrosion localisé.
- [5]. Dieter Landolt. (2003). Corrosion et chimie des surfaces des métaux.
- [6]. Allaoui Oussama, Moulay Smail. (2016). L'effet inhibitrice de méthoxy méthyl triphenyl phosphonium chloride contre la corrosion dans un milieu H_2SO_4 0.5M. Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [7]. Scully John Christopher. (1995). Corrosion protection, Principe fondamentaux. Ed Masson.
- [8]. Bouadda Zakia, Kaci Ilham. (2016). L'étude de l'effet de la salinité et le pH sur la performance des inhibiteurs de corrosion sur une électrode en acier au carbone. Université M'Hamed Bouguerra-Boumerdes.
- [9]. Allam Mohamed. (2017). L'inhibition de la corrosion de l'acier au carbone par les huiles essentielles en milieu acide sulfurique. Université Moulay Tahar Saida.
- [10]. D, Amokrane. Corrosion et Protection des Ouvrages. Institut algérien du pétrole. Boumerdes.
- [11]. Oulabbas Amel. (2019). Effets des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers ordinaires dans deux milieux acides. Université Badji Mokhtar Annaba.
- [12]. Belloul Yamina, Djouder Cilia. (2018). Propriétés protectrices d'un polysavon 80C12 réducteur de frottement hydrodynamique : application à l'inhibition de la corrosion du cuivre. Université de Béjaia.
- [13]. Bouziri Ahmed, ziouche aicha. (2019). Elaboration et caractérisation par les méthodes non destructives de revêtement sur les alliages utilisés en aéronautique par voie chimique. Université Saad Dahleb Blida.
- [14]. Moudjeb khawla. (2020). Etude De L'effet De L'inhibiteur À Base De Plante Sur Le

Comportement De L'acier Au Carbone Dans Le Milieu Acide HCL, Université de 20 Août 1955-Skikda.

[15]. Ghaffari Assia, (2015). Etude de l'efficacité inhibitrice de tétra (2-hydroxy-3(méthacryloyloxy) propyl benzène-1, 2, 4,5-tétracarboxylate (HMBC) vis-à-vis de la corrosion du cuivre en milieu d'acide chlorhydrique HCl 0.5N, Université Ziane Achour de Djelfa.

[16]. Bendjebbour Amina. (2011). corrosion localisée des aciers api 51 – X52 de la ligne asr/mp sollicitée en sol algérien, Université Abou Bekr Bel Kaid Tlemcen.

[17]. Korichi Nesrine. (2019). L'extrait de *carpobrotus edulis* utilisé comme inhibiteur de corrosion dans les milieux HCl 0 ,5 M, H₂SO₄ 0 ,5M, NaCl 30% et l'eau de refroidissement de L'échangeur E5, Université 20Août 1955–Skikda.

[18]. Habchi Abderrahmane. (2013). Etude de l'effet de la température sur la corrosion de l'acier XC52 en présence du Sulfarlem et leur sel correspondant dans un milieu H₂SO₄ 20%. Université Kasdi Merbah Ouargla.

[19]. Yousfi Hanane, Bourahla Souaad. (2020). Etude des inhibiteurs de corrosion pour protéger l'acier ordinaire en milieu agressif. Université Mouhamed El Bachir El Ibrahim de Bordj Bou Arréridj.

[20]. Abdelhalim Kamel. (2019). L'effet synergétique de la gomme arabique et les halogènes pour l'inhibition de l'acier API5L X70 en milieu HCl. Université Médicale Virtuelle Francophone.

[21]. Zenasni Choukria. (2013). Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier doux par des copolymères à base dupoly (4-vinylpyridine). Université Abou–Bakr Belkaid – Tlemcen.

[22]. Marmi Hayat. (2017). Amélioration de la résistance à la corrosion électrochimique des aciers par utilisation des inhibiteurs, Université Mohamed Khider-Biskra.

[23]. Boulbit Sabrina. Rouag Chayma. (2021). Étude de l'effet inhibiteur du miel contre la corrosion du Monel 400 par la méthode gravimétrique, Université de 20 Août 1955-Skikda.

[24]. Béranger Gérard, Mazille Henri. (2002). Corrosion des métaux et alliages mécanismes et phénomènes. Ed Hermès-Lavoisier.

[25]. Saigaa Narimen. (2016). Etude physicochimique de l'inhibition de la corrosion d'un acier au carbone en milieu acide sulfurique. Université Larbi Tebessi-Tébessa.

[26]. B. Grosogeat, P. Colon. (2010). La Corrosion. Université Médicale Virtuelle Francophone.

[27]. Slimane Ben Ali Djihane, Taier Meriem. (2019). Elaboration et caractérisation dans les milieux corrosifs HCl, NaCl, H₂SO₄ et les condensats de la vapeur LS d'un inhibiteur à base de feuille d'olive pour le tenu en corrosion des acides. Université Larbi Tebessi-Tébessa.

Chapitre 2

[28]. Chalabi Imene, Chalabi Meriem. (2020). L'utilisation de figuier de barbarie comme inhibiteur vert de corrosion dans un milieu acide. Université de 20 août 1955-Skikda.

[29]. Ghames Amel. (2017). Caractérisation et étude de l'efficacité inhibitrice et biologique des dérivés du 4,4'-diaminobenzyl et de leurs complexes métalliques. Université Ferhat Abbas Sétif-1.

[30]. Slimani Ammar, Ghedier Brahim Nourediene. (2017). Effets de la corrosion sur les installations gaziers et leurs méthodes de protections. Cas de SH /HASSI R'MEL. Université Kasdi Merbah Ouargla.

[31]. Anoune Imad. (2014). Résistance à la corrosion des revêtements composites Nickel-Alumine sur différents substrats, Université Hadj Lakhdar Batna.

[32]. Abekhti Nadia, Bendahir Aicha. (2019). Corrosion dans les installations pétrolières de surface causes, effets et remèdes, Université d'Adrar.

[33]. Chettibi Nedjla, Boufrioua Amira. (2021). Etude expérimentale et modélisation du comportement de l'inhibiteur CHIMEC 1038 après dopage. Université de 20 Août 1955-Skikda.

[34]. S Bensaada. Cours de corrosion, université de Jijel.

[35]. Bensabra Hakim. (2016). Cours de Corrosion et Protection des Métaux, Université de Jijel.

[36]. Sayad Bouzid. (2018). Etude du Comportement à la corrosion d'une Fonte à graphite sphéroïdale en milieu chloruré. Université Badji Mokhtar Annaba.

[37]. Nebbar Mohamed Chaouki. (2010). Etude de la tenue à la corrosion de l'acier N80 et évaluation de l'efficacité d'un inhibiteur de corrosion. Université Mohamed Khider – Biskra.

[38]. M. Hélie. Produits de corrosion et couche d'oxyde à la surface d'un acier, Université d'Evry - Val d'Essonne.

[39]. Bouaoud Moufida. (2014). Tenue à la corrosion en milieu acide d'un dépôt de Zn-Sn sur acier inoxydable, Université Ferhat Abbas-Sétif 1.

[40]. Hanane Karek. (2016). Comportement électrochimique du fer blanc en milieu NaCl. Université 20 Août 1955 de Skikda.

- [41]. Chennouf safa, Boumaza khawla. (2021). Effet de l'extrait de plante *Ocimum basilicum* L sur le comportement électrochimique du fer blanc en milieux NaCl (2%). Université 20 Août 1955-Skikda.
- [42]. Djbablah chaoibe, Belabed Housseem. (2020). Corrosion inhibition de l'acier au carbone par des extraits de plante verte. Université de 20 Août 1955-Skikda.
- [43]. Kaoudj Fariza, Zioui Hayat. (2020). Propriétés inhibitrices de l'extrait de la plante d'ortie vis-à-vis de la corrosion de l'acier XC38 en milieu H₂SO₄. Université A.M.Oulhadj-Bouira.
- [44]. Bouali Imane. (2018). Étude d'inhibiteurs de corrosion métallique à base d'orthophosphates de zirconium lamellaires fonctionnalisés. Université de Lorraine Nancy.
- [45]. Khoukhi Faiza. (2008). Etude de l'efficacité de deux inhibiteurs de corrosion dans les milieux multiphasiques (Eau, huile et gaz). Université M'hamed Bougara de Boumerdes.
- [46]. Ahmad Zaki. Principles Corrosion Engineering and Corrosion Control. (2006). USA. Ed Elsevier Ltd.
- [47]. Benaksa Feyrouz. (2017). Étude de la corrosion aqueuse d'un acier inoxydable dans différents milieux. Université de Biskra.
- [48]. Djouhri Lyés. Titouah Khaled. (2018). Etude de l'efficacité d'inhibiteur de corrosion en présence des produits de traitements dans L'industrie pétrolière. Université A. Mira – Bejaia.
- [49]. Benaicha Maamar, Messai Ahmed Yakoub. (2013). Étude l'effet inhibitrice de (N_mésitylimidazole) contre la corrosion d'acier(XC70) dans un milieu acide (H₂SO₄ 0.5M) par la méthode de dosage volumétrique, Université Kasdi Merbah – Ouargla.
- [50]. Meguedmi Samia, Faghmous Zineb. (2019). Synthèse et caractérisation d'un inhibiteur à base de plante pour la protection contre la corrosion des pipes pour le transport de brut. Université 20 Aout 1955-Skikda.
- [51]. Nassar Bouchra. Leddai zohra. (2019). Inhibition de la corrosion d'un acier par un agent de surface. Université du 20 Août 1955–Skikda.
- [52]. Laraba Lamia, Saadi Ahlem Sara. (2019). Université 20 Août 1955-Skikda.
- [53]. Meftah ILhem, Mansouri Rayene. (2019). Utilisation de l'extrait d'Aloe vera comme inhibiteur de corrosion pour l'acier au carbone X70 dans les milieux chlorhydriques à différentes concentrations. Université 20 Août 1955-Skikda.
- [54]. Yekhlef Radhia. (2012). Synthèse de nouveaux composés de l'acide phosphonique et

mise en évidence de leur acidité, affinité de chélation et de leurs propriétés inhibitrices de corrosion. Université Ferhat Abbas-Setif 1.

[55]. Aliouali Azeddine.(2017). Etude du comportement à la corrosion de l'aluminium dans différents milieux, Université de Batna2.

[56]. Boukili Abdelkamel. (2015). Contribution à l'étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier doux C38 en milieu chlorhydrique molaire par un dérivé de la Mercaptobenzimidazole. Université Sidi Mohammed Ben Abdellah.

[57].Berdjough Nawel, Degachi Meriem. (2014). Etude du comportement électrochimique d'un acier au carbone sous l'effet De la température en milieu acide. Université d'EL-Oued.

[58]. Clinton Chinogurei. (2018). Propriétés inhibitrices de l'huile de cade sur la corrosion de l'aluminium. Université Badji Mokhtar-Annaba.

[59]. Doudi Khadija. (2014). Etude de l'influence des paramètres opératoires sur l'efficacité inhibitrice de l'extrait brut de trigonella foenum-graecum L vis-à-vis de la corrosion de l'acier au carbone en milieu d'acide chlorhydrique 1N HCl. Université Ziane Achour de Djelfa.

المخلص

يعد استخدام المثبطات من أكثر الطرق استخدامًا لحماية المعادن من التآكل. الهدف من هذا العمل هو دراسة تثبيط تآكل الفولاذ AISI 1020 في وسط كلوريد الصوديوم بواسطة مثبطين قابلين للتحلل الحيوي هما الجلوتامين وتريمبوتين. أجريت هذه الدراسة بالطرق الكهروكيميائية (مطيافية المعاوقة الكهروكيميائية (EIS) ومنحنيات الاستقطاب) وطريقة الكتلة المفقودة. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن الفعالية التثبيطية للمثبطات المختبرة تعتمد على زمن الغمر وتركيز المثبط ودرجة الحرارة Trimebutine. هو أفضل مثبط ، تصل كفاءته التثبيطية القصوى إلى حوالي 83.10% في وجود 5.326 جم / لتر في وسط التآكل. يلعب Trimebutine دور مثبط انوديك بينما يتمتع الجلوتامين بطابع كاثودي. تم تحقيق امتزاز جزيئات مثبط Trimebutine على سطح المعدن من خلال التفاعلات الكهروستاتيكية (الامتزاز المادي) عن طريق تكوين طبقة أحادية في واجهة المعدن / المحلول.

الكلمات المفتاحية: التآكل ، الفولاذ الكربوني ، درجة حرارة الامتزاز ، فقدان الكتلة ، مانع التآكل.

Résumé

L'emploi des inhibiteurs est l'une des méthodes les plus utilisées pour protéger les métaux contre la corrosion. L'objectif de ce travail est d'étudier l'inhibition de la corrosion de l'acier AISI 1020 dans le milieu de chlorure de sodium par deux inhibiteurs biodégradables à savoir la Glutamine et la Trimebutine. Cette étude a été réalisée par les méthodes électrochimiques (la spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) et les courbes de polarisation) et la méthode de la masse perdue. Les résultats obtenus montrent L'efficacité inhibitrice des inhibiteurs testés dépend du temps d'immersion, de la concentration de l'inhibiteur et de la température. La Trimebutine est le meilleur inhibiteur, son efficacité inhibitrice maximale atteint une valeur de l'ordre de 83,10% en présence de 5.326 g/L dans le milieu corrosif. La Trimebutine joue le rôle d'un inhibiteur anodique alors que la Glutamine présente un caractère cathodique. L'adsorption des molécules inhibitrices de la Trimebutine sur la surface métallique est réalisée par des interactions électrostatiques (adsorption physique) en formant une monocouche à l'interface métal/ solution.

Mots clés : corrosion, acier au carbone, isotherme d'adsorption, perte de masse, inhibiteur de corrosion.

Abstract

The use of inhibitors is one of the most widely used methods to protect metals against corrosion. The objective of this work is to study the inhibition of corrosion of AISI 1020 steel in sodium chloride medium by two biodegradable inhibitors namely Glutamine and Trimebutine. This study was carried out by electrochemical methods (electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and polarization curves) and the lost mass method. The results obtained show the inhibitory effectiveness of the inhibitors tested depends on the immersion time, the concentration of the inhibitor and the temperature. Trimebutine is the best inhibitor, its maximum inhibitory efficiency reaches a value of around 83.10% in the presence of 5.326 g/L in the corrosive medium. Trimebutine plays the role of an anodic inhibitor while Glutamine has a cathodic character. Adsorption of Trimebutine inhibitor molecules on the metal surface is achieved by electrostatic interactions (physical adsorption) by forming a monolayer at the metal/solution interface.

Key words: corrosion, carbon steel, adsorption isotherm, mass loss, corrosion inhibitor.