

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE BLIDA 1

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCEDES

## *MEMOIRE DE MASTER*

Spécialité : Génie Chimique

Présenté par :

Zemali Loubna

*Etude de l'effet de sel d'ammonium quaternaire  
synthétisé à partir de kérosène sur la corrosion de  
l'alliage d'aluminium en milieu acide  
chlorhydrique 1M*

Promotrice: HAMITOUCHE. H

Juré :

- ▣ Mahdawé
- ▣ B
- ▣

Septembre 2014

## TABLE DES MATIERES

RESUME.....	3
REMERCIEMENTS.....	4
TABLE DES MATIERES.....	6
LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX.....	7
INTRODUCTION.....	9
1. Généralités sur les alliages d'aluminium .....	10
1.1. L'aluminium et ses alliages.....	10
1.1.1. Désignation numérique.....	13
1.1.1.1. Désignation des alliages d'aluminium corroyés.....	13
1.2. Les familles d'alliages d'aluminium.....	13
1.2.1. La famille 6000.....	14
1.2.1.1 Propriétés de l'alliage 6082.....	15
1.3. Corrosion des alliages d'aluminium .....	16
1.3.1. Type de corrosion .....	17
1.3.1.1. Corrosion chimique.....	17
1.3.1.2. Corrosion biochimique (bactérienne).....	17
1.3.1.3 Corrosion accompagnée d'usure.....	17
1.3.1.4 Corrosion électrochimique .....	17
1.3.2. Les différentes formes de corrosion .....	18
1.3.2.1. Corrosion généralisée ou uniforme.....	18
1.3.2.2. Corrosion localisée .....	18
1.3.3. Les facteurs influençant la corrosion.....	19
1.3.3.1. Influence du pH .....	19
1.3.3.2. Influence de la température .....	19
1.3.3.3. Influence de la salinité.....	20
1.3.4. Corrosion de l'aluminium dans un milieu aqueux.....	21
2. LUTTE CONTRE LA CORROSION PAR L'UTILISATION DES INHIBITEURS.....	23
2.1. Généralités sur les inhibiteurs de corrosion.....	23
2.1.1. Historique.....	23
2.1.2. Définition.....	24
2.1.3. Conditions et domaines d'utilisation.....	24

2.1.4. Classes d'inhibiteurs.....	25
2.2. Inhibition en milieu acide.....	27
2.3. Adsorption des inhibiteurs organiques.....	29
2.3.1. Isotherme d'adsorption .....	29
2.3.1.1. Isotherme de Langmuir .....	30
2.3.1.2. Isotherme de Temkin .....	30
2.3.1.3. Isotherme de Frumkin .....	30
2.3.2. Energie libre d'adsorption.....	31
2.4. Méthodes d'étude des inhibiteurs de corrosion.....	31
2.4.1. METHODES GRAVIMETRIQUES.....	31
2.4.2. METHODES ELECTROCHIMIQUES.....	32
2.4.2.1. Méthodes stationnaires.....	32
2.4.2.2. Méthodes non-stationnaires ou transitoires.....	33
3. ETUDE DE L'INHIBITION DE LA CORROSION D'ALLIAGE D'ALUMINIUM PAR UN TENSIOACTIF SYNTHETISE DANS HI 1M.....	34
3.1. Composition de l'alliage d'aluminium utilisé.....	34
3.2. Electrolyte (milieu corrosif).....	34
3.3. Mode opératoire des tests gravimétriques.....	34
3.4. Résultats et Discussions.....	36
3.4.1. Evolution de la vitesse de corrosion en fonction du temps d'immersion .....	37
3.4.2. Influence de la concentration de l'inhibiteur sur la vitesse de corrosion et l'efficacité.....	37
3.4.3. Influence de la température sur l'efficacité inhibitrice de TCKE .....	41
3.4.4. Influence de l'acidité sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de TCKE.....	43
3.4.5. Evolution de la vitesse de corrosion et l'efficacité d'inhibition de TCKE en fonction du temps d'immersion.....	45
3.4.7. Détermination de l'énergie d'activation.....	48
3.4.8. Isothermes d'adsorption .....	49
3.4.9. Observation de la surface par microscope électronique à balayage .....	51
CONCLUSION GENERALE.....	54
REFERENCES.....	55

## Résumé

Ce travail porte sur l'inhibition de la corrosion de l'alliage d'aluminium 6082 en milieu acide HCl 1M par un sel d'ammonium quaternaire TCKE produit au moyen de kérosène. L'influence de la concentration, du temps d'immersion, de l'acidité de milieu et de la température sur les processus de corrosion de l'alliage d'aluminium en milieu HCl 1M en absence et en présence d'inhibiteur a été étudiée par des mesures gravimétriques. Les résultats obtenus montrent que le pouvoir inhibiteur de TCKE dépend de ces paramètres et que pour 2h d'immersion, à 25°C, l'efficacité inhibitrice de TCKE est de 86% pour une concentration de 17,28 mg/L. Les analyses de surface effectuées par microscopie électronique à balayage montrent la présence d'une couche sur la surface métallique qui conduit à la diminution de la vitesse de corrosion.

## Abstract

This study focuses on the inhibition of corrosion of aluminum alloy 6082 medium 1M HCl acid with a quaternary ammonium salt produced by TCKE kerosene. The influence of the concentration, the soak time, the acidity of the medium and the temperature on the corrosion process of aluminum alloy in 1M HCl medium in the absence and presence of inhibitor was studied by gravimetric measurements. The results obtained show that the inhibitor TCKE power depends on these parameters and for 2h immersion at 25 ° C, the inhibitory efficiency of TCKE is 86% at a concentration of 17.28 mg / L. Surface analyzes performed by scanning electron microscopy showed the presence of a layer on the metal surface that leads to the decrease of the corrosion rate.

## ملخص

تركز هذه الدراسة على تثبيط تآكل سبائك الألومنيوم 6082 متوسطة حمض الهيدروكلوريك 1M مع ملح الأمونيوم الرباعية التي تنتجها TCKE الكيروسين. تأثير تركيز، ونوع الوقت، تمت دراسة حموضة المتوسطة ودرجة الحرارة على عملية تآكل سبائك الألومنيوم في حمض الهيدروكلوريك 1M المتوسطة في غياب وجود المانع بواسطة قياسات الجاذبية. النتائج المتحصل عليها تبين أن قوة المانع TCKE تعتمد على هذه المعايير والغمر 2H عند 25 درجة مئوية، وكفاءة المثبطة لل TCKE هي 86% بتركيز 17.28 ملغ / L تحليلات أظهر سطح يؤديها المجهر الإلكتروني الماسح وجود طبقة على سطح المعدن الذي يؤدي إلى انخفاض معدل التآكل.

# Remerciements

*Au mon dieu qui je le remercie de nous  
Avoir donné le courage, la volonté, l'amour de savoir  
Et surtout la patience pour faire ce travail.*

*En premier lieu, je remercie mon promotrice*

**Madame H.HAMITUCHE**

*Et en second, Mr. Le chef de département*

*Un grand merci à toutes les personnes qui ont, directement  
ou indirectement, contribués au bon déroulement de ce  
travail*

*Sans oublier de remercier le président et les autres membres  
du jury qui nous feront l'honneur d'apprécier notre modeste  
mémoire.*

*Et tous nos enseignants et enseignantes de l'institut des  
sciences et de la technologie pour leur patience et tendresse  
pour tout ce qui nous ont appris durant notre formation  
pendant ces Cinq années.*

LOUBNA



# Dédicaces

*À qui puis-je dédier cet humble travail si ce n'est à mes très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, le soutien, l'aide et les encouragements sont l'essence de ma réussite. Sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.*

*Je dédie ce travail également*

*À mes chers frères abdo et mahdi*

*A ma sœur hadjer, rahma et shahra zed*

*À mon fiancé hichem et toute sa famille*

*pour leur soutien, leur aide, leurs encouragements.*

*À tous mes oncles, tantes, cousins et leurs familles.*

*À mes Meilleures amies lamia et hadjer.*

*À tous mes amis et amies et mes collègues de master G.C qui étaient avec moi dès le début de mon parcours depuis 2012 jusqu'au 2014.*

## LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1. Maille élémentaire.....	10
Figure 1.2.Règles de désignation des alliages d'aluminium selon la norme NF EN 573.....	13
Figure 1.3. Diagramme d'équilibre potentiel – pH du système aluminium – eau à 25 °C.....	19
Figure 3.1. Schéma de l'éprouvette utilisée.....	35
Figure 3.2. Position de la pièce métallique dans le milieu corrosif.....	36
Figure 3.3. Variation de la vitesse de corrosion en fonction des quantités en inhibiteur injectées.....	40
Figure 3.4. Evolution de l'efficacité inhibitrice en fonction des différentes quantités du TCKE dans HCl 1M à 25°C.....	40
Figure 3.5. Evolution de l'efficacité inhibitrice en fonction de la température en présence de concentration optimale d'inhibiteur après 2h d'immersion.....	43
Figure 3.6. Variation de $\ln(V_{\text{corr}})$ en fonction de l'inverse de la température.....	48
Figure 3.7. Isotherme d'adsorption de Langmuir de TCKE sur l'aluminium dans HCl 1M à 25°C après 2h d'immersion.....	50
Figure 3.8. . Isotherme d'adsorption de Temkin de TCKE sur l'aluminium dans HCl 1M à 25°C après 2h d'immersion.....	50
Figure 3.9. . Isotherme d'adsorption de Fumkin de TCKE sur l'aluminium dans HCl 1M à 25°C, après 2h d'immersion.....	51
Figure 3.10. . Micrographie (MEB) de la surface de l'alliage d'aluminium sans attaque.....	52
Figure 3.11. Micrographie (MEB) de la surface de l'aluminium après immersion dans HCl 1M en absence d'inhibiteur.....	52
Figure 3.12. Micrographie (MEB) de la surface d'alliage dans HCl 1M en présence de TCKE...53	
Tableau 1.1. Principales propriétés de l'aluminium.....	
Tableau 1.2. Exemples d'applications de l'aluminium et de ses alliages, applications, principaux critères de choix des utilisateurs, alliages usuels retenus par les utilisateurs et quelques remarques.....	
Tableau 1.3. Familles d'alliages d'aluminium.....	
Tableau 1.4.Facteurs influençant la corrosion.....	
Tableau 3.1.Composition chimique de l'alliage en pourcentage massique.....	34
Tableau 3.2. Vitesse de corrosion de l'alliage 6082 dans HCl 1M, à 25°C.....	37
Tableau 3.3. Vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de corrosion de l'alliage d'aluminium dans HCl 1M, sans et avec différentes concentrations de TCKE à 25°C.....	38

Tableau 3.4. Evolution de la vitesse de corrosion et l'efficacité d'inhibition en présence et en absence de TCKE en fonction de la température.....	42
Tableau 3.5. Valeurs de la vitesse de corrosion et l'efficacité d'inhibition en fonction de la concentration en acide.....	44
Tableau 3.6. Vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice à différents temps d'immersion..	45
Tableau 3. 7. Valeurs de vitesse de corrosion de l'alliage et l'efficacité inhibitrice de TAPF sans et avec TCKE, à 25°C.....	47
Tableau 3.8. Energies d'activation de dissolution de l'alliage d'aluminium dans HCl 1M, sans et avec TCKE.....	49

## APPENDICE A

### Liste des symboles et abréviations

E (%) : efficacité de l'inhibiteur en pourcentage

$R_p$  : résistance de polarisation.

TCKE: Tensioactif à base de Kérosène

R : Constante des gaz parfaits. ( $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ )

$\Delta G^{\circ}_{ads}$  : Energie libre d'adsorption Stender

$\theta$  : Le taux de recouvrement.

K : la constante d'équilibre

°C : degré selle suce

HCl : acide chlore hydrique

h : heure

$m_0$  : masse initiale

m : la masse finale

S : surface totale

t : temps d'immersion

$V_{corr}$ ,  $V^{\circ}_{corr}$  : vitesses moyennes de corrosion de l'aluminium respectivement en l'absence et en présence d'inhibiteur en  $mg/h \cdot Cm^2$ .

$E_a$  : l'énergie d'activation

MEB : microscope électronique à balayage



## INTRODUCTION

En tonnage, la production d'aluminium ne représente qu'environ 2 % de celle des aciers. Cependant, ce métal arrive en seconde position dans l'utilisation des matériaux métalliques. Il doit cette place à un ensemble de propriétés qui en font un matériau remarquable: sa faible densité, ses conductivités thermiques et électrique proches de celles du cuivre, sa résistance à la corrosion, son aptitude aux traitements de surface, sa facilité de mise en œuvre et de recyclage. Cependant, l'aluminium et ces alliages sont très sensibles aux phénomènes de corrosion lorsqu'ils sont en contact avec un environnement aqueux agressif tel que les solutions de l'acide chlorhydrique (HCl) dans les opérations de nettoyage, décapage et détartrage.

En matière de protection, les inhibiteurs constituent un moyen original pour lutter contre la corrosion de l'aluminium dans les milieux acides. L'emploi des surfactants comme inhibiteur de corrosion de l'aluminium dans l'acide chlorhydrique a fait l'objet de plusieurs études [1], les résultats trouvés montrent que les sels d'ammonium quaternaire appartenant à la famille des surfactants cationique possèdent un pouvoir inhibiteur remarquable. En effet, ces sels d'ammonium quaternaire sont onéreux et leur synthèse est faisable. En Algérie, ces produits sont importés malgré la disponibilité de la matière première de synthèse. Dans ce contexte, l'objectif de notre étude est porté sur l'étude de pouvoir inhibiteur d'un sel d'ammonium quaternaire synthétisé à base de Kérosène local vis-à-vis de la corrosion de l'alliage d'aluminium dans HCl 1M.

Notre manuscrit est organisé en trois chapitres.

Le premier présente une étude bibliographique sur les alliages d'aluminium et leur corrosion. Le deuxième chapitre concerne la lutte contre la corrosion par l'utilisation d'inhibiteurs et méthodes d'évaluation du pouvoir inhibiteur. On présente, ensuite, dans le chapitre 3, l'aspect expérimental de notre étude et les résultats obtenus et leur interprétation.

A la fin de ce manuscrit seront présentées les conclusions et les perspectives générales.

## CHAPITRE 1

### GENERALITES SUR LES ALLIAGES D'ALUMINIUM ET LEUR CORROSION

L'aluminium est l'élément métallique le plus abondant dans la nature, en quantité. La production mondiale d'aluminium est de l'ordre de 25 Mt/an ; c'est le second métal le plus utilisé après l'acier. L'aluminium est préféré pour ces caractéristiques particulières:

- la masse volumique de 2,7 g/cm<sup>3</sup>, l'aluminium est trois fois plus léger que l'acier. Cette propriété est particulièrement intéressante dans les transports ;
- la conductivité thermique pour la production d'échangeurs thermiques (radiateurs automobiles, de réfrigérateurs, de climatiseurs...)
- la conductivité électrique pour la fabrication de câbles électriques ;
- la facilité de mise en forme pour la production de boîtes de conserve, de boîtes boissons, de profilés de fenêtres...

La bonne résistance à la corrosion de l'aluminium fait aussi partie des propriétés attractives, déterminantes en milieu marin, et appréciée dans de nombreuses applications [2-4].

#### 1.1. L'aluminium et ses alliages

L'aluminium est un élément chimique de symbole Al et de numéro atomique 13. Il est extrait de la bauxite, où il est présent sous forme d'oxyde hydraté dont on extrait l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Il peut également être extrait d'autres minéraux : néphéline, leucite, sillimanite, andalousite, muscovite. Il se cristallise dans le réseau C.F.C, et son paramètre de maille (a) est de 0,404 nm comme indiqué la Figure 1.1 Ses principales propriétés sont présentées dans le Tableau 1.1.



**Figure 1.1.** Maille élémentaire.

**Tableau 1.1.** Principales propriétés de l'aluminium

<b>Propriétés atomiques</b>	
Numéro atomique	13
Rayon atomique	142 pm
Masse molaire	27 g/mole
Structure cristalline	C.F.C
Paramètre de maille	0,404 nm
<b>Propriétés physiques</b>	
Masse volumique	2698 kg/m <sup>3</sup>
Point de fusion	660 °C
Coefficient de dilatation (8-10)	24
Conductivité thermique	237 W/m.K

Les faibles propriétés mécaniques de l'aluminium non allié font qu'il ne présente pratiquement aucun intérêt industriel. En effet l'aluminium est un métal extrêmement ductile (A% jusqu'à 70% pour l'aluminium pur à 99,99% à l'état recristallisé) et possède une limite d'élasticité très basse (Rp 0,2 de 15 à 20 MPa pour la nuance précédemment citée) [5]. Cependant, l'intérêt suscité par la légèreté de ce métal a conduit les métallurgistes à développer des alliages d'aluminium plus résistants. Ces alliages sont classés en deux grandes familles ; les alliages de corroyage (ou de forgeage) et les alliages de fonderie (ou démoulage).

Les alliages de corroyage sont destinés à être modifiés par des techniques de forge (laminage, Tréfilage, matriçage etc...). On distingue parmi eux les alliages à durcissement par écrouissage (séries 1000, 3000, 5000) et les alliages à durcissement structural (ou alliages trempant) (séries 2000, 4000, 6000, 7000).

Dans le tableau 1.2, quelques exemples d'applications de l'aluminium et de ses alliages sont cités

**Tableau 1.2.** Exemples d'applications de l'aluminium et de ses alliages, applications, principaux critères de choix des utilisateurs, alliages usuels retenus par les utilisateurs et quelques remarques.

Exemples d'applications de l'aluminium et de ses alliages			
Applications	Principaux critères de choix des utilisateurs	Alliages usuels retenus par les utilisateurs	Remarques
<b>Chaudronnerie, tôlerie</b>	Mise en forme Soudage	1200, 1100, 1050A 3105, 3003, 3004 5049, 5052, 5454 5754, 5086, 5083 <b>6082</b> , 6061	
<b>Applications mécaniques</b>	Caractéristiques mécaniques Usinabilité	2618A, 2024, 2017A, 2014, 2214, 2030, 2011 5086, 5083 6005A, <b>6082</b> , 6061, 6012, 6262, 7075, 7049A, Fortal	
<b>Plasturgie</b>	Caractéristiques mécaniques Usinabilité Conductivité thermique	2017A 5083 6061 7075 Fortal, Alumold	
<b>Construction aéronautique et spatiale</b>	Légèreté Caractéristiques mécaniques Mise en forme Usinage Aptitude aux traitements de surface Tenue à la corrosion	2618A, 2024, 2014 2214, 2219 7020, 7075, 7175, 7475, 7050, 7010	
<b>Automobile</b>	Mise en forme Caractéristiques mécaniques Aspect après peinture Tenue à la corrosion	5251, 5754, 5182 5083 6060, 6005A, 6106 <b>6082</b> , 6016	Pour les échangeurs brasés : 3003 et 3005 plaqués
<b>Véhicules industriels</b>	Mise en forme Assemblage (soudage) Fonctionnalités des demi-produits Esthétique Tenue à la corrosion	3003, 3004 5052, 5454, 5754, 5086, 5083 6005A, <b>6082</b>	En bandes larges : 3003, 5052, 5754 En tôles relief : 3003, 5052, 5754, 5086
<b>Construction navale</b>	Mise en forme Soudage Tenue à la corrosion	5754, 5086, 5383, 5083, 6005A, <b>6082</b>	Tôles relief en 5086
<b>Bâtiment</b>	Mise en forme Assemblage Aptitude à l'anodisation, au laquage Tenue à la corrosion	1050A 3105, 3003, 3005, 5005, 5052 6060, 6005A, 6106	Bandes prélaquées : 1050A, 3105, 3003, 3005, 5052 Bandes préanodisées : 5005

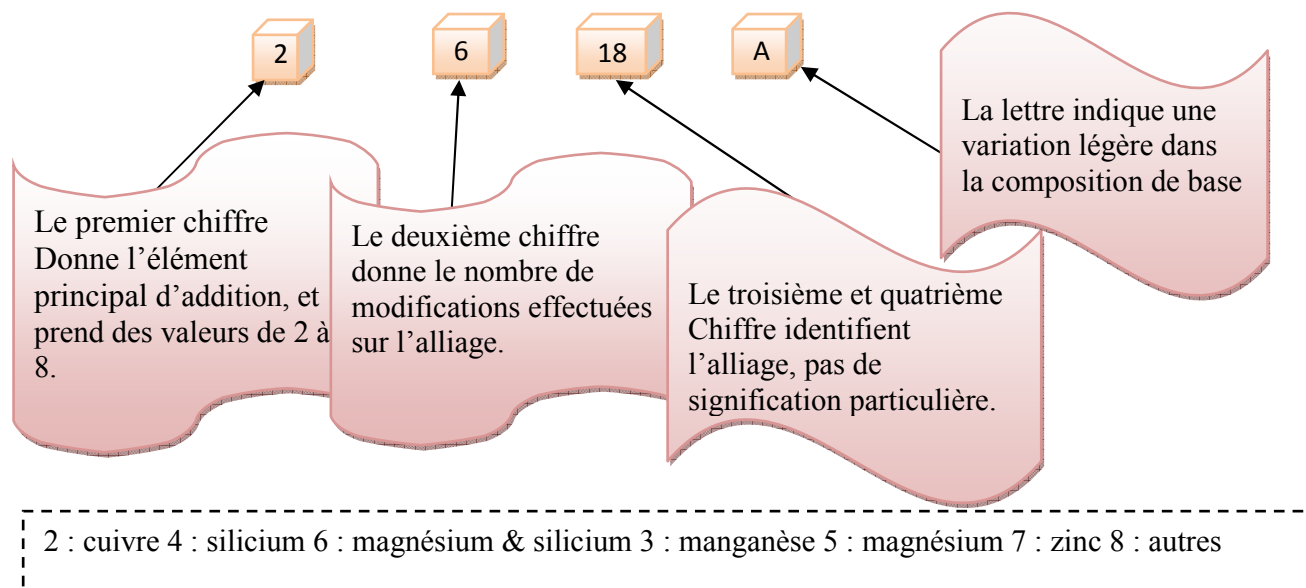
La résistance à la corrosion est une propriété importante, mais ce n'est qu'une des propriétés prises en compte ou non dans ces choix [6, 7].

### 1.1.1. Désignation numérique

Conformément aux directives de l'Aluminium Association (Washington DC 2006, USA), les alliages d'aluminium sont désignés à l'aide d'un système numérique de quatre chiffres identifiant la composition chimique de l'alliage. Ce groupe de quatre chiffres est parfois suivi d'une lettre indiquant une variante nationale.

#### 1.1.1.1. Désignation des alliages d'aluminium corroyés

Corroyer c'est la mise en forme des demi-produits et des produits finis par déformation à chaud. La norme NF EN 573 définit les règles de désignation des produits destinés à être transformés par corroyage. La désignation des alliages d'aluminium comprend un nombre de 4 chiffres et une lettre dont la définition est donnée ci-après [8]:



**Figure 1.2.** Règles de désignation des alliages d'aluminium selon la norme NF EN 573.

## 1.2. Familles d'alliages d'aluminium

Les huit familles d'alliages d'aluminium se divisent en deux groupes bien distincts en relation avec leur mode de durcissement (Tableau 1.3).

Le premier groupe est constitué des alliages à durcissement par écrouissage. Ce sont les familles 1000, 3000, 5000 et 8000. Les propriétés mécaniques de ces alliages sont

déterminées par le durcissement plastique qui correspond à une modification structurale du métal.

Le second groupe est constitué des alliages à durcissement structural. Ce sont les familles 2000, 4000, 6000 et 7000. Les propriétés mécaniques de ces alliages sont déterminées par le traitement thermique, généralement effectué à la fin de la gamme de transformation, en trois étapes : mise en solution, trempe et revenu (ou maturation). Le phénomène de durcissement résulte de la précipitation provoquée et contrôlée de certaines phases à l'intérieur de la matrice d'aluminium qui vont produire une augmentation des propriétés mécaniques. Dans cette étude, l'alliage à durcissement structural **6082** appartenant à la famille 6000 a été utilisé.

**Tableau 1.3.** Familles d'alliages d'aluminium

<b>Durcissement par écrouissage</b>			
Famille	Élément d'alliage	% en masse	Additions possibles
1000	Aucun		Cuivre
3000	Manganèse	0,5 – 1,5	Magnésium – cuivre
5000	Manganèse	0,5 -5	Manganèse-Chrome
8000	Fer et silicium	Si : 0,3 – 1 Fe : 0,6 - 2	Nickel
<b>Durcissement structural</b>			
6000	Magnésium et silicium	Mg : 0,5 – 1,5 Si : 0,5 – 1,5	Silicium – magnésiummanganèse
2000	Cuivre	2 - 6	Mg : 1 - 2
7000	Zinc et magnésium	Zn : 5 – 7 Mg : 1 - 2	Cuivre
4000	Silicium	0,8– 1,7	

### 1.2.1. Famille 6000

Les éléments d'addition les plus importants de la série 6000 sont le magnésium et le silicium.ils sont d'une grande importance industrielle. Leur durcissement est du à la précipitation des formes transitoire de composé  $Mg_2Si$ . Ils ont une très bonne aptitude à la mise en forme à froide et à la déformation. Ils présentent un bon niveau de caractéristiques mécanique. Ils ont une bonne résistance à la corrosion atmosphérique et leurs beaux aspects de surface après brillantage.

Les alliages de la série 6000 peuvent être classés en deux catégories :



- un groupe dont les compositions sont plus chargées en magnésium et silicium (6061, **6082** par exemple). Ils sont utilisés pour des applications de structure (charpente, pylône...), ainsi qu'en aéronautique (liaisons électriques, boîtiers électroniques embarqués..) ;
- une deuxième catégorie moins chargée en silicium qui par conséquent aura des caractéristiques mécaniques plus faibles. C'est le cas du 6060 qui permettra de grandes vitesses de filage mais qui aura des caractéristiques mécaniques plus faibles. Il sera utilisé par exemple en décoration et ameublement, menuiserie métallique.

Il faut également noter l'existence du 6101 anciennement appelé *Almelec*. Cet alliage a été énormément utilisé pour ses aptitudes de conducteur électrique. Il a notamment été utilisé pour la fabrication de lignes moyenne et haute tension in France.

#### 1.2.1.1. Propriétés de l'alliage 6082

- Propriétés chimiques

Alliage d'aluminium 6082 à une structure cristalline cubique à l'échelle atomique. Cela conduit à des matériaux présentant des propriétés de résistance élevée, car il est plus difficile pour les cellules à cristaux lame sur l'autre que pour les autres structures cristallines. Alliage d'aluminium 6082, en commun avec tous les alliages d'aluminium, faciles à former une couche d'oxyde d'aluminium en contact avec l'air, qui agit pour empêcher la corrosion.

- Propriétés physiques

Alliage d'aluminium 6082 a un point de 555 degrés centigrades de fusion. Sa densité est de 2,7 kilogrammes par mètre cube. Il a un module d'élasticité de 70 GPa. Il a une résistivité électrique 0.038E-6 Ohm mètres. Sa conductivité thermique est de 180 Watts par mètre-Kelvin. Il a une extension 24E-6 par Kelvin thermique.

- Propriétés mécaniques

Alliage d'aluminium 6082 a une limite d'élasticité de 60 MPa. Sa résistance à la traction est de 130 MPa. Il a une résistance au cisaillement de 85 MPa. A un taux de 27 pour cent d'allongement. Il présente une dureté de 35 mesurée sur le taux de dureté Vickers.

### 1.3. Corrosion des alliages d'aluminium

La corrosion est la détérioration des matériaux par interaction physico-chimique avec leur environnement, entraînant des modifications de propriétés du métal souvent accompagnées d'une dégradation fonctionnelle de ce dernier (altération de ses propriétés mécaniques, électriques, etc.). Les mécanismes mis en jeu sont divers et conduisent à des formes différentes de corrosion. [9, 10].

Les pertes économiques en matériel qui peuvent être attribuées à la corrosion en général sont très importantes. On distingue les effets directs qui concernent les dépenses dues à détérioration du matériel et son remplacement et les effets indirects qui sont sans doute plus importants. Il s'agit de [11] :

- Des pertes de productivité consécutives à l'arrêt des installations pour réparation.
- Des pertes de production (fuites dans la canalisation, émissions de gaz,...).
- Coût de l'entretien et du contrôle (mise en peinture, protection cathodique).
- Coût du à l'utilisation de matériau plus nobles.
- Contamination des matières fabriquées par des produits de corrosion.
- Arrêt de production.

La corrosion n'est pas seulement une source de gaspillage de matières premières et d'énergie, elle peut en plus provoquer des accidents graves et dans certains cas contribuer à la pollution de l'environnement naturel [11].

Et matériel corrodés constitue pour l'industrie une charge financière très élevée à laquelle il faut ajouter le manque à gagner correspondant à l'arrêt des installations nécessaires pour effectuer les réparations.

Les coûts annuels imputables à la corrosion et à ses conséquences s'élèvent à plusieurs milliards de dollars par an dans la plupart des pays industrialisés. Aux Etas - Unis, les pertes occasionnées par la corrosion sont évaluées à plus de 7 milliards de dollars.

La corrosion métallique est le phénomène suivant lequel les métaux et alliages ont tendance, sous l'action de réactifs chimiques ou d'agents atmosphériques, à retourner vers leur état originel d'oxyde, de sulfure, de carbonate ou de tout autre sel plus stable dans le milieu ambiant [12].

### 1.3.1. Type de corrosion

La corrosion peut se développer suivant différents processus qui caractérisent chacun un type de corrosion [13,14].

#### 1.3.1.1. Corrosion chimique

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

Exposés à l'air, sous l'action de l'oxygène, des oxydes de soufre et d'azote produits par les combustions de différents combustibles, les métaux se recouvrent d'une couche d'oxyde.

Deux cas sont possibles :

- La couche d'oxyde forme une pellicule protectrice sur métal, dans ce cas le métal ne subit pas d'oxydation ultérieure, c'est le cas de **l'aluminium**, du nickel et du chrome.
- La couche d'oxyde est poreuse, elle n'empêche pas l'oxydation en profondeur du métal c'est le cas du fer [15].

#### 1.3.1.2. Corrosion biochimique (bactérienne)

C'est l'attaque bactérienne des matériaux métalliques, en particulier dans les canalisations enterrées et les réservoirs. En effet, le métabolisme du développement de certaines bactéries provoque la formation d'acide sulfurique qui attaque le métal ; Le mécanisme du mode de corrosion peut être de type chimique par production de substances corrosives telles que  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ , ou d'un acide organique.

#### 1.3.1.3 Corrosion accompagnée d'usure

Lorsque les produits de corrosion forment un dépôt adhérent et continu sur la surface du métal, ils ralentissent la vitesse de corrosion. Cette couche peut être éliminée en certains points par usure, abrasive ou érosive. Il y a alors accélération de la corrosion parce que la surface du métal est mise à nu.

#### 1.3.1.4. Corrosion électrochimique

C'est une réaction électrochimique entre la surface d'un matériau et un liquide électrolyte. Cette réaction est accompagnée de la formation de piles qui sont le siège de circulation de courant électrique. Ce type constitue 96% de cas de corrosion.

### 1.3.2. Différentes formes de corrosion

Plusieurs formes de corrosion peuvent être dénombrées, caractérisées par des modifications de propriétés physiques du métal [14, 16,17], on cite quelques unes.

#### 1.3.2.1. Corrosion généralisée ou uniforme

La corrosion uniforme est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface. Le métal dans ce cas est dans l'état actif. Elle est aisément contrôlable par des mesures de perte de poids ou la diminution d'épaisseur du métal.

C'est la forme la plus classique de corrosion, elle se caractérise par une attaque de toute la surface du métal en contact avec le milieu corrosif, elle ne modifie que très peu les qualités de résistance du matériau [18].

L'aluminium mis à nu se recouvre instantanément d'une couche d'oxyde de 5 à 10 nm d'épaisseur et sa résistance à la corrosion dépend de la stabilité de cette couche d'oxyde vis-à-vis du milieu corrosif. La corrosion généralisée se caractérise par une diminution d'épaisseur uniforme sur toute la surface du métal : la couche d'oxyde étant dissoute d'une façon régulière par l'agent corrosif. Dans une atmosphère naturelle, rurale ou marine, la vitesse de corrosion de l'aluminium est extrêmement faible, voire insignifiante. Elle ne dépasse pas 5µm /an. D'une manière générale, la résistance à la corrosion généralisée de l'aluminium dépend du pH du milieu corrosif ; la corrosion ne pouvant pratiquement se produire que dans les milieux acides avec  $\text{pH} < 4$  et dans les milieux basiques avec  $\text{pH} > 9$ . Mais en fait, pour un pH donné, la vitesse de corrosion dépend fortement des ions présents dans la solution. Il existe des exceptions aux limites de pH à l'intérieur desquelles on peut utiliser l'aluminium : ainsi l'aluminium résiste à la corrosion dans l'acide nitrique concentré ( $\text{pH} = 1$ ) et dans l'ammoniacque ( $\text{pH} = 13$ ). [19]

#### 1.3.2.2. Corrosion localisée

La forme de la corrosion la plus rencontrée est par piqure

- Corrosion par piqûre

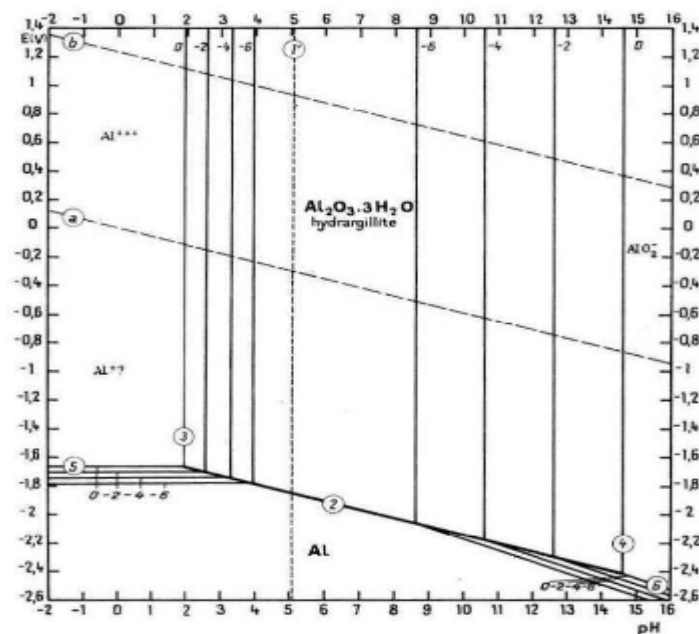
La corrosion par piqûre consiste en une dissolution rapide du métal sur des sites discrets de la surface, alors que le reste de cette surface n'est pas attaquée [20].

L'aluminium et ses alliages, comme tout métal recouvert d'un film passif, est sensible à la corrosion par piqûre. Elle se produit au contact d'ions halogénures  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$  et  $\text{I}^-$ , plus particulièrement au contact de l'ion  $\text{Cl}^-$ , très agressif vis-à-vis de l'aluminium de par son faible diamètre et son caractère polaire.

### 1.3.3. Facteurs influençant la corrosion

#### 1.3.3.1. Influence du pH

De nombreuses réactions chimiques ou électrochimiques, intervenant dans les phénomènes de corrosion, dépendent de la valeur de pH de la solution. Pourbaix [2] a établi pour la plupart des métaux des diagrammes potentiel-pH d'équilibres des réactions, qui décrivent les différentes réactions théoriques possibles entre un métal et ses ions en présence d'eaux.



**Figure 1.12.** Diagramme d'équilibre potentiel – pH du système aluminium – eau à 25 °C.

#### 1.3.3.2. Influence de la température

La température est l'un des facteurs susceptible de modifier le comportement d'un matériau dans un milieu corrosif. C'est ainsi que Crousier et al [3] ont montré que l'augmentation de la température du milieu HCl (1M) de 20°C à 83°C provoque un affaiblissement de la résistance à la corrosion de quelques alliages. Ajoutons que la température peut modifier l'interaction métal-inhibiteur dans un milieu donné. L'étude de l'effet de la température est d'une grande importance puisqu'elle peut nous renseigner sur le mécanisme d'action de l'inhibiteur (chimisorption ou physisorption) et sur les énergies apparentes d'activation du processus de corrosion en absence et en présence de celui-ci.

La vitesse de corrosion augmente exponentiellement avec la température selon la formule d'Arrhenius [4] exprimant la vitesse de réaction en fonction de la température suivant l'équation :

$$V_{\text{corr}} = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (1.5)$$

Où

$V_{\text{corr}}$  : vitesse de corrosion en (mg/h.cm<sup>2</sup>).

$E_a$  : énergie d'activation du processus de dissolution du métal en (j.mol<sup>-1</sup>).

$A$  : facteur pré exponentiel.

$R$  : constante des gaz parfaits.

$T$  : température absolue.

#### 1.3.3.3. Influence de la salinité

Les chlorures sont des ions agressifs, souvent à l'origine de corrosions localisées, leur présence en solution s'accompagne d'effets complémentaires, d'une part, leur concentration locale induit une acidification du milieu et d'autre part, la salinité a une influence sur la conductivité du milieu aqueux

Etant donné que la corrosion est l'action d'un liquide ou d'un gaz sur la surface d'un métal, il est donc logique de penser que la nature de cette surface jouera un rôle important sur le comportement du métal vis-à-vis de cette action. Toutes les caractéristiques d'une surface sont désignées sous le nom : l'état de surface.

D'autres facteurs peuvent influencer la corrosion. Nous donnons l'influence de la plupart de ces facteurs dans le tableau suivant [10] :

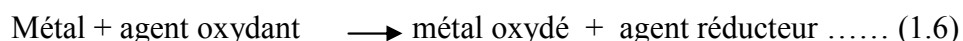


**Tableau 1.5.** Facteurs influençant la corrosion

Facteurs définissant les modes d'attaque	Concentration du réactif teneur en oxygène, en impuretés acidité (pH) du milieu température, pression
Facteurs métallurgiques	Composition de l'alliage impuretés traitements thermiques, mécaniques additions protectrices
Facteurs définissant les conditions d'emploi	Etat de surface forme des pièces sollicitations mécaniques emploi d'inhibiteurs procédés d'assemblage
Facteurs dépendant du temps	Vieillessement tensions mécaniques température modification des revêtements protecteurs

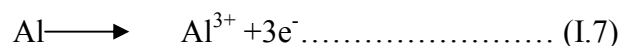
#### 1.3.4. Corrosion de l'aluminium dans un milieu aqueux

La corrosion des métaux est due à une réaction d'oxydoréduction irréversible entre le métal et un agent oxydant contenu dans l'environnement. L'oxydation du métal implique la réduction de l'agent oxydant selon la réaction :

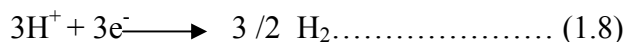


En effet, les réactions électrochimiques fondamentales de la corrosion de l'aluminium et ses alliages ont fait l'objet de plusieurs études. Il est très considérée comme une combinaison au moins deux réactions électrochimiques résultant des secteurs anodiques où la dissolution de métal se produit, et secteurs cathodiques où deux réactions peuvent se dérouler telles que la réduction de l'oxygène dissous et la réduction des protons  $H^+$  proviennent de la dissociation de l'eau [37-39].

L'oxydation de l'aluminium dans un milieu aqueux se fait suivant la réaction électrochimique [37-41]



L'aluminium sous forme de métal, à la valence 0, passe en solution sous forme d'ion trivalent  $\text{Al}^{3+}$  en perdant  $3e^-$ . Et comme il y a libération d'électron donc il y aura obligatoirement et simultanément une réduction pour capter les électrons ainsi libérés, soit par la réduction des protons  $\text{H}^+$  si le milieu est acide.



Soit par la réduction de l'oxygène dissous dans l'eau



### Conclusion

- L'aluminium et ses alliages sont bien connus pour leurs excellentes propriétés, telles que légèreté, conductibilité électrique et thermique, propriétés mécaniques, résistance à la corrosion, non-toxicité. C'est pourquoi le nombre d'applications de ce matériau a cru très rapidement ces dernières années dans des domaines très différents tels que l'industrie automobile, l'aviation, l'emballage, la lithographie, etc.  
Le choix d'un alliage est une adéquation entre ses propriétés, ses aptitudes technologiques et les conditions de service. Il existe des alliages spécialisés pour certaines applications, soit par l'usage, soit qu'ils ont été spécialement mis au point pour une application spécifique, sachant que ces applications ne sont pas forcément exclusives.
- La corrosion de l'aluminium peut se manifester sous plusieurs formes plus ou moins visibles à l'œil nu. Il n'y a pas de forme de corrosion spécifique de l'aluminium et de ses alliages. La tenue à la corrosion d'un métal ou d'un alliage dépend de nombreux facteurs inhérents au métal lui-même, au milieu dans lequel il est placé et aux conditions d'emploi. Il n'y a pas de métal ou alliage capable de résister à tous les milieux aqueux, même à la température ambiante.

## **CHAPITRE 2**

### **LUTTE CONTRE LA CORROSION PAR L'UTILISATION D'INHIBITEURS ET METHODES D'EVALUATION DU POUVOIR INHIBITEUR**

La lutte contre la corrosion englobe les méthodes suivant :

- Protection par inhibiteurs,
- Protection électrochimique.
- Protection par revêtements,
- Prévention par une forme adaptée des pièces,
- Prévention par un choix judicieux des matériaux,

En fait, la diminution de l'agressivité du milieu, par adjonction d'inhibiteurs, connaît, une large application industrielle, spécialement dans l'industrie de décapage et de détartrage, la stimulation des puits de pétrole et les circuits fermés. C'est un procédé facile à réaliser et souvent acceptable sur le plan du coût de revient. Cependant des conditions d'application abusives peuvent entraîner des conséquences dangereuses [12].

#### 2.1. Généralités sur les inhibiteurs de corrosion

##### 2.1.1. Historique

Tout comme pour bien d'autres domaines, il est difficile de déterminer l'origine exacte de l'inhibition considérée comme une technologie à part. Les Romains connaissaient déjà la corrosion. Au premier siècle après Jésus-Christ, le grand naturaliste et historien romain, Pline l'Ancien (23-79 après J.C.), mentionne des méthodes de protection pour éviter la corrosion du fer et du bronze : de l'huile ou du bitume pour le bronze, de la poix, du gypse ou de la céruse pour le fer. L'étude de la corrosion a débuté aux environs du 17<sup>e</sup> siècle, mais ce n'est qu'au cours du 19<sup>e</sup> siècle que l'on a étudié scientifiquement les moyens de lutter contre cette corrosion. En effet, il y a quelques décennies, il a été observé que le dépôt calcaire formé à l'intérieur des conduites transportant certaines eaux naturelles protégeait cette conduite ; plutôt que d'améliorer sans cesse la résistance à la corrosion des conduites en agissant directement sur ces dernières, il s'est avéré plus pratique d'ajuster les concentrations minérales des solutions transportées, qui sont à l'origine des dépôts calcaires "protecteurs". En 1945, on comptait moins de 30 papiers traitant de l'inhibition. Dans un article de 1948, Waldrip se référait à un rapport datant de 1943 au sujet de sa discussion concernant la protection contre la

corrosion des puits de pétrole [21]. 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 raffineries de pétrole, etc. Durant les cinquante dernières années, un nombre croissant de brevets, d'articles et autres ouvrages évoquant ce sujet a été recensé, témoignant d'un grand développement technologique en matière d'inhibition.

### 2.1.2. Définition

Selon NACE (National Association of Corrosion Engineers) [22], un inhibiteur de corrosion est un composé chimique qui, ajouté à faible concentration au milieu corrosif, ralentit ou stoppe le processus de corrosion d'un métal placé au contact de ce milieu.

### 2.1.3. Conditions et domaines d'utilisation

D'une manière générale, un inhibiteur de corrosion doit répondre à un certain nombre d'exigences : il doit abaisser la vitesse de corrosion du métal tout en conservant les caractéristiques physico-chimiques de ce dernier ; être stable aux températures d'utilisation ; être stable en présence des autres constituants du milieu mais également ne pas influencer sur la stabilité des espèces contenues dans ce milieu ; être efficace à faible concentration ; peu onéreux et compatible avec les normes de non-toxicité.

Leurs domaines traditionnels d'application sont :

- le traitement des eaux (eaux sanitaires, eaux de chaudières, eaux de procédés industriels) ;
- l'industrie du pétrole (forage, extraction, raffinage, stockage et transport) ;
- l'industrie des peintures sur métaux ;
- la protection temporaire des métaux durant une période où la pièce ou l'installation est particulièrement sensible à la corrosion (décapage acide, nettoyage, stockage, ...) ou encore lorsque la pièce est soumise à des usinages très sévères comme le perçage, taraudage, forage, filetage, etc

#### 2.1.4. Classes d'inhibiteurs

Les inhibiteurs de corrosion sont des composés chimiques qui, ajoutées en très faible quantité dans le milieu corrosif, diminuent la vitesse de corrosion en modifiant la nature de l'interface [23] : substrat métallique/ électrolyte. On peut classer les inhibiteurs de différentes façons :

- Par domaine d'application.
- Par réaction partielle.
- Par mécanisme réactionnel.
- Selon la nature des molécules de l'inhibiteur

##### a) Classement selon domaines d'application des inhibiteurs

Souvent on classe les inhibiteurs selon leur domaine d'application [11]. En effet, ils sont utilisés en milieu acide pour éviter principalement l'attaque chimique de l'aluminium et en milieu neutre pour protéger les circuits d'eau de refroidissement.

En milieu organique, de grandes quantités d'inhibiteurs de corrosion sont employées dans les lubrifiants pour moteurs et dans l'essence. Les inhibiteurs pour peintures, tels les pigments inorganiques ou les tannins jouent également un rôle important.

Pour les phases gazeuses, on emploie les inhibiteurs de corrosion pour une protection temporaire des différents objets emballés pendant le transport et stockage [24]. Ces composés inhibiteurs, ayant une grande pression de vapeur, s'adsorbent sur la surface métallique pour la protéger contre la corrosion atmosphérique.

##### b) Classification selon l'influence des inhibiteurs sur les réactions électrochimiques partielles

D'après leur influence sur la vitesse des réactions électrochimiques partielles, on différencie [23] trois types d'inhibiteurs:

- Les inhibiteurs anodiques.
- Les inhibiteurs cathodiques
- Les inhibiteurs mixtes.

Un inhibiteur anodique diminue la densité de courant partiel anodique et déplace le potentiel de corrosion dans le sens positif. Un inhibiteur cathodique, au contraire, diminue la densité de courant partiel cathodique et déplace le potentiel de corrosion dans le sens négatif. Un inhibiteur mixte diminue la vitesse des deux réactions partielles, mais il modifie peu le potentiel de corrosion [23]

### c) Classement selon le mécanisme d'action

Il n'existe pas de mode d'action unique des inhibiteurs de corrosion. Un même composé aura d'ailleurs souvent un mécanisme d'action qui sera fonction du système de corrosion (métal + solution) en présence duquel il se trouvera [25]. Toutefois, et quel que soit le mécanisme exact par lequel chaque inhibiteur agit dans les conditions dans lesquelles il est placé, il existe un certain nombre de considérations de base valables pour tous les inhibiteurs : la corrosion étant un processus essentiellement électrochimique[26,27], l'action de l'inhibiteur ne peut se faire qu'au niveau d'une des étapes des réactions élémentaires (transport d'espèces en solution, formation d'intermédiaires superficiels, adsorption des espèces à la surface des phases solides, transfert de charges électroniques). L'inhibiteur de corrosion forme une couche barrière sur la surface métallique (figure 2.3) qui modifie les réactions électrochimiques en bloquant soit les sites anodiques (siège de l'oxydation du métal) soit les sites cathodiques (siège de la réduction du dioxygène en milieu neutre aéré ou siège de la réduction du proton  $H^+$  en milieu acide)[28].

L'intervention de l'inhibiteur dans le processus de transport des espèces électroactives (dioxygène proton, produits de réaction) au sein de la solution étant peu probable[27], le mécanisme d'action d'un inhibiteur est donc le plus souvent à rechercher au voisinage immédiat de la surface métallique[28,29].

### d) Classement selon la nature des molécules de l'inhibiteur

#### d.1) Inhibiteurs inorganiques ou minéraux

Les molécules minérales sont utilisées le plus souvent en milieu proche de la neutralité [17], voire en milieu alcalin, et plus rarement en milieu acide. Les produits se dissocient en solution et ce sont leurs produits de dissociation qui assurent les phénomènes d'inhibition (anions ou cations). Les principaux anions inhibiteurs sont les oxo-anions de type  $XO_{4n}^-$  tels les chromates, molybdates, phosphates, silicates,... Les cations sont essentiellement  $Ca^{2+}$  et  $Zn^{2+}$  et ceux qui forment des sels insolubles avec certains anions tels que l'hydroxyle  $OH^-$ . Le nombre de molécules en usage à l'heure actuelle va en se restreignant, car la plupart des produits efficaces présentent un côté néfaste pour l'environnement.



### d.2) Inhibiteurs organiques

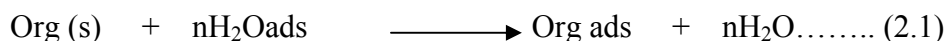
Les molécules organiques sont promises à un développement plus que certain en termes d'inhibiteur de corrosion [17], leur utilisation est actuellement préférée à celle d'inhibiteurs inorganiques pour des raisons d'écotoxicité essentiellement. Les inhibiteurs organiques sont généralement constitués de sous-produits de l'industrie pétrolière. Ils possèdent au moins un centre actif susceptible d'échanger des électrons avec le métal, tel l'azote, l'oxygène, le phosphore ou le soufre.

### 2.2. Inhibiteurs en milieu acide

Dans les milieux acides, les inhibiteurs les plus fréquemment utilisés sont des molécules de type organique. Ces inhibiteurs agissent d'abord par adsorption à la surface des métaux, avant même d'intervenir dans les processus réactionnels de corrosion pour en diminuer la vitesse.

Dans les solutions aqueuses, en raison de leur caractère, les molécules d'eau s'adsorbent à la surface du métal. Les inhibiteurs organiques doivent donc déplacer les molécules d'eau adsorbées.

L'adsorption d'une substance organique à la surface du métal peut être décrite par la réaction suivante :



Où n est le nombre de molécules d'eau déplacées à partir de la surface pour chaque molécule organique adsorbée. Le nombre n est indépendant du recouvrement et de la charge du métal, mais dépend de l'aire géométrique de la molécule organique par rapport à celle de l'eau. L'adsorption de la molécule organique se produit parce que l'énergie d'interaction entre le métal et les molécules d'eau.

### 2.3. Adsorption des inhibiteurs organiques

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. Deux types d'adsorption peuvent être distingués : la physisorption et la chimisorption. A ces deux types de liaisons entre l'espèce adsorbée et la surface métallique, il faut ajouter la formation possible de complexes organométalliques de surface.

a) L'adsorption physique ou physisorption conserve l'identité aux molécules adsorbées ; trois types de forces sont à distinguer :

- Les forces de dispersion (Van der Waals) toujours présentes, ne sont pas assez énergétiques pour assurer à l'inhibiteur une fixation suffisante à la surface du métal ;
- Les liaisons hydrogène dues aux groupements hydroxyle ou amine ;
- Les forces polaires, résultant de la présence de champ électrique (forces

Électrostatiques).

Les caractéristiques de la liaison électrostatique dépendent de la charge de la surface (qui est directement liée au potentiel de charge nulle du métal  $E_{zc}$ ) et de celle de l'inhibiteur. Ce dernier peut en effet exister sous forme moléculaire ou sous forme ionique dans le milieu corrosif. La forme ionique peut résulter de la dissociation de la molécule ou de sa protonation. L'adsorption électrostatique des molécules non dissociées dépend de leur polarisabilité (moment dipolaire), une molécule non polaire ne pouvant s'adsorber électrostatiquement. L'adsorption d'ions (en général des anions) sur une surface métallique, modifie la charge de celle-ci et peut faciliter l'adsorption d'ions inhibiteurs (en général des cations). Ce mécanisme explique certains phénomènes de synergie observés lorsque plusieurs inhibiteurs sont utilisés conjointement. En effet, les espèces adsorbées physiquement, se condensent rapidement sur le métal mais sont facilement enlevées de la surface (désorption), par exemple par élévation de la température ou par lavage énergétique de la surface.

b) La chimisorption est spécifique pour certains métaux et n'est pas tout à fait réversible. Ce type d'adsorption consiste en la mise en commun d'électrons entre la partie polaire de la molécule et la surface métallique, ce qui engendre la formation de liaisons chimiques bien plus stables car basées sur des énergies de liaison plus importantes. Les électrons proviennent en grande majorité des doublets non liants du centre actif de la molécule inhibitrice (hétéroatomes O, N, S, P). Ce centre se comportera par exemple comme un donneur d'électrons vis-à-vis d'un atome métallique de la surface. Le paramètre important est alors la densité électronique autour du centre qui peut contribuer à renforcer l'effet donneur d'électrons de ce centre actif, donc à renforcer la liaison de covalence entre l'atome donneur et l'atome métallique. Pour la même raison, on explique que les amines cycliques sont en règle générale de meilleurs inhibiteurs que les amines aliphatiques.

Les composés organiques insaturés (à double ou triple liaison) sont porteurs d'électrons capables de créer des liaisons avec les atomes métalliques. Ces liaisons se feront préférentiellement avec une surface métallique chargée positivement. La présence d'une liaison insaturée peut donc être très favorable à l'efficacité inhibitrice d'une molécule organique en milieu acide, puisque celle-ci peut alors s'adsorber indifféremment sur une surface chargée positivement (électrons  $\pi$ ) ou négativement (cation).

Les complexes de surface se forment eux à partir de composés organiques bi ou trifonctionnels (diamines, diphosphines, amino-alcools), les différents centres actifs s'adsorbant avec cyclisation de la molécule sur un ou plusieurs atomes métalliques de la surface [30,31].

### 2. 3.1. Isotherme d'adsorption

Une isotherme est une fonction qui décrit la quantité adsorbée (Q) en fonction de la concentration à température constante. L'allure des isothermes d'adsorption à une température donnée dépend des interactions adsorbant/adsorbat et en particulier de la nature de l'espèce adsorbée et de la nature de la surface du solide. Plusieurs modèles d'isothermes d'adsorption sont proposés et ils diffèrent par leurs conditions de validité.

Les isothermes d'adsorption sont très importantes dans la détermination du mécanisme des réactions organo-électrochimiques. Les plus connus sont les isothermes de: Langmuir, Frumkin, Hill de Boer, Parsons, Temkin, Flory –Huggins et Dhar –Flory Huggins et Bockris –Swinkels [32]. Toutes ces isothermes sont de la forme générale :

$$f(x, \theta) \exp(-2a\theta) = KC \dots\dots\dots (2.1)$$

Où  $f(x, \theta)$  est le facteur configurationnel qui dépend du modèle physique et des hypothèses formulées pour l'isotherme.

$\theta$ : Le taux de recouvrement

C : La concentration de l'inhibiteur dans électrolyte

x : La proportion du facteur de dimension.

K : La constante d'équilibre du processus d'adsorption.

a : Le paramètre d'interaction moléculaire

Parmi les isothermes les plus rencontrées dans l'inhibition acide par les composés organiques sont :

### 2.3.1. 1. Isotherme de Langmuir

Ce modèle néglige tout type d'interactions entre les espèces, et considère une adsorption par blocage géométrique des sites [32]. L'équation de l'isotherme est de la forme :

$$\frac{C}{\theta} = C + 1/K \dots\dots\dots (2.2)$$

Les hypothèses de ce modèle sont les suivantes [32]:

- Absence d'interaction entre les espèces adsorbées à la surface de l'électrode
- Equivalence des sites d'adsorption (surface homogène)
- Chaque site donne lieu à l'adsorption d'une molécule d'adsorbat
- Les sites d'adsorption sont en nombre bien défini par unité de surface
- Le nombre des molécules qui arrivent à la surface est égal au nombre de molécules qui quittent la surface (adsorption réversible).

### 2.3.1.2. Isotherme de Temkin

L'énergie libre d'adsorption de l'adsorbat est une fonction linéaire du taux de recouvrement  $\theta$ , les constantes chimiques de vitesse sont fonction de  $\theta$ . Il y'a attraction ou répulsion entre espèces adsorbées à la surface, l'équation de l'isotherme de Temkin est la suivante :

$$\exp(-2a\theta) = K C_i \dots\dots\dots (2.3)$$

Ou  $a$  est une constante d'interaction entre particules adsorbées,  $K$  désigne le coefficient d'adsorption et  $C_i$  la concentration de l'inhibiteur dans l'électrolyte [33].

### 2.3.1.3. Isotherme de Frumkin

L'isotherme de Frumkin est représentée après réarrangement par l'expression suivante [34]:

$$\ln \left[ \frac{\theta}{C(\theta-1)} \right] = \ln K + 2a \theta \dots\dots\dots (2.4)$$

Le paramètre  $a$  possède les dimensions suivantes : J/mol par mol/ cm<sup>3</sup>, il exprime la manière dont un recouvrement accru modifie l'énergie d'adsorption de l'espèce. Si  $a$  est positif, les interactions entre deux espèces à la surface sont attractives, si  $a$  est négatif, les

interactions sont répulsives, si  $a \rightarrow 0$ , l'isotherme de Frumkin se rapproche de l'isotherme de Langmuir.

### 2.3.2. Energie libre d'adsorption

L'énergie libre d'adsorption ( $\Delta G^\circ_{\text{ads}}$ ) peut être estimée, en connaissant la valeur de la constante d'équilibre déterminée à partir de l'équation de l'isotherme correspondant, par la formule (2.5).

$$\Delta G^\circ_{\text{ads}} = -R T \ln(K) \dots\dots\dots (2.5)$$

Les paramètres thermodynamiques  $\Delta H^\circ_{\text{ads}}$  et  $\Delta S^\circ_{\text{ads}}$  pour l'adsorption des inhibiteurs sur la surface d'acier peuvent être calculés à partir de l'équation suivante [35]:

$$\Delta G^\circ_{\text{ads}} = \Delta H^\circ_{\text{ads}} - T \Delta S^\circ_{\text{ads}} \dots\dots\dots (2.6)$$

Avec  $\Delta H^\circ$  et  $\Delta S^\circ$  sont respectivement les variations d'enthalpie et d'entropie du processus d'adsorption.

## 2.4. Méthodes d'étude des inhibiteurs de corrosion

Les méthodes d'étude des inhibiteurs de corrosion sont celles de la corrosion d'une manière générale, qu'elles soient électrochimiques ou non. Les méthodes, les plus utilisées, sont basées sur des techniques gravimétriques et électrochimiques [12].

### 2.4.1. Méthode gravimétrique

Cette méthode relativement simple d'utilisation est préférée par rapport à d'autres types d'essais qui nécessitent l'utilisation d'instruments électriques [36], mais ne permet pas l'approche des mécanismes mis en jeu lors de la corrosion.

Elle consiste à exposer des échantillons de surface 'S' à un milieu corrosif maintenu à température constante pendant un temps déterminé (t), et à mesurer la différence de masse des échantillons avant et après ( $\Delta m$ ) chaque essai. La vitesse de corrosion en  $\text{mg/cm}^2 \cdot \text{h}$  est donnée par la relation suivante :

$$V_{\text{corr}} = \Delta m / St \dots\dots\dots (2.7)$$

$$V_{\text{corr}} = (1 - \frac{m}{m_0}) / St \dots\dots\dots (2.8)$$

Avec

- $m_0$  : masse initiale
- $m$  : la masse finale
- $S$  : surface totale
- $t$  : temps d'immersion

L'efficacité inhibitrice d'un composé organique  $E(\%)$  déterminée par gravimétrie est donnée par la relation suivante :

$$E\% = \left[ 1 - \frac{V_{corr}}{V_{corr}^0} \right] \times 100 \quad (2.9)$$

Où

$V_{corr}^0$  et  $V_{corr}$  sont les vitesses de corrosion après immersion dans la solution sans et avec inhibiteur respectivement.

#### 2.4.2. Méthode électrochimiques

Les méthodes électrochimiques peuvent être classées en deux catégories :

- Méthodes stationnaires
- Méthodes non stationnaires

##### 2.4.2.1.1 Méthodes stationnaires

Les méthodes stationnaires permettent d'étudier un système se trouvant dans un état d'équilibre thermodynamique. Elles prennent en compte tous les couples rédox présents dans la solution [36]. Les plus employées pour étudier les inhibiteurs de corrosion sont :

- **Le suivi de l'évolution de potentiel libre en fonction du temps**, cette mesure apporte des informations préliminaires sur la nature des processus en cours, à l'interface métal / électrolyte : corrosion, passivation,...etc.

- **Tracé des courbes de polarisation potentiodynamique**

Les courbes courant-tension stationnaires permettent de confirmer les indications données par l'évolution du potentiel de corrosion et de les préciser en distinguant l'influence de l'inhibiteur sur chacune des réactions élémentaires (anodique et cathodique) qui se produisent à l'électrode. Ces courbes permettent également la détermination de la vitesse de corrosion.



- **Mesure de la résistance de polarisation ( $R_p$ )**

Cette méthode est rapide et particulièrement adaptée à l'étude de l'efficacité inhibitrice de molécules dont l'effet n'est pas connu (le tri des composés). Sa validité doit être vérifiée avec soin dans le cas particulier de chaque système étudié. Elle peut également permettre un suivi dans le temps du comportement de l'inhibiteur. Cependant, cette technique ne permet pas de différencier les phénomènes réactionnels mis en jeu lors de l'inhibition de la corrosion [37].

#### 2.4.2.2. Méthodes non-stationnaires ou transitoires

La méthode la plus puissante est celle de la spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) qui permet d'avoir des informations sur les étapes élémentaires qui constituent le processus électrochimique global. Elle permet également de suivre l'évolution des propriétés électrochimiques d'un échantillon conducteur revêtu ou non [37]. Comparées aux méthodes stationnaires, les mesures d'impédance apportent une analyse plus complète du mécanisme d'action de l'inhibiteur, puisqu'elles permettent de séparer les différents mécanismes intervenant lors du processus d'inhibition.

#### Conclusion

- Les inhibiteurs de corrosion constituent un moyen de lutte contre la corrosion des métaux et des alliages. Ils présentent l'originalité d'être le moyen efficace d'intervention sur le milieu corrosif. Les molécules inhibitrices peuvent agir suivant différents mécanismes, leur conférant ainsi des performances d'inhibition dépendantes du matériau et du milieu d'étude.
- Différentes techniques électrochimiques sont utilisées pour étudier l'interface électrodes /électrolyte dans le cadre de l'inhibition de la corrosion humide. Ces techniques permettent d'appréhender l'étude selon deux points de vue. D'un point de vue phénoménologique d'abord, la caractérisation de l'adsorption est possible par suivi dans le temps du potentiel libre de corrosion caractéristique de la modification de l'interface.

L'aspect plus quantitatif (courbes de polarisation, spectroscopie d'impédance) permet, quant à lui, d'accéder à des vitesses de corrosion et à des valeurs de paramètres physiques décrivant l'état du système.

### CHAPITRE 3

## ETUDE DE L'INHIBITION DE LA CORROSION D'ALLIAGE D'ALUMINIUM PAR UN TENSIOACTIF SYNTHETISE DANS HI 1M

Ce chapitre est consacré à la présentation du matériel et la technique employée au cours de cette étude pour savoir le pouvoir inhibiteur de la corrosion de l'alliage de l'aluminium 6082 en milieu acide (HCl 1M) en absence et en présence de notre sel d'ammonium quaternaire (TCKE) de la famille des tensioactifs cationiques préparé à partir de la coupe pétrolière kérosène (KE) d'une part, et à l'exposition des résultats expérimentaux obtenus par gravimétrie, d'autres part.

### 3.1. Composition de l'alliage d'aluminium utilisé

Le matériau étudié est un alliage d'aluminium de désignation 6082, sa composition chimique, en pourcentage massique, est donnée dans le Tableau 3.1.

**Tableau 3.1.** Composition chimique de l'alliage en pourcentage massique.

Elément	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	V
% massique	99,4126	0,094	0,4	0,0091	0,01	0,022	0,0021	0,0033	0,015	0,025	0,0069

### 3.2. Electrolyte (milieu corrosif)

La mesure de l'efficacité de l'inhibiteur par gravimétrie a été effectuée dans une solution de HCl 1 M.

### 3.3. Mode opératoire des tests gravimétriques

Les mesures de perte de masse sont une première approche de l'étude de l'inhibition de la corrosion d'un métal dans une solution électrolytique. Cette méthode ne nécessite pas un appareillage important. Son principe consiste à mesurer la masse ainsi que les dimensions du substrat métallique avant et après immersion dans le milieu agressif en présence et en absence de l'inhibiteur. Les dimensions des échantillons d'alliage utilisés sont mesurées à l'aide d'un pied à coulisse digital. Les éprouvettes sont des parallélépipèdes comme il est schématisé sur la figure 3.1.



**Figure 3.1.** Schéma de l'éprouvette utilisée

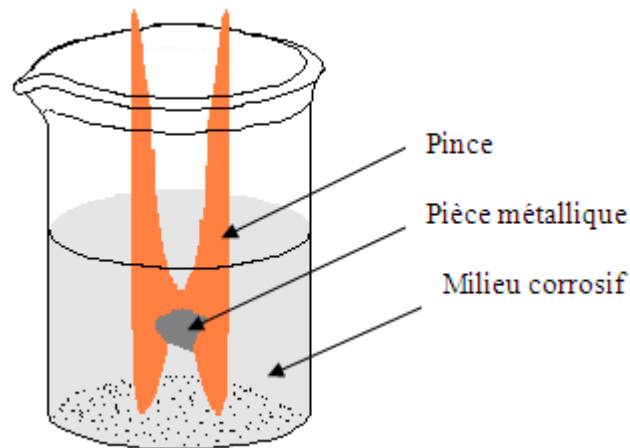
Les éprouvettes sont soumises à un polissage mécanique, à l'aide d'une polisseuse sous jet d'eau, en utilisant du papier abrasif de granulométrie décroissante (280, 400, 600 et 1200 mesh).

Le polissage de l'électrode est une étape fondamentale dont le but est d'obtenir une surface plane et polie permettant des résultats reproductibles. Ce polissage est ensuite suivi d'un lavage à l'eau distillée et d'un séchage ; l'électrode doit présenter presque l'aspect d'un miroir selon la **(Photo 3.1)**.



**Photo 3.1.** Aspect miroir de l'échantillon

Les essais sont réalisés dans des béchers de 80 ml, dans chacun on introduit une pince en plastique pour fixer l'éprouvette de telle façon que le maximum de la surface de l'éprouvette soit en contact avec la solution (voir la figure 3.2).



**Figure 3.2.** Position de la pièce métallique dans le milieu corrosif

La valeur de l'efficacité inhibitrice donnée est la moyenne de trois essais effectués dans les mêmes conditions.

Le montage expérimental utilisé pour réaliser ces tests est représenté sur la photo 2



**Photo 2.** Montage expérimental de gravimétrie.

### 3.4. Résultats et Discussions

La vitesse moyenne de corrosion ( $V_{\text{corr}}$ ) de notre alliage en absence et en présence de différentes concentrations en inhibiteurs est évaluée à partir de la détermination de perte de masse par  $\text{cm}^2$  et par heure selon la formule (2.8).

L'efficacité inhibitrice  $E(\%)$  de notre produit est calculée en utilisant l'expression (2.9)

### 3.4.1. Evolution de la vitesse de corrosion en fonction du temps d'immersion

Le tableau 3.2 regroupe les valeurs de vitesse de corrosion en fonction du temps d'immersion. L'analyse de ce tableau montre que les vitesses de corrosion dans l'intervalle de temps [2-6h] sont proches, pour cela on a choisi une durée d'immersion de 2h dont la vitesse de corrosion est de 1,66 mg/cm<sup>2</sup>h pour la suite de notre étude.

**Tableau 3.2.** Vitesse de corrosion de l'alliage 6082 dans HCl 1M, à 25°C.

Temps d'immersion (h)	N° d'essai	m <sub>0</sub> (g)	m corr(g)	S (cm <sup>2</sup> )	Δm (mg)	V <sub>corr</sub> (mg/cm <sup>2</sup> h)	V <sub>corr moy</sub> (mg/cm <sup>2</sup> h)
1	1	4,1757	4,1672	8,22	8,5	1,03	1,35
	2	5,1701	5,1611	8,61	9	1,04	
	3	5,4764	5,4660	9,58	10,4	1,08	
2	1	6,2998	6,2626	11,34	37,2	1,64	1,66
	2	4,0790	4,0525	7,966	26,5	1,66	
	3	4,8035	4,7754	8,46	28,1	1,66	
3	1	2,3112	2,2840	5,46	27,2	1,65	1,67
	2	7,9932	7,9280	13	65,2	1,67	
	3	7,9125	7,8441	13,5	68,4	1,68	
4	1	4,6510	4,5871	9,3	63,9	1,71	1,73
	2	5,0405	4,9797	8,6522	60,8	1,75	
	3	5,8998	5,8366	8,9	63,2	1,77	
5	1	5,0139	5,9334	9,522	80,5	1,75	1,75
	2	4,8196	4,7366	9,2	83	1,74	
	3	5,7053	5,6233	9,42	82	1,76	
6	1	4,8196	4,7199	9,5	99,7	1,74	1,66
	2	4,4876	4,3723	11,6	115,3	1,65	
	3	5,4414	5,3491	9,2	92,3	1,67	
24	1	4,5077	4,2923	7,98	217,2	1,12	1,11
	2	6,0820	5,7900	10,47	292	1,15	
	3	4,2372	4,0190	8,25	218,2	1,10	
48	1	4,8839	4,6037	9,06	280,2	0,64	0,64
	2	8,8113	8,4089	13,97	402,4	0,60	
	3	8,4313	8,0145	13,36	416,8	0,64	

### 3.4.2. Influence de la concentration de l'inhibiteur sur la vitesse de corrosion et l'efficacité

Le Tableau 3.3, regroupe les valeurs de vitesse de corrosion (V<sub>corr</sub>) de notre matériau, et l'efficacité inhibitrice E (%) déterminées par gravimétrie pour une durée d'immersion de 2 heures, en absence et en présence de notre produit élaboré TCKE à différentes concentrations, à 25°C.

**Tableau 3.3.** Vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de corrosion de l'alliage d'aluminium dans HCl 1M, sans et avec différentes concentrations de TCCE à 25°C.

Concentration (mg/L)	N° d'essai	m <sub>0</sub> (g)	m(g)	S (cm <sup>2</sup> )	Δm (mg)	V <sub>corr</sub> (mg/cm <sup>2</sup> h)	V <sub>corr</sub> (mg/cm <sup>2</sup> h)	E (%)
0	1	6,2998	6,2626	11,34	37,2	1,64	1,66	/
	2	4,0790	4,0525	7,966	26,5	1,66		
	3	4,8035	4,7754	8,46	28,1	1,66		
1,92	1	7,3660	7,3390	14,5	27	0,93	0,91	45,18
	2	5,9738	5,9501	10,5	23,7	1,12		
	3	9,3489	9,3226	14,76	26,3	0,89		
3,84	1	4,8335	4,8231	8,82	10,3	0,58	0,60	63,85
	2	7,5776	7,5620	12,75	15,6	0,61		
	3	5,0153	5,0048	8,71	10,5	0,60		
5,76	1	4,6299	4,6202	8,46	9,7	0,57	0,59	64,45
	2	7,2600	7,2445	12,74	15,5	0,60		
	3	7,3256	7,3103	12,54	15,3	0,61		
7,68	1	4,1139	4,1082	7,98	5,7	0,35	0,36	78,31
	2	5,7022	5,6947	9,88	7,5	0,37		
	3	4,9726	4,9659	8,94	6,7	0,37		
9,60	1	6,8026	6,7958	11,68	6,8	0,29	0,30	81,92
	2	6,3245	6,3174	11,39	7,1	0,31		
	3	4,1235	4,1185	8,4	5	0,32		
11,52	1	4,0826	4,0781	11,73	4,5	0,27	0,27	83,73
	2	4,3126	4,3079	8,24	4,7	0,28		
	3	7,2241	7,2188	12,56	7	0,27		
13,44	1	7,9595	7,9538	12,45	5,7	0,23	0,25	84,93
	2	5,9524	5,9479	10,70	5,1	0,24		
	3	4,4342	4,4297	8,36	4,5	0,27		
15,36	1	6,6458	6,6398	11,29	6	0,26	0,25	84,93
	2	4,1603	4,1560	8,20	4,3	0,26		
	3	5,3319	5,3277	9,45	4,9	0,25		
17,28	1	6,9423	6,9376	11,56	4,7	0,22	0,23	86,14
	2	5,2280	5,2235	9,29	4,5	0,24		
	3	6,5270	6,5216	10,84	5,4	0,23		
19,20	1	3,8570	3,8532	7,70	3,8	0,24	0,23	86,14
	2	7,0350	7,0295	11,55	5,5	0,23		
	3	4,6294	4,6250	8,92	4,4	0,24		
21,12	1	6,7834	6,7800	6,75	3,4	0,21	0,23	86,14
	2	4,2095	4,2068	7,88	2,7	0,24		
	3	5,2534	5,2493	9,13	4,1	0,22		
23,04	1	6,4710	6,4650	12	6	0,25	0,23	86,14
	2	6,5033	6,4969	12,86	6,4	0,24		
	3	7,4643	7,4584	13,72	6,9	0,21		

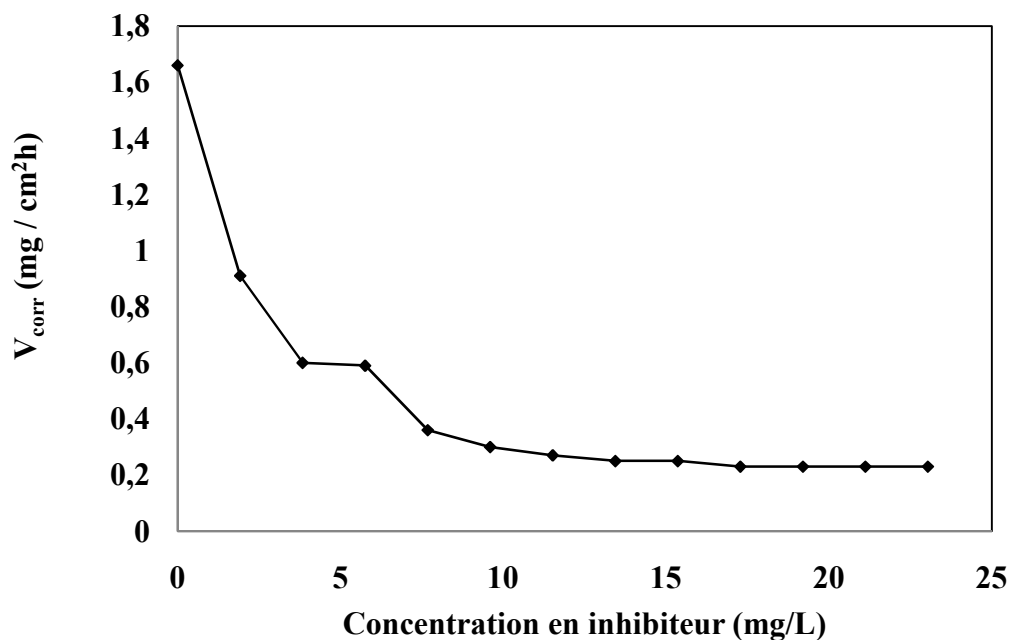
L'analyse des résultats nous montre clairement que ce composé possède des propriétés inhibitrices de la corrosion remarquables dans le milieu considéré.

La variation de l'efficacité inhibitrice de notre substance tensioactives ainsi que la vitesse de corrosion de l'alliage choisi, sont reportées sur les Figures 3.3 et 3.4.

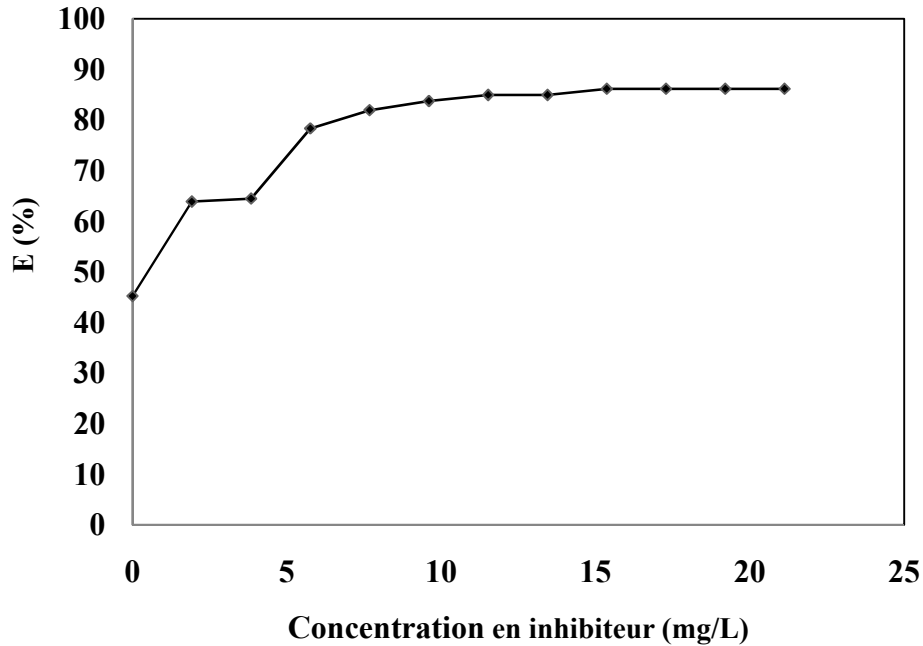
Nous remarquons, que la vitesse de corrosion diminue tandis que l'efficacité de la protection croît avec la concentration en inhibiteur, Ce comportement est interprété par l'adsorption de l'inhibiteur sur la surface de l'aluminium en augmentant ainsi le taux de recouvrement [38].

Ces figures montrent également qu'il existe une concentration critique pour laquelle l'efficacité de l'inhibiteur atteint une valeur maximale. En effet, pour une quantité de 17.28mg/L, TCKE présente une efficacité d'environ 86 %.

D'après I.B. Obot et al [39], Les inhibiteurs organiques protègent généralement le métal contre la corrosion en formant un film sur la surface métallique. Leur efficacité comme rapportée par plusieurs auteurs est liée à la composition chimique, à la structure moléculaire spatiale, à la structure électronique moléculaire, à la densité de charge extérieure, et à leur affinité pour la surface en métal. En outre, l'interaction entre la surface en métal et les groupements fonctionnels contenant de l'oxygène, d'azote, de soufre et de phosphore jouent un rôle important dans l'inhibition due aux paires libres d'électron qu'ils possèdent.



**Figure 3.3.** Variation de la vitesse de corrosion en fonction des quantités en inhibiteur injectées.



**Figure 3.4.** Evolution de l'efficacité inhibitrice en fonction des différentes quantités du TCKE dans HCl 1M à 25°C.

### 3.4.3. Influence de la température sur l'efficacité inhibitrice de TCKE

En général, la température a un effet important sur les phénomènes de corrosion : la vitesse de corrosion augmente lorsque la température d'essai augmente, et cette augmentation de température induit, de fait, des changements sur l'action des inhibiteurs. L'influence de la température sur l'efficacité des inhibiteurs organiques, notamment en milieu acide a fait l'objet de plusieurs recherches.

Pour déterminer l'effet de ce facteur sur le pouvoir inhibiteur de produit synthétisé à sa concentration optimale (17,28 mg/L), nous avons effectué une étude dans l'intervalle de température 25-65°C.

Dans le tableau 3.4, les valeurs de la vitesse de corrosion et l'efficacité en inhibition sont mentionnées.

La lecture de tableau 3.4 indique que  $V_{\text{corr}}$  dans HCl 1M augmente avec l'accroissement de la température. Dans le même milieu, en présence de TCKE,  $V_{\text{corr}}$  croît également avec la température, mais prend des valeurs inférieures à celles de  $V_{\text{corr}}$  dans HCl 1 M seul. La croissance

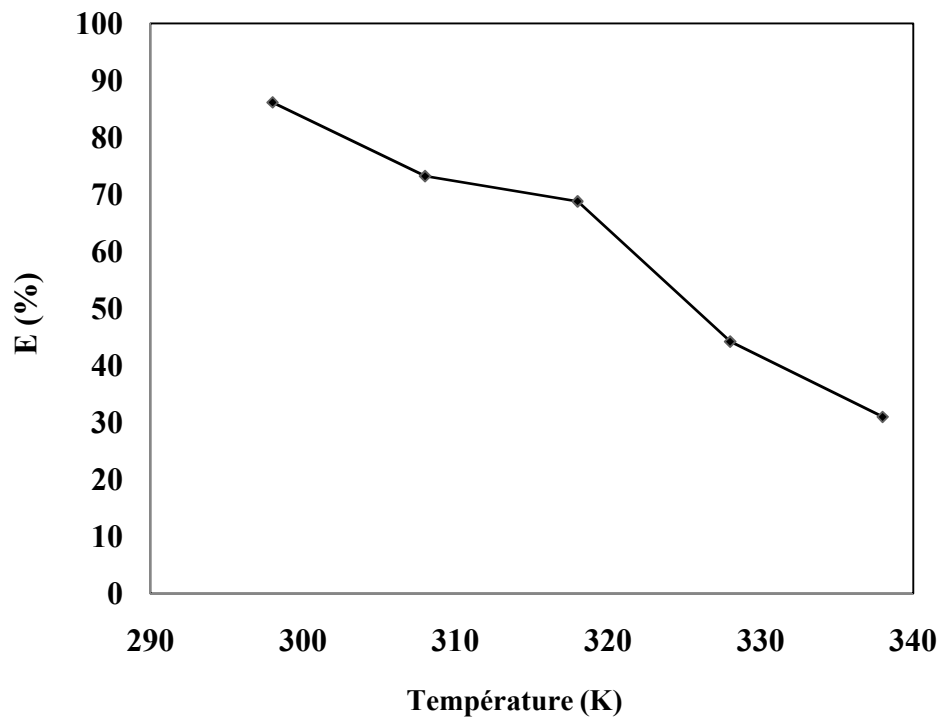


rapide de la vitesse de corrosion dans la solution corrosive seule (HCl 1M), en fonction de la température confirme une dissolution métallique croissante, provoquant ainsi une diminution de la résistance à la corrosion de l'aluminium [40,41].

La figure 3.5 illustre l'évolution de l'efficacité d'inhibition de notre produit en fonction de la température après 2h d'immersion. On remarque sur cette figure que l'efficacité inhibitrice diminue également dans le domaine de température étudié.

**Tableau 3.4.** Evolution de la vitesse de corrosion et l'efficacité d'inhibition en présence et en absence de TCKE en fonction de la température.

T (°C)	Concentration (mg/L)	N° d'essai	m <sub>0</sub> (g)	m(g)	S (cm <sup>2</sup> )	Δm (mg)	V <sub>corr</sub> (mg/cm <sup>2</sup> h)	V <sub>corr moy</sub> (mg/cm <sup>2</sup> h)	E (%)
25°C	0	1	6,2998	6,2626	11,34	37,2	1,64	1,66	/
		2	4,0790	4,0525	7,966	26,5	1,66		
		3	4,8035	4,7754	8,46	28,1	1,66		
	17,28	1	6,9423	6,9376	11,56	4,7	0,22	0,23	86,14
		2	5,2280	5,2235	9,297	4,5	0,24		
		3	6,5270	6,5216	10,836	5,4	0,23		
35°C	0	1	5,2386	5,1656	9,66	73	3,77	3,77	/
		2	5,1703	5,0996	9,37	70,7	3,76		
		3	3,7161	3,6558	7,58	60,3	3,78		
	17,28	1	8,1649	8,1246	13,92	40,3	1,44	1,01	73,20
		2	9,3666	9,3343	14,02	32,3	1,02		
		3	5,4662	5,4395	12	24,1	1,00		
45°C	0	1	5,5465	5,4200	6,66	126,5	9,49	9,74	/
		2	6,4806	6,2621	11,24	218,5	9,72		
		3	3,6545	3,5333	6,20	121,2	9,76		
	17,28	1	5,5902	5,5293	10,09	60,9	3,01	3,04	68,78
		2	5,8128	5,7412	11,06	71,6	3,08		
		3	4,3992	5,3370	10,20	62,2	3,05		
55°C	0	1	3,3886	3,1284	7,194	260,2	18,08	18,06	/
		2	4,3443	4,0158	8,955	328,5	18,34		
		3	4,9872	4,7147	7,150	272,5	19,05		
	17,28	1	5,7098	5,5302	8,9	179,6	10,08	10,08	44,18
		2	6,7909	6,5415	12,32	249,4	10,12		
		3	5,6884	5,4877	9,94	200,7	10,08		
65°C	0	1	2,5371	2,1583	5,82	378,8	32,54	32,56	/
		2	2,7849	2,3387	5,68	446,2	32,57		
		3	2,0444	1,7260	4,88	318,4	32,58		
	17,28	1	5,0973	4,6965	8,80	400,8	22,77	22,76	30,98
		2	3,6636	3,3560	6,76	307,6	22,75		
		3	5,1324	4,7634	9,41	369	19,60		



**Figure 3.5.** Evolution de l'efficacité inhibitrice en fonction de la température en présence de concentration optimale d'inhibiteur après 2h d'immersion.

#### 3.4.4. Influence de l'acidité sur la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice de TCKE

Dans cette partie nous avons étudié l'influence de la concentration de l'acide chlorhydrique sur la corrosion du métal sans et avec le produit élaboré. Les concentrations de HCl testées sont : 0,5, 1,5, 2, 2,5 et 3M.

Les valeurs de vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice à différentes concentration en acide, après 2h d'immersion, à 25°C sont rassemblées dans le tableau 3.5.

Selon les résultats obtenus, on peut observer que la vitesse de corrosion de notre alliage augmente lorsque la concentration en acide augmente. En fait, la susceptibilité du matériau à la corrosion est fonction du nombre de protons de l'électrolyte. Une forte concentration en protons dans la solution, augmente l'agressivité du milieu.

**Tableau 3.5.** Valeurs de la vitesse de corrosion et l'efficacité d'inhibition en fonction de la concentration en acide.

Concentration en acide (M)	concentration en inhibiteur (mg/L)	N° d'essai	m <sub>0</sub> (g)	m(g)	S (cm <sup>2</sup> )	Δm (mg)	V <sub>corr</sub> (mg /cm <sup>2</sup> h)	V <sub>corr</sub> mg <sub>2</sub> (mg/cm <sup>2</sup> h)	E (%)
0,5	0	1	4,0021	3,9996	7,47	2,5	0,16	0,16	/
		2	4,7075	4,7048	8,13	2,7	0,16		
		3	6,3309	6,3282	7,79	2,7	0,17		
	17,28	1	8,1459	8,1442	13,86	1,7	0,06	0,02	87,50
		2	5,5519	5,5515	9,61	0,4	0,02		
		3	4,7111	4,7107	8,23	0,4	0,02		
1	0	1	6,2998	6,2626	11,34	37,2	1,64	1,66	/
		2	4,0790	4,0525	7,966	26,5	1,66		
		3	4,8035	4,7754	8,46	28,1	1,66		
	17,28	1	6,9423	6,9376	11,56	4,7	0,22	0,23	86,14
		2	5,2280	5,2235	9,297	4,5	0,24		
		3	6,5270	6,5216	10,836	5,4	0,23		
1,5	0	1	5,2508	4,8947	9,51	356,1	18,72	18,84	/
		2	5,2656	4,9263	8,94	339,3	18,96		
		3	6,1259	5,6980	11,35	427,9	18,85		
	17,28	1	5,4704	5,3643	10,22	106,7	5,22	4,95	73,72
		2	5,7910	5,6899	10,21	101,1	4,95		
		3	6,7358	6,6161	12,10	119,7	4,94		
2	0	1	5,6128	4,9652	9,42	647,6	34,36	34,51	/
		2	7,0422	6,2830	10,95	759,2	34,66		
		3	7,7100	6,9256	11,58	784,4	33,86		
	17,28	1	5,7756	5,3723	9,20	404,3	21,91	22,71	36,29
		2	5,8441	5,3927	10,00	451,4	22,55		
		3	5,8082	5,3558	9,89	452,4	22,87		
2,5	0	1	5,3699	4,4248	9,05	945,1	52,20	51,17	/
		2	5,7381	4,7636	9,49	974,5	51,33		
		3	5,4987	4,5576	9,23	941,1	51,00		
	17,28	1	6,0793	5,3438	9,80	735,5	37,52	37,50	26,71
		2	6,2137	5,4235	10,56	790,2	37,41		
		3	6,9305	6,1256	10,6	794,9	37,49		
3	0	1	6,6496	5,5062	10,82	1143,4	52,83	52,92	/
		2	7,1537	5,9247	11,39	1129	52,95		
		3	5,6966	4,6815	9,58	1015,1	52,98		
	17,28	1	6,5264	5,6590	11,75	867,4	38,80	39,00	26,30
		2	4,9987	4,3322	8,50	666,5	39,20		
		3	3,4563	2,7405	6,64	715,8	52,70		

### 3.4.5. Evolution de la vitesse de corrosion et l'efficacité d'inhibition de TCKE en fonction du temps d'immersion

Le Tableau 3.6. regroupe les valeurs de vitesse de corrosion ( $V_{corr}$ ) de notre matériau, et l'efficacité inhibitrice pour différents temps d'immersion 2, 4, 6, 24 et 48h en présence de notre produit préparé à sa concentrations optimale, en milieu HCl 1M.

**Tableau 3.6.** Vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice à différents temps d'immersion.

t (h)	concentration (mg/L)	N° d'essai	$m_0$ (g)	m(g)	S (cm <sup>2</sup> )	$\Delta m$ (mg)	$V_{corr}$ (mg/cm <sup>2</sup> h)	$V_{corr\ moy}$ (mg/cm <sup>2</sup> h)	E (%)
2	17,28	1	6,9423	6,9376	11,56	4,7	0,22	0,23	86,14
		2	5,2280	5,2235	9,29	4,5	0,24		
		3	6,5270	6,5216	10,84	5,4	0,23		
4	17,28	1	4,1974	4,1875	7,4	9,9	0,33	0,33	80,92
		2	4,0653	4,0534	9,09	11,9	0,32		
		3	5,7871	5,7737	9,10	13,34	0,36		
6	17,28	1	3,1965	3,1910	8,4	5,5	0,10	0,11	93,37
		2	4,0014	3,9954	8,25	6	0,12		
		3	4,8466	4,8398	10,19	6,8	0,11		
24	17,28	1	3,9405	3,9161	7,55	24,4	0,13	0,13	88,28
		2	4,5074	4,4782	9,07	29,2	0,13		
		3	1,8728	1,8452	8,54	27,6	0,13		
48	17,28	1	4,8935	4,6638	9,16	229,7	0,52	0,45	30,46
		2	6,1093	5,8872	10	222,1	0,46		
		3	5,4999	5,2738	10,33	226,1	0,45		

L'analyse des résultats de tableau 3.6, montre clairement que notre substance tensioactive synthétisée se montre plus efficace pour un temps d'immersion de 6h. Cela peut expliquer la dépendance de l'activité inhibitrice de notre produit au temps d'immersion.

### 3.4.6. Effet d'un additif sur la vitesse de corrosion et l'efficacité d'inhibition de TCKE

L'emploi des sels d'ammonium quaternaire comme inhibiteurs de corrosion a été largement étudiée. Ils peuvent être employés seuls, ou souvent combinés avec d'autres composés, dans cette partie nous sommes intéressés d'examiner l'effet d'un additif organique ; il s'agit de TAPF sur le pouvoir inhibiteur de TCKE de la corrosion en HCl 1M de notre alliage d'aluminium. TAPF est un tensioactif anionique (sulfonate) synthétisé à base d'un produit pétrolier à savoir le platformat (PF).

Le Tableau 3.7. regroupe les valeurs de vitesse de corrosion ( $V_{\text{corr}}$ ) de notre matériau, et l'efficacité inhibitrice des sulfonates (TAPF) à différentes concentrations dans un premier lieu et en présence de la concentration optimale en TCKE dans un deuxième lieu, pour 2h d'immersion, à 25°C.

**Tableau 3.7.** Valeurs de vitesse de corrosion de l'alliage et l'efficacité inhibitrice de TAPF sans et avec TCKE, à 25°C.

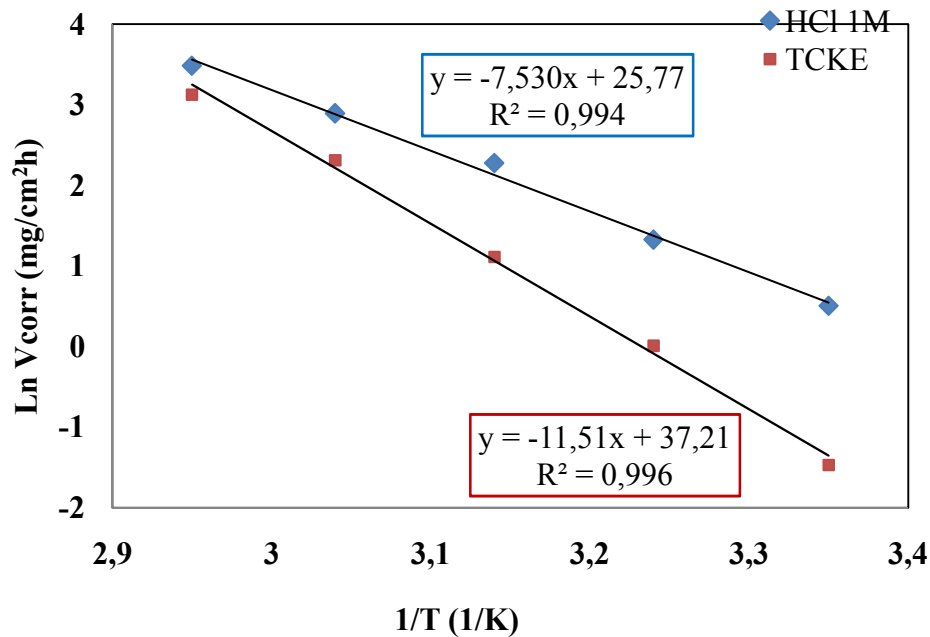
C (TAPF) (mg/L)	C (TCKE) (mg/L)	N° d'essai	m <sub>0</sub> (g)	m(g)	S (cm <sup>2</sup> )	Δm (mg)	V <sub>corr</sub> (mg/cm <sup>2</sup> h)	V <sub>corr moy</sub> (mg/cm <sup>2</sup> h)	E (%)
1,36	0	1	10,8975	10,8736	16,8	28	0,83	0,83	50
		2	5,1657	5,1470	9,58	17,8	0,86		
		3	6,0060	5,9884	10,6	17,6	0,83		
2,72	0	1	5,7355	5,7180	12,2	17,5	0,71	0,69	58,43
		2	7,4251	7,4041	13,02	18	0,69		
		3	11,938	11,9019	15	20,9	0,69		
4,08	0	1	3,5729	3,5633	7,81	9,6	0,61	0,61	63,25
		2	5,5787	5,5655	10,68	13,2	0,61		
		3	6,5784	6,5650	10,85	13,4	0,62		
5,44	0	1	5,5333	5,5222	9,96	11,1	0,55	0,56	66,26
		2	4,3943	4,3856	7,9	8,7	0,56		
		3	4,8674	4,8582	8,1	9,2	0,56		
6,80	0	1	11,6231	11,6039	17,2	19,2	0,55	0,55	66,86
		2	5,5489	5,5354	13,05	15,6	0,55		
		3	6,0263	6,0060	18,8	20,4	0,54		
8,16	0	1	9,7924	9,7752	15,74	17,2	0,54	0,54	67,46
		2	10,4639	10,4379	17	26	0,76		
		3	5,1527	5,1419	9,9	10,8	0,54		
9,52	0	1	2,8671	2,8591	8,5	8	0,46	0,465	71,98
		2	3,1366	3,1299	7	6,7	0,46		
		3	3,1284	3,1176	6,9	6,45	0,47		
10,88	0	1	4,5186	4,5078	9,8	10,8	0,58	0,45	72,89
		2	4,6037	4,5953	9,2	8,4	0,45		
		3	5,6377	5,6286	10	9,1	0,45		
12,24	0	1	9,4194	9,4102	10,95	9,2	0,42	0,43	74,09
		2	4,7285	4,7233	12	5,2	0,43		
		3	8,7607	8,7515	10,16	9,2	0,45		
13,60	0	1	9,1907	9,1812	11,3	9,5	0,42	0,425	74,39
		2	6,6582	6,6478	9,04	10,4	0,57		
		3	5,2010	5,1944	7,67	6,6	0,43		
14,96	0	1	2,3622	2,3576	5,4	4,6	0,42	0,425	74,39
		2	2,6464	2,6425	4,19	3,9	0,46		
		3	5,0847	5,0772	8,7	7,6	0,43		
16,32	0	1	2,6798	2,6750	5,08	4,8	0,47	0,425	74,39
		2	5,4312	5,4232	9,5	8	0,42		
		3	5,1853	5,1790	7,25	6,3	0,43		
13,60	17,28	1	6,9339	6,9311	11,88	2,8	0,11	0,11	93,37
		2	5,7981	5,7957	11,77	2,4	0,10		
		3	3,7417	3,7392	10,30	2,5	0,12		

L'analyse de tableau 3.8 montre qu'en présence de l'additif TAPF, l'efficacité inhibitrice de TCKE est améliorée peut être par l'effet synergétique.

### 3.4.7. Détermination de l'énergie d'activation

L'utilisation de l'équation (1.5) d'Arrhenius, nous permet de déterminer l'énergie d'activation. On a tracé la variation du logarithme de la vitesse de corrosion en fonction de l'inverse de la température absolue, en absence et en présence de concentration optimale de TCKE (voir la figure 3.6). Cette figure montre que la variation de  $\text{Log}(V_{\text{corr}})=f(T)$  est linéaire et suit la loi d'Arrhenius aussi bien en absence et en présence de TCKE.

Les valeurs de l'énergie d'activation ( $E_a$ ), sans et avec addition de l'inhibiteur, sont données dans le tableau 3.8. L'inspection de ce tableau, montre que l'énergie d'activation en présence d'inhibiteur est supérieure à celle correspondante à HCl 1M seul. En effet, l'augmentation de la valeur d' $E_a$  en présence d'inhibiteur, traduit l'adsorption de notre inhibiteur par des liaisons de nature électrostatique (liaisons faibles). Ce type de liaisons sensibles à la température ne permet pas de lutter efficacement contre la corrosion quand la température augmente.



**Figure 3.6.** Variation de  $\text{Ln}(V_{\text{corr}})$  en fonction de l'inverse de la température.

**Tableau 3.8.** Energies d'activation de dissolution de l'alliage d'aluminium dans HCl 1M, sans et avec TCKE.

Milieu	$E_a$ (kJ.mol <sup>-1</sup> )
HCl 1M seul	62,60
HCl 1M +TCKE	95,69

### 3.4.8. Isothermes d'adsorption

Les inhibiteurs organiques agissent par adsorption sur la surface du métal. La connaissance du type d'adsorption et la détermination des grandeurs thermodynamiques caractérisant cette adsorption aident souvent à élucider le mode d'action de ces inhibiteurs. Pour cela, la valeur du taux de recouvrement de la surface du métal par l'inhibiteur adsorbé ( $\Theta$ ) est définie par la relation suivante [42]:

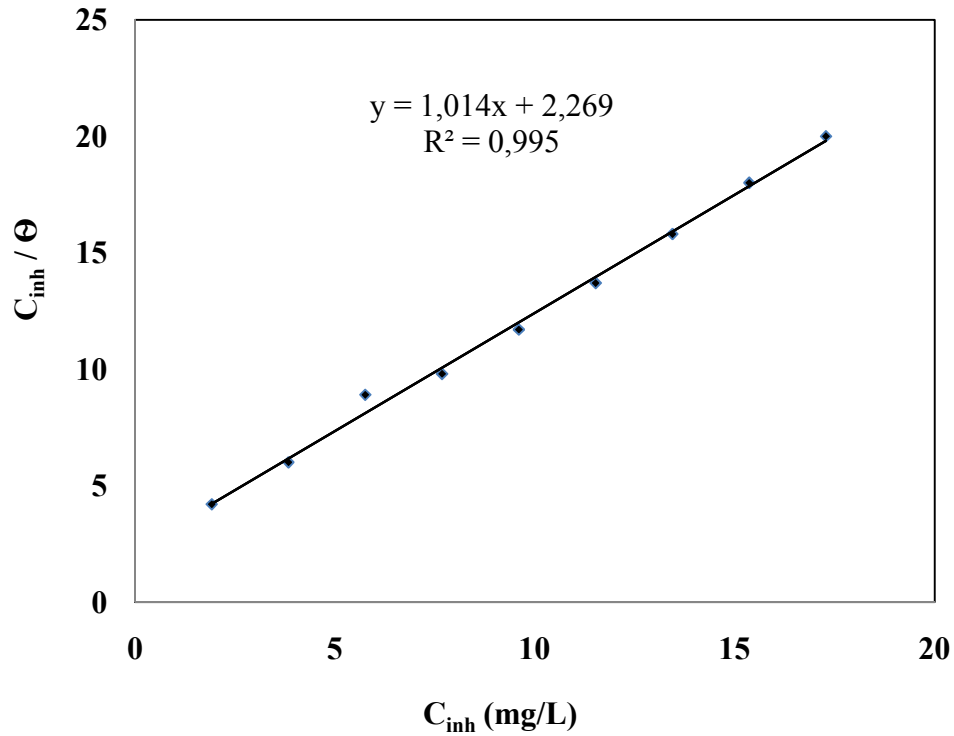
$$\Theta = \frac{E(\%)}{100} \quad (3.1)$$

$\Theta$  est utilisé pour déterminer l'isotherme correspondante au processus d'adsorption de notre produit synthétisé.

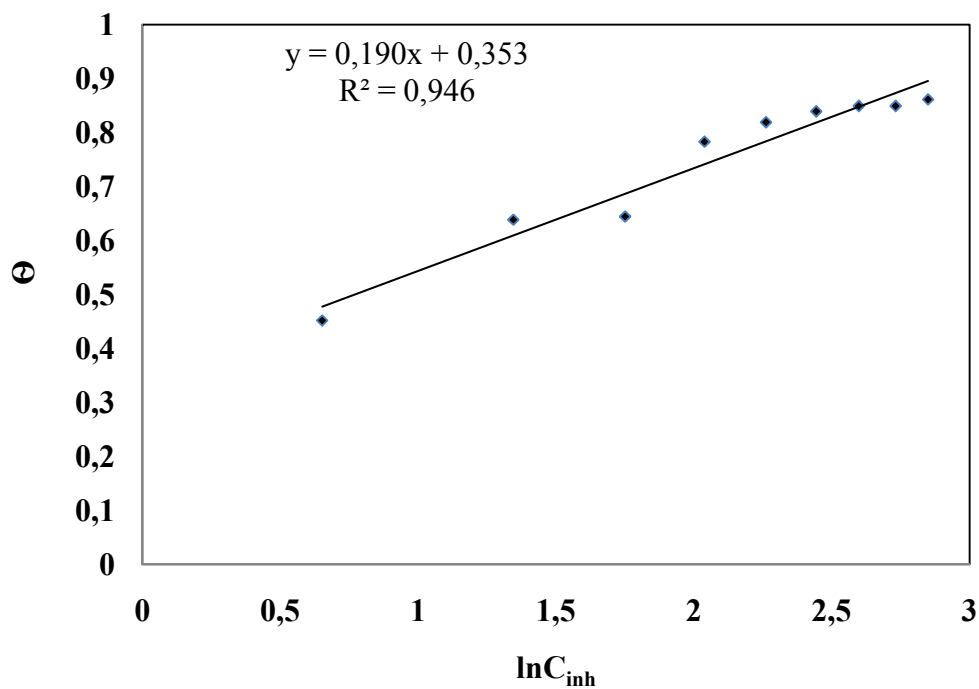
Différentes isothermes Langmuir, Temkin et Frumkin, ont été testées afin de trouver l'isotherme d'adsorption convenable (Expressions données en chapitre 2).

Les tracés de différentes isothermes d'adsorption de TCKE sur le substrat de notre alliage d'aluminium en HCl 1M après 2h d'immersion, à 25°C, sont enregistrés sur les figures 3.7-3.9. L'analyse de ces figures indique clairement que l'adsorption de TCKE sur la surface d'alliage d'aluminium en milieu chlorhydrique après 2h d'immersion, à 25°C obéit à l'isotherme d'adsorption de Langmuir, du fait que le coefficient de corrélation  $R^2$  est très proche à l'unité.

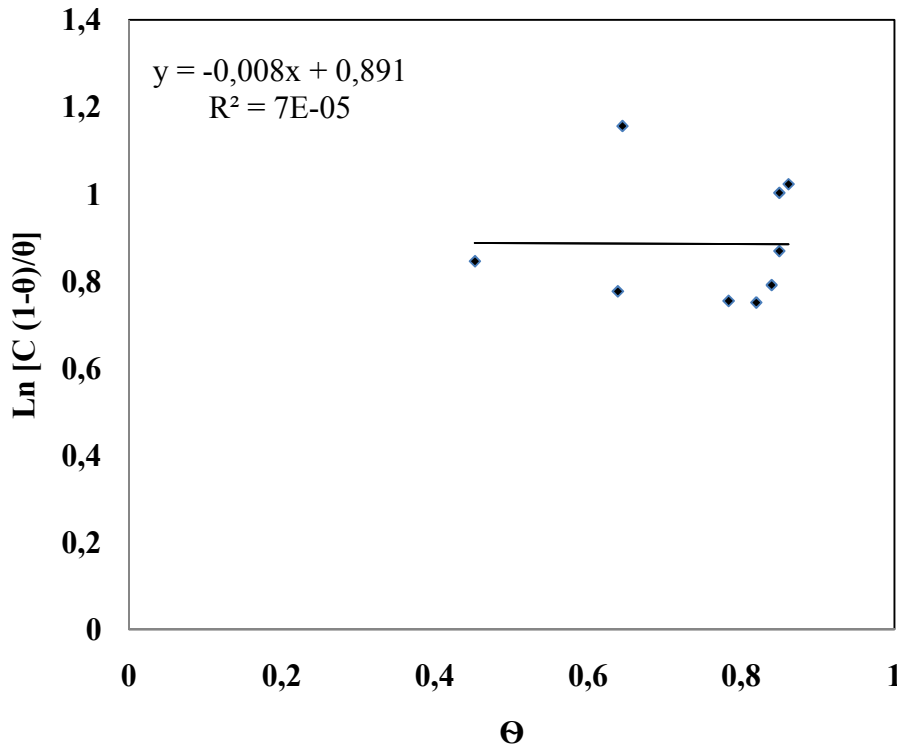




**Figure 3.7.** Isotherme d'adsorption de Langmuir de TCKE sur l'aluminium dans HCl 1M à 25°C, après 2h d'immersion.



**Figure 3.8.** Isotherme d'adsorption de Temkin de TCKE sur l'aluminium dans HCl 1M à 25°C, après 2h d'immersion.



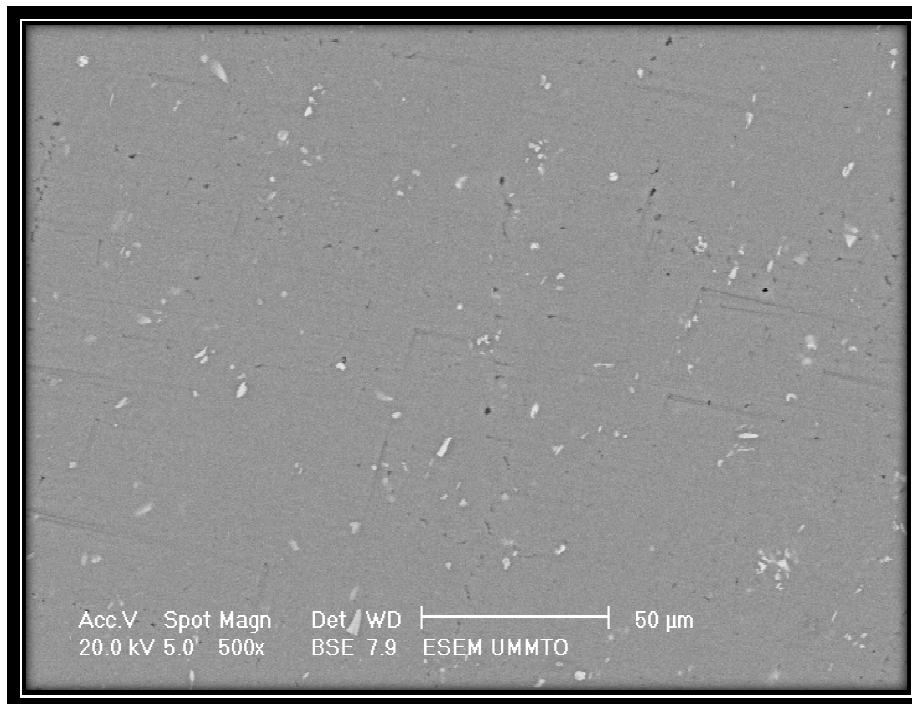
**Figure 3.9.** Isotherme d'adsorption de Fumkin de TCKE sur l'aluminium dans HCl 1M à 25°C, après 2h d'immersion.

A partir de la formule de l'isotherme d'adsorption de Langmuir donnée par :  $(\frac{C}{\theta} = C + 1/K)$ , on peut déterminer l'énergie libre standard d'adsorption ( $\Delta G^{\circ}_{ads}$ ) par l'équation (2.5). la valeur de  $\Delta G^{\circ}_{ads}$  trouvée est de -7916,83 Joul/mol avec K (0,44). La valeur négative de  $\Delta G^{\circ}_{ads}$  indique la spontanéité de processus d'adsorption et la stabilité de la couche adsorbée sur la surface métallique.

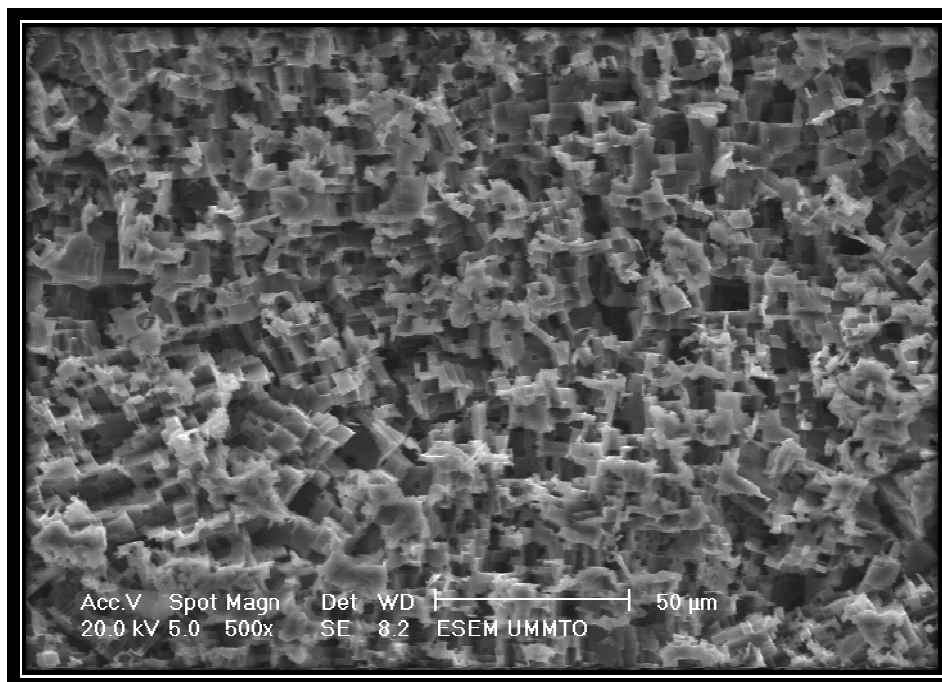
#### 3.4.9. Observation de la surface par microscope électronique à balayage

Nos observations au MEB ont porté sur des échantillons de l'alliage d'aluminium sans attaque (3.10), après 24h d'immersion à 25 °C dans HCl 1M seul (Figure 3.11) et avec addition de concentration optimale en TCKE dans Hl 1M (Figure 3.12).

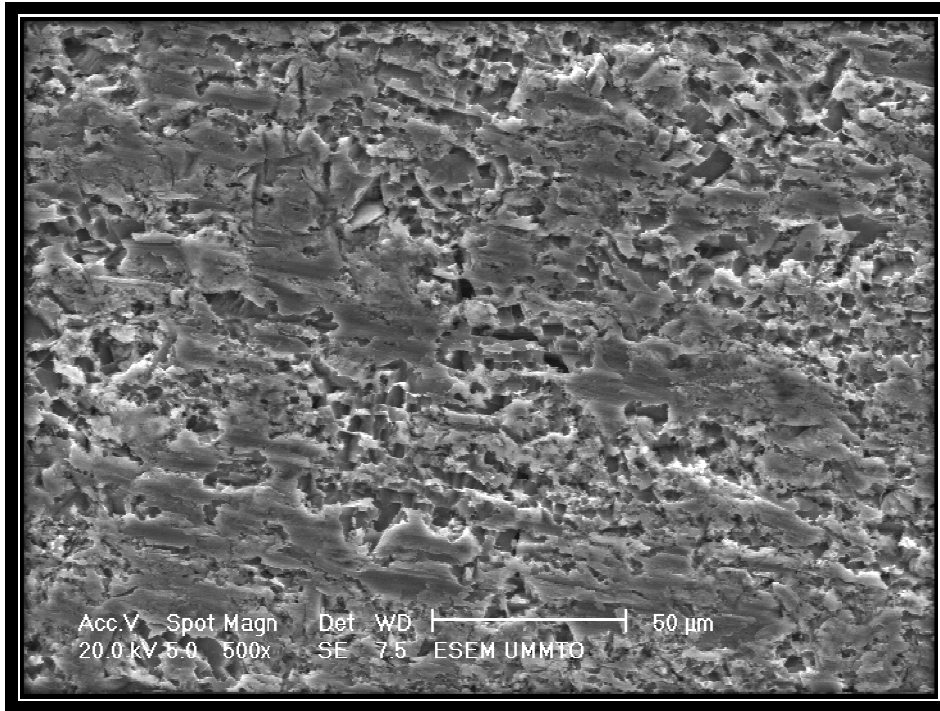
Comparant la figure 3.10 et 3.11, Nous remarquons que après 24 h d'immersion à 25 °C dans HCl 1M seul, que la surface de notre alliage est fortement endommagée. Ceci montre clairement que l'aluminium subit une corrosion généralisé sur toute la surface en absence de l'inhibiteur. La figure 3.12, montre une surface moins attaquée en présence de notre inhibiteur, cela est traduit par l'adsorption de TCKE sur la surface de l'aluminium.



**Figure 3.10.** Micrographie (MEB) de la surface de l'alliage d'aluminium sans attaque.



**Figure 3.11.** Micrographie (MEB) de la surface de l'aluminium après immersion dans HCl 1M en absence d'inhibiteur.



**Figure 3.12.** Micrographie (MEB) de la surface d'alliage dans HCl 1M en présence de TCKE.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail de mémoire avait pour objectif d'étudier le pouvoir inhibiteur d'un sel d'ammonium quaternaire synthétisé localement TCKE à partir de kérosène vis-à-vis de la corrosion d'un alliage d'aluminium 6082 dans une solution agressive 1 M HCl, à l'aide de la méthode gravimétrique.

Les différents résultats obtenus ont permis de tirer les constatations suivantes :

- L'influence de la concentration montre qu'un maximum d'efficacité est obtenu pour une concentration de 17,28 mg/L, avec un pourcentage de 86 %.
- L'effet du temps d'immersion a également été réalisé, cette étude effectuée pour une concentration de 17,28 mg/L a permis d'avoir des informations sur la stabilité de la couche inhibitrice formée sur la surface métallique, Ces résultats ont confirmé la stabilité de notre produit qui peuvent ainsi être utilisés comme inhibiteur temporaire de la corrosion de l'alliage 6082 en milieu HCl 1M.
- Les essais concernant l'effet de la température ont été menés dans l'intervalle 25-65 °C. Ils ont montrés que l'augmentation de la température induit une diminution de l'activité inhibitrice de TCKE, ce qui explique sa désorption en augmentant la température de milieu d'étude.
- l'acidité peut être influencé le pouvoir inhibiteur de TCKE.
- De plus, le tracé des différentes isothermes (Langmuir, Temkin et Frumkin) a montré que l'adsorption de TCKE obéit à l'isotherme de Langmuir. Ce modèle suppose que l'adsorption est monomoléculaire et que les interactions entre particules absorbées sont négligeables. Cette étude a également permis de mettre en évidence la physisorption des molécules tensioactives sur la surface à travers l'énergie d'activation ( $E_a$ ) du processus de dissolution de l'acier qui est plus élevée en présence de l'inhibiteur
- Les observations par microscopie à balayage (MEBE) confirment la présence d'une couche protectrice formée sur la surface de notre alliage.

Les perspectives intéressantes de ce travail seraient : l'utilisation des techniques électrochimiques pour comprendre mieux les mécanismes réactionnels.

## Références bibliographiques

1. X. Li, S. Deng, H. Fu, Inhibition by tetradecylpyridinium bromide of the corrosion of aluminium in hydrochloric acid solution, *Corrosion Science* 53 (2011) 1529–1536, M. Abdallah, I. Zaafarany, S.O. Al-Karane, A.A. Abd El-Fattah, Antihypertensive drugs as an inhibitors for corrosion of aluminum and aluminum silicon alloys in aqueous solutions, *Arabian Journal of Chemistry* (2012) 5, 225–234
2. ASM Metals Handbook, Corrosion of Aluminium and Aluminium alloys, Vol. 13, 583- 609, Metals Handbook, 9th edition ASM Intl, Ohio (1987).
3. REBOUL (M.), Mémoires et Études Scientifiques, *Revue de Métallurgie*, 61-74, (1987).
4. PECHINEY RHENALU, Demi-produits Aluminium (1997).
5. Develay, R., Données numériques sur l'aluminium non allié. Les Techniques de l'ingénieur. M443.
6. ASHBY (M.F.), Materials selections in mechanical design. Pergamon Press (1992).
7. BRECHET (Y.), Choix des matériaux, Conférence CETIM, (juin 1994).
8. Classe de PTSI, Matériaux, Lycée Vauban, Brest (1992)
9. Short introduction and its control, corrosion in the metals and its prevention National corrosion service, NPL., 2003.
10. TOUAFRI, L., Thèse de Doctorat, Emploi Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Algérie. 2010.
11. BERANGER G. et F. DABOSI, « corrosion et protection de métaux » Ecole d'été du CNR, 1980
12. LANDOLT, D., corrosion et chimie de surfaces des métaux, Presses Polytechniques et Universitaires Rmandes, 1993
13. SNOEYINK V, L and JENKINS, D., water chemistry. newyork: john wiley and sons (19).
14. BOUDIEB, N., Mémoire de Magistère. Université M'HAMED BOUGUERRA-BOUMERDAS. 2009.
15. LIVRE de Thermodynamique Matériaux.
16. PUJOL, V.N., LUSUEUR. Etude de mécanisme d'action du monofluore phosphate de sodium. Thèse de Doctorat. Paris 6. PP 10-24. 2001
17. B. NIMMO, G. HINDS. Beginners guide to corrosion. NPPL. February. 2003
18. Hach, A., (La corrosion des métaux).
19. Khireche, Soraya, mémoire de magister Elaboration et étude de la corrosion des alliages Al-Zn et Al-Zn-Sn dans une solution à 3% en poids de NaCl, université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.

20. Mankowski, G. , C. Lemaitre et H.H. Strehblow : Corrosion localisée, page 173. Les éditions de physique, 1994.
21. NACE International . , Glossary of Corrosion Related Terms (www.nace.org), (2007).
22. Fiaud, C. , Inhibiteurs de corrosion, Techniques de l'ingénieur, COR1005.
23. Short introduction and its control, corrosion in the metals and its prevention National corrosion service, NPL. , (2003).
24. BOUDIEB, N. , Mémoire de Magistère. Université M'HAMED BOUGUERRA-BOUMERDAS.2009.
25. G. Beranger, H. Mazille, Corrosion et anticorrosion, pratique industrielle, Edition Technique et Documentation, Lavoisier, Paris, (2002).
26. Nace Glossary of corrosion Terms. Matériels protection, Vol: 4, N°1, (1965).
27. Q.B. Zhang, Y.X. Hua, Corrosion inhibition of mild steel by alkylimidazolium ionic liquids in hydrochloric acid, *Electrochimica Acta* 54, (2009) 1881–1887
28. F. Moran, Inhibiteurs de corrosion et traitement des eaux , Techniques de l'ingénieur, COR1000.
27. W. Lorenz, F. Mansfield, Procedures of the 6th European Symposium on Corrosion Inhibitors, Italy, (1985).
28. E.Schaschl, Methods for evaluation and testing of corrosion inhibitors, Nace Houston 5, (1973).
29. F.Karman, E. Kalman, I. Cserny, Electrochemical corrosion, *Corrosion Science*, 84 (1998) 43-69 .
30. J.Christopher Scully, Corrosion Protection, Principes Fondamentaux, Eddition
31. N. Hackerman, M.Cafferty, Procedures of the 5th International congress on metal corrosion, 542, Tokyo (1972).
- 32.Touhami, F., Aouniti, A. Abed, Y., Hammouti, B., Kertit, S. and Ramdani, A., «Corrosion inhibition of armco iron in 1 M HCl media by new bipyrazolic derivatives», *Corrosion Science*, V.42, (2000) , 929-940.
33. M. Lebrini. «Synthèse et études physicochimiques de nouveaux thiadiazoles inhibiteurs de corrosion de l'acier en milieu acide», Thèse de doctorat, Université des sciences et Technologies de LILLE, (2005).
34. M.Sahin, S.Bilgic, H.Yilmaz, «The inhibition effects of some cyclic nitrogen compounds on the corrosion of the steel in NaCl mediums», *Applied Surface Science*, V.195, (2002).
35. KETCHAM, (S.J.) et HAYNIE, (F.H.). , *Corrosion*, 17, no 7, 242t (1963).
36. FARSI, CHERIFA. , MEMOIRE DE MAGISTER En génie des procédés, TENSIOACTIFS CATIONIQUES BASE DE PRODUITS PETROLIERS : SYNTHESE ET PROPRIETES INHIBITRICES VIS- A-VIS DE LA CORROSION ACIDE DES ACIERS.

37. POURBAX, J. , *Atlasse d'équilibre électrochimique à 25C*, Gauthier Villards et Cie ,Paris (1987).
38. OUADHA, KHEIRA. , *Mémoire de fin d'étude Pour l'Obtention de diplôme de master en génie des procédés pharmaceutiques THEM : ETUDE DE L'EFFET INHIBITRICE DE TENSIOACTIFS CATIONIQUES CONTRE LA CORROSION DE L'ALUMINIUM EN MILIEU ACIDE*, 2013.
39. Xianghong Li, Shuduan Deng et Hui Fu., *Corrosion Science* 52 (2010) 2786–2792.
40. B. Obot, N.O. Obi-Egbedi, N.W. Odozi, *Acenaphtho [1, 2-b] quinoxaline as a novel corrosion inhibitor for mild steel in 0.5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>*, *Corrosion Science* 52, 923–926, (2010)
41. P. Bouersbah, C. Millet, *Electrochemical characterization Of a corrosion inhibitor: influence of temperature on the inhibition mechanism*, *Science de Corrosion*, (2005).
42. H. Kaesh and N. Hackerman, *Corrosion inhibition by organic amines*, *Journal electrochemical*, 1958, P (191-198).