



UNIVERSITÉ DE SAÏDA - Dr MOULAY TAHAR جامعة سعيدة – د. مولاي الطاهر

العلوم كلية

Faculté des Sciences et Technologie

Département de Science de la matière

قسم علوم المادة

MEMOIRE

Elaboré en vue de l'obtention du diplôme de master en chimie

Spécialité : Chimie inorganique

Intitulé :

Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier doux en milieu acide par l'acide 3,5-dinitrosalicylique (DNS)

Présenté par :

KEDIDIR Mohammed islam

Soutenu le **18/06/2026**, devant le jury composé de :

M ^{me} ZAOUI Fatiha	Université de Saïda - Dr MOULAY Tahar	Présidente
M ^r BENALI Omar	Université de Saïda - Dr MOULAY Tahar	Encadrant
M ^{me} OULDKADA Zahra	Université de Saïda - Dr MOULAY Tahar	Examinatrice

Année universitaire 2025/2026

REMERCIEMENTS

Tous d'abord je remercie mon grand DIEU pour le courage et la volonté qu'il m'a donnée pour achever ce travail.

Au premier temps, je tiens à remercier monsieur le professeur **Benali Omar** pour la confiance qu'elle m'a témoignée en acceptant de diriger ce travail et pour avoir mis à ma disposition les moyens nécessaires pour l'aboutissement de ce projet.

Mes vifs remerciements vont aussi aux membres de jury de ce mémoire ; en l'occurrence son président M^{me} Zaoui Fatiha qui a réservée une part de son temps à l'évaluation de ce travail et l'examinatrice M^{me} Oulakada Zahra qui a acceptée d'expertiser ce projet.

Que M^r Houari Brahim directeur du laboratoire de chimie : synthèses, propriétés et applications trouve ici mes plus grands remerciements pour m'avoir accepté dans son laboratoire ainsi que Mr Sehmi Abdelghani pour son aide à la synthèse du notre inhibiteur.

Que tous les enseignants qui ont contribué à ma formation trouvent ici l'expression de mon estime, de ma reconnaissance et de ma gratitude.

Un merci spécial est adressé à tous les camarades de ma promotion.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à ma famille : Ma mère, mon frère, mes sœurs et tous mes proches et amis, qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

*A ma très chère et
adorable mère qui est toujours
ma source de courage et de réussite.*

A mon frère et mes sœurs.

A toute ma famille.

A tous mes amis.

Liste des figures

Chapitre I : Revue bibliographique sur la corrosion et l'inhibition de la corrosion

Figure I.1: Amorçage et propagation d'une piqûre	3
Figure I.2: Corrosion par piqûre (cas réel).....	3
Figure I.3: Représentation schématisée d'une pile de corrosion	3
Figure I.4: Image MEB d'une coupe transversale montrant la corrosion intergranulaire	4
Figure I.5: (a) dézincification d'une tige de laiton ayant séjourné douze ans dans l'eau, (b) corrosion graphitique d'une fonte à graphite lamellaire	4
Figure I.6: Corrosion sous contrainte d'une pipe en acier (a) surface extérieure, (b) surface intérieure	5
Figure I.7: corrosion galvanique entre deux métaux M1 et M2	6
Figure I.8: Les classes des inhibiteurs.	9
Figure I.9: Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel.....	11
Figure I.10: Schéma de principe d'impédance électrochimique.....	12
Figure I.11: Diagramme de Nyquist correspondant à une interface	13
Figure I.12: Diagramme de Bode correspondant à une interface électrode/solution	13
Figure I.13: Circuit de Randles d'une interface électrochimique simple	14

Chapitre II: Partie expérimentale

Figure II.1 : Préparation de l'acide 3,5-dinitrosalicylique (DNS)	17
Figure II.3: Dispositif expérimental de trois électrodes.....	19
Figure II.4: Dispositif expérimental des mesures électrochimiques.	19
Figure II.5: Le logiciel de pilotage : Orignalys	20

Chapitre III: Résultats et discussion

Figure III.1: Variation de potentiel de libre (OCP) en fonction de la concentration en inhibiteur	21
Figure III.2: Courbes de polarisation de l'acier doux en l'absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur dans HCl 1M.....	22
Figure III.3: Exemple de traitement des données des courbes de polarisations par le logiciel Orignalys (Acier doux + HCl 1 M sans inhibiteur)	23
Figure III.4: Exemple de traitement des données par la méthode de Stern et Geary par le logiciel Orignalys (Acier doux + HCl 1 M sans inhibiteur)	25
Figure III.5: a) Diagrammes de Nyquist pour l'acier doux dans une solution d'HCl 1M contenant différentes concentrations de l'inhibiteur à 30 °C	26
Figure III.6: b) Diagrammes de Bode pour l'acier doux dans une solution d'HCl 1M contenant différentes concentrations de l'inhibiteur à 30 °C	27
Figure III.7: Exemple de traitement des données par le logiciel Zview (Acier doux + HCl 1 M sans inhibiteur)	28
Figure III.8: Circuit équivalent des spectres d'impédance obtenus pour le système : acier doux / HCl 1M / inhibiteur	28

Figure III.9: a) Diagrammes de Nyquist pour l'acier doux dans une solution d'HCl 1M seul à différent temps d'immersion et à 30 °C.....	30
Figure III.10: b) Diagrammes de Nyquist pour l'acier doux dans une solution d'HCl 1M + 5×10^{-4} M en inhibiteur à différent temps d'immersion et à 30 °C.....	31
Figure III.11: Courbes $\log(I) = f(E)$ du système Acier doux/ HCl 1M/ inhibiteur à T=350C	33
Figure III.12: Droites d'Arrhenius de l'acier doux en absence et en présence de l'inhibiteur a différentes concentration.....	34
Figure III.13: Courbes d'ajustement des données de corrosion de l'acier doux en présence d'inhibiteur selon l'isotherme de Langmuir a différentes températures.	36

Liste des tableaux

Chapitre II: Partie expérimentale

Tableau II.1 : Caractérisation du composé Infrarouge.....	17
Tableau II.2 : Caractérisation du composé RMN... ..	18

Chapitre III: Résultats et discussion

Tableau III.1: grandeurs électrochimiques et taux d'inhibitions (EI%) de la corrosion de l'acier doux dans HCl 1 M sans et avec addition de l'inhibiteur à différentes concentrations... ..	24
Tableau III.2. Efficacités inhibitrices obtenues par les différentes méthodes.....	25
Tableau III.3: Valeurs de R_p et efficacités d'inhibition de la corrosion correspondantes pour la corrosion de l'acier doux dans une solution d'HCl 1M contenant différentes concentrations de l'inhibiteur à 30 °C.....	26
Tableau III.4 : Paramètres d'impédance et efficacité d'inhibition de la corrosion de l'acier doux dans une solution d'HCl 1M contenant différentes concentrations de l'inhibiteur à 30°C	31
Tableau III.5: Paramètres d'impédance et efficacité d'inhibition à différents temps d'immersion.....	33
Tableau III.6 : Paramètres électrochimiques obtenus à $T=35^{\circ}\text{C}$	35
Tableau III.7 : Energie d'activation E_a pour l'acier doux dans HCl 1M sans et avec l'inhibiteur	36
Tableau III.8: Paramètres d'adsorptions pour le système Acier doux/HCl 1M/ inhibiteur	38

Sommaire

Introduction générale.....	1
<i>Chapitre I : Revue bibliographique sur la corrosion et l'inhibition de la corrosion</i>	
I.1. Introduction	2
I.2. Types de corrosion	2
I.3. Différentes formes de la corrosion	2
I.3.1. Corrosion uniforme ou généralisée	2
I.3.2. Corrosion localisée (par piqûres)	2
I.3.3. La corrosion galvanique	3
I.3.4. La corrosion intergranulaire.....	4
I.3.5. La corrosion sélective.....	4
I.3.6. Corrosion sous contrainte.....	5
I.3.7. Corrosion galvanique	5
I.4. Lutte contre la corrosion.....	6
I.4.1. Prévention par une forme adaptée des pièces.....	6
I.4.2. Prévention par le choix du matériau	6
I.4.3. Protection par revêtements	7
I.4.4. La protection électrochimique.....	7
I.5. Généralités sur l'utilisation des inhibiteurs de corrosion	8
I.5.1. Conditions d'utilisations et propriétés.....	8
I.5.2. Les classes d'inhibiteurs	9
I.6. Types d'adsorption	9
I.6.1. Adsorption physique	10
I.6.2. Chimisorption.....	10
I.7. Méthodes électrochimiques d'étude de la corrosion.....	10
I.7.1 Suivi du potentiel en circuit ouvert.....	10
I.7.2 Courbes de polarisation.....	10
I.7.3. Mesure de résistance de polarisation (Methode de Stern et Geary).....	11
I.7.3. Spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE).....	12
<i>Chapitre II : Partie Expérimentale</i>	
II.1. Introduction	15
II.2. L'acier doux	15

II.3. L'inhibiteur.....	15
II.4. Mesures électrochimiques	18
<i>Chapitre III : Résultats et discussion</i>	
III.1. Influence de la concentration de l'inhibiteur	21
<i>III.1.1. Potentiel a circuit ouvert</i>	21
<i>III.1.2. Courbes de polarisation</i>	21
<i>III. 1.3. Méthode de Stern et Geary</i>	25
<i>III.1.4 Méthode Spectroscopie d'impédance électrochimique</i>	26
III.2. Influence du temps d'immersion	29
III.3. Effet de la température.....	31
III.4. Phénomène d'adsorption	35
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	40

Introduction générale

Les solutions acides telles que le HCl et le H₂SO₄ sont largement employées dans différentes l'industrie, notamment dans l'élimination de couches superficielles indésirable se trouvant sur les surfaces métallique, le décapage et dans plusieurs procédés de synthèse industrielle.

A cause de leurs caractères agressifs, l'emploi des inhibiteurs de corrosion des métaux et alliages en présence des solutions acides est devenue incontournable. Le choix d'untel ou tel inhibiteur est fonction de plusieurs paramètres parmi eux, on site: la nature de l'acide, de sa quantité (concentration du milieu), de la température de la solution, de la présence de substances dissoutes et aussi et surtout du type de métal (acier doux, acier dur, cuivre,).

Donc pour supprimer les dépôts indésirables, les pièces en métal sont plongées dans des bains acides où l'attaque acide engendre le passage en solution de ces dépôts mais aussi partiellement celle du métal à partir de la surface. Afin de réduire la dégradation du métal et la consommation de l'acide, des inhibiteurs de corrosion efficaces doivent être ajoutés au bain de nettoyage. Dans ce contexte l'acide HCl est le plus employé. Il est de plus en plus remplacé par l'acide sulfurique.

Le présent travail se veut une contribution dans le domaine de l'application des inhibiteurs organiques pour lutter contre la corrosion d'un acier doux en présence et en absence d'un inhibiteur nouvellement synthétisé. Notre choix s'est porté sur le acide 2-hydroxy-3,6-dinitrobenzoïque ou 3,6-dinitro acide salicylique (**DNS**) dans le milieu agressif HCl 1M.

Le mémoire est scindé en trois chapitres :

Le chapitre 1 est une mise au point générale sur la corrosion, les inhibiteurs de corrosion et les méthodes d'études de l'inhibition de la corrosion.

Le chapitre 2 présente les dispositifs expérimentaux, le milieu d'étude et le matériau utilisé.

Le chapitre 3 fait état des résultats et discussion.

Notre travail est couronné par une conclusion.

***Chapitre I : Revue bibliographique sur la corrosion
et l'inhibition de la corrosion***

I.1. Introduction

Selon la norme internationale ISO 8044 [AFNO, 00], la corrosion est définie comme une interaction physico-chimique entre un métal et son environnement, entraînant des changements dans les caractéristiques du métal et souvent une détérioration fonctionnelle du métal lui-même, de son entourage ou du système technique formé par ces deux éléments [1-2]. Alors comme tous autres phénomènes, la corrosion suit des principes thermodynamiques. Le métal a une prédisposition à retrouver son état initial, c'est-à-dire retourné vers sa forme plus stable présente dans la nature. Cela est dû au fait qu'à l'exception des métaux précieux (comme l'or et le platine) qui existent à l'état naturel, la plupart des métaux présents sur terre se trouvent sous forme d'oxydes, de sulfures et de carbonates et silicates [2-3].

I.2. Types de corrosion

On observe différents types de corrosion : sèche, atmosphérique, sous contrainte, humide, bio-corrosion,...

On se limite à la corrosion métallique en solution. Elle se traduit simultanément par réaction d'oxydation du métal et une réaction de réduction de l'agent corrosif ou oxydant. Le phénomène de corrosion est essentiellement un phénomène électrochimique. D'autre part la corrosion est importante d'un point de vue économique (le coût de la corrosion s'élève à environ 4% du PNB) et environnemental (dispersion des ions métalliques dans l'environnement) [3-4]

I.3. Différentes formes de la corrosion

I.3.1. Corrosion uniforme ou généralisée

Se manifeste avec la même vitesse en tous les points du métal entraînant une diminution régulière de l'épaisseur de celui-ci ou simplement un changement de coloration (ternissement)

I.3.2. Corrosion localisée (par piqûres)

Généralement les métaux et alliages protégés par un film passif (oxydes ou autres) peuvent subir une attaque par piqûration, lorsqu'il se produit une rupture localisée du film. Ces piqûres se localisent en certains points de la surface métallique, elles se développent de façon insidieuse et s'auto propagent : au fond de la cavité créée, l'hydrolyse des ions métalliques dissous entraîne une augmentation du degré d'acidité, ce qui entretient le phénomène de corrosion [2-3, 5-8].

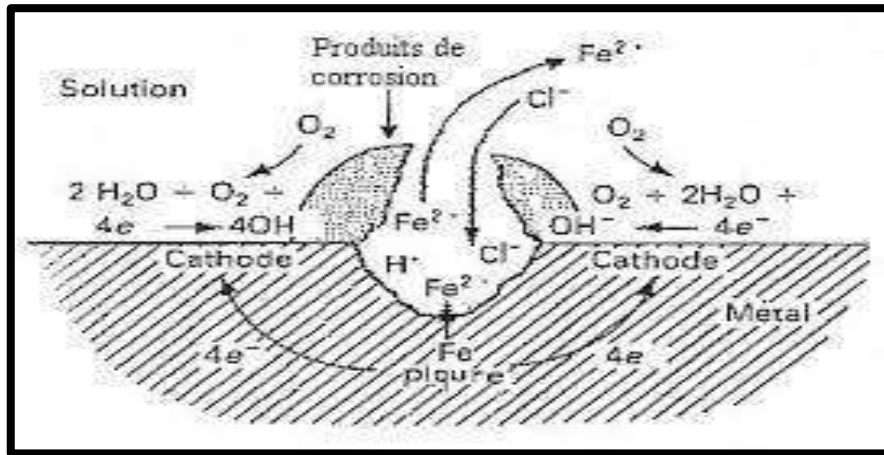


Figure I.1: Amorçage et propagation d'une piqûre.



Figure I.2: Corrosion par piqûre (cas réel)

1.3.3. La corrosion galvanique

Elle est le résultat de la formation de micro-piles où l'on distingue des zones anodiques (métal attaqué) et des zones cathodiques (réduction de l'agent corrosif généralement les ions H^+ en milieu acide). Ceci est dû à la présence d'hétérogénéités soit au niveau du métal ou alliage soit au niveau du milieu agressif [3, 6-7].

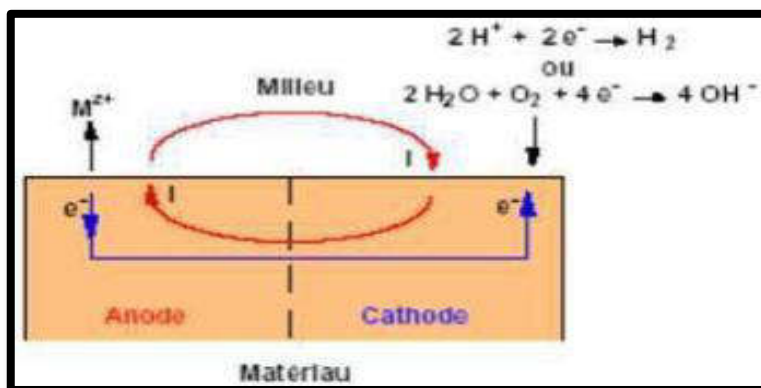


Figure I.3: Représentation schématique d'une pile de corrosion.

I.3.4. La corrosion intergranulaire

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 et elle se manifeste aux joints intergranulaires [8].

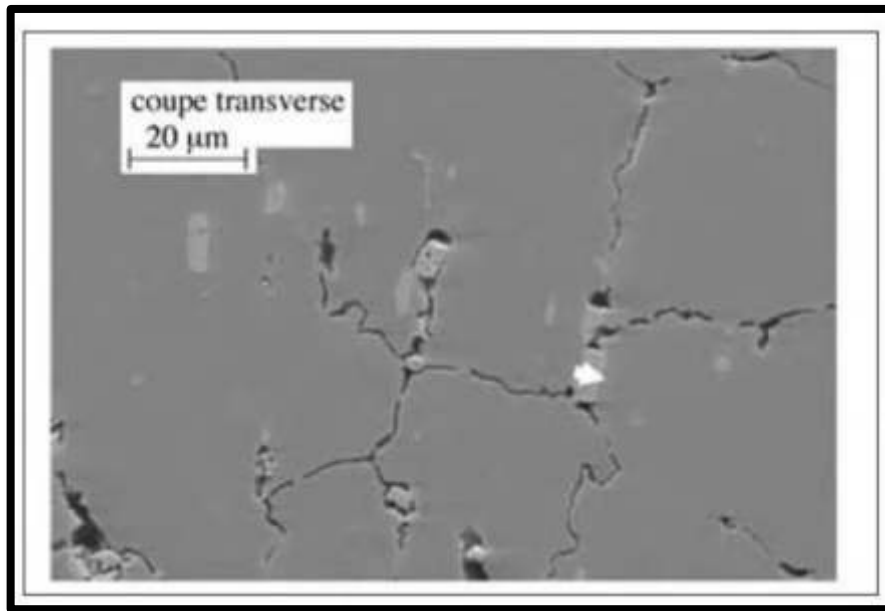


Figure I.4: Image MEB d'une coupe transversale montrant la corrosion intergranulaire

I.3.5. La corrosion sélective

Elle correspond à une oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse (dont les différents constituants réagissent en proportion différente de leur teneur) [9-10].

Exemple : la dézincification du laiton et la corrosion graphitique d'une font à graphite lamellaire.

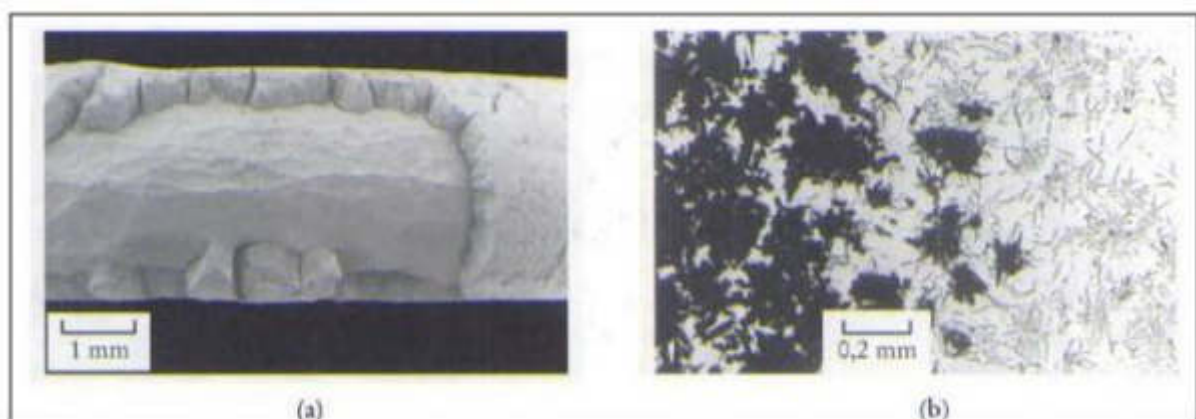


Figure I.5: (a) dézincification d'une tige de laiton ayant séjourné douze ans dans l'eau, (b) corrosion graphitique d'une font à graphite lamellaire.

I.3.6. Corrosion sous contrainte

Elle résulte de l'action commune de la corrosion et d'une contrainte mécanique (déformation du métal sous l'effet de contraintes appliquées ou résiduelles). Ce phénomène concerne un grand nombre de matériaux, notamment passivables dont le film protecteur se rompt localement sous l'action des contraintes, entraînant alors une corrosion localisée [11-12].

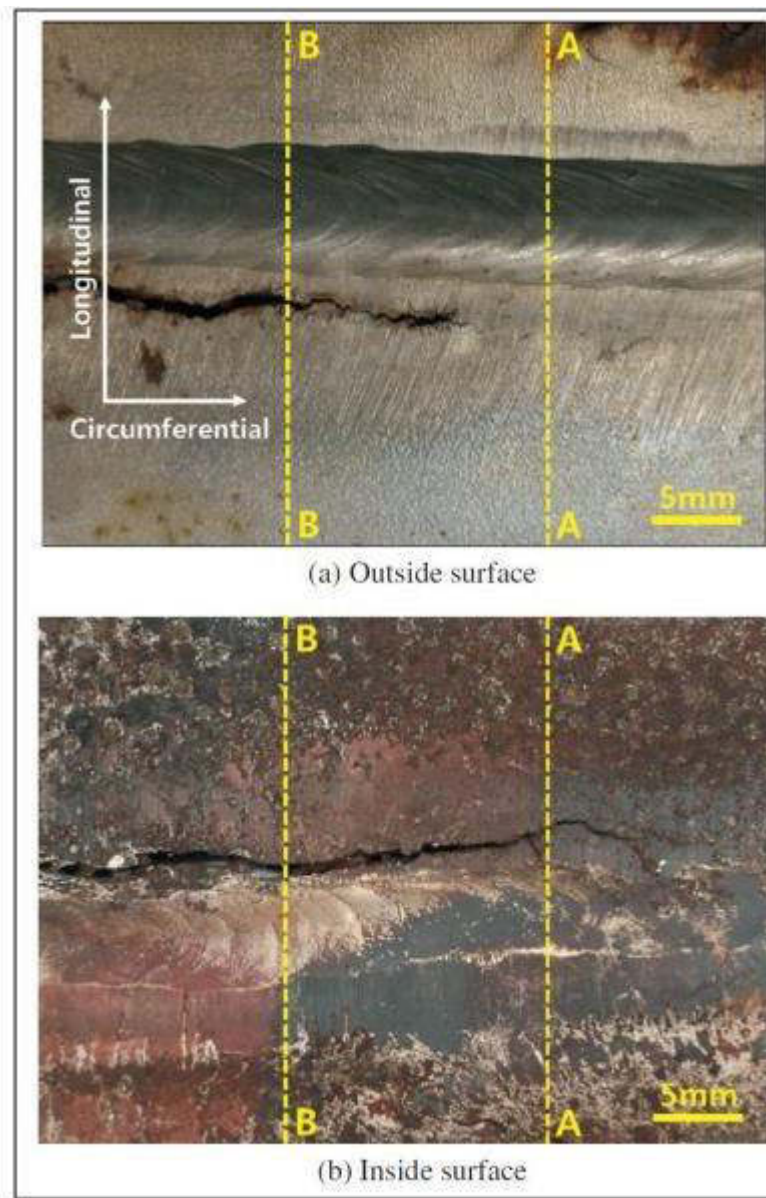


Figure I.6: Corrosion sous contrainte d'une pipe en acier (a) surface extérieure, (b) surface intérieure

I.3.7. Corrosion galvanique

Cette forme de corrosion est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux. La dégradation du métal le moins résistant s'intensifie. C'est une des formes de

corrosion les plus fréquentes en milieu aqueux. Les zones où se produisent les réactions anodique (corrosion du matériau) et cathodique (réduction de l'oxydant) sont distinctes. Cette localisation des réactions est essentiellement liée à une hétérogénéité provenant du métal, du milieu ou des conditions physico-chimiques à l'interface [12-14].

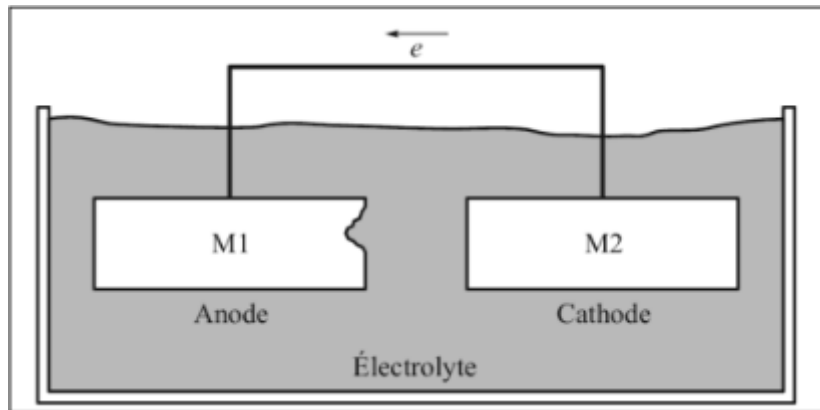


Figure I.7: corrosion galvanique entre deux métaux M1 et M2

I.4. Lutte contre la corrosion

Toutes les mesures qu'on peut prendre pour protéger les matériaux métalliques contre l'action destructive du milieu rentrent dans la lutte contre la corrosion. La protection la plus immédiate est de choisir des métaux ou alliages résistant aux milieux agressifs. Il est à noter que, dès la phase de conception d'une installation, la protection contre la corrosion doit être considérée pour éviter de nombreux problèmes et garantir une certaine durée de vie.

Il existe plusieurs techniques de protection que l'on peut classer comme [2-3] :

- ✓ prévention par une forme adaptée des pièces.
- ✓ prévention par un choix des matériaux.
- ✓ protection par revêtements.
- ✓ protection électrochimique.
- ✓ protection par inhibiteurs.

I.4.1. Prévention par une forme adaptée des pièces

Elle consiste à adapter la géométrie des objets aux conditions d'utilisation afin d'éliminer les zones de rétention d'humidité, de faciliter l'écoulement des fluides et d'éviter l'accumulation de dépôts [15].

I.4.2. Prévention par le choix du matériau

Le choix du matériau doit principalement tenir en compte de l'influence défavorable et des conditions de fonctionnement. Il n'existe pas de métaux ou alliages qui ont une résistance

absolue à la corrosion, mais on connaît uniquement des matériaux résistant à la corrosion dans certains milieux agressifs. Le comportement à la corrosion n'est qu'un critère parmi d'autres dans le choix des matériaux, bien qu'il s'avère souvent déterminant. La résistance à la corrosion est une propriété du système métal-milieu et non du métal seul [16].

1.4.3. Protection par revêtements

Les revêtements 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 [17]. On distingue :

- Protection par revêtements métalliques: sont couramment employés pour protéger l'acier contre la corrosion atmosphérique. Selon leur comportement à la corrosion par rapport à substrat, on distingue deux types de revêtements métalliques :
 - ✓ Ceux plus nobles que le substrat cathodique.
 - ✓ Ceux moins nobles que le substrat anodique.
- Protection par revêtements organiques : généralement ils forment une barrière plus ou moins imperméable entre le substrat métallique et le milieu, et on les classe en trois familles [18] :
 - ✓ Revêtements en bitumes,
 - ✓ Revêtements polymériques,
 - ✓ Peintures et vernis.

1.4.4. La protection électrochimique

Pour effectuer la protection électrochimique d'un métal, on modifie son potentiel de dissolution de façon à l'utiliser soit dans la zone d'immunité, soit dans la zone de passivité (diagramme de Pourbaix)[17-19].

- Protection cathodique :

La protection cathodique est le plus important de tous les moyens permettant de contrôler la corrosion par l'application d'un courant électrique. La corrosion peut être virtuellement réduite à zéro et une surface d'un métal peut être maintenue dans un milieu corrosif sans aucune détermination pendant un temps indéfini. La protection cathodique peut être utilisée en pratique pour protéger les métaux tels que l'acier, le cuivre, le plomb, le laiton et l'aluminium contre la corrosion dans tous les sols et pratiquement dans tous les milieux aqueux [20].

➤ Protection anodique :

Certains métaux tels que le fer et les aciers inoxydables peuvent aussi être protégés efficacement en les plaçant en anode et en augmentant leur potentiel dans le domaine passif de la courbe de polarisation anodique [21].

➤ Protection par anode sacrificielle :

Un métal plus corrodable (Al, Mg, Zn....) est intégré dans la structure en contact électrique avec le métal à protéger. Le courant I_{protec} est fixé par l'intersection des droites cathodique du métal et anodique de l'anode. L'anode se consomme et se change régulièrement (coques de bateaux, chauffe-eau....) [21].

I.5. Généralités sur l'utilisation des inhibiteurs de corrosion

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 lutter contre elle. Plusieurs articles relatifs à l'inhibition de corrosion ont vu le jour durant la période couvrant 1945 à 1954. Ces articles restent témoins du grand développement technologique en matière d'inhibition qu'a connu cette période. Durant les quarante dernières années, un nombre croissant de papiers et de livres traitant ce sujet a été recensé : par exemple en 1970 quelques 647 articles ayant trait à l'inhibition de corrosion sont dénombrés. En 2012, près 17 000 articles traitent de l'inhibition de la corrosion [2].

Un inhibiteur est « **un composé chimique qui, additionné à faible teneurs au milieu corrosif, ralentit voire stoppe le processus de corrosion d'un métal se trouvant au contact de ce milieu** » [2, 22].

I.5.1. Conditions d'utilisations et propriétés

Un inhibiteur (ou un mélange d'inhibiteurs) peut être utilisé comme unique moyen de protection, soit comme protection permanente [23] ou soit comme protection temporaire.

D'une manière générale un inhibiteur de corrosion doit vérifier un certain nombre de propriétés fondamentales :

- Être stable en présence des autres constituants du milieu
- Être efficace à faible teneur
- Diminuer la vitesse de corrosion d'un métal
- Être peu onéreux
- Être stable aux températures d'utilisation
- Être compatible avec les normes de non-toxicité.

Les inhibiteurs ont plusieurs domaines traditionnels d'application : l'industrie du pétrole, le traitement des eaux, l'industrie des peintures sur métaux et la protection temporaire des métaux, notamment pendant le décapage acide, le nettoyage des installations ou le stockage à l'atmosphère.

I.5.2. Les classes d'inhibiteurs

Il y a plusieurs possibilités de classement des inhibiteurs sont disponibles. Elles se distinguent les unes des autres de différentes façons [24, 25] :

- Soit en partant de la nature des composés utilisés comme inhibiteurs : on distingue les inhibiteurs organiques et les inhibiteurs minéraux.
- Soit en partant de leur mécanisme d'action électrochimique : on distingue ici les inhibiteurs cathodiques, anodiques ou mixtes.
- Soit en partant de leurs mécanismes d'adsorption
- Soit à partir du champ d'utilisation

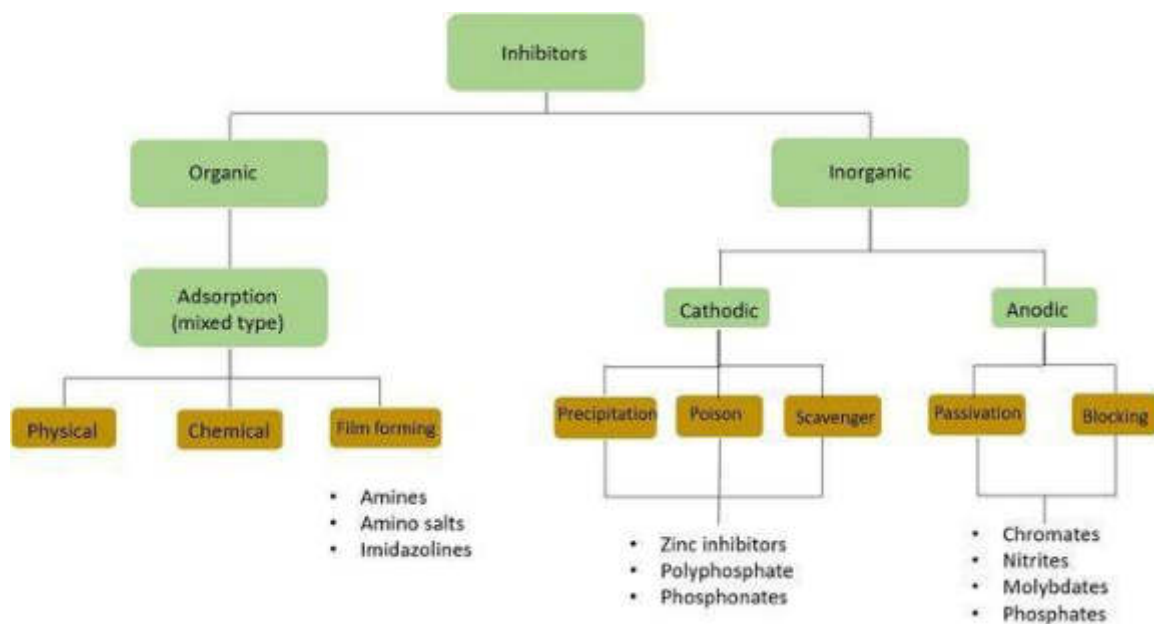


Figure I.8: Les classes des inhibiteurs.

I.6. Types d'adsorption

Il est connu que l'adsorption est un phénomène de surface. Deux types d'interaction sont principalement responsables de la liaison inhibiteur/surface métallique, soit la physisorption ou l'adsorption chimique. Ces types d'adsorption dépendent de plusieurs paramètres parmi eux : la nature et la charge du métal, de la formule chimique des composés organiques et du type d'électrolyte [26].

1.6.1. Adsorption physique

Elle est due aux forces de Van Der Waals et aux forces électrostatiques existant entre la charge ionique ou les dipôles de l'espèce inhibitrice et la surface du métal électriquement chargée. La charge du métal est définie par la position du potentiel de corrosion de ce métal par rapport à son potentiel de charge nulle (E_0) [27]. Si $E_{\text{corr}} < E_0$ on observe l'adsorption des cations. Si au contraire $E_{\text{corr}} > E_0$ on observe préférentiellement l'adsorption des anions.

1.6.2. Chimisorption

La chimisorption est plus fréquente que la physisorption. Elle engendre une efficacité plus importante de l'inhibiteur. Elle fait intervenir un transfert d'électrons entre les orbitales du métal et la molécule inhibitrice, ce qui aboutit à la formation de liaisons chimiques plus stables [28]. Il est intéressant de noter ici que le transfert électronique est favorisé par la présence d'électrons libres comme ceux que l'on trouve par exemple dans les systèmes d'électrons π [28]. La présence d'une liaison insaturée peut favoriser l'efficacité inhibitrice d'une molécule organique en milieu acide [29-30].

1.7. Méthodes électrochimiques d'étude de la corrosion

1.7.1 Suivi du potentiel en circuit ouvert

La mesure du potentiel à circuit ouvert permet la mesure de la différence de tension et ceci par la mise en place d'un métal immergé dans un milieu corrosif et une électrode de référence appropriée (généralement électrode au calomel saturé (ECS) ou Ag/AgCl). Le potentiel à circuit ouvert dépend du métal lui-même, de sa composition, de la température [2]. C'est une grandeur qui résulte de l'équilibre entre la réaction anodique d'oxydation du fer et la réaction cathodique de réduction d'oxygène, cette technique est souvent utilisée afin de détecter les zones corrodées [22].

1.7.2 Courbes de polarisation

Les méthodes électrochimiques permettent l'étude du phénomène de corrosion selon les courbes de polarisation. La courbe de polarisation de l'interface métal-solution est une caractéristique fondamentale de la cinétique électrochimique, mais ne rend compte que de l'étape la plus lente du processus global à l'interface électrochimique. Pour déterminer une courbe de polarisation potentiostatique, on applique à l'aide d'un potentiostat, différents potentiels entre l'électrode de travail et une électrode de référence. On mesure le courant stationnaire qui s'établit après un certain temps dans le circuit électrique entre cette électrode de travail et une contre-électrode. Cette méthode permet de déterminer d'une façon précise les

paramètres électrochimiques d'un métal au contact de l'électrolyte à savoir : la vitesse instantanée de corrosion (i_{corr}), le potentiel de corrosion (E_{corr}), les pentes de Tafel et les résistances de polarisations (R_p) et les vitesses de corrosion (CR) en mm/année. La détermination de la vitesse de corrosion à partir des courbes de polarisation est étroitement liée à la cinétique régissant le processus électrochimique. Pour déterminer expérimentalement les paramètres électrochimiques une présentation logarithmique de la densité de courant est en général préférable, car elle met en évidence la relation linéaire entre le logarithme de la densité de courant et le potentiel (Figure II.1) [2].

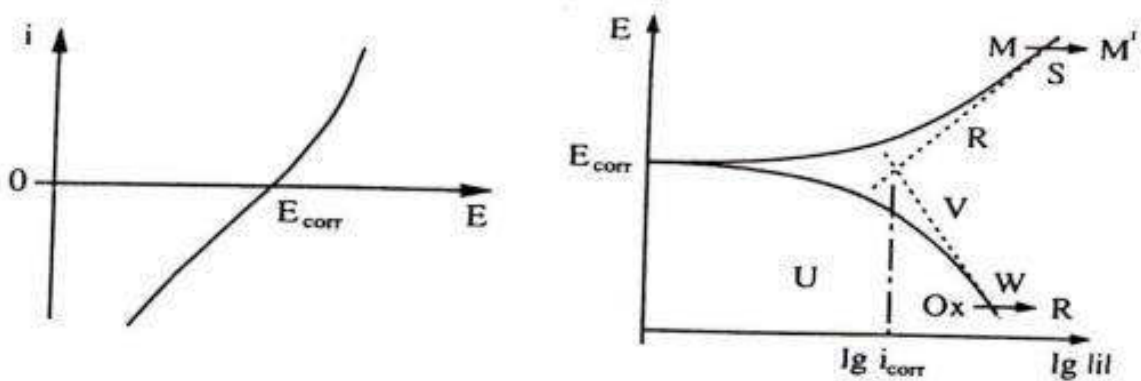


Figure I.9: Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel.

L'efficacité inhibitrice peut être déterminée par la relation suivante :

$$EI (\%) = (I_{0corr} - I_{corr}) / I_{0corr} \times 100 \quad (II.2)$$

Avec I_{0corr} et I_{corr} sont les courant de corrosion de l'échantillon après immersion dans la solution respectivement sans et avec inhibiteur [2].

Le taux de recouvrement θ est donné par la relation (II.3) :

$$\theta = 1 - I_{corr} / I_{0corr} \quad (II.3)$$

I.7.3. Mesure de résistance de polarisation (Méthode de Stern et Geary)

La méthode de résistance de polarisation a été introduite en 1957 par Milton Stern et Allen L. Geary dans leur article fondateur publié dans le Journal of the Electrochemical Society. Cette publication constitue l'une des contributions les plus importantes de l'électrochimie de la corrosion du XX^{ème} siècle, car elle a fourni pour la première fois une méthode quantitative, non destructive et rapide pour mesurer la vitesse de corrosion instantanée d'un métal en milieu corrosif. L'apport majeur de Stern et Geary réside dans la démonstration théorique que la pente de la courbe courant-tension au voisinage du potentiel de corrosion est directement liée

au courant de corrosion, et donc à la vitesse de dégradation du matériau. Cette relation, désormais appelée équation de Stern-Geary, constitue le fondement de la technique de polarisation linéaire. La résistance de polarisation R_p est définie comme l'inverse de la pente de la courbe $i = f(E - E_{\text{corr}})$ au potentiel de corrosion, soit $R_p = (dE/di)$ à $E = E_{\text{corr}}$.

1.7.3. Spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE)

Un processus électrochimique global peut être décomposé en plusieurs réactions chimiques et/ou électrochimiques élémentaires. Les techniques électrochimiques stationnaires (tracé de courbes courant-potentiel stationnaires) permettent de déterminer l'étape la plus lente qui limite la vitesse de la réaction globale du processus. L'emploi des techniques non stationnaires, telle que la spectroscopie d'impédance électrochimique, permet de séparer les différentes réactions élémentaires dans la mesure où elle possède des constantes de temps suffisamment distinctes [3].

L'impédance électrochimique est une technique non stationnaire reposant sur la mesure d'une fonction de transfert, suite à une perturbation de faible amplitude du système électrode/solution. Les systèmes électrochimiques ne sont généralement ni linéaires ni stationnaires. On ne peut donc mesurer leurs fonctions de transfert qu'en utilisant des signaux d'amplitude suffisamment faible d'un point de fonctionnement que l'on suppose quasi-stationnaire pendant la durée de la mesure. Dans ces conditions, on peut admettre que le comportement du système est celui d'un système linéaire invariant dans le temps. L'impédance électrochimique consiste à imposer à un potentiel constant de polarisation E , un potentiel sinusoïdal $\Delta E(t)$ de faible amplitude et de fréquence donnée et à enregistrer la réponse en courant du système. Inversement, $\Delta I(t)$ peut être imposé au courant stationnaire I_0 et, dans ce cas, le potentiel est enregistré figure II.2.

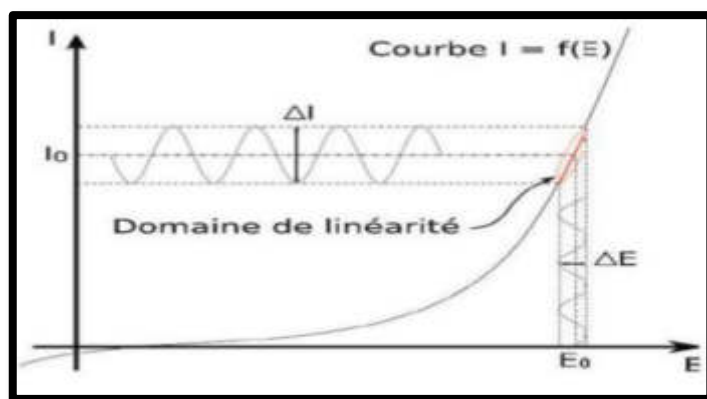


Figure I.10: Schéma de principe d'impédance électrochimique.

Le choix du type de régulation (en potentiel ou en courant) dépend du système électrochimique et notamment de la forme de sa courbe courant-potentiel [3]. L'impédance peut être représentée par deux représentations [8] (Figure II.3), en coordonnées cartésiennes par sa partie réelle et sa partie imaginaire dite représentation de Nyquist, ou en coordonnées polaires par son module $|Z|$ dite représentation de Bode ; toutes les deux permettent de traduire la variation de Z en fonction de la fréquence f .

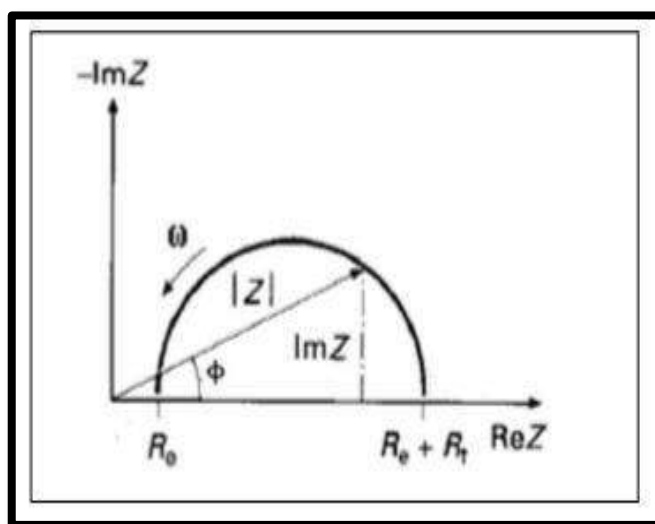


Figure I.11: Diagramme de Nyquist correspondant à une interface.

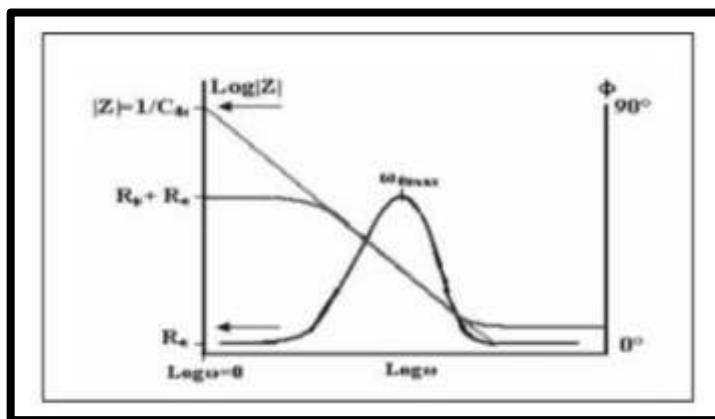


Figure I.12: Diagramme de Bode correspondant à une interface électrode/solution.

La modélisation des impédances électrochimiques consiste à analyser des données d'un modèle déjà supposé pour fournir le modèle de circuit simple ou polyvalent équivalent approprié. Pour cela, il faut suivre la logique physique du système : les processus successifs sont branchés en série alors que les processus simultanés sont branchés en parallèle.

Le comportement en régime dynamique d'une réaction redox en l'absence de gradient de concentration des espèces électroactives est donc analogue à celui du circuit électrique de la figure II.13, appelé circuit de Randles généralisé.

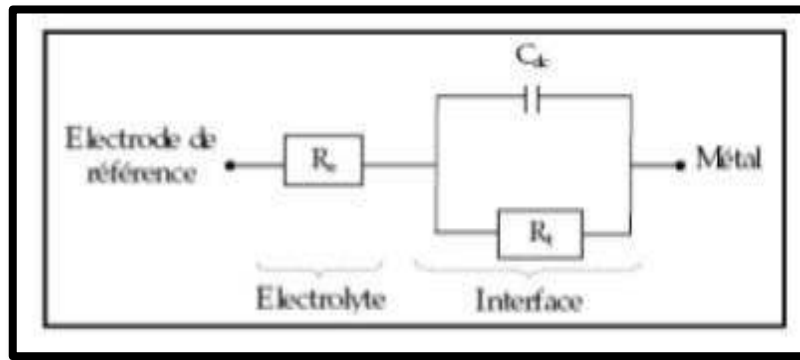


Figure I.13: Circuit de Randles d'une interface électrochimique simple

Ce circuit comprend la résistance de transfert de charges (R_t), la résistance de l'électrolyte (R_e) qui représente la chute ohmique dans l'électrolyte entre les électrodes de travail et de référence lorsqu'un courant passe. Notons que C_{dc} et R_t sont introduites en parallèle pour rendre compte qu'au niveau de l'interface, l'établissement de la double couche (modification de la répartition des charges électriques à l'interface) et le transfert de charge (transfert d'électrons à travers l'interface et qui est dû aux réactions électrochimiques) s'effectuent simultanément [2].

Références bibliographiques

- [1] P. Fabre, O. Reynes, électrochimie résumé de cours et exercices corrigés, ellipses 214.
- [2] O. Larabi, Contribution à l'étude de l'inhibition de corrosion d'un acier au carbone par des composés organiques en milieu acide agressif, mémoire de master, université de Tlemcen, 2017.
- [3] D. Landolt, Corrosion et chimie de surfaces des métaux, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1993.
- [4] F. Balbaud, C. Desgranges, C. Duhamel, Corrosion et protection des matériaux à haute température, Presses des Mines, 2011.
- [5] Les diagrammes de corrosion - acquisition des données et interprétation, Lavoisier, 2010.
- [6] B. Normand, Prévention et lutte contre la corrosion: une approche scientifique et technique, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2004.
- [7] H. Bentrach, Corrosion des ouvrages pétroliers : Utilisation de la gomme arabique comme inhibiteur environnemental pour l'acier API 5L X42 in: Département de Génie Mécanique, Université Mohamad Khider, BISKRA, Doctorat 2015.

- [8] Métaux et alliages passivables : Règles de choix et emplois types, Techniques de l'ingénieur, M 153, (1994).
- [9] R. Schmidt, L. Künzi, Comportement des matériaux dans les milieux biologiques: applications en médecine et biotechnologie, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1999.
- [10] S. Audisio, G. Béranger, Anticorrosion et durabilité dans le bâtiment, le génie civil et les ouvrages industriels, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2010.
- [11] H.S. Khatak, B. Raj, Corrosion of Austenitic Stainless Steels: Mechanism, Mitigation and Monitoring, Woodhead Publishing Limited, 2002.
- [12] C. -Q. Cheng, L.-I. Klinkenberg, Y. Ise, J. Zhao, E. Tada, A. Nishikata, Pitting corrosion of sensitised type 304 stainless steel under wet-dry cycling condition, Corros. Sci., 118 (2017) 217-226.
- [13] G. Yang, K.B. Yoon, Y.C. Moon, Stress corrosion cracking of stainless steel pipes for Methyl-Methacrylate process plants, Engineering Failure Analysis, 29 (2013) 45-55.
- [14] G. Béranger, H. Mazille, Corrosion et anticorrosion – Pratique industrielle, Hermès Science Publications, Paris, 2002.
- [15] D. Kherbiche, Y. Kemer, Etude des causes de la corrosion des bacs de stockage de pétrole, mémoire de Master, Université Annaba, 2019.
- [16] M. Annou. Etude de la résistance à la corrosion des dépôts composites (Ni-Al₂O₃). Mémoire de magister, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2013.
- [17] H. Bensabra, Corrosion et Protection des Métaux, Génie des Matériaux. Université de Jijel. 2016.
- [18] I. Tushinsky Leonid, K. Iliya, P. Alexandr, S. Victor, R. Peter, Coated Metal: Structure and properties of metal-coating compositions, Edition Springer, 2002.
- [19] J. Kittel, Nouvelle donnée sur l'origine du pouvoir anticorrosion de revêtements organiques et sur sa dégradation, thèse de doctorat, université de Paris 6, p 129, 2001.
- [20] Site CANAM ponts, Protection contre la corrosion: <https://www.canambridges.com/fr/services/peinture-et-metallisation/>
- [21] A. Campa, Protection des surfaces métalliques contre la corrosion, technologie professionnelle pour les mécaniciens, Tome 2, les Editions Foucher, Paris, 1971.
- [22] NACE Glossary of Corrosion Terms. Materials Protection, 4, 1, (1965) 79.
- [23] E. Heitz, Proc. 4th European Symposium on Corrosion Inhibitors, Ann, Univ. Ferrara, Italy, N. S. Sez. V, Suppl. 6, (1975) 432.

- [24] D. Landolt, Corrosion et Chimie de Surface des Métaux, 1st Edition, Alden Press, Oxford, (1993) 489.
- [25] B. SANYAL, Organic compounds as corrosion inhibitors in different environments, Prog. Org. Coat., 9 (1981) 165-236.
- [26] C. Fiaud, C. Lemaitre, N. Pebère, Inhibiteurs de corrosion, Corrosion et Anticorrosion (pratique industrielle), Hernès Science Publications, Paris, (2002) 245.
- [27] I.L. Rozenfeld, Corrosion Inhibitors, McGraw-Hill, (1981).
- [28] C.C. Nathan, Corrosion Inhibitors, NACE, Houston, (1973).
- [29] S. Locquet, M. Lagrenée, J. Bonnans, F. Bentiss, Patent Wo, (2002) 10179.
- [30] E. Schaschl, NACE Corrosion Inhibitors, USA, National Association of Corrosion

Chapitre II : Partie Expérimentale

Dans le présent de notre travail nous avons utilisé les techniques électrochimiques afin de tester l'effet d'un inhibiteur organique synthétisé sur la diminution de la corrosion de l'acier doux dans le milieu HCl 1M.

II.1. Introduction

Parmi les méthodes d'évaluation de la corrosion d'un métal exposé à une solution électrolytique, les mesures électrochimiques se basant sur l'obtention des paramètres électrochimiques tels que le courant de corrosion, le potentiel de corrosion, la résistance de transfert de charge ou autres paramètres demeurent l'essentiels approches de l'étude de l'inhibition de la corrosion d'un acier dans une solution électrolytique. Dans cette étude, on a effectué des essais électrochimiques dans un milieu agressif contenant 1M d'HCl. L'étude de l'effet d'acide salicylique sur une pièce d'acier doux en contact avec la solution cité dessus (l'étude de l'efficacité inhibitrice) [1-2].

II.2. L'acier doux

L'acier doux est un type d'acier au carbone qui contient un faible pourcentage de carbone, généralement moins de 0.25 % en poids. Également connu sous le nom d'acier au carbone ordinaire, il se distingue par son excellente ductilité, sa soudabilité et son usinabilité, ce qui en fait un matériau privilégié dans diverses industries. Les aciers doux des aciers micro alliés au niobium, au vanadium, au nikel et au titane par exemple. Les autres éléments principaux entrant dans la composition chimique de ces aciers sont : le Carbone, le Manganèse, l'Aluminium, le Silicium, le chrome et le manganèse. Dans notre expérience nous avons utilisé l'acier doux, avec la composition suivant :

(wt%): 0.1 % C, 0.03 % Si, 0.2 % Mn, 0.02 % P, 0.05 % Cr, 0.05 % Ni, 0.03 % Al, 0.17 % Ti, 0.09 % et le reste Fe.

Les échantillons d'acier sont préparés, avant immersion dans les solutions, par polissage sous eau au papier abrasif au carbure de silicium (SiC) de granulométrie décroissante allant jusqu'au grain 1000. Ces échantillons sont ensuite rincés à l'eau distillée, dégraissés par l'acétone et séchés à l'aide d'un sèche-cheveux avant utilisation [4-6].

II.3. L'inhibiteur

Le composé organique que nous avons utilisés comme inhibiteur de corrosion et qui a été synthétisé au sein de notre laboratoire.

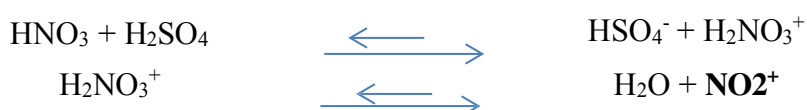
a- Principe de la synthèse

Cette réaction de substitution électrophile aromatique met en évidence les règles de Holleman, en particulier l'influence des substituants désactivant qui orientent la substitution majoritairement en position méta.

b- Mode opératoire

Première étape : Formation de l'entité NO_2^+

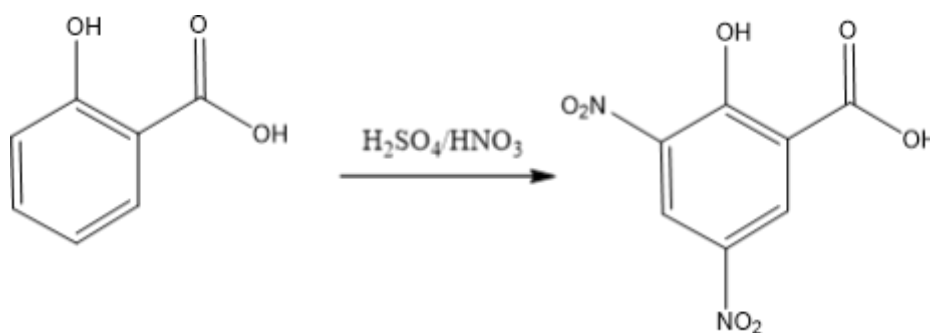
Pour effectuer la nitration, il faut opérer en présence d'acide nitrique et l'acide sulfurique c'est à partir de ces deux réactifs que l'on forme le groupement NO_2^+ selon l'Equation bilan :



Dans un petit ballon muni d'une ampoule à addition et placé dans un bain de glace, introduire 5.25 mL d'acide nitrique fumant (65%). Ajouter ensuite, avec précaution et goutte à goutte, 10.5 mL d'acide sulfurique concentré (98%), tout en maintenant une agitation continue et une température comprise entre 0 et 5 °C.

Deuxième étape : Nitration de l'acide salicylique

Ajouter 3,25 g d'acide salicylique au mélange réactionnel, par portions successives sur une durée de 1 heures, sous agitation continue, en maintenant la température en dessous de 5 °C.



Troisième étape : Filtration et Lavage:

Le mélange réactionnel a été retiré du bain de glace et ajouté avec précaution à 250 mL d'eau distillée glacée sous agitation continue. Les cristaux jaunes obtenus sont filtrés sous vide sur entonnoir de Büchner, puis lavés avec un minimum d'eau distillée glacée. Ensuite, le produit est ensuite séché à l'étuve jusqu'à masse constante. La masse obtenue est de 4,20 g, correspondant à un rendement de 67.74 %.



Figure II.14 : Préparation de l'acide 3,5-dinitrosalicylique (DNS)

c- Caractérisation du composé

D'après la littérature [7-9] le composé sous investigation est caractérisé par :

Infra rouge:

Tableau II.1 : Caractérisation du composé Infra rouge

Nombre d'onde (cm ⁻¹)	Intensité	Attribution
3200 – 3450 (large)	Forte, large	$\nu(\text{OH})$ phénolique + COOH
~2900	Faible	$\nu(\text{CH})$ aromatique
1710 – 1720	Très forte	$\nu(\text{C=O})$ carboxylate
1610 – 1625	Forte	$\nu(\text{C=C})$ aromatique
1560 – 1580	Très forte	$\nu_{\text{as}}(\text{NO}_2)$ asymétrique
1330 – 1350	Forte	$\nu_{\text{s}}(\text{NO}_2)$ symétrique
1270 – 1290	Moyenne	$\nu(\text{C-O})$ phénolique
1170 – 1190	Moyenne	$\nu(\text{C-O})$ carboxylate

RMN:

Le spectre RMN ^1H du DNS est enregistré dans le DMSO-d₆ à 300 MHz. La molécule ne

possède que 4 protons : 2 protons échangeables (OH acide et OH phénolique) et 2 protons aromatiques (H-4 et H-6). Leur fort déblindage est caractéristique des groupements nitro.

Tableau II.2 : Caractérisation du composé RMN

Signal	δ (ppm)	Multiplicité	Intégration	Attribution
s1	14,20	singulet large	1H	COOH
s2	11,80	singulet large	1H	OH phénolique
s3	9,18	Singulet	1H	H-4 (aromatique)
s4	8,55	Singulet	1H	H-6 (aromatique)

II.4. Mesures électrochimiques

Les expériences électrochimiques sont effectuées dans une cellule en pyrex thermostatée et à double paroi, équipée d'un montage conventionnel à trois électrodes :

- Une électrode de platine comme contre-électrode ;
- Une électrode au sulfate mercurieux $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2/\text{KCl}$ (ESC) comme électrode de référence.
- L'acier doux comme électrode de travail. Cette dernière se présente sous la forme d'un disque où seule une partie active de 1 cm^2 est exposée à la solution agressive, le reste étant recouvert par de la résine (figure II.2).



Figure II.15: Dispositif expérimental de trois électrodes.

Les mesures électrochimiques sont réalisées avec un montage comprenant un Potentiostat Origa flex 10A (Figure II.3), piloté par le logiciel Origalys (figure II.4).



Figure II.16: Dispositif expérimental des mesures électrochimiques.

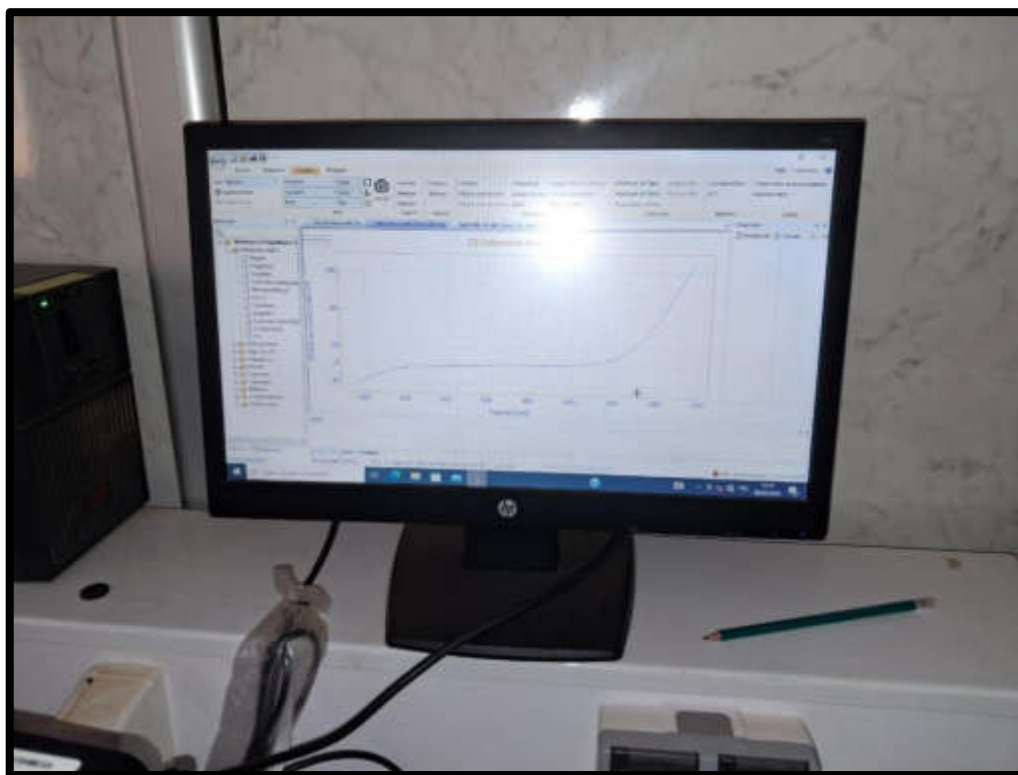


Figure II.17: Le logiciel de pilotage : Origalys

Avant de faire les mesures électrochimiques l'électrode de travail est maintenue à son potentiel d'abandon pendant une demi-heure.

Les mesures de résistance de polarisation ont été effectuées en appliquant un balayage de potentiel contrôlé sur une petite plage, typiquement de 15 mV par rapport à E_{corr} . Le courant résultant est représenté linéairement en fonction du potentiel, la pente de cette courbe à E_{corr} correspondant à la résistance de polarisation (R_p). Toutes les expériences ont été réalisées dans une solution fraîchement préparée à des températures constantes de 30, et $35 \pm 0,1$ °C, à l'aide d'un bain thermostaté.

Les mesures d'impédance AC ont été réalisées à des potentiels de corrosion (E_{corr}) sur une gamme de fréquences de 100 kHz à 100 mHz, avec une perturbation d'amplitude du signal de 10 mV. Des diagrammes de Nyquist et Bode ont été obtenus.

Références bibliographiques

[1] O. Larabi, Contribution à l'étude de l'inhibition de corrosion d'un acier au carbone par des composés organiques en milieu acide agressif, mémoire de master , université de Tlemcen, 2017.

- [2] H. Bentrach, Corrosion des ouvrages pétroliers : Utilisation de la gomme arabique comme inhibiteur environnemental pour l'acier API 5L X42 in: Département de Génie Mécanique, Université Mohamad Khider, BISKRA, Doctorat 2015.
- [3] M. Annou. Etude de la résistance à la corrosion des dépôts composites (Ni-Al₂O₃). Mémoire de magister, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2013.
- [4] H. Bensabra, Corrosion et Protection des Métaux, Génie des Matériaux. Université de Jijel. 2016.
- [6] J. Kittel, Nouvelle donnée sur l'origine du pouvoir anticorrosion de revêtements organiques et sur sa dégradation, thèse de doctorat, université de Paris 6, p 129, 2001.
- [7] S. S. Dube; S. S. Dhindsa: Dissociation constants of 3,5-dinitrosalicylic acid, Proceedings of the Indian Academy of Sciences, Section A, 642, 1968.
- [8] Alexander Apelbalt; Emanuel Manzurola: "Solubilities of o-acetylsalicylic, 4-aminosalicylic, 3,5-dinitrosalicylic, and p-toluic acid, and magnesium-DL-aspartate in water from T = (278 to 348) K", in: J. Chem. Thermodyn., 1999, 31 (1), S. 85–91.
- [9] V. S. Senthil Kumar; Srinivasan S. Kuduva; Gautam R. Desiraju: "Pseudopolymorphs of 3,5-dinitrosalicylic acid", in: J. Chem. Soc., Perkin Trans. 2, 1999, S. 1069–1073.

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1. Influence de la concentration de l'inhibiteur

III.1.1. Potentiel a circuit ouvert

Le potentiel libre ou potentiel de corrosion de l'acier dans HCl (1M) en absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur (**acide 3,5-dinitrosalicylique**) sous investigation a été suivi a 30 minute d'immersion et a 30°C. Les courbes obtenues sont présentées dans la figure III.1.

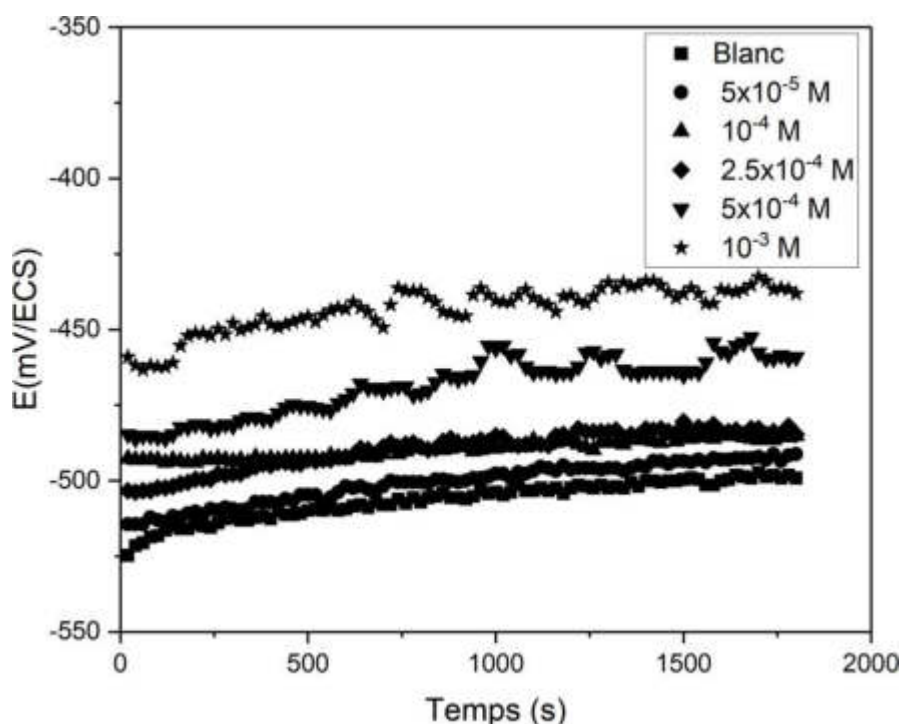


Figure III.18. Variation de potentiel de libre (OCP) en fonction de la concentration en inhibiteur.

D'après la figure III.1 Sans inhibiteur, le potentiel OCP de l'acier tend à se stabiliser à une valeur de - 510 mV/ ECS après 5 min d'immersion par contre que le potentiel de corrosion tend à se stabiliser à des valeurs supérieures et augmentent avec l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur[1].

III.1.2. Courbes de polarisation

L'acier doux est soumis à des tests de corrosion en présence et en absence de notre inhibiteur dans une solution corrosive d'acide chlorhydrique à 1 M. Les courbes de polarisation enregistrées sont regroupées dans la figure III.2.

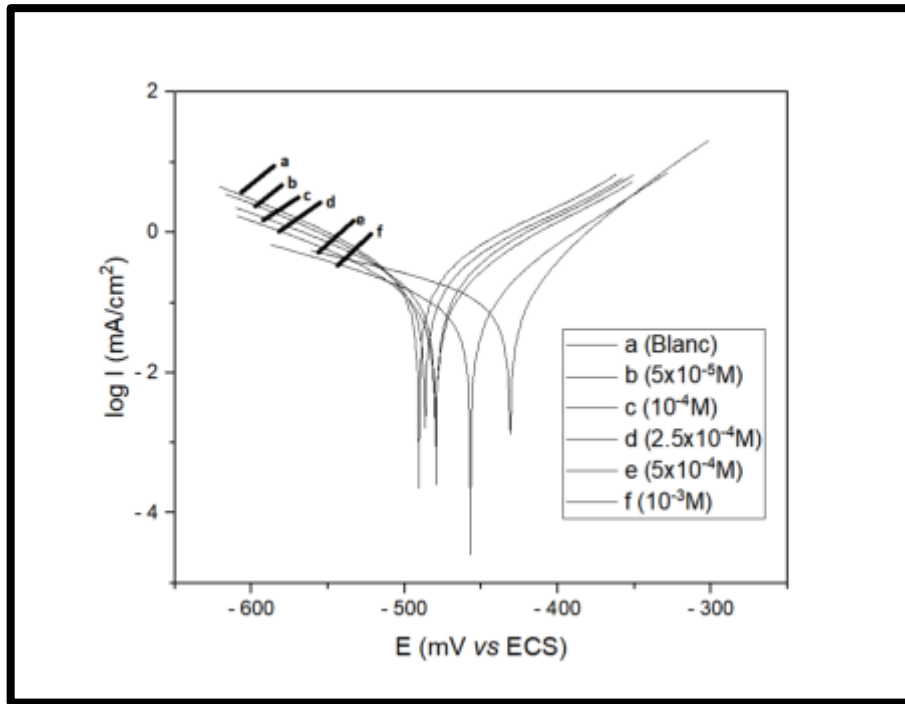


Figure III.19: Courbes de polarisation de l'acier doux en l'absence et en présence de différentes concentrations de l'inhibiteur dans HCl 1M

D'après les courbes de polarisation enregistrées, on peut faire les constatations suivantes :

- Abaissement de l'intensité du courant anodique et cathodique avec diverses concentrations de DNS dans une solution HCl à 1M, ce qui indique que l'addition de cet inhibiteur retarde à la fois les réactions anodiques et cathodiques suivantes :

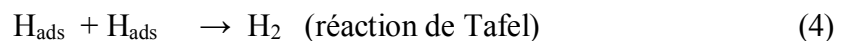


On admet généralement que cette réaction de réduction nécessite deux étapes successives [2-3] :

- La première est réaction dite de décharge (ou réaction de Volmer) :



- L'opinion diffère cependant sur la seconde étape qui pourrait être :
soit purement chimique :



soit électrochimique :



La diminution de la densité du courant de corrosion est due de l'effet de blocage des sites actifs sur la surface métallique par les molécules adsorbées de l'inhibiteur [4-5].

- Déplacement du potentiel de corrosion à une valeur maximale de ΔE_{corr} environ 60 mV < 85 mV par rapport au blanc, ce qui confirme que notre inhibiteur agit comme un inhibiteur de type mixte [6].
- On constate également que les courbes cathodiques se présentent sous forme de droites de Tafel indiquant que la réaction de réduction de l'hydrogène à la surface de l'acier doux se fait selon un mécanisme de transfert de charge qu'on appelle également d'activation pure.
- L'ajout de l'inhibiteur au milieu corrosif se traduit par une très légère modification de pentes des droites de Tafel (b_c) (tableau III. 1). Ce résultat nous amène à dire que le mécanisme de réduction du H^+ ne change pas en présence de l'inhibiteur [6-7].
- Dans le domaine anodique, la présence de l'inhibiteur en milieu HCl 1M est accompagnée également par une diminution des densités de courant anodique.

Le tableau III.1 présente les grandeurs électrochimiques déduites à partir de droites de Tafel pour l'électrode fabriquée en acier doux plongeant dans une solution de HCl 1 M sans et avec différentes concentrations en inhibiteur. Rappelons ici, que les valeurs de R_p ont été déterminées par extrapolation des droites cathodiques et anodiques et les valeurs de vitesse de corrosion (C.R) déterminé par logiciel de calcul Originis (figure III.3).

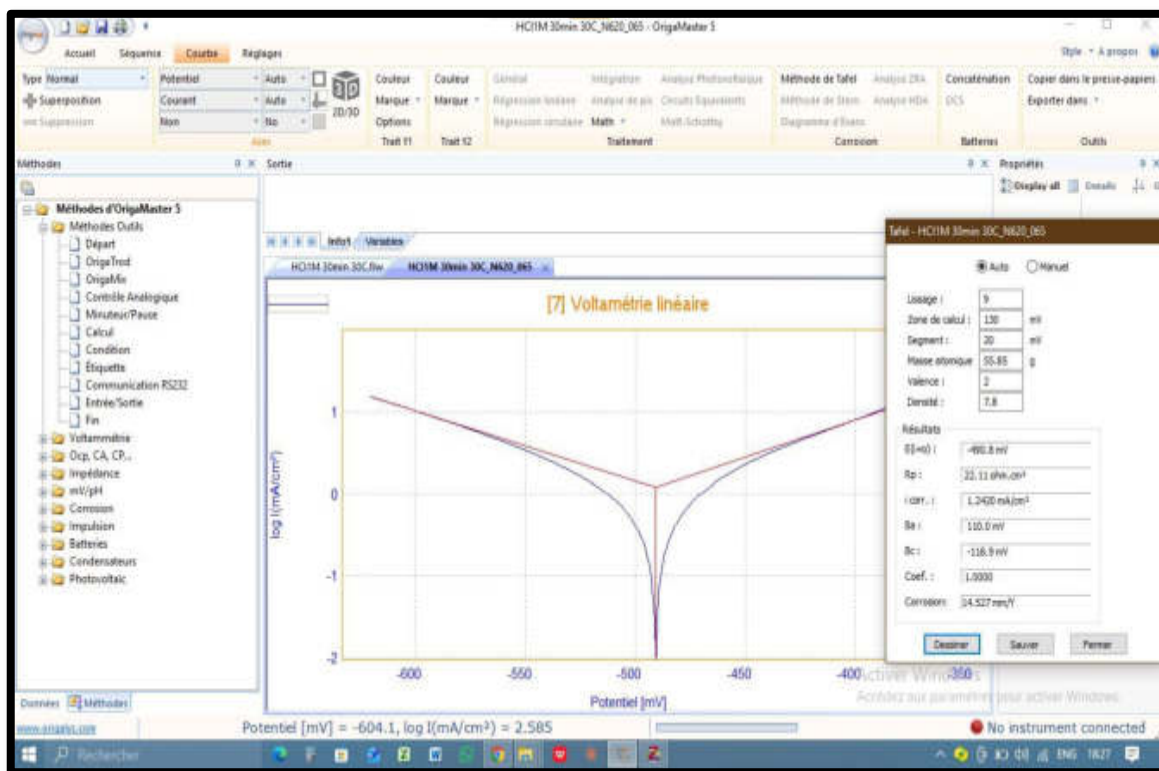


Figure III.20. Exemple de traitement des données des courbes de polarisations par le logiciel Originis (Acier doux + HCl 1 M sans inhibiteur)

Tableau III.1. grandeurs électrochimiques et taux d'inhibitions (EI%) de la corrosion de l'acier doux dans HCl 1 M sans et avec addition de l'inhibiteur à différentes concentrations.

Conc. (mol/L)	-E_{corr} (mV_{vs} ECS)	b_a (mV/dec)	b_c (mV/dec)	I_{corr} (mA/cm²)	R_p (Ω.cm²)	C.R (mm/an)
Blanc	-491	110	118	1.24	22.11	14.53
5x10⁻⁵M	-487	96	109	0.24	93.01	2.80
10⁻⁴M	-480	86	119	0.19	116.12	2.22
2.5x10⁻⁴M	-480	89	130	0.16	157	2.07
5x10⁻⁴M	-451	65	149	0.093	216	1.09
10⁻³M	-431	53	182	0.11	155.2	1.30

Pour le calcul des taux d'inhibition, nous rappelons que les différentes efficacités inhibitrices (EI) sont calculées par les formules suivantes [8]:

➤ Pour les courants de corrosion :

$$EI_{i_{corr}} (\%) = \frac{i_{w_{cor,0}} - i_{w_{cor}}}{i_{w_{cor,0}}} \quad (6)$$

Tel que :

$i_{w_{cor,0}}$: La valeur de courant sans inhibiteur.

$i_{w_{cor}}$: La valeur de courant inhibée.

➤ Pour les résistances de polarisation

$$EI_{R_p} (\%) = \frac{R_p - R_{p0}}{R_p} \quad (7)$$

Avec : R_p les valeurs de résistances de polarisations en présence de l'inhibiteur considéré et R_{p0} la valeur de résistance de polarisation en absence de l'inhibiteur.

➤ Pour les vitesses de corrosion (C.R) :

$$EI_{C.R} (\%) = \frac{C.R_0 - C.R}{C.R} \quad (8)$$

Tel que :

$C.R_0$: La valeur de vitesse de corrosion du blanc (absence d'inhibiteur).

$C.R$: Les valeurs de vitesse de corrosion avec l'inhibiteur.

Les valeurs d'efficacités inhibitrices sont regroupées dans le tableau III.2.

Tableau III.2. Efficacités inhibitrices obtenues par les différentes méthodes

Conc. (mol/L)	EI _{icorr} (%)	EI _{Rp} (%)	EI _{CR} (%)
Blanc	-----	-----	-----
5x10 ⁻⁵ M	80.64%	76.22%	80.73%
10 ⁻⁴ M	84.68%	80.96%	84.72%
2.5x10 ⁻⁴ M	87.10%	85.92%	85.75%
5x10 ⁻⁴ M	92.50%	89.76%	92.45%
10 ⁻³ M	91.13%	85.75%	91.05%

D'après ce tableau, nous observons que le taux d'inhibition EI(%) croît avec l'augmentation de la concentration en inhibiteur pour atteindre une valeur de 92.5% à 5.10⁻⁴M (concentration optimale).

III. 1.3. Méthode de Stern et Geary

La technique de polarisation linéaire selon la méthode de **Stern et Geary** a été réalisée dans les mêmes conditions que la méthode de courbes de polarisation [8].

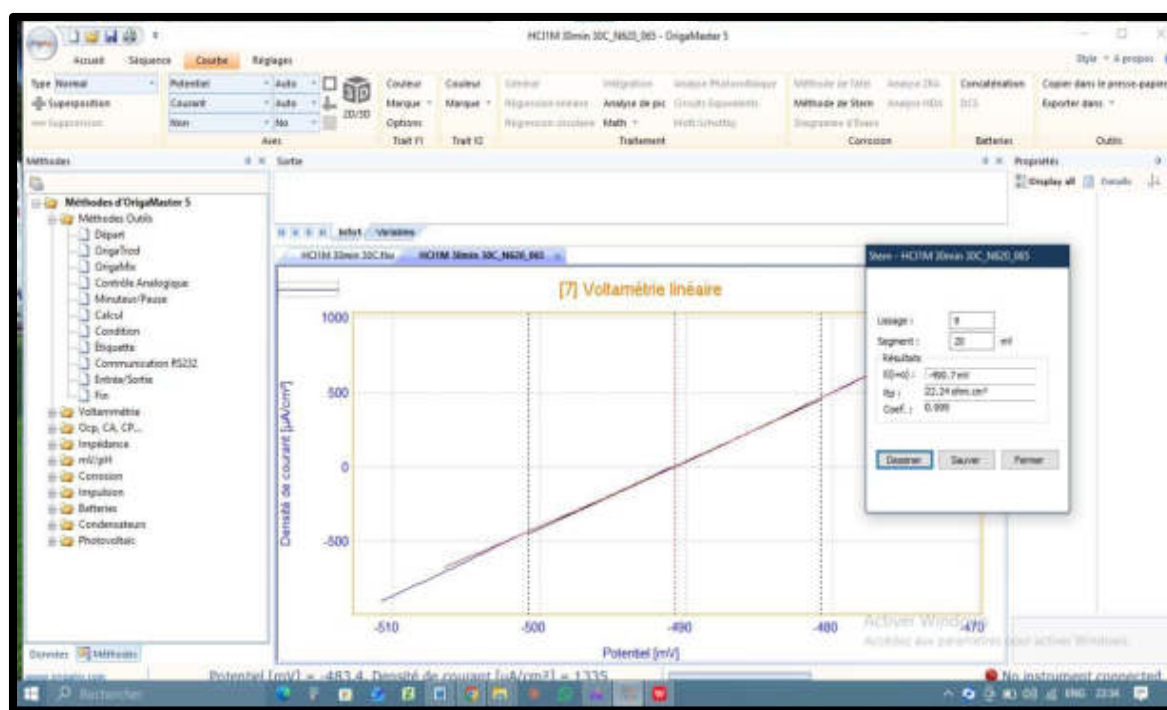


Figure III.21. Exemple de traitement des données par la méthode de Stern et Geary par le logiciel Originlis (Acier doux + HCl 1 M sans inhibiteur)

Les valeurs correspondantes de résistance de polarisation (R_p) de l'acier doux, en l'absence et en présence de différentes concentrations d'inhibiteur, sont présentées dans le tableau III. 3. II

apparaît clairement que R_p augmente avec la concentration d'inhibiteur. Le pourcentage d'inhibition ($EI_{Rp}\%$) calculé à partir des valeurs de R_p est également présenté dans le même tableau. On remarque que $EI_{Rp}\%$ augmente avec la concentration d'inhibiteur et atteint 89.36 % à 5×10^{-4} M de l'inhibiteur [7, 8].

Les efficacités d'inhibition obtenues par polarisation potentiodynamique et par la méthode de résistance de polarisation (**Stern et Geary**) sont en bon accord.

Tableau III.3. Valeurs de R_p et efficacités d'inhibition de la corrosion correspondantes pour la corrosion de l'acier doux dans une solution d'HCl 1M contenant différentes concentrations de l'inhibiteur à 30 °C

Conc. (mol/L)	R_p ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	EI_{Rp} (%)
Blanc	22.24	-----
5×10^{-5} M	95.31	76.66 %
10^{-4} M	111.94	80.13 %
2.5×10^{-4} M	145.52	84.72 %
5×10^{-4} M	209.1	89.36 %
10^{-3} M	157.32	85.86 %

III.1.4 Méthode Spectroscopie d'impédance électrochimique

Les diagrammes de Nyquist de l'acier doux dans une solution de HCl 1M, en présence et en absence d'additif (inhibiteur), sont présentés dans la figure III.5a.

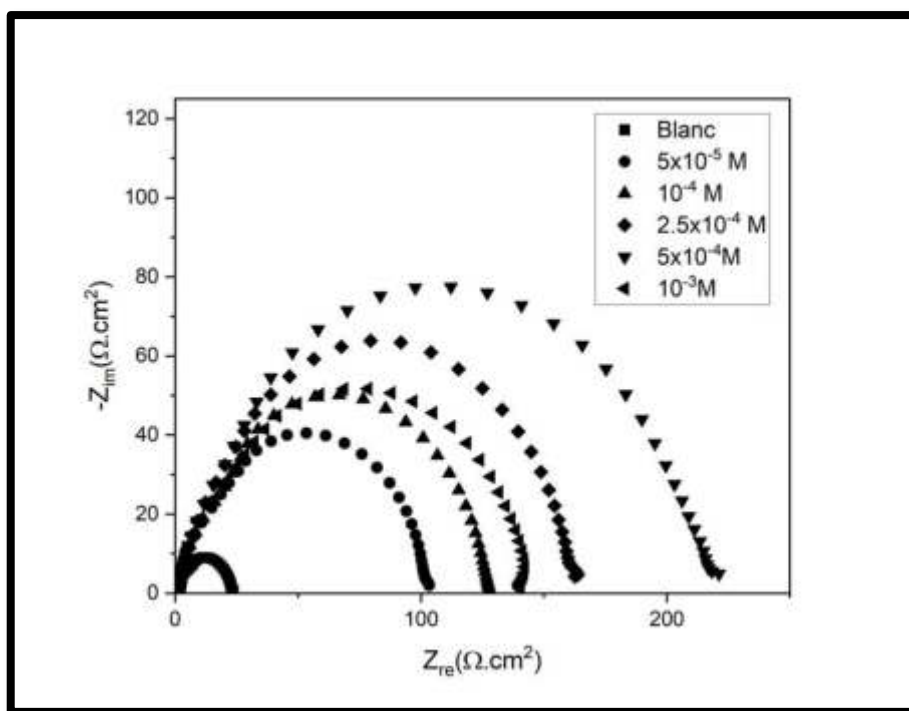


Figure III.22a. Diagrammes de Nyquist pour l'acier doux dans une solution d'HCl 1M contenant différentes concentrations de l'inhibiteur à 30 °C

Ces courbes ont été obtenues après de 30 min d'immersion dans la solution correspondante. Tous les diagrammes présentent une seule boucle capacitive ce qui a été confirmé par le digramme de Bode ou en remarque clairement d'une seul pente dans la représentation de $\log Z = f(\log f)$ et un seul sommet dans la représentation de $\text{Phase} = f(\log f)$. (figure III.5b).

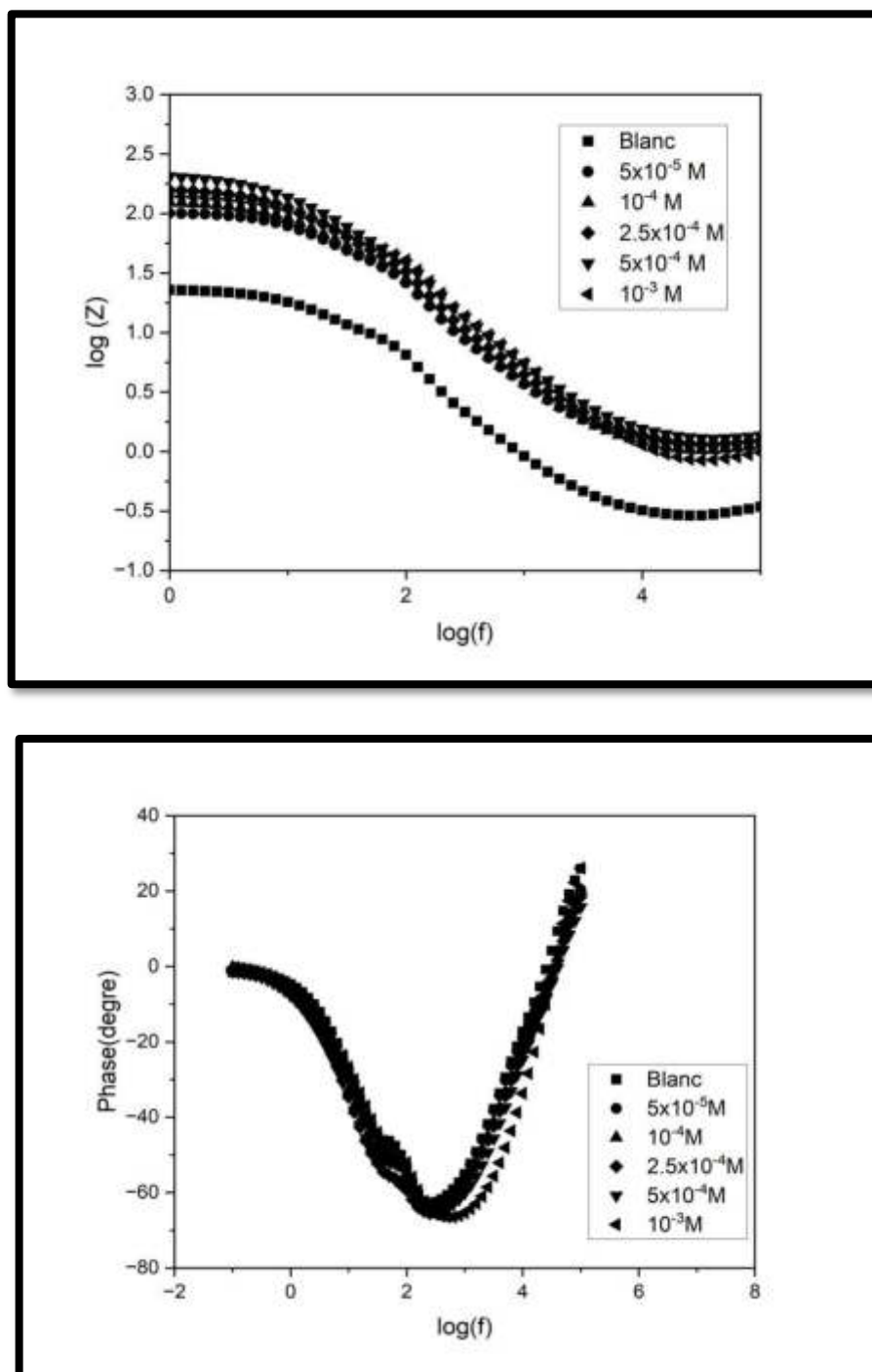


Figure III.23 b. Diagrammes de Bode pour l'acier doux dans une solution d'HCl 1M contenant différentes concentrations de l'inhibiteur à 30 °C.

Les digrammes d'impédance obtenus ont été traités par le logiciel Zview 4.0. La figure III.7 présente un exemple de traitement d'un des spectres avec le digramme de fittage.

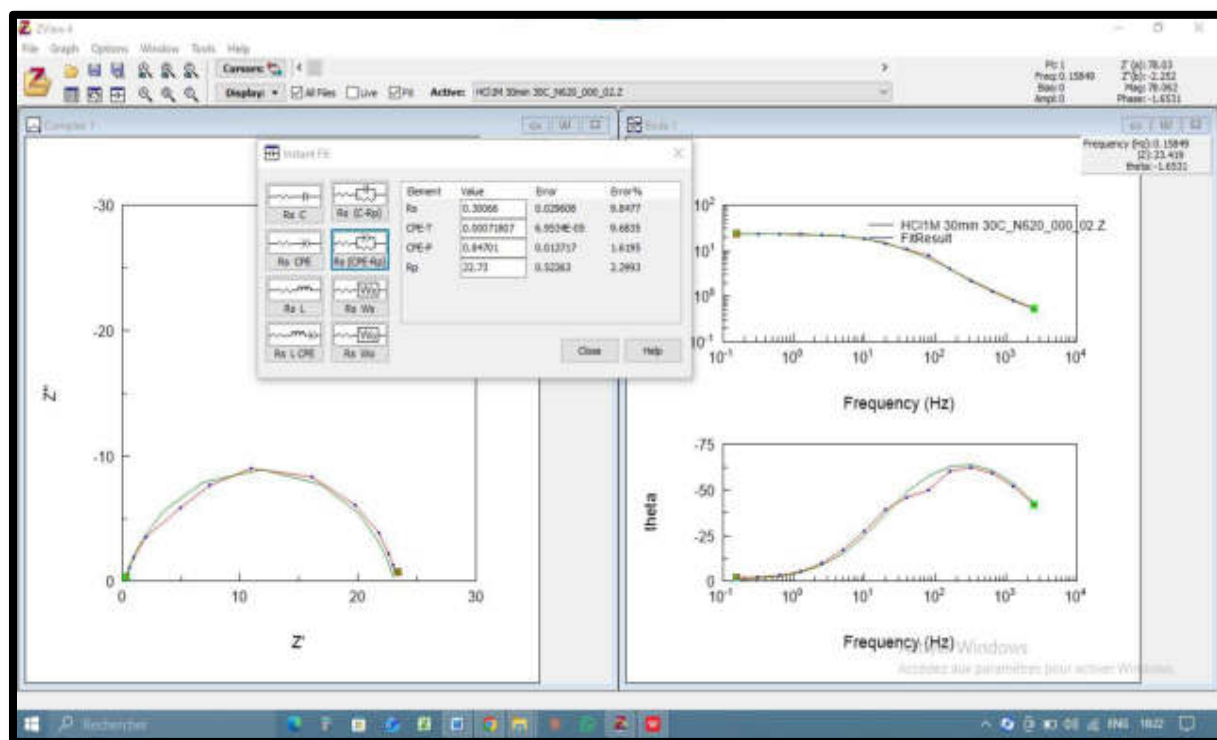


Figure III.24. Exemple de traitement des données par le logiciel Zview (Acier doux + HCl 1 M sans inhibiteur)

Les paramètres d'impédance, dérivés des diagrammes de Nyquist, les pourcentages d'inhibition et le schéma du circuit équivalent sont donnés respectivement dans le tableau III. 3 et la figure III.8.

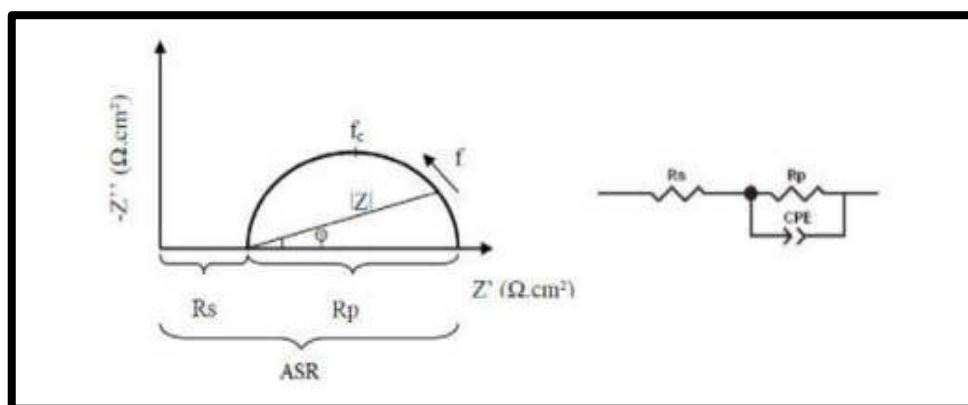


Figure III.25: Circuit équivalent des spectres d'impédance obtenus pour le système : acier doux / HCl 1M / inhibiteur.

Le circuit est constitué d'un élément à phase constante (CPE) Q , en parallèle avec une résistance R_t . L'utilisation d'une impédance de type CPE a été largement décrite dans plusieurs travaux [9–10].

$$Z_{CPE} = [(j\omega)^n]^{-1} \quad (9)$$

L'équation ci-dessus renseigne sur le degré de non-idéalité du comportement de la capacité. Sa valeur permet de différencier le comportement d'un condensateur idéal ($n = 1$) et celui d'un CPE ($n < 1$).

Le pourcentage d'efficacité d'inhibition est calculé à partir de la résistance de transfert de charge obtenue sur les diagrammes de Nyquist, selon l'équation:

$$EI_{Rt}(\%) = \frac{R_t - R_{t0}}{R_t} \quad (10)$$

où R_t et R_{t0} sont les valeurs de résistance de transfert de charge sans et avec inhibiteur, respectivement.

Considérant qu'un CPE peut être vu comme une association parallèle d'un condensateur et d'une résistance inversement proportionnelle à la fréquence angulaire, la valeur de la capacité, C_{dc} , peut ainsi être calculée pour un circuit parallèle composé d'un CPE (Q) et d'une résistance (R_t), selon la formule suivante [11, 12] :

$$Q = \frac{(C_{dc}R_t)^n}{R_t} \quad (11)$$

Les valeurs des éléments du circuit correspondant aux différents systèmes de corrosion, y compris les valeurs de C_{dc} , sont répertoriées dans le tableau III.4.

Tableau III.4 : Paramètres d'impédance et efficacité d'inhibition de la corrosion de l'acier doux dans une solution d'HCl 1M contenant différentes concentrations de l'inhibiteur à 30°C

Conc. (mol/L)	R_s ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	n	Q ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{S}^n$)	R_t ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	C_{dc} ($\mu\text{F} \cdot \text{cm}^2$)	EI_{Rt} (%)
Blanc	0.3	0.85	7.2×10^{-4}	22.73	316.3	-----
$5 \times 10^{-5} \text{M}$	1.18	0.85	1.8×10^{-4}	98.00	87.0	76%
10^{-4}M	1.07	0.84	1.2×10^{-4}	121.6	53.7	81.21%
$2.5 \times 10^{-4} \text{M}$	1.20	0.84	1.5×10^{-4}	156.0	73.5	85.43%
$5 \times 10^{-4} \text{M}$	1.18	0.82	1.5×10^{-4}	206.0	77.5	88.97%
10^{-3}M	0.66	0.83	1.5×10^{-4}	136	68.9	83.29%

Comme on peut le constater dans ce tableau, l'augmentation de la résistance en présence de l'inhibiteur comparativement à HCl seul est liée à l'effet protecteur contre la corrosion des molécules [13-14].

La valeur de C_{dl} diminue en présence de l'inhibiteur, ce qui suggère que les molécules inhibitrices agissent par adsorption à l'interface métal-solution. Il est important de souligner que n atteint approximativement la même valeur de 0,85-0.82. Ce résultat peut être interprété comme une indication du degré d'hétérogénéité de la surface métallique, correspondant à une légère dépression du demi-cercle de la capacité de la double couche. Par ailleurs, on observe dans le même tableau que les résultats obtenus par cette méthode sont presque les mêmes que ceux déterminé par des mesures de polarisation.

III.2. Influence du temps d'immersion

L'effet du temps d'immersion a été testé par la méthode de spectroscopie d'impédance électrochimique dans une solution d'acide chlorhydrique HCl 1M seul et en présence de la concentration optimale (5×10^{-4} M) et à une température de 30°C.

Les spectres d'impédance en représentation de Nyquist sont présenté dans les figures III.9.a et III.10.b. ces derniers montrent la présentation d'une seule boucle que ce soit en absence ou en présence de l'inhibiteur sous étude.

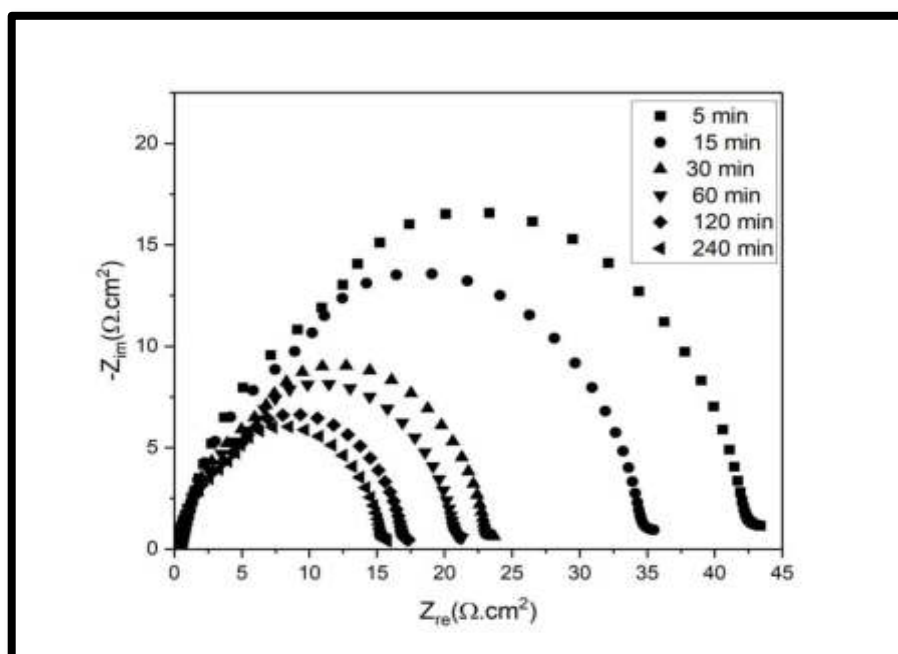


Figure III.26a. Diagrammes de Nyquist pour l'acier doux dans une solution d'HCl 1M seul à différent temps d'immersion et à 30 °C

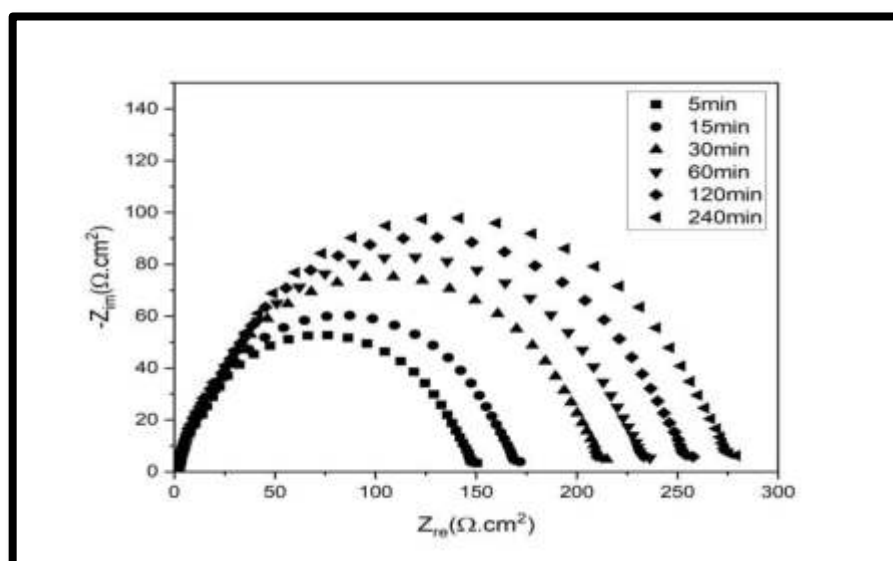


Figure III.27b. Diagrammes de Nyquist pour l'acier doux dans une solution d'HCl 1M + 5×10^{-4} M en inhibiteur à différent temps d'immersion et à 30 °C.

Le tableau III.5 regroupe les valeurs des paramètres électrochimiques, la capacité de la double couche et les efficacités inhibitrices (EI %) en absence et en présence de l'inhibiteur.

Tableau III.5: Paramètres d'impédance et efficacité d'inhibition à différents temps d'immersion

	Temps (min)	n	Q ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{S}^n$)	R_{tc} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	C_{dc} ($\mu\text{F} \cdot \text{cm}^2$)	EI_{Rt} (%)
HCl 1M	5	0.85	3.9×10^{-4}	41.67	185.79	----
	15	0.84	4.8×10^{-4}	34.09	219.7	-----
	30	0.83	7.2×10^{-4}	22.73	316.3	-----
	60	0.84	7.9×10^{-4}	20.5	360.9	----
	120	0.85	9.8×10^{-4}	16.7	467.4	-----
	240	0.83	12.1×10^{-4}	15.15	543.8	-----
HCl 1M + 5×10^{-4} M	5	0.82	2.1×10^{-4}	144	97.3	71.06 %
	15	0.83	1.72×10^{-4}	175.1	85.4	80.53 %
	30	0.82	1.5×10^{-4}	206	77.5	88.97 %
	60	0.84	1.33×10^{-4}	226.5	68.4	90.95 %
	120	0.82	1.22×10^{-4}	247.1	56.5	93.24 %
	240	0.83	1.12×10^{-4}	267.1	55.5	94.32 %

Une lecture attentive du tableau précédent permet à remarquer que:

- le taux de d'inhibition (%) augmente avec l'augmentation du temps d'immersion qui atteint une valeur maximale de 94.32% après 240 min soit 4h. ceci indique notre inhibiteur est stable dans le temps et peut être utilisé même pour le temps élevé d'exposition au milieu agressif.
- Cette augmentation dans les valeurs de R_t et une diminution dans les valeurs de C_{dl} provient de la formation spontanée de la couche protectrice à la surface du métal formé par les molécules d'inhibiteur en fonction du temps ainsi qu'une diminution dans la dissolution du ce dernier.

III.3. Effet de la température

La température est un facteur capable de changer les propriétés vis-à-vis de la corrosion d'un matériau dans un milieu agressif donné. Elle a une influence sur l'interaction métal-inhibiteur. L'influence de la température sur l'efficacité inhibitrice des composés organiques, a été étudiée par plusieurs chercheurs [15-22]. Lors du décapage et détartrage à température élevée et pour se débarrasser des produits de corrosion sur les équipements métalliques, les inhibiteurs sont employés pour contrecarrer les attaques acides. A titre d'exemples, notons que H. Hassan [20] a étudié l'influence de la température sur le pouvoir inhibiteur de plusieurs composés organiques utilisés pour la protection de l'acier dans un milieu HCl 0.1 M et que Gomma [17-18] a étudié cet effet sur la protection du cuivre par le benzotriazole dans H_2SO_4 et pour des températures allant de 30 à 65 °C. Ces études ont montré une diminution de l'efficacité inhibitrice avec la température. Par ailleurs, il a été montré, qu'avec l'augmentation de la température, peu de molécules gardent leur pouvoir inhibiteur intact comparativement à celui observé à basse température [21-22].

Pour déterminer l'effet de ce facteur sur le pouvoir inhibiteur du composé organique étudié, nous avons effectué une étude à différentes températures (30°C, 35°C et 40°C) à l'aide des mesures électrochimiques stationnaires en mode potentiodynamique.

Dans cette étude nous avons tracé les courbes de polarisation de l'acier en absence et en présence de l'inhibiteur dans l'intervalle de température de 30°C à 40°C.

Les figures III.9 présente à titre d'exemple l'influence de la température sur les courbes de polarisation cathodiques et anodiques de l'acier en milieu HCl 1M sans et avec ajout des différentes concentrations en inhibiteur.

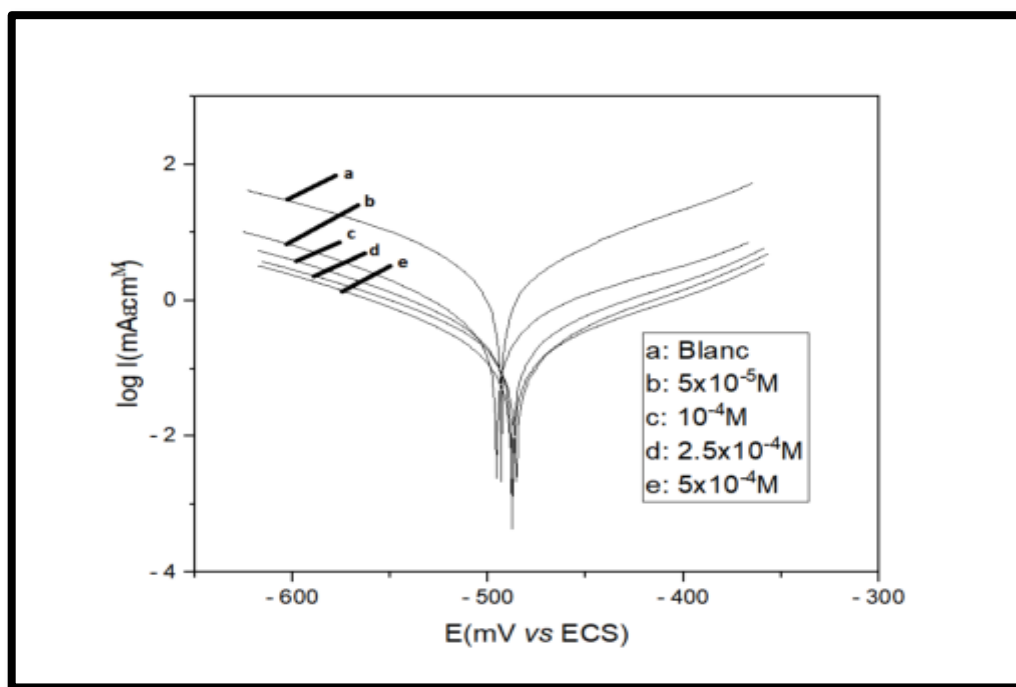


Figure III.28: Courbes $\log(I) = f(E)$ du système Acier doux/ HCl 1M/ inhibiteur à $T=35^{\circ}\text{C}$
 Les résultats obtenus à partir des courbes ci-dessus sont regroupés dans le tableau III.6.

Tableau III.6 : Paramètres électrochimiques obtenus à $T= 35^{\circ}\text{C}$

Conc. (mol/L)	$-E_{\text{corr}}$ (mV vs ECS)	b_a (mV/dec)	b_c (mV/dec)	I_{corr} (mA/cm ²)	EI_{icorr} (%)
Blanc	-493	100	97	2.3	-----
$5 \times 10^{-5} \text{M}$	-496	146	110	0.78	66.09 %
10^{-4}M	-488	128	117	0.43	81.30 %
$2.5 \times 10^{-4} \text{M}$	-487	114	109	0.30	86.96 %
$5 \times 10^{-4} \text{M}$	-488	128	117	0.26	88.26 %

L'inspection de la figure précédente et de ce tableau nous permet de constater que:

- L'ajout de l'inhibiteur affecte la branche cathodique et la branche anodique en même temps.
- Les valeurs des densités de courant diminuent lorsque la concentration en inhibiteur augmente.
- Les courbes dans la partie cathodique se présentent sous forme de portions linéaires, ce qui montre que la réduction des ions H^+ à la surface métallique se fait selon le même mécanisme de transfert de charge et ceci pour toutes les températures étudiées.

- Le potentiel de corrosion reste pratiquement constant.
- L'efficacité inhibitrice augmente avec l'augmentation de la concentration pour atteindre la valeur maximale 88,26% pour la concentration optimale.

Par ailleurs cette étude nous permet de déterminer les énergies d'activation du processus de dissolution du métal. En effet, la loi d'Arrhenius, a été employée pour calculer la valeur de l'énergie d'activation en absence et en présence de l'inhibiteur à différentes concentrations [23] :

$$\ln I_{corr} = A - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (12)$$

Où E_a est l'énergie d'activation, A = constante.

La variation de $\ln I_{corr}$ en fonction de $1/T$ est une droite que ce soit en absence ou en présence de l'inhibiteur. En utilisant l'équation d'Arrhenius, nous avons pu déterminer les énergies d'activation correspondant à chaque cas.

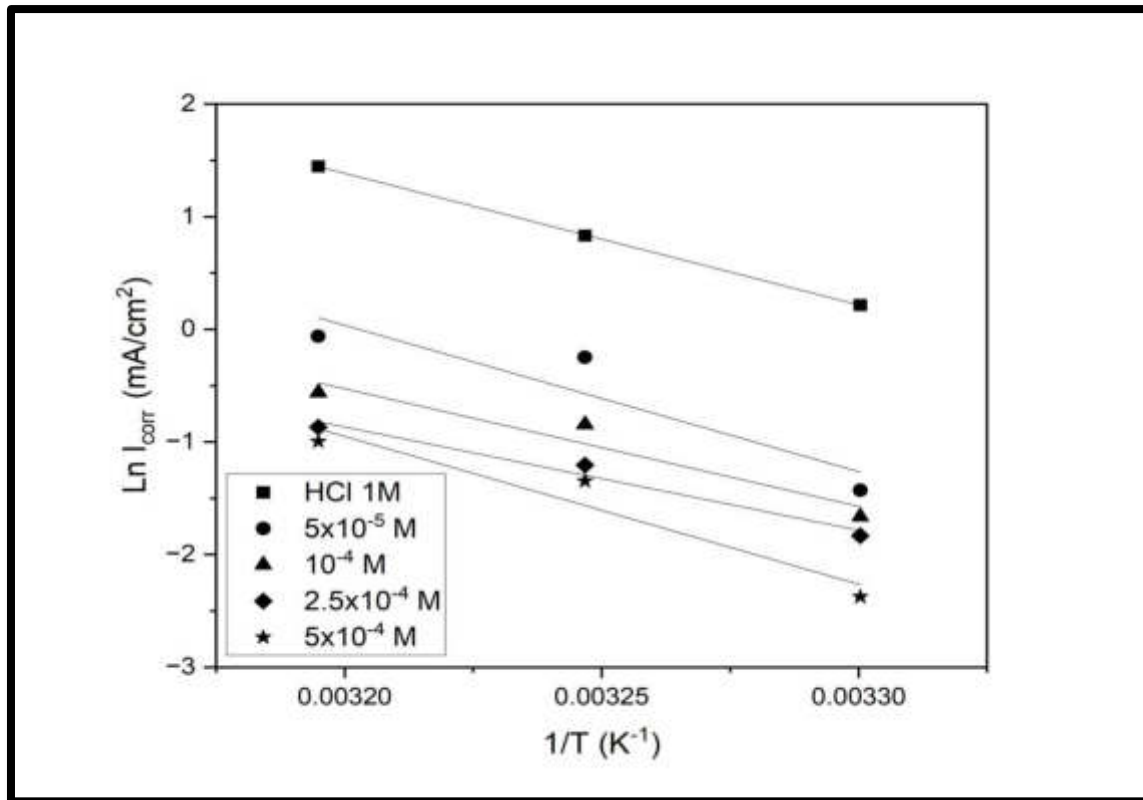


Figure III.29: Droites d'Arrhenius de l'acier doux en absence et en présence de l'inhibiteur a différentes concentration

La régression entre $\ln I_{corr}$ et $1/T$ a été effectuée par ordinateur. Les coefficients de régression sont très proches de 1, ce qui indique une bonne linéarité entre $\ln I_{corr}$ et $1/T$. Les énergies d'activation calculées pour les trois inhibiteurs sont données dans le tableau III.7.

Tableau III.7 : Energie d'activation E_a pour l'acier doux dans HCl 1M sans et avec l'inhibiteur

Conc. (Mol/L)	E_a (kJ/mol)
HCl 1M	97.11
5×10^{-5} M	108.06
10^{-4} M	86.84
2.5×10^{-4} M	76.21
5×10^{-4} M	82.31

Nous constatons une diminution de l'énergie d'activation en présence de l'inhibiteurs étudié sauf que pour la première concentration. L'influence de la température sur l'inhibition de la corrosion a été étudiée par plusieurs auteurs [8, 24-26] qui ont rapporté que l'énergie d'activation est plus faible pour la réaction inhibée que pour la réaction non inhibée. Ceci a été attribué à une augmentation du taux de recouvrement de la surface métallique par la molécule d'inhibiteur avec l'augmentation de la température. D'autre part, la diminution de E_a dans la solution inhibée appuie l'hypothèse d'une chimisorption de l'inhibiteur sur la surface métallique [27]. De plus, Szauer, Brandt et Foroulis [23, 28] affirment que la valeur plus faible de l'énergie d'activation du processus en présence de l'inhibiteur par rapport à celle en son absence est attribuée à sa chimisorption, tandis que l'inverse est le cas pour l'adsorption physique.

III. 4. Phénomène d'adsorption

Il est connu que les isothermes d'adsorption sont très importantes pour la compréhension du mécanisme d'inhibition de la corrosion [19]. Les isothermes les plus fréquemment utilisées sont celles de Langmuir, Freundlich, Temkin, Frumkin, etc. En supposant une relation directe entre l'efficacité d'inhibition et le taux de recouvrement de surface, $\Theta = EI\%/100$, de l'inhibiteur, les données de courbes de polarisations ont été utilisées pour évaluer les valeurs de recouvrement de surface, données par l'équation 10 [20].

Dans ce cas, le taux de recouvrement de la surface du métal est relié à la concentration de l'inhibiteur par la relation :

$$\frac{C_{inh}}{\Theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C_{inh} \quad (13)$$

Où K_{ads} désigne le coefficient d'adsorption et C_{inh} la concentration de l'inhibiteur dans la solution.

Les valeurs de taux de recouvrement ont été testées graphiquement afin d'ajuster une isotherme d'adsorption appropriée. Le graphique de C/θ en fonction de C (Figure III. 11) a donné des droites de pentes très proche de l'unité ce qui prouve clairement l'adsorption du l'inhibiteur suit l'isotherme de Langmuir.

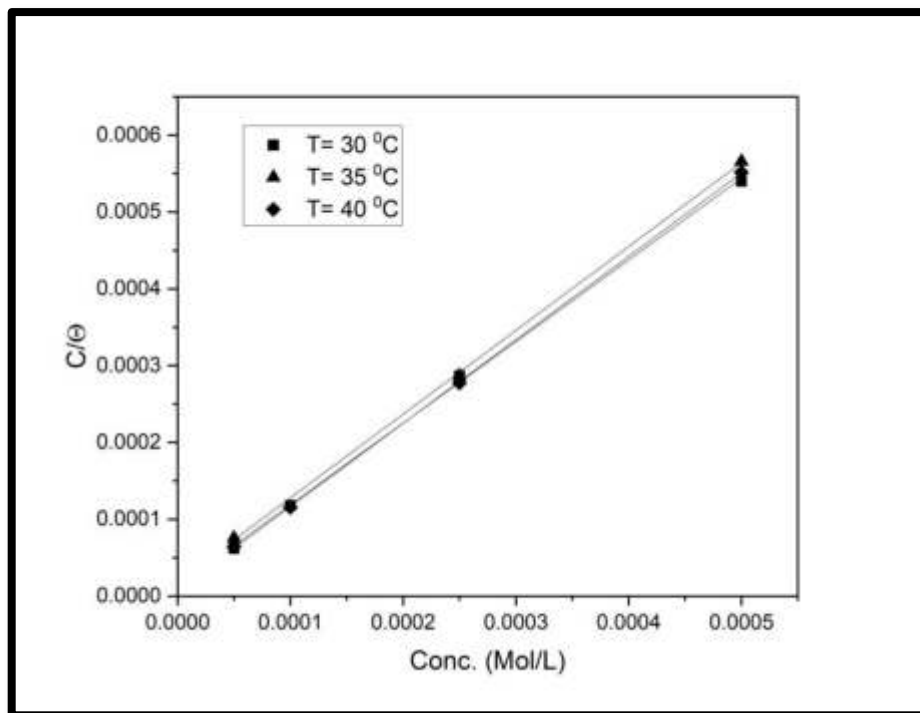


Figure III.30: Courbes d'ajustement des données de corrosion de l'acier doux en présence d'inhibiteur selon l'isotherme de Langmuir a différentes températures.

Les valeurs de coefficient d'adsorption sont obtenue en extrapolation de ces droite a l'ordonné à l'origine.

D'autre part, l'enthalpie libre d'adsorption ΔG_{ads} peut être déterminée en utilisant l'équation :

$$\Delta G_{ads} = R.T.L(55,5.K_{ads}) \quad (14)$$

Les valeurs de K_{ads} et ΔG_{ads} sont regroupés dans le tableau III.8

Tableau III.8: Paramètres d'adsorptions pour le système Acier doux/HCl 1M/ inhibiteur

Temperature (°C)	K_{ads} (L/mol)	$-\Delta G_{ads}$ (kJ/mol)
30	$7,81. 10^4$	38,5
35	$5,4. 10^4$	38,2
40	$12,5. 10^4$	41,0

D'après ces résultats, on peut dire que, les valeurs négatives de ΔG_{ads} indique que le phénomène d'adsorption est spontané et que la double couche adsorbée sur la surface est stable. Soulignons que les valeurs absolues de ΔG_{ads}° , voisines de 20 kJ/mol ou inférieures, sont liées à l'adsorption physique, tandis que celles proches de 40 kJ/mol ou supérieures témoignent de l'existence de la chimisorption. [29-30].

La valeur absolue de ΔG_{ads} calculée dans notre cas sont proche de 40 kJ/mol montrant que cet inhibiteur s'adsorbe sur la surface métallique par une chimisorption.

On peut noter qu'un mécanisme plausible d'inhibition de la corrosion de l'acier doux dans une solution de HCl 1M pour le composé étudié peut être déduit sur la base de l'adsorption. En solution acide, cet inhibiteur peut exister sous forme d'espèces cationiques susceptibles d'être adsorbées sur les sites cathodiques de l'acier doux et de réduire le dégagement d'hydrogène. De plus, l'adsorption de ces composés sur les sites anodiques par l'intermédiaire des paires libres d'électrons des atomes d'oxygène (OH) et de l'oxygène (C=O) ainsi que les par l'intermédiaire des électrons π des groupes C=O du acide carboxylique réduira alors la dissolution anodique de l'acier doux.

Références bibliographiques

- [1] A. Teboula, S.Chouafa, Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier en milieu acide par l'extrait des feuilles de figuier, Mémoire de Mater, université de Guelma, 2022.
- [2] A. Benyachi, M.Roch, J. Pagetti, M. Troquet, Matériaux et Techniques, 76 (1988) 36.
- [3] X. Li, Corros. Sci.51 (2009) 620–634.
- [4] A. Benyaich, M. Roch, J. Pagetti, M.Troquet, Matériaux et Techniques,766 (1988) 36.
- [5] A.A. Aksut, W.J. Lorenz, F. Mansfeld, Corros.Sci., 22, (1982) 611.
- [6] M. Messali, H. Lgaz, R. Dassanayake, R. Salghi, S. Jodeh, N. Abidi, and O. Hamed, J. Mol. Struct. 1145 (2017) 43–54.
- [7] O. Larabi, Contribution à l'étude de l'inhibition de corrosion d'un acier au carbone par des composés organiques en milieu acide agressif, mémoire de master , université de Tlemcen, 2017.
- [8] O. Benali , L. Larabi, S. M. Mekelleche, Y. Harek, J. mater. Sci., 41 (2006) 7064.
- [9] Y.Freng, K.S.Siow, W.K.Teo, A.K.Hseich, Corros. Sci., 41 (1999) 829.
- [10] F.Bentiss, M.Lagrenée, M.Traisnel, J.C.Hornez, Corros. Sci., 41 (1999) 789.
- [11] A. Popova, E. Sokolova, S. Raicheva, M. Christov, Corros. Sci., 45, (2003) 33.
- [12] G.K. Gomma, Mat. Chem. Phys., 52, (1998) 200.

- [13] A. Sehmi, F. Boudou, N. Bouchikhi, A. Ait Amer, F. Zaoui, M. Zebida, O. Benali, B. Lasri and C. Gherdaoui, *Discover Chemistry*, 3(1) (2026) 222.
- [14] F. Boudjellal, A. Sehmi, F. Boudou, M. Zebida, A. Guendouzi, O. Benali, N. Bouchikhi and C. Gherdaoui, *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 138 (2025) 3129–3158.
- [15] Mansfeld F (1981) *Corrosion* 37:301
- [16] Mccafferty E (1997) *Corros Sci* 39:243
- [17] Wu X, Ma H, Chen S, Xu Z, Sui A (1999) *J Electrochem Soc* 146:1847
- [18] Ma H, Chen S, Yin B, Zhao S, Liu X (2003) *Corros Sci* 45:867
- [19] Hackerman N, Mccafferty E (1974) In: *Proceedings of the fifth international congress on metallic corrosion*. Houston, TX, p 542
- [20] Zvaunya R, Dawson JL (1994) *J Appl Electrochem* 24:943
- [21] Villamil RFV, Corio P, Rubin JC, Agostinho SML (2002) *J Electroanal Chem* 535:75
- [22] Pillai KC, Narayan R (1983) *Corros Sci* 23:151
- [23] Foroulis ZA (1990) in *Proceedings of the 7th European corrosion inhibitors*. Ferrara, pp 149
- [24] Putilova IN, Balezin SA, Barannik VP (1960) In: *Metallic corrosion inhibitors*. Pergamon Press, New York
- [25] Stoyanova AE, Sokolova EI, Raicheva SN (1997) *Corros Sci* 39:1595
- [26] Lagrenée M, Mernari B, Bouanis M, Traisnel M, Bentiss F (2002) *Corros Sci* 44:573
- [27] Sankarapavinasam S, Pushpanaden F, Ahamed M (1991) *Corros Sci* 32:193
- [28] Szauer T, Brandt A (1981) *Electrochim Acta* 26:1209
- [29] Ayers PW, Levy M (2000) *Theor Chem Acc* 103:353
- [30] Geerlings P, De Proft F (2002) *Int J Mol Sci* 3:276

CONCLUSION GENERALE

L'influence de l'addition de l'**acide 3,5-dinitrosalicylique (DNS)** sur la corrosion de l'acier doux en milieu HCl 1M a été menée en utilisant les différentes méthodes électrochimiques (PCO, courbe de polarisation, résistance de polarisation et la spectroscopie d'impédance électrochimique). Cette étude nous permet de faire les conclusions suivantes :

- L'inhibiteur étudié est performant même aux faibles concentrations.
- Les courbes de polarisation ont montré que le composé étudié était un inhibiteur de type mixte.
- L'efficacité inhibitrice de ce composé augmente avec la concentration et atteint un maximum à 5×10^{-4} M.
- La spectroscopie d'impédance électrochimique montre une augmentation de la résistance en présence de l'inhibiteur comparativement à HCl seul tandis que la valeur de C_{dl} diminue, ceci est lié à l'effet protecteur contre la corrosion des molécules de l'inhibiteur.
- Les résultats obtenus par les différentes méthodes sont en bon accord.
- L'adsorption de l'inhibiteur sur la surface de l'acier doux suit l'isotherme de Langmuir.
- L'efficacité inhibitrice de l'inhibiteur considéré augmente avec la température et son ajout entraîne une diminution de l'énergie d'activation de la corrosion.
- L'adsorption des molécules inhibitrice sur la surface de l'acier doux se fait vraisemblablement par chimisorption.

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى بحث السلوك الكهروكيميائي للفولاذ الطري في حمض الهيدروكلوريك في غياب وجود حمض 3,5-ثنائي نيتروساليسيليك (DNS). وقد أسفرت هذه الدراسة عن استخلاص عدد من المعايير. استخدمنا طرقًا كهروكيميائية (منحنى الاستقطاب، ومقاومة الاستقطاب، وSIE) لتحديد مختلف المعايير الكهروكيميائية لتآكل الفولاذ في وسط حمضي، وبالتالي، معدل التثبيط. سمحت لنا دراسة تأثير درجة الحرارة بتحديد قيم طاقة التنشيط في غياب وجود المثبط قيد الدراسة. علاوة على ذلك، كشفت دراستنا أن امتزاز المثبط الأكثر فعالية يتبع نموذج لانغموير. كما تم حساب قيمة طاقة جيبس الحرة للامتزاز.

الكلمات المفتاحية: التآكل، الفولاذ الطري، حمض الهيدروكلوريك، الطرق الكهروكيميائية.

Résumé

Le but de ce travail est d'étudier le comportement électrochimique d'un acier doux dans l'acide chlorhydrique en absence et en présence de l'acide 3,5-dinitrosalicylique (DNS). À partir de cette étude un certain nombre des paramètres ont été obtenus. Nous avons utilisé les méthodes électrochimiques (courbe de polarisation, résistance de polarisation et SIE) pour déterminer les différents paramètres électrochimiques de corrosion de l'acier en milieu acide et par conséquent le taux d'inhibition. L'étude de l'effet de la température nous a permis de déterminer les valeurs de l'énergie d'activation en absence et en présence de l'inhibiteur étudié. Par ailleurs, notre étude a révélé que l'adsorption de l'inhibiteur le plus efficace suit le modèle de Langmuir. La valeur de l'enthalpie libre d'adsorption a été également calculée.

MOTS- CLES: corrosion, acier doux, acide chlorhydrique, méthodes électrochimiques.

Abstract

The aim of this work was to study the electrochemical behavior of mild steel in hydrochloric acid in the absence and presence of 3,5-dinitrosalicylic acid (DNS). From this study, several parameters were obtained. We used electrochemical methods (polarization curve, polarization resistance, and SIE) to determine the various electrochemical parameters of steel corrosion in an acidic environment and, consequently, the inhibition rate. The study of the temperature effect allowed us to determine the activation energy values in the absence and presence of the inhibitor under investigation. Furthermore, our study revealed that the adsorption of the most effective inhibitor follows the Langmuir model. The value of the adsorption Gibbs free energy was also calculated.

KEYWORDS: corrosion, mild steel, hydrochloric acid, electrochemical methods.

