

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université M'Hamed Bougara Boumerdes

Faculté des Sciences

Département de Chimie



## Mémoire De Fin D'étude

En Vue de L'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Science de la matière

Filière : Chimie

Spécialité : Chimie Analytique

Thème :

**Etude de l'effet inhibiteur d'une huile  
essentielle de lavande sur la corrosion d'un  
acier au carbone dans le milieu HCl (1M)**

*Présenté par :*

Mlle : BELLAHDID SOUMIA

Mlle : LOUNES HADJER

*Soutenu devant le jury :*

Mme H. BOUSSAK

MCA/UMBB

Présidente

Mme K. LABRAOUI

MCB/UMBB

Examinatrice

Mme S. HAMDANI-BELKAID

MCB/UMBB

Encadreur

Année Universitaire  
2020/2021

نظرا لتواجد الماء على سطح الأرض، فإن أضرار التآكل مست جميع نشاطات الإنسان، ابتداء من النشاط العمراني إلى غاية المنشآت و الآلات المتطورة مثل الطائرات، المحطات النووية و الدارات الالكترونية، مرورا بالمصانع الكيميائية، و المنشآت البترولية و المعادن الملامسة لماء البحر. في هذا العمل قمنا بدراسة التأثير التثبيطي للخزامي ضد تآكل الفولاذ في وسط حمض كلور الماء (1مول). حيث أجريت هذه الدراسة، باستخدام تقنية من القياسات التجريبية، و هي النقص الكتلي متمثلة في النتائج التي تم الحصول عليها و التي تظهر تأثير وقائي فعال جدا لهذا المثبط مهما كانت درجة الحرارة.

**الكلمات المفتاحية:** التآكل، المثبط، الخزامي، الفولاذ، حمض، فقدان الوزن.

## Résumé

Compte tenu de la présence quasi universelle de l'eau sur la terre, les dégâts occasionnés par la corrosion aqueuse affectent pratiquement tous les domaines de l'activité humaine, depuis le bâtiment jusqu'aux installations et appareils les plus sophistiqués tels les avions, les centrales nucléaires et les circuits électroniques, en passant par les usines chimiques, les installations pétrolières et les matériaux en contact avec l'eau de mer.

Dans ce travail, on a étudié l'effet inhibiteur d'une huile essentielle de "LAVANDE", sur la corrosion de l'acier, mis dans une solution de l'acide HCl (1M). Cette étude est menée, en utilisant la technique de mesures expérimentales, à savoir : la gravimétrie. Les résultats obtenus, par la technique de perte de poids (gravimétrie), montrent un effet protecteur intéressant de ce produit inhibiteur. Ces mesures indiquent que l'efficacité d'inhibition augmente avec la concentration de l'inhibiteur, et cela quelque soit la température.

**Mots clés :** Corrosion, inhibiteur, lavande, acier, acide, perte de poids.

## Abstract

Taking into account the quasi universal presence of water on the ground, the damage caused by aqueous corrosion affects practically all the human activity, from the building to the most sophisticated installations and apparatuses such planes, the nuclear thermal power stations and the electronic circuits, while passing by the chemical factories, the oil installations and the materials in contact with sea water.

In this work, we studied the inhibitory effect of an Essential oil "LAVENDER", on the corrosion of steel, in HCl (1M) medium.

This study is carried out using a simple experimental measurement technique.

The results obtained by the weight loss technique show an interesting protective effect of this inhibitor product whatever the study temperature.

**Key words:** Corrosion, inhibitor, lavender, steel, acid, the weight loss.

# REMERCIEMENTS

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu, le tout-puissant, qui nous a donné la santé, la force, la volonté, le courage et la patience pour terminer ce modeste travail.*

*Nous avons effectué ce travail au laboratoire pédagogique du Département de Chimie de la Faculté des Sciences de l'université **M'HAMED BOUGARA BOUMERDES**.*

*Nous tenons à remercier vivement notre encadreur, **Mme. S. HAMDANI**, d'avoir accepté de diriger ce travail et d'avoir mis à nous disposition tous les moyens qui ont permis de mener à terme cette étude et aussi pour sa patience, son soutien, ses aides, ses précieux conseils et ses encouragements, et son suivi durant la réalisation de cette étude.*

*Nous remercions également les membres de jury :*

***Mme H. BOUSSAK** présidente de jury et **Mme K. LABRAOUI** examinatrice toute deux maitres de conférences à l'Université de Boumerdès qui nous ont fait l'honneur en acceptant de faire partie du jury.*

*Nous remercions toutes les responsables du Département de Chimie de Faculté des Sciences de l'université **M'HAMED BOUGARA BOUMERDES**, pour nous permettre d'effectuer ce travail de recherche.*

*Nous n'oublions pas certainement à remercier tout le personnel des laboratoires de notre Département de Chimie, pour son soutien moral et matériel. Dont nous gardons avec vous d'excellents souvenirs.*

*Nous remercions tous les enseignants de **l'université de BOUMERDES** durant le cycle d'étude.*

*Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

**Merci...**

**SOUMIA & HADJER**





# **DEDICACE**

*DIEU TOUT PUISSANT MERCI D'ETRE TOUJOURS AU  
PRES DE MOI*

*Je dédie ce projet aux êtres les plus chers à mon cœur :*

*La meilleur de toutes les mères Nadia*

*Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit*

*Ton affection me couvre, ta bien vaillance me guide et ta présence à mes cotes*

*A toujours Eté ma source de force pour affronter les différents obstacles*

*Mon très cher père AHLAL*

*Tu as toujours été a mes cotes pour me soutenir et*

*M'en courage Que ce travail traduit ma Gratitude et mon affection.*

*A Ma sœur wafa et mes frère Ayoub et Abdelhadi*

*A ma cher binôme soumia*

*Pour sa entente et sa sympathie ; pour leurs indéfectible*

*Soutiens leur patience infinie*

*A Tout ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.*



# **HADJER**







# **DEDICACE**

*Merci Allah "**mon dieu**"  
de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire,  
la patience.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À mes très chers parents, que dieu les gardes et les protèges.  
Qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à  
mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de  
me voir devenir ce que je suis, merci beaucoup mes parents, je les remercie également pour  
leur patience et intérêt pour ma personne.*

*À mon frère **HAMZA**.*

*À mes chères sœurs **FERIEL & SARAH**.*

*À tous mes amis (es), collègues d'étude.*

*À mes enseignants qui la source de mon savoir.*

*À toutes personnes qui ma aider à poursuivre mes études.*

*En fin, je remercie mon binôme **HADJER**  
qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.*



# **SOUMIA**



## LISTE DES TABLEAUX

<b>N° tableaux</b>	<b>Titre du tableau</b>	<b>N° page</b>
I.1	Composition chimique de l'huile de Lavande (Lavandula Officinalis)	23
II.1	Composition chimique de l'acier X60 en pourcentage massique	31
II.2	Les propriétés physique-chimiques d'acide chlorhydrique	32
III.1	Les valeurs expérimentales de perte de masse en milieu acide HCl (1M) en absence d'inhibiteur	37
III.2	Vitesses de corrosion du métal X60 en fonction de la concentration en inhibiteur sur une durée de 20h	38
III.3	L'efficacité inhibitrice de la lavande sur la corrosion de l'acier X60 dans HCl (1M)	40
III.4	Perte de masse de l'acier dans HCl (1M) en absence et en présence de l'huile essentielle de lavande à différente températures	42
III.5	Valeurs de l'énergie d'activation $E_a$ , pour l'acier X 60 dans HCl (1M) sans et avec ajout de l'inhibiteur à différente concentration	47
III.6	Valeurs de $(C_{inh}/\theta)$ obtenues à la température 20°C en fonction de la concentration	49

## LISTE DES FIGURES

<b>N° Figures</b>	<b>Titre du la figure</b>	<b>N° page</b>
I.1	Corrosion uniforme et corrosion localisée	6
I.2	Corrosion galvanique	7
I.3	Corrosion par piqûres	7
I.4	Corrosion caverneuse d'un acier allié sous un joint	8
I.5	Représentation schématique du phénomène de corrosion-érosion	9
I.6	Corrosion sélective d'un alliage	9
I.7	Classement des inhibiteurs de corrosion	17
I.8	Formation des couches barrières en milieu acide	19
I.9	Huile essentielle de Lavande	22
I.10	Montage d'extraction par Hydro distillation.	23
I.11	La distillation par entraînement à la vapeur d'eau	24
I.12	Montage d'extraction par hydro diffusion	25
I.13	Extraction L'extraction à l'aide d'un solvant	25
I.14	Macération dans un solvant organique	26
II.1	Les formes des échantillons	31
II.2	Papier utilisé dans le polissage	32
II.3	L'acier X60 dans le milieu acide HCl sans l'inhibiteur	34
II.4	Acier X60 dans HCl (1M) en présence de l'inhibiteur à différentes concentrations	34
II.5	Bain marie Thermostaté	35

III.1	Evolution de la perte de masse en fonction de temps dans le milieu acide HCl (1M)	37
III.2	Evolution de la perte de masse en fonction des concentrations de l'HE de lavande en milieux acide	39
III.3	Evolution des vitesses de corrosion en fonction de la concentration de l'huile essentielle de lavande	39
III.4	Evolution de l'efficacité inhibitrice de lavande sur la corrosion de l'acier X60	41
III.5	Perte de masse de l'acier dans HCl (1M) en fonction de la concentration de l'huile essentielle de lavande à différentes températures	43
III.6	Perte de masse de l'acier dans HCl (1M) en fonction de la température à différentes concentrations de l'huile essentielle de lavande	44
III.7	Tracés de $\ln V_{\text{Corrosion}}$ en fonction de l'inverse de la température de l'acier X 60 dans HCl (1M) à différentes concentrations d'inhibiteur	45
III.8	Droites moyennes d'Arrhénius de l'acier dans HCl (1M) en présence et en absence de l'inhibiteur	46
III.9	Evolution de l'énergie d'activation $E_a$ en fonction de la concentration de l'inhibiteur, pour l'acier X 60 dans HCl (1M)	47
III.10	Modèle de l'isotherme d'adsorption de Langmuir de l'acier X60 dans HCl (1M) à différentes concentrations en l'huile essentielle de lavande à 20°C	49



# SOMMAIRE

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

## **Chapitre I : Etude bibliographique**

I.1. Notions théoriques sur la corrosion.....	4
I.1.1. Introduction.....	4
I.1.2. Définition de la corrosion .....	4
I.1.3. Importance de l'étude de la corrosion .....	5
I.1.3.1. Économique.....	5
I.1.3.2. Sécurité .....	5
I.1.3.3. Écologique .....	5
I.1.4. Formes de corrosion .....	6
I.1.4.1. Corrosion généralisée .....	6
I.1.4.2. Corrosion localisée .....	6
I.1.5. Différents modes de corrosion .....	9
I.1.5.1. Corrosion sèche .....	9
I.1.5.2. Corrosion humide .....	10
I.1.6. Processus de la corrosion.....	10
I.1.6.1. La corrosion chimique .....	10
I.1.6.2. La corrosion bactérienne.....	10
I.1.6.3. La corrosion électrochimique. ....	10
I.1.7. Les facteurs de corrosion bibliographique.....	11
I.1.7.1. Facteurs définissant le milieu corrosif.....	11
I.1.7.2. Facteurs définissant la pièce soumise à corrosion.....	11
I.1.7.3. Facteurs définissant les conditions d'emploi de la pièce.....	11
I.1.8. Mécanismes de corrosion.....	12
I.2. Moyens de protection contre la corrosion.....	12
I.2.1. La prévention par une forme adaptée de la pièce.....	12
I.2.2. Elimination des zones humides.....	12
I.2.3. Remède au couplage galvanique.....	13

I.2.4. Utilisation des pièces échangeables.....	13
I.2.5. Protection par revêtements.....	13
I.2.5.1. Protection par revêtements métalliques.....	13
I.2.5.2. Revêtements inorganiques non métalliques.....	13
I.2.5.3. Protection par revêtements organiques.....	14
I.2.6. Protection cathodique.....	14
I.2.7. Protection par anode sacrificielle.....	14
I.2.8. Protection anodique.....	15
I.2.9. Protection par les inhibiteurs de corrosion.....	15
I.3. Généralités sur les inhibiteurs de corrosion.....	15
I.3.1. Historique.....	15
I.3.2. Définition.....	16
I.3.3. Propriétés de l'inhibiteur.....	16
I.3.4. Utilisation des inhibiteurs.....	16
I.3.5. Les classes d'inhibiteurs.....	17
I.3.5.1. Par domaine d'application.....	18
I.3.5.2. Par réaction partielle (les mécanismes d'action électrochimique).....	19
I.3.5.3. Par mécanisme réactionnel (adsorption ou formation de film).....	20
I.4. Huile essentielle de lavande ( <i>Lavandula Officinalis</i> ).....	21
I.4.1. Définition.....	21
I.4.2. Composition chimiques de l'huile essentielle de Lavande.....	22
I.4.3. Mode d'extraction.....	23
I.4.3.1. Extraction par hydrodistillation.....	23
I.4.3.2. Extraction par entraînement à la vapeur d'eau.....	24
I.4.3.3. Hydrodiffusion.....	24
I.4.3.4. L'extraction à l'aide d'un solvant comme l'éther ou l'hexane.....	25
I.4.3.5. Extraction par micro-ondes sous vide.....	25
I.4.3.6. Extraction par les corps gras.....	26
I.4.3.7. La macération.....	26



## **Chapitre II : Partie expérimentale**

II.1. Introduction .....	29
II.2. Méthode de la perte de masse .....	29
II.3. Avantages et inconvénients de la méthode gravimétrique .....	30
II.4. Dispositifs utilisés .....	30
II.5. L'acier au carbone utilisé .....	30
II.6. Conditions expérimentales dans le laboratoire .....	31

## **Chapitre III : Résultats et discussions**

III.1. Effet du temps de l'immersion sur la corrosion de l'acier X60 dans HCl (1M)... ..	37
III.2. Etude de l'influence de la concentration de l'inhibiteur sur la corrosion de l'acier dans HCl (1M).....	38
III.3. Etude de l'influence de la température sur l'efficacité de l'inhibiteur .....	41
III.4. Effet de la température sur la vitesse de la corrosion .....	44
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>52</b>

## **Références bibliographiques**



**Introduction générale**



## Introduction générale

La corrosion des métaux et alliages est un phénomène universellement connu qui entraîne chaque année des pertes matérielles considérables, directes et indirectes, pour l'industrie et la collectivité. Plus grave, la corrosion peut causer des dommages irréversibles à l'environnement et même des pertes en vie humaine puisqu'elle est susceptible d'entraîner des problèmes de santé (pollution, contamination, accidents corporels...etc).

On estime que la corrosion détruit un quart de la production annuelle mondiale d'acier, ce qui représente environ 150 millions de tonnes par an. Elle touche tous les domaines de l'économie : du circuit intégré au pont en béton armé. La corrosion est donc un phénomène nuisible et aussi un facteur permanent de destruction des installations industrielles [1].

La majorité des métaux et des alliages placés dans les environnements variés sont affectés par différentes formes de corrosion, à savoir la corrosion uniforme ou localisée. Ces attaques sont particulièrement dangereuses lorsqu'elles sont localisées. Le coût occasionné par la dégradation annuelle des matériaux, a provoqué la mise en œuvre de méthode de protection. L'adoption de mesures préventives contre la corrosion est donc nécessaire et l'utilisation des inhibiteurs est une méthode adaptée et pratique pour protéger les métaux. Elle consiste à utiliser des substances chimiques qui, lorsqu'elles sont ajoutées en faibles concentration en présence d'un milieu agressif, peuvent réduire ou bien stopper la corrosion du métal exposé.

L'étude de l'inhibition de la corrosion des matériaux dans des milieux acides, connus par leur agressivité, constitue donc un domaine de recherche très attractif en raison de la large utilisation des solutions acides dans l'industrie, notamment dans les bains de décapage des métaux et pour le nettoyage des installations industrielles.

Les performances recherchées de ces produits s'évaluent en termes de protections métallique et environnementale. En effet, les nouvelles directives mondiales concernant les rejets industriels étant de plus en plus sévères en termes d'écologie, la mise au point d'inhibiteurs de corrosion éco-compatibles et biodégradables devient, de nos jours, un enjeu important. C'est en particulier pour cette raison que nous avons

choisi l'étude de l'inhibition de la corrosion en milieu acide par des composés organiques éco-compatibles.

Dans cette étude, une huile essentielle de Lavande "Lavandula Officinalis" a été testée comme inhibiteur de corrosion d'un acier au carbone de nuance X60 dans un milieu agressif de HCl (1M). L'objectif attribué à ce travail consiste en la détermination des concentrations optimales de l'efficacité de l'inhibiteur qui peut assurer une protection adéquate de l'acier immergé dans une solution de l'acide, par l'utilisation de la technique expérimentale gravimétrique (la perte de masse).

Les propriétés inhibitrices évaluées par la méthode gravimétrique, nous ont permis de suivre l'évolution de l'efficacité inhibitrice en fonction des paramètres suivants (la concentration de l'inhibiteur, la température du milieu et le temps d'immersion).

Le travail que nous présentons dans ce mémoire est subdivisé en trois chapitres précédés d'une introduction et suivi d'une conclusion ; il se présente comme suit :

- **Le premier chapitre :** Est consacré à une étude bibliographique sur des notions fondamentales sur le phénomène de la corrosion et les méthodes de protection notamment par les inhibiteurs de corrosion.
- **Le deuxième chapitre :** Est consacré à la technique expérimentale (technique de la perte de masse), ainsi que les dispositifs expérimentaux utilisés pour la réalisation de ce mémoire, et les conditions opératoires maintenues pour l'étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier en milieu HCl (1M).
- **Le troisième chapitre :** Montre les résultats expérimentaux de l'effet de la concentration, de la température et de temps d'immersion sur le pouvoir inhibiteur de l'huile essentielle de la Lavande, obtenus par les tests gravimétriques et qui sont donnés sous forme de tableaux et figures. Les discussions et les interprétations sont aussi rapportées dans ce chapitre.

Enfin une conclusion générale sur l'ensemble de ce travail, parachève cette étude.





**Chapitre I**  
**Etude bibliographique**

## I.1. Notions théoriques sur la corrosion

### I.1.1. Introduction

La corrosion est un phénomène qui ne peut être négligé, la sélection des matériaux pour une application particulière dans un milieu agressif est faite en tenant compte de la résistance à la corrosion mais aussi des paramètres mécaniques, de mise en forme, coût et disponibilité.

Des milliers d'essais sont réalisés chaque année pour essayer de comprendre et de réduire les dommages causés par la corrosion. Plusieurs méthodes ont été développées pour suivre l'évolution dans le temps de la dégradation des aciers dans différents milieux agressifs.

Plusieurs méthodes sont utilisées en même temps pour expertiser un seul phénomène lié à la corrosion. Les types de corrosion varient en fonction des matériaux et des milieux et chaque type ne peut être évalué correctement que si la méthode de caractérisation utilisée est appropriée [2].

La corrosion est un domaine très vaste car elle fait intervenir plusieurs principes rattachés à la chimie, à l'électrochimie, à la métallurgie, à la physique et à la thermodynamique [3].

### I.1.2. Définition de la corrosion

La corrosion traduit la réactivité de la plupart des matériaux industriels vis-à-vis de l'environnement au contact desquels ils sont placés au cours de leur emploi. Elle affecte tous les métaux ainsi que les polymères et céramiques. Elle résulte d'interactions chimiques et/ou physiques entre le matériau et son environnement.

La corrosion électrochimique est une dégradation du matériau ou de ses propriétés par réaction avec l'environnement [4]. Elle est due à une réaction d'oxydoréduction interfaciale et irréversible entre le métal et les agents oxydants contenus dans son environnement (eau, oxygène, acides...). Cette réaction d'oxydoréduction se compose de deux réactions partielles anodique et cathodique.

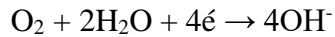
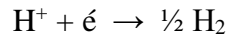
La réaction anodique correspond à la dissolution du métal :



Où  $M$  désigne le métal et  $M^{n+}$  l'ion correspondant. La réaction cathodique, quant à elle, varie suivant la nature des espèces oxydantes présentes en solution.



Les phénomènes cathodiques les plus fréquemment rencontrés sont la réduction du proton  $H^+$  en milieu acide et la réduction de l'oxygène dans les milieux aérés.



Sous l'action de ces réactifs chimiques ou d'autres agents atmosphériques, le métal tend à retourner vers son état originel d'oxyde, de sulfure, de carbonate ou de tout autre sel plus stable dans le milieu ambiant [5].

### **I.1.3. Importance de l'étude de la corrosion**

Pratiquement tous les milieux sont corrosifs. On parle de corrosion par l'air, l'eau ou l'oxygène, par l'atmosphère ou les sols, par acide, les bases ou les sels, par les bactéries ou les moisissures. Les dégâts causés par la corrosion, semble donc inévitable et sont extrêmement élevés, sont divisés en trois : économique, sécurité et écologique.

#### **I.1.3.1. Économique**

138 milliard de Dollars aux Etats Unis d'Amérique ! Ce chiffre (publié par la N.A.C.E) inclut seulement les secteurs réellement concernés par l'étude. Par extrapolation à l'ensemble de l'industrie Américaine, la N.A.C.E estime que le cout total de la corrosion atteint le chiffre de 276 milliard de dollars, soit 3,14% de la production nationale Américaine. Ces pertes peuvent être directes (cout des équipements à remplacer, cout de l'entretien ou du contrôle, surcout du à l'emploi des matériaux plus noble) ou indirectes (arrêt de production, perte d'énergie, surépaisseur important) [6].

#### **I.1.3.2. Sécurité**

Les risques dus à la corrosion sont liés aux incidents causés par des appareils sous pression, réservoir métallique, produit radioactif, conduite de gaz, rotor de turbines...etc.

#### **I.1.3.3. Écologique**

Pollution de l'environnement, gaspillage de l'eau et de l'énergie nécessaire à la transformation des matières première en structure métalliques [6].

#### I.1.4. Formes de corrosion

Différentes formes de corrosion, dépendant de la nature du matériau et des caractéristiques de son environnement, ont pu être identifiées et répertoriées selon leurs principales manifestations visibles [7] :

##### I.1.4.1. Corrosion généralisée

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 [8].

##### I.1.4.2. Corrosion localisée

Cette forme de corrosion représente un phénomène particulièrement dangereux puisque les produits de la corrosion ne sont pas nécessairement visibles et de plus, la perte de poids n'est pas toujours appréciable [8].

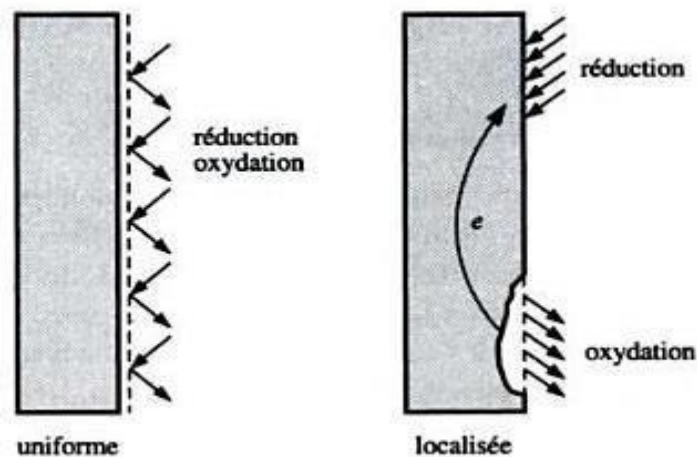


Figure I.1. Corrosion uniforme et corrosion localisée [8].

On distingue plusieurs types de corrosion localisée :

##### ➤ Corrosion galvanique (bimétallique)

Ce type de corrosion résulte du couplage électrique de deux métaux différents et immergés dans la même solution. Le moins noble (l'anode) se corrode et le plus noble (la cathode) est protégé. Elle résulte de la formation d'une pile électrochimique [8]. La figure (I.2) montre un schéma expliquant la corrosion galvanique.

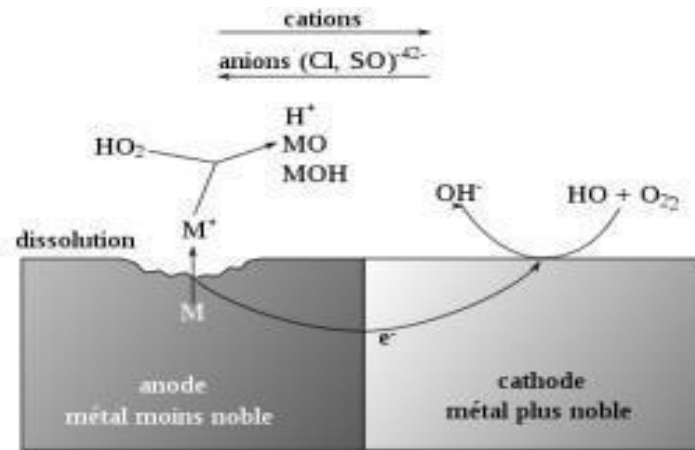


Figure I.2. Corrosion galvanique [9].

### ➤ Corrosion par piqûres

La corrosion par piqûres est caractérisée par une attaque très localisée en certains points de la surface et provoque des piqûres. Cette forme de corrosion est produite par certains anions, notamment les chlorures, sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince. La corrosion par piqûres affecte en particulier les métaux ou les alliages passivés (aciers inoxydables, les alliages d'aluminium, etc.) [8]. La figure suivante représente un schéma expliquant la corrosion par piqûres.

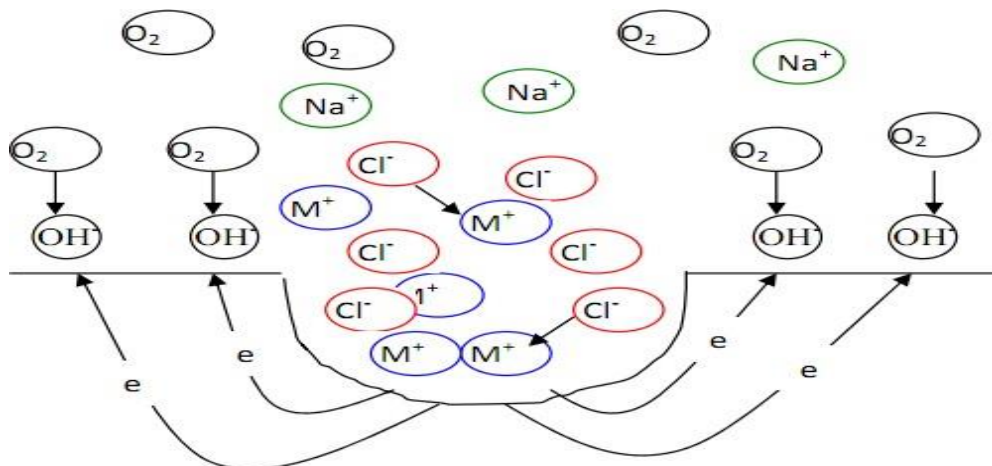


Figure I.3. Corrosion par piqûres [10].

### ➤ Corrosion cavernieuse

Ce type de corrosion est généralement associé à la présence de petits volumes de solution stagnants dans les trous, sous les dépôts, à l'interface des brides et joints, etc. C'est une attaque électrochimique par "aération différentielle" qui se prolonge par une ou des réactions secondaires [8].



**Figure I.4.** Corrosion cavernuse d'un acier allié sous un joint [11].

➤ **Corrosion sous contrainte**

La corrosion sous contrainte résulte de l'action conjuguée d'une contrainte mécanique (résiduelle ou appliquée), et d'un milieu agressif vis-à-vis du matériau, chacun de ces facteurs pris séparément n'étant pas susceptible à lui seul d'endommager la structure. Ce type de corrosion, particulièrement sournois et dangereux pour les installations, se caractérise par l'apparition de fissures inter granulaires dont la direction générale de propagation est perpendiculaire à la plus grande contrainte. Cette dernière peut être d'origine résiduelle (cintrage, écrouissage, laminage à froid...), d'origine thermique (dilatation, variation de pression), ou inhérente à la fonction de l'installation (câbles de ponts suspendus, structures de soutènement, etc.) [8].

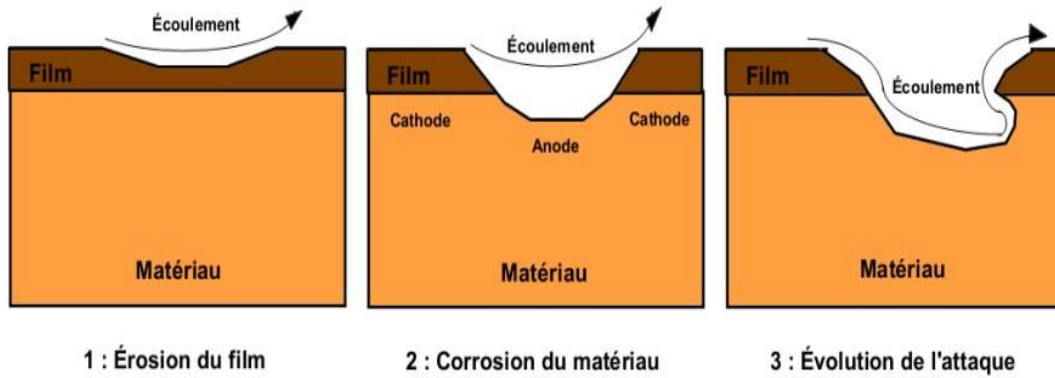
➤ **Corrosion inter granulaire**

Dans certaines conditions, les joints de grains sont le siège d'une corrosion localisée très importante alors que le reste du matériau n'est pas attaqué. L'alliage se désagrège et perd toutes ses propriétés mécaniques. Ce type de corrosion peut être dû soit à la présence d'impuretés dans le joint, soit à l'enrichissement (ou l'appauvrissement) local en l'un des constituants [8].

➤ **Corrosion érosion**

La corrosion érosion est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement mécanique de matière. Elle a souvent lieu sur des métaux exposés à l'écoulement rapide d'un fluide (Figure I.5) [12].





**Figure I.5.** Représentation schématique du phénomène de corrosion-érosion [12].

### ➤ Corrosion sélective

Cette forme de corrosion est due à l'oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse [13].



**Figure I.6.** Corrosion sélective d'un alliage [11].

## I.1.5. Différents modes de corrosion

### I.1.5.1. Corrosion sèche

La corrosion sèche est l'attaque d'un métal par un gaz, conduisant à la formation d'un troisième composé. La plus connue est celle qui est provoquée par l'attaque des métaux par l'oxygène. Lorsque le métal est placé dans une atmosphère gazeuse, sa surface absorbe les particules de gaz par un processus physique ou chimique selon la température. La vitesse de corrosion dépend ainsi de la température du métal.

### **I.1.5.2. Corrosion humide**

Le terme corrosion humide couvre tous les cas de corrosion par un milieu liquide conducteur. Cela peut être de l'eau, toute solution d'acide, de base ou d'autres [15].

### **I.1.6. Processus de la corrosion**

La corrosion peut se développer suivant différents processus qui définissent chacun un type de corrosion. On peut distinguer trois types de corrosion :

- Corrosion chimique,
- Corrosion électrochimique,
- Corrosion bactérienne (biocorrosion).

#### **I.1.6.1. La corrosion chimique**

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

Au cours de la corrosion chimique, l'oxydation du métal et la réduction de l'oxydant se fait en une seule action, c'est-à-dire les atomes du métal forment directement des liaisons chimiques avec l'oxydant qui arrache les électrons de valence des atomes métalliques [16].

#### **I.1.6.2. La corrosion bactérienne**

Ce type de corrosion, appelé aussi bio-corrosion, rassemble tous les phénomènes de corrosion dans lesquels les bactéries agissent directement ou par l'intermédiaire de leur métabolisme en jouant un rôle primordial, soit en accélérant un processus déjà établi, soit en créant les conditions favorables à son établissement (ex : production de  $H_2SO_4$  par certains types de bactéries) [17].

#### **I.1.6.3. La corrosion électrochimique**

La corrosion électrochimique, appelée encore corrosion humide, est le mode de corrosion le plus important et le plus fréquent. Elle réside essentiellement dans l'oxydation du métal sous forme d'ions ou d'oxydes. La corrosion électrochimique fait appelle à un transfert de charges électriques (circulation d'un courant) entre l'agent oxydant ( $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $H^+$ , etc.) « réaction cathodique » et le métal « réaction anodique » [16].

---

**I.1.7. Les facteurs de corrosion**

Les facteurs susceptibles d'intervenir dans une corrosion sont extrêmement nombreux et de nature diverses. L'une des principales difficultés que l'on rencontre dans la recherche expérimentale sur la corrosion est la détermination des facteurs intervenant dans le cas que l'on propose d'étudier [18]. Ces derniers peuvent intervenir en synergie et il est très compliqué de les distinguer.

**I.1.7.1. Facteurs définissant le milieu corrosif**

- Composition chimique du milieu, y compris la nature des impuretés et leurs teneurs ;
- PH, potentiel d'oxydoréduction ;
- Présence éventuelle d'inhibiteurs ;
- Température ;
- Pression ;
- Etat de repos ou de mouvement du milieu (agitation) ;
- Viscosité ;
- Résistivité ;
- Eclairage ;
- Présence de micro-organismes.

**I.1.7.2. Facteurs définissant la pièce soumise à corrosion**

- Composition chimique de l'alliage de la pièce, y compris les impuretés, même celles présentes à faible teneur ;
- Structure métallographique, nature et morphologie des constituants ;
- Contraintes mécaniques résiduelles ;
- Résistivité de l'alliage ;
- Forme de la pièce ;
- Mode de réalisation de la pièce (méthodes d'assemblage, revêtement...) ;
- Etats de surface (micro géométrie, structure, composition, présence de gaz adsorbés...), traitements de surface éventuels.

**I.1.7.3. Facteurs définissant les conditions d'emploi de la pièce**

- Contraintes mécaniques appliquées ;
  - Orientation par rapport aux courants liquides éventuels ;
  - Mouvement relatif de la pièce par rapport au milieu ;
-

- Présence éventuelle d'autres pièces métalliques au voisinage de la pièce, nature de ces pièces ;
- Potentiel (spontané ou imposé) de la pièce par rapport au milieu et par rapport aux autres pièces métalliques éventuellement présentes ;
- Volumes relatifs de la pièce et du milieu corrosif, etc.

### I.1.8. Mécanismes de corrosion

Bien que les formes de corrosion citées ci-dessus soient diverses, les mécanismes de base de la corrosion d'un matériau métallique en milieu aqueux ont la même origine qui est de nature électrochimique.

Ces mécanismes résultent d'un ensemble de réactions qui se produisent à l'interface métal-solution et qui mettent en jeu des électrons et des espèces chimiques. Ces réactions électrochimiques peuvent être décrites de la façon simplifiée suivante :

- **Réaction anodique de dissolution du métal (M):**



- **Réaction cathodique de réduction d'une espèce de l'électrolyte (O):**



L'espèce susceptible de se réduire devant être présente en quantité suffisamment importante dans le milieu [8].

## I.2. Moyens de protection contre la corrosion

Les méthodes à utiliser pour protéger les matériaux contre la corrosion dépendent des types de corrosion, qui sont en général liés à la nature du métal lui-même ou au milieu environnant.

### I.2.1. La prévention par une forme adaptée de la pièce

Le fait de prévoir une forme particulière pour un objet, permet de réduire, voir éliminer les risques de corrosion éventuels.



### **I.2.2. Elimination des zones humides**

En prévoyant un drainage plus ou moins parfait, on évite une accumulation d'humidité d'où le risque de corrosion.

### **I.2.3. Remède au couplage galvanique**

Pourtant, parfois dans l'industrie, pour des raisons de conception, on est dans l'obligation d'assembler des pièces de matériaux différents. Cela conduit les concepteurs à prévoir des solutions pour éviter la dégradation du métal le moins noble en utilisant soit un joint isolant ou une pièce de rechange.

### **I.2.4. Utilisation des pièces échangeables**

Dans un assemblage d'équipements métalliques, On utilise une pièce échangeable que l'on sacrifie au profit de l'équipement qui devrait se corroder.

### **I.2.5. Protection par revêtements**

#### **I.2.5.1. Protection par revêtements métalliques**

Selon leur comportement à la corrosion par rapport au substrat, on distingue deux types de revêtements métalliques :

- Ceux plus nobles que le substrat,
- Ceux moins nobles que le substrat.

Le chrome, le nickel ou le cuivre forment des revêtements plus nobles qu'un substrat en acier, contrairement au zinc, au cadmium ou l'aluminium. Dans les deux cas, la couche forme une barrière entre le métal de base et le milieu corrosif. Un revêtement plus noble corrode localement le substrat qui joue le rôle d'anode. En revanche, lorsque le dépôt est moins noble que le substrat, le phénomène s'inverse. Le dépôt joue le rôle de d'anode et se détériore, alors que le substrat "cathode", reste protégé.

#### **I.2.5.2. Revêtements inorganiques non métalliques**

Les revêtements inorganiques non métalliques sont de deux types :

##### **a). Les couches de conversion**

Ces couches sont obtenues par une réaction du métal avec un milieu choisi ; elles contiennent donc toujours des ions provenant du substrat.

On différencie les couches de conversion selon leur procédé de fabrication, à savoir :

- L'anodisation,
- La phosphatation,
- La sulfuration,
- La chromatation.

#### **b). Les couches étrangères au substrat**

Parmi les revêtements inorganiques non métalliques étrangers au substrat, il y a ceux plus nobles que le substrat :

- Les émaux,
- Les ciments,
- Les céramiques réfractaires.

#### **I.2.5.3. Protection par revêtements organiques**

Les revêtements organiques forment une barrière plus ou moins imperméable entre le substrat métallique et le milieu, et on les classe en trois familles :

- Revêtements en bitume,
- Revêtements polymériques,
- Peintures et vernis.

#### **I.2.6. Protection cathodique**

La protection cathodique doit fonctionner pendant la durée de vie de l'ouvrage et maintenir la totalité de la surface exposée à l'électrolyte au delà d'un seuil d'immunité dépendant de la nature du métal. Par ailleurs le niveau de potentiel doit demeurer en dessus d'une limite pour éviter une dégradation des propriétés mécaniques (fragilisation par l'hydrogène) ou du revêtement (décollement/alcalinisation). L'analyse préalable des paramètres de l'électrolyte et de l'ouvrage est essentielle pour sa conception.

#### **I.2.7. Protection par anode sacrificielle**

L'absence d'une source d'énergie électrique basse tension (ouvrages en mer, dans une zone peu habitée ou désertique) conduit à envisager un système de protection cathodique par anodes galvaniques. Ces dernières, en alliage plus électro-négatif que le métal de l'ouvrage, sont connectées à celui-ci pour constituer une pile naturelle de faible tension dont la capacité en courant dépend de l'alliage et de leur poids. L'utilisation économique d'un tel système se limite généralement à une faible surface, à un

électrolyte très conducteur (eau de mer) ou à une protection provisoire de quelques mois.

### **I.2.8. Protection anodique**

La méthode est applicable seulement aux métaux et alliages (par exemple le fer et les aciers inoxydables) qui deviennent rapidement passifs quand ils sont polarisés anodiquement sous de faibles densités de courant.

Le potentiel est maintenu anodique dans le domaine de passivation de la courbe de polarisation, à l'aide d'un appareil électronique appelé « potentiostat ».

La protection anodique a trouvé une application dans la protection des réservoirs contenant en particulier de l'acide sulfurique.

Il est typique de constater que la vitesse de corrosion sous protection anodique, bien que faible, n'a jamais réduite à zéro, tandis que pour l'acier protégé cathodiquement la vitesse peut être nulle.

### **I.2.9. Protection par les inhibiteurs de corrosion**

Les inhibiteurs de corrosion sont des substances qui, ajoutées en très faible quantité dans le milieu corrosif, diminuent la vitesse de corrosion en modifiant la nature de l'interface : substrat métallique/électrolyte [19].

## **I.3. Généralités sur les inhibiteurs de corrosion**

### **I.3.1. 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. Néanmoins, 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'avère 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 [20], Waldrip se référait à un rapport datant de 1943 au sujet de sa discussion concernant la protection contre la corrosion des puits de pétrole. De nombreux articles concernant l'inhibition ont été rédigés durant la période couvrant 1945 à 1954 : ceux-ci

traitaient entre autres de l'inhibition dans les domaines de l'aviation, des chaudières, des circuits de refroidissement, des moteurs diesel, des sels de déneigement, des raffineries de pétrole, des pétroliers....etc.

Les articles publiés durant cette période témoignent d'un grand développement technologique en matière d'inhibition. Durant les quarante dernières années, un nombre croissant de résumés, d'articles et autres ouvrages évoquant ce sujet a été recensé : au total, en 1970, 647 articles traitant de l'inhibition sont dénombrés [21].

### **I.3.2. Définition**

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

Selon la norme ISO 8044, un inhibiteur est une "substance chimique ajoutée au système de corrosion à une concentration choisie pour son efficacité ; celle-ci entraîne une diminution de la vitesse de corrosion du métal sans modifier de manière significative la concentration d'aucun agent corrosif contenu dans le milieu agressif " [22].

La définition d'un inhibiteur de corrosion n'est pas unique, néanmoins celle retenue par la "National Association of Corrosion Engineers (NACE)" est la suivante : "un inhibiteur est une substance qui retarde la corrosion lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration" [23].

### **I.3.3. Propriétés de l'inhibiteur**

Un inhibiteur de corrosion doit abaisser la vitesse de corrosion du métal tout en conservant les caractéristiques physico-chimiques de ce dernier. Il doit être non seulement stable en présence des autres constituants du milieu, mais également ne pas influencer sur la stabilité des espèces contenues dans ce milieu. Un inhibiteur est définitivement reconnu comme tel s'il est stable à la température d'utilisation et efficace à faible concentration. Il peut être utilisé en vue d'une protection permanente ou plus couramment en vue d'une protection temporaire : durant une période où la pièce est particulièrement sensible à la corrosion (stockage, décapage, nettoyage,...) ou encore lorsque la pièce est soumise à des usinages très sévères comme le perçage, forage, filetage [24]. Un inhibiteur doit être compatible avec les normes de non toxicité [25]. Avec les exigences environnementales, il est recommandé des produits verts qui ne sont



pas nocifs pour l'environnement, ces produits sont biodégradables. Enfin, un inhibiteur doit être peu onéreux [26].

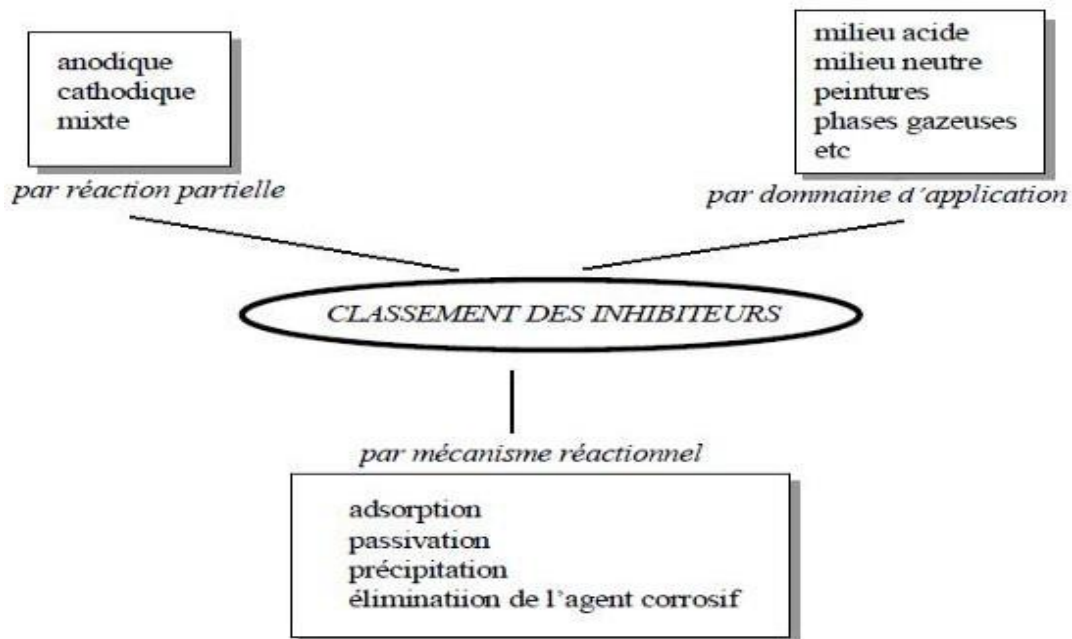
#### **I.3.4. Utilisation des inhibiteurs**

Bien que leur utilisation puisse être théoriquement envisagée dans la plupart des cas de corrosion (avec, comme principales limitations, un volume trop important du milieu corrosif ou l'impossibilité éventuelle d'y incorporer des additifs), les inhibiteurs ont plusieurs domaines traditionnels d'application [27] :

- Le traitement des eaux (eaux sanitaires, eaux de procédés industriels, eaux de chaudières, etc.).
- L'industrie du pétrole : forage, extraction, raffinage, stockage et transport ; à tous les stades de cette industrie, l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion est primordiale pour la sauvegarde des installations.
- La protection temporaire des métaux, que ce soit pendant le décapage acide, le nettoyage des installations ou le stockage à l'atmosphère (inhibiteurs volatils, incorporation aux huiles et graisses de protection temporaire) ou pour le traitement des huiles de coupe.
- L'industrie des peintures sur métaux où les inhibiteurs sont des additifs assurant la protection anticorrosion des métaux.

#### **I.3.5. Les classes d'inhibiteurs**

Il existe plusieurs possibilités de classer les inhibiteurs, celles-ci se distinguant les unes des autres de diverses manières (figure I.7). Des classements simples peuvent être proposés [19] :



**Figure I.7.** Classement des inhibiteurs de corrosion [28].

- Soit à partir de la formulation des produits (inhibiteurs organiques ou minéraux),
- Soit à partir de leur mécanisme d'action électrochimique (inhibiteurs cathodiques, anodiques ou mixtes),
- Soit à partir de leurs mécanismes d'interface et principes d'action (adsorption à la surface du métal et/ou formation d'un film protecteur) [28].

### **I.3.5.1. Par domaine d'application**

Dans la classification relative au domaine d'application, on peut distinguer les inhibiteurs de corrosion utilisés en milieux aqueux, organiques ou gazeux. Ceux utilisés en milieux aqueux sont choisis en fonction du PH du milieu : en milieu acide, ils sont utilisés afin d'éviter l'attaque chimique de l'acier lors d'une opération de décapage ou de détartrage et en milieu neutre/alcalin, ils sont souvent utilisés pour protéger les conduites des circuits de refroidissement. Les inhibiteurs utilisés en milieu organique sont incorporés dans les lubrifiants pour moteurs, dans l'essence ou dans les peintures. Les inhibiteurs en phase gazeuse sont employés pour protéger les objets métalliques pendant leur transport et stockage. Pour cela, des composés organiques ayant une pression de vapeur élevée sont souvent utilisés [29].

Dans la classification relative à la formulation des produits, on peut distinguer les inhibiteurs organiques et les inhibiteurs minéraux.

### ➤ Les inhibiteurs organiques

Les molécules organiques sont promises à un développement plus que certain en termes d'inhibiteur de corrosion : leur utilisation est actuellement préférée à celles 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 atome servant de centre actif pour leur fixation sur le métal tel que l'azote (amines, ammoniums quaternaires, amides, imidazolines, triazoles...), l'oxygène (alcools acétyléniques, carboxylates, oxadiazoles...), le soufre (dérivés de la thiourée, mercaptans, sulfoxydes, thiazoles...) ou le phosphore (phosphonates). L'une des limitations dans l'utilisation de ces produits peut être l'élévation de température, les molécules organiques étant souvent instables à chaud [12].

### ➤ Les inhibiteurs minéraux

Les molécules minérales sont utilisées le plus souvent en milieu proche de la neutralité, voire en milieu alcalin, et plus rarement en milieu acide. Les produits se dissocient en solution et ce sont souvent leurs produits de dissociation qui assurent les phénomènes d'inhibition (anions ou cations). Les cations inhibiteurs sont essentiellement  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Zn}^{2+}$  et ceux qui forment des sels insolubles avec certains anions tels que  $\text{OH}^-$ .

Les principaux anions inhibiteurs sont les oxo-anions de type  $\text{XO}_4^{n-}$  tels les chromates, molybdates, phosphates, silicates..., [30-32]. 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.

#### **I.3.5.2. Par réaction partielle (les mécanismes d'action électrochimique)**

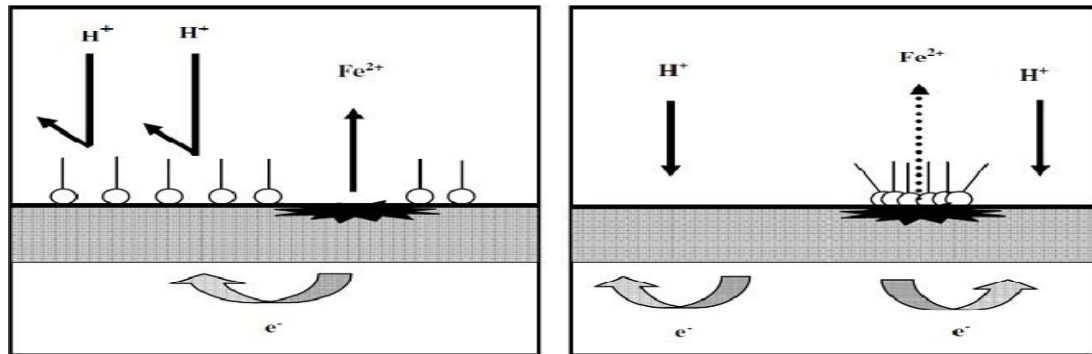
La corrosion peut être déclenchée en présence d'une cellule composée d'anode, de cathode, d'un électrolyte et d'un conducteur électrique.

L'ajout de l'inhibiteur de corrosion doit ralentir la corrosion par :

- La diminution de la polarisation anodique (inhibiteur anodique ou anionique).
- La diminution de la polarisation cathodique (inhibiteur cathodique ou cationique).
- L'augmentation de la résistance électrique par la formation d'un dépôt sur la surface du métal [30].

L'inhibiteur de corrosion forme une couche barrière sur la surface métallique, 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 de l'oxygène en milieu neutre aéré ou la réduction du proton  $H^+$  en milieu acide) ; ces mécanismes sont présentés dans la figure I.8.



**a- Blocage des sites cathodiques**

**b- Blocage des sites anodiques**

**Figure I.8.** Formation des couches barrières en milieu acide [32].

#### ➤ Les inhibiteurs anodiques

Les inhibiteurs anodiques sont très nombreux. Ce sont des substances inorganiques comme les orthophosphates, silicates, chromates. Leur mode d'action consiste à élever la valeur du potentiel de corrosion du matériau afin de l'amener à une valeur pour laquelle il y a formation d'un film passif protecteur sur l'anode.

Même si les inhibiteurs anodiques sont très efficaces et souvent utilisés, ils ont généralement une propriété indésirable: si la teneur en inhibiteur est/ou devient progressivement abaissée, la surface métallique n'est plus entièrement couverte, et elle fonctionne comme anode, obtenant ainsi une combinaison dangereuse, une petite anode et une grande cathode, conduisant à la corrosion par piqûres [34].

#### ➤ Les inhibiteurs cathodiques

L'action de ces inhibiteurs se traduit par une diminution de la vitesse de la réaction cathodique et donc par un déplacement du potentiel de corrosion vers des valeurs moins nobles. Ce sont généralement des cations qui peuvent migrer vers la surface cathodique, où ils précipitent sous formes de sels basiques ou d'hydroxydes, formant des films adhérents et compacts. Les inhibiteurs cathodiques incluent des combinaisons de zinc, de nickel, de magnésium, des phosphates alcalins.... [34].

➤ **Inhibiteurs mixtes**

Les inhibiteurs de corrosion qui augmentent la résistance ohmique de l'électrolyte sont considérés, dans certains cas, comme inhibiteurs filmant (anodique et cathodique).

La résistance de la solution augmente suite à la formation d'un film à la surface du métal.

Lorsque le film est déposé sélectivement sur la surface anodique, le potentiel de corrosion se déplace vers des valeurs positives. Dans le cas où le film est déposé à la surface cathodique, le potentiel de corrosion balance vers des valeurs négatives [35].

Dans le cas de la formation d'un film sur les surfaces anodiques et cathodiques, le déplacement du potentiel de corrosion est du côté de la tendance prédominante.

Les inhibiteurs mixtes diminuent la vitesse des deux réactions partielles mais modifient peu le potentiel de corrosion [35].

**I.3.5.3. Par mécanisme réactionnel (adsorption ou formation de film)**

Dans la classification liée au mécanisme réactionnel mis en jeu en fonction de leur mode d'action, on peut distinguer deux types d'inhibiteurs :

➤ **Adsorption des molécules inhibitrices à la surface métallique**

La corrosion peut ralentir suite à l'adsorption d'un inhibiteur à la surface du métal. Le degré d'inhibition dépend alors de l'équilibre entre espèces dissoutes et adsorbées. L'adsorption est le mode d'action des inhibiteurs organiques, elle résulte de l'existence des forces de Van Der Waals entre l'inhibiteur et le métal [31].

➤ **Formation d'un film intégrant les produits de dissolution du substrat**

Cette forme d'inhibition, appelée inhibition d'interphase traduit la formation d'un film tridimensionnel entre le substrat corrodé et les molécules d'inhibiteur.

Les inhibiteurs d'interphase ne sont pas uniquement adsorbés aux interfaces (Métal/oxyde) et (oxyde/électrolyte), mais sont également incorporés dans les couches barrières (formation de complexes). Les molécules inhibitrices d'interphase forment des réseaux homogènes, denses, de bonne stabilité et elles se caractérisent par une faible porosité [36].



## I.4. Huile essentielle de lavande (*Lavandula Officinalis*)

### I.4.1. Définition

On définit les huiles essentielles par des substances odorantes et volatiles, extraite d'un végétal sous forme liquide. Elle provient d'une sécrétion naturelle de produits volatils élaborée par certains végétaux et contenue dans les cellules de la plante. Selon l'huile désirée, on prendra tout ou partie d'une plante spécifique pour en extraire l'essence aromatique très volatiles. Elles sont solubles dans l'huile et dans l'alcool, mais pas dans l'eau. Les huiles essentielles se définissent par :

- Leur nom latin qui précise l'espèce botanique et évite les confusions.
- La partie ou organe dont est tirée l'huile essentielle : racines, feuilles, fleurs, graines.
- Son mode d'obtention : distillation à la vapeur d'eau ou expression.
- Le chémotype ou principe actif caractéristique qui donne les effets physiologiques majeurs.



Figure I.9. Huile essentielle de lavande [37].

### I.4.2. Composition chimiques de l'huile essentielle de lavande

Les bienfaits de lavande sont connus depuis des millénaires, et son huile essentielle est la plus utilisée en aromathérapie. Son action bienfaisante est en majeure partie expliquée par sa grande proportion en acétate linalyle et linalol. Ces deux chémotypes ont notamment des effets régulateurs sur les neurotransmetteurs, et agissent donc sur le cerveau, le système hormonal et le système immunitaire. Elle a un pouvoir rééquilibrant extraordinaire car elle agit sur le psychisme, et tempère les extrêmes. De par son effet régulateur, elle est aussi efficace contre les troubles dépressifs et les angoisses, le stress, l'émotivité et les peurs. Elle peut être stimulante, mais aussi calmer les nerfs, et faciliter l'endormissement. Elle a un effet harmonisant sur le système cardiovasculaire et sur la tension [38-43].

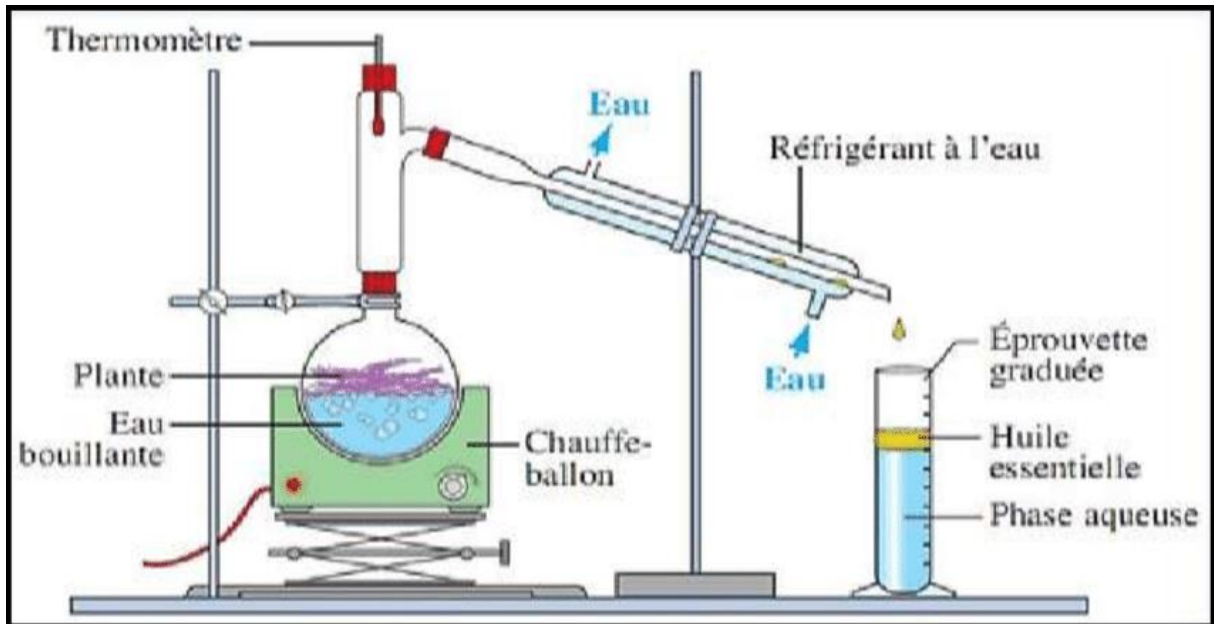
**Tableau I.1.** Composition chimique de l'huile de lavande (*Lavandula Officinalis*)

Huile essentielle de lavande	Acétate de linalyle	40 - 50 %
	1,8-cinéole	1,50%
	Bêta caryophyllène-camphène	8 %
	Ocimène	7 - 13%
	Linalol	30 - 40%

### I.4.3. Mode d'extraction

#### I.4.3.1. Extraction par hydrodistillation

Il s'agit de la méthode la plus simple et de ce fait-là plus anciennement utilisée. Le matériel végétal est immergé directement dans un alambic rempli d'eau placé sur une source de chaleur. Le tout est ensuite porté à ébullition. Les vapeurs hétérogènes sont condensées dans un réfrigérant et l'huile essentielle se sépare de l'hydrolat par simple différence de densité. L'huile essentielle étant plus légère que l'eau (sauf quelques rares exceptions), elle surnage au-dessus de l'hydrolat [44].

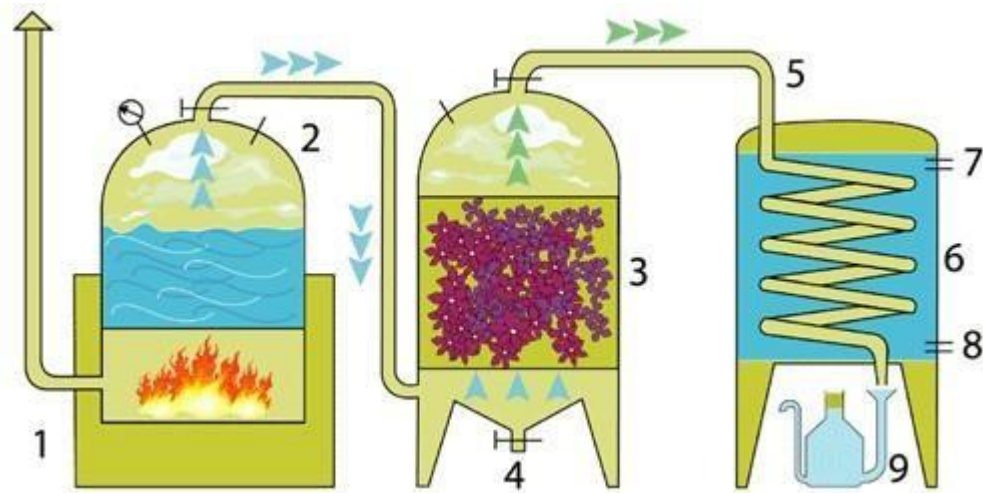


**Figure I.10.** Montage d'extraction par Hydrodistillation.

#### I.4.3.2. Extraction par entraînement à la vapeur d'eau

A la différence de l'hydro distillation, cette technique ne met pas en contact direct l'eau et la matière végétale à traiter. De la vapeur d'eau fournie par une chaudière traverse la matière végétale située au-dessus d'une grille. La vapeur endommage la structure des cellules végétales et libère ainsi les molécules volatiles pour former un mélange « eau + huile essentielle ».

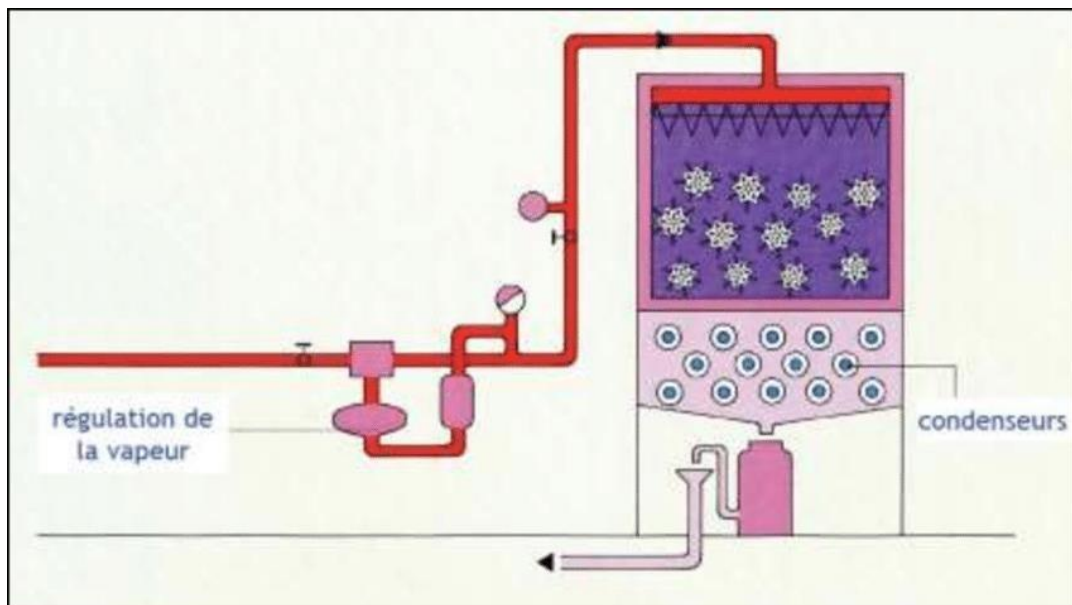
Le mélange est ensuite véhiculé vers le condenseur et l'essencier avant d'être séparé en une phase aqueuse et une phase organique "l'huile essentielle". L'absence de contact direct entre l'eau et la matière végétale, puis entre l'eau et les molécules aromatiques évite certains phénomènes d'hydrolyse ou de dégradation pouvant nuire à la qualité de l'huile [45].



**Figure I.11.** La distillation par entraînement à la vapeur d'eau.

#### I.4.3.3. Hydrodiffusion

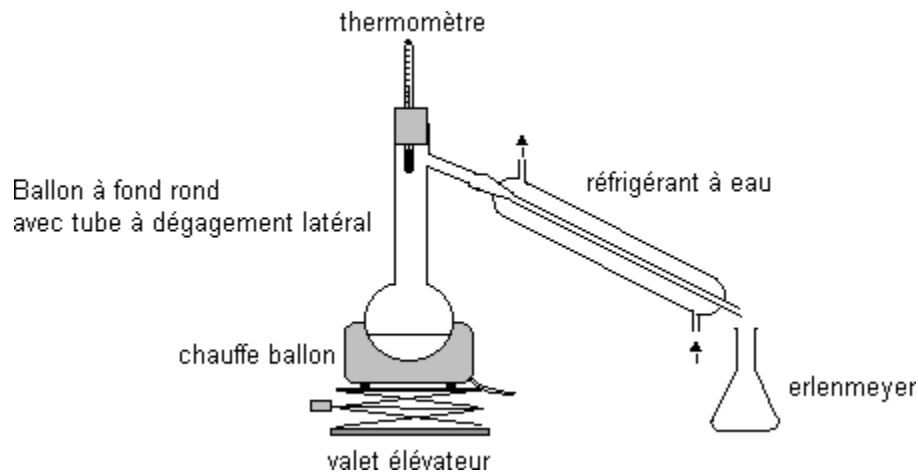
Elle consiste à pulvériser de la vapeur d'eau à travers la masse végétale, du haut vers le bas. Ainsi le flux de vapeur traversant la biomasse végétale est descendant contrairement aux techniques classiques de distillation dont le flux de vapeur est ascendant. L'avantage de cette technique est traduit par l'amélioration qualitative et quantitative de l'huile récoltée, l'économie de temps, de vapeur et d'énergie [46].



**Figure I.12.** Montage d'extraction par hydrodiffusion.

#### I.4.3.4. L'extraction à l'aide d'un solvant comme l'éther ou l'hexane

Certains organes de végétaux, en particulier les fleurs, sont trop fragiles et ne supportent pas les traitements par entraînement à la vapeur d'eau et l'hydro-distillation. C'est le cas des fleurs de jasmin, d'œillet [47]. Il est donc important d'utiliser la méthode d'extraction par des solvants.



**Figure I.13.** Extraction à l'aide d'un solvant.

#### I.4.3.5. Extraction par micro-ondes sous vide

Dans ce procédé la plante est chauffée sélectivement par un rayonnement de micro-ondes dans une enceinte dont la pression est réduite de l'huile essentielle est entraînée dans le mélange isotopique formé avec la vapeur d'eau propre à la plante traitée. Très rapide, peu consommateur d'énergie ce procédé fournit un produit de qualité et de quantité supérieur à celle obtenue par l'hydrodistillation [47].

#### I.4.3.6. Extraction par les corps gras

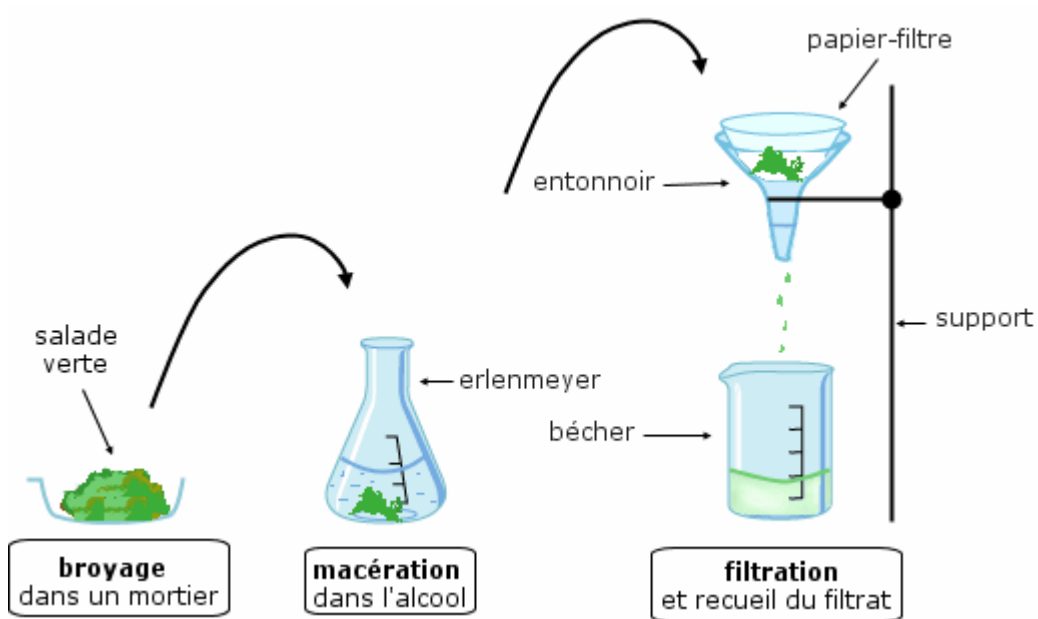
La méthode d'extraction par les corps gras est utilisée en fleurage dans le traitement des parties fragiles de plantes telles que les fleurs, qui sont très sensibles à l'action de la température. Elle met à profit la liposoluble des composants odorants des végétaux dans les corps gras. Le principe consiste à mettre les fleurs en contact d'un corps gras pour le saturer en essence végétale. Le produit obtenu est une pommade florale qui est ensuite épuisée par un solvant qu'on élimine sous pression réduite. Dans cette technique, on peut distinguer l'enfleurage où la saturation se fait par diffusion à la température



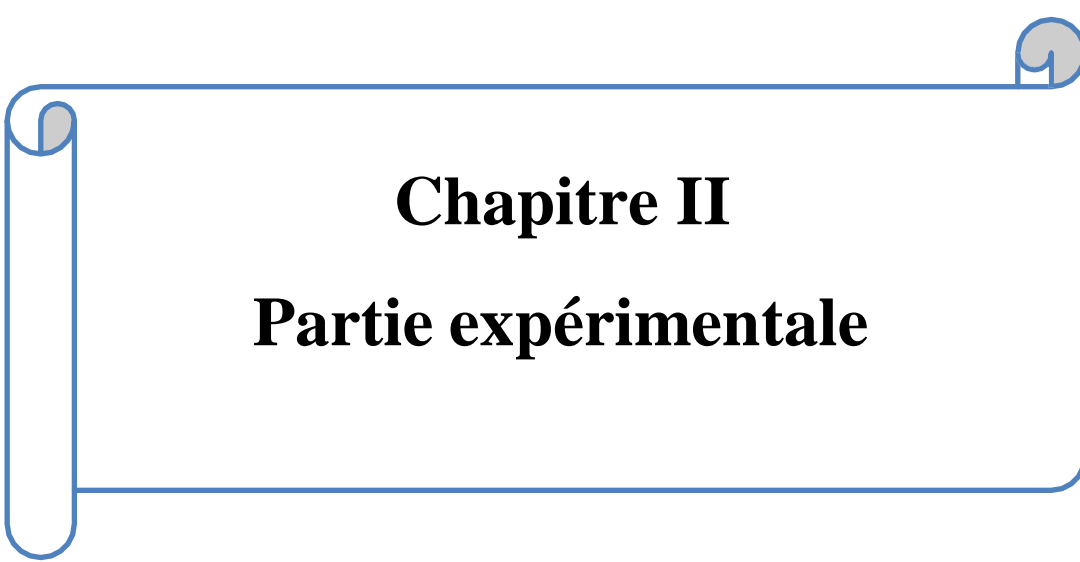
ambiante des arômes vers le corps gras et la digestion qui se pratique à chaud, par immersion des organes végétaux dans le corps gras [48].

#### I.4.3.7. La macération

Une substance séjourne à froid dans un solvant organique pour en extraire les constituants solubles dans ce solvant.



**Figure I.14.** Macération dans un solvant organique.



**Chapitre II**  
**Partie expérimentale**

## II.1. Introduction

Ce chapitre étant consacré à l'étude de l'effet inhibiteur des composés organiques contenu dans un extrait d'une plante de Lavande « *Lavandula Officinalis* » dans un milieu acide. Pour mener cette étude, et afin d'estimer la vitesse de corrosion, nous avons utilisé une technique expérimentale gravimétrique appelée la technique de la perte de masse. Cette dernière constitue une approche simple et fiable pour étudier l'inhibition de la corrosion d'un métal dans une solution agressive. Elle présente l'avantage d'être d'une mise en œuvre directe et de ne pas nécessiter un appareillage important [49].

Lors de cette étude nous avons choisi comme système électrochimique l'acier au carbone X60 et une solution d'acide chlorhydrique (1M). Nous avons étudié l'influence de la concentration et la température sur l'efficacité d'inhibition en milieu HCl. L'effet du temps d'immersion sur le comportement de l'inhibiteur a également été étudié. Par ailleurs, nous avons calculé et commenté certaines valeurs thermodynamiques et cinétiques afin de prévoir le mécanisme du processus de l'inhibition de la corrosion de l'acier dans le milieu considéré. L'isotherme d'adsorption a été tracée afin de savoir le mode d'adsorption de nos composés à l'interface métal/solution.

## II.2. Méthode de la perte de masse

Le principe de cette méthode repose sur la mesure de la perte de masse  $\Delta m$  subie par un échantillon de surface  $S$ , pendant le temps  $t$  d'immersion dans une solution corrosive maintenue à une température constante [50].

La vitesse de corrosion de l'acier dans le milieu considéré est alors donnée par la relation suivante :

$$V_{\text{corr}} = \frac{\Delta m \text{ (mg)}}{S \times t \text{ (cm}^2 \cdot \text{h)}} \dots\dots\dots \text{(I.1)}$$

Où ( $\Delta m = m_0 - m_1$ ) représentent la perte de poids de l'acier en absence et en présence de l'inhibiteur.

L'efficacité inhibitrice donnée est la moyenne de deux essais effectués dans les mêmes conditions pour chaque concentration. Elle est donnée par la relation suivante :

$$P(\%) = \frac{V_{\text{corr}} - V'_{\text{corr}}}{V_{\text{corr}}} \times 100 \dots\dots\dots \text{(II.2)}$$

Où  $V_{\text{corr}}$  et  $V'_{\text{corr}}$  représentent respectivement la vitesse de corrosion de l'acier après immersion en absence et en présence de l'inhibiteur testé.

### II.3. Avantages et inconvénients de la méthode gravimétrique

Cette méthode présente les avantages suivants :

- Mesures directes de la vitesse de corrosion et par conséquent l'efficacité du produit testé,
- Matériel simple,
- Facilité de mise en œuvre,
- Ne nécessite pas plusieurs hypothèses.

On peut citer quelques inconvénients liés aux mesures gravimétriques :

- La vitesse de corrosion mesurée est une vitesse moyenne calculée à partir de trois essais, la probabilité d'erreurs est due soit à l'utilisateur ou bien à l'appareillage utilisé ;
- L'adhérence des produits de corrosion nécessite un décapage qui peut provoquer une attaque du métal ;
- La reproductibilité n'est pas toujours appréciable (son emploi impose les conditions d'une dissolution générale en l'absence de la formation d'une couche épaisse au cours de la corrosion ou de son inhibition) ;
- Elle ne permet pas l'approche des mécanismes mis en jeu lors de la corrosion.

### II.4. Dispositifs utilisés

- Un bain marie a été utilisé pour le maintien de l'électrolyte à la température désirée.
- Des béchers de 250ml.
- Des fils isolés utilisés comme support des échantillons.
- Des papiers abrasifs de granulométrie (SiC100 - SiC2000) utilisés pour le polissage des échantillons.
- Une balance analytique de précision.
- Papier absorbant pour sécher les pièces.
- Les échantillons en acier X60.

## II.5. L'acier au carbone utilisé

En raison de leurs bonnes propriétés mécaniques et de leur faible coût, les aciers au carbone sont des matériaux qui sont largement utilisés dans l'industrie. Dans ce contexte, ces matériaux sont généralement soumis à de nombreuses sollicitations extérieures et agressives les rendant de ce fait, vulnérables face à la corrosion. L'étude de l'inhibition de la corrosion acide de ces matériaux, constitue donc un domaine de recherche très attractif en raison de la large utilisation des solutions acides dans l'industrie, notamment dans les bains de décapage des métaux et pour le nettoyage des installations industrielles.

Dans ce travail, nous avons utilisé l'acier au carbone de nuance X60 dont la composition chimique est donnée dans le tableau suivant.

**Tableau II.1.** Composition chimique de l'acier X60 en pourcentage massique.

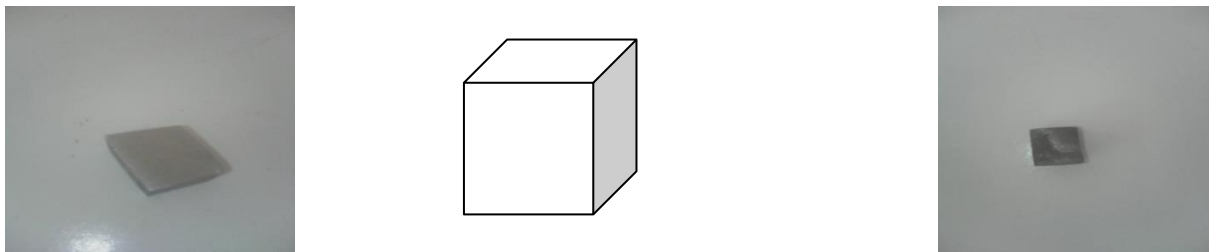
Eléments	C	Mn	Si	S	P	Cr	Mo	Ni
Teneur en (Wt%)	0.57-0.65	0.4-0.7	0.15-0.35	0.035	0.035	/	/	/

## II.6. Conditions expérimentales dans le laboratoire

### a. Préparation des échantillons

#### ➤ Découpage

Les échantillons utilisés dans nos essais, ont été découpés de différente dimension  $L_x H_y$  données sur la figure suivante :

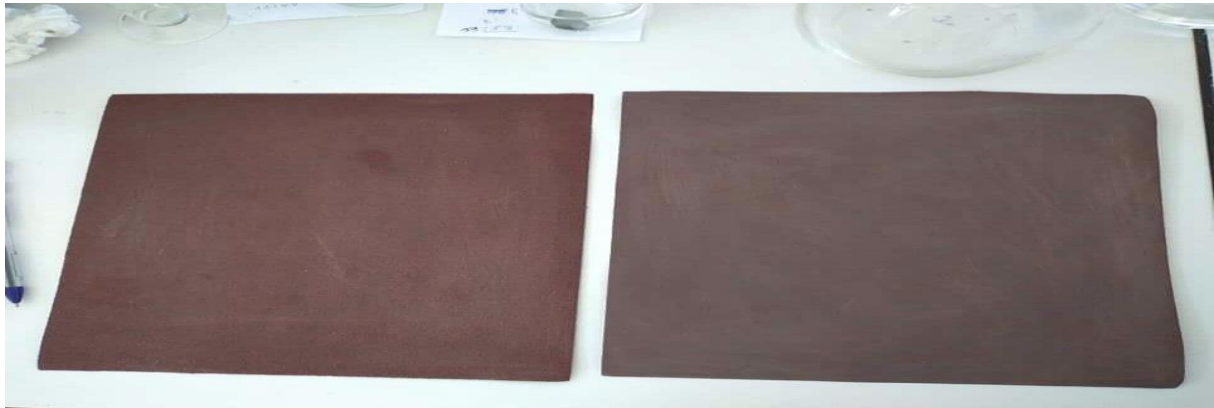


**Figure II.1.** Les formes des échantillons.



➤ **Polissage**

Afin d'assurer la reproductibilité et la validité des essais, il est nécessaire au préalable d'effectuer une bonne préparation de la surface du substrat. De ce fait, les échantillons sont polies mécaniquement, avec du papier abrasif au carbure de silicium jusqu'à une granulométrie de 1200, rincées à l'eau distillée et dégraissées à l'acétone.



**Figure II.2.** Papier utilisé dans le polissage.

**b. Préparation des milieux corrosifs**

A partir d'une solution concentrée d'acide chlorhydrique (mère) on a préparé une solution fille de concentration 1M.

**Tableau II.2.** Les propriétés physique-chimiques d'acide chlorhydrique.

Formule brute	HCl
Densité	1,180 g/cm <sup>3</sup>
Masse molaire	36,5 g /mol
Pureté	35,5

Méthode de calcul:

$$100 \longrightarrow 35,5$$

$$1180 \longrightarrow X$$

$$X = 418,6 \text{ g/L}$$

$$1M \longrightarrow 36,5$$

$$X \longrightarrow 418,6 \text{ g/L}$$

$$C = 11,47 \text{ mol/L}$$

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$V_1 = \frac{1 * 1}{11,47} = 0,0871 \text{ L}$$

$$V_1 = 87,1 \text{ mL}$$

On prend 200 mL de l'eau distillée dans une fiole et on rajoute 87,1 mL d'HCl de 35,5% et après on complète le volume jusqu'à 1000 mL de l'eau distillée.

### c. Préparation de la solution d'inhibiteur

L'inhibiteur vert étudié est une huile essentielle commerciale brute de pureté 100% extraite de la plante de lavande (*Lavandula Officinalis*) dissous dans un mélange 70% alcool et 30% eau.

L'effet inhibiteur de lavande a été étudié dans une solution de HCl (1M). Les solutions sont naturellement aérées ; elles sont agitées au moyen d'un barreau aimanté entraîné par un agitateur magnétique.

### d. Procédure expérimentale

Une fois la préparation de l'état de surface est achevée on fait 3 expériences.

- L'échantillon est pesé et introduit immédiatement dans un bécher. La température de ce dernier a été maintenue constante à 25°C ; Ces échantillons sont immergés dans une position inclinée dans des petits béchers contenant du HCl (1M), sans addition de l'inhibiteur, après une durée d'immersion bien déterminée (1h ; 2h ; 4h ; 20h ; 24h ; 46h) la pièce est lavée, séchée et enfin pesée.



**Figure II.3.** L'acier X60 dans le milieu acide HCl sans l'inhibiteur.

- Dans la deuxième expérience en ajoutant l'huile d'inhibiteur Lavandula directement à la solution corrosive à des concentrations différentes de 0,2g/L ; 0,4g/L ; 0,8g/L ; 1,6g/L et 2,5 g/L.



**Figure II.4.** Acier X60 dans HCl (1M) en présence de l'inhibiteur à différentes concentrations.

- Dans la troisième expérience nous avons reproduit l'expérience précédente à des températures différentes maintenues constantes grâce à un bain thermostaté (20°C ; 30°C ; 40°C ; 50°C et 60°C) pendant 4 heures.



**Figure II.5.** Bain marie Thermostaté.



**Chapitre III**  
**Résultats et discussions**

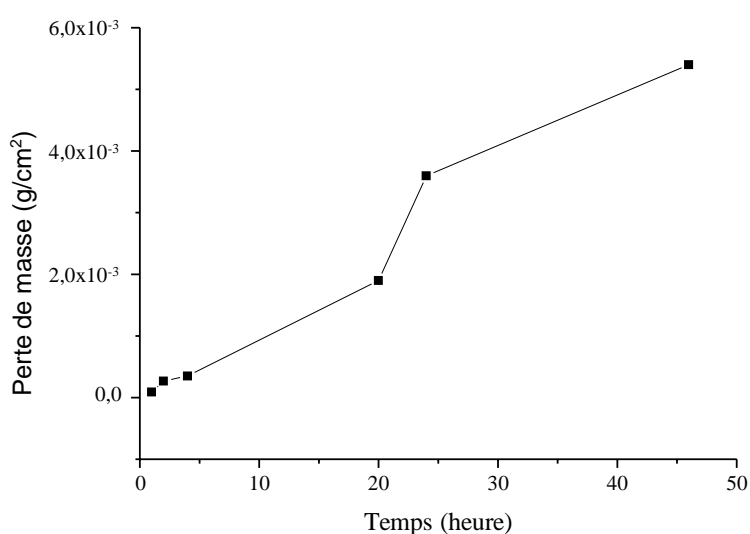
### III.1. Effet du temps de l'immersion sur la corrosion de l'acier X60 dans l'acide HCl (1M)

Parmi les facteurs qui ont un effet sur la vitesse de corrosion de l'acier, nous citons le facteur du temps d'immersion, donc pour cela nous avons effectué des mesures gravimétriques de l'acier X60 en milieu HCl à concentration (1M) à différents temps d'immersion (1h ; 2h ; 4h ; 20h ; 24h ; 46h).

Le tableau donne les valeurs de la perte de masse ( $\Delta m$ ) de l'acier X60.

**Tableau III.1.** Les valeurs expérimentales de perte de masse en milieu acide HCl (1M) en absence d'inhibiteur.

Temps	1h	2h	4h	20h	24h	46h
S (cm <sup>2</sup> )	6,6	5,4	6	6,8	6,8	7,26
m avant (g)	8,2160	8,2637	8,6555	11,0583	10,9714	12,1664
m après (g)	8,2154	8,2622	8,6534	11,0452	10,9467	12,1271
$\Delta m$	0,0006	0,0015	0,0021	0,0131	0,0247	0,0393
$\Delta m/S(g/cm^2)$	$9,0909 \cdot 10^{-5}$	$2,777 \cdot 10^{-4}$	$3,50 \cdot 10^{-4}$	$1,926 \cdot 10^{-3}$	$3,6324 \cdot 10^{-3}$	$5,4132 \cdot 10^{-3}$



**Figure III.1.** Evolution de la perte de masse en fonction de temps dans le milieu acide HCl (1M).



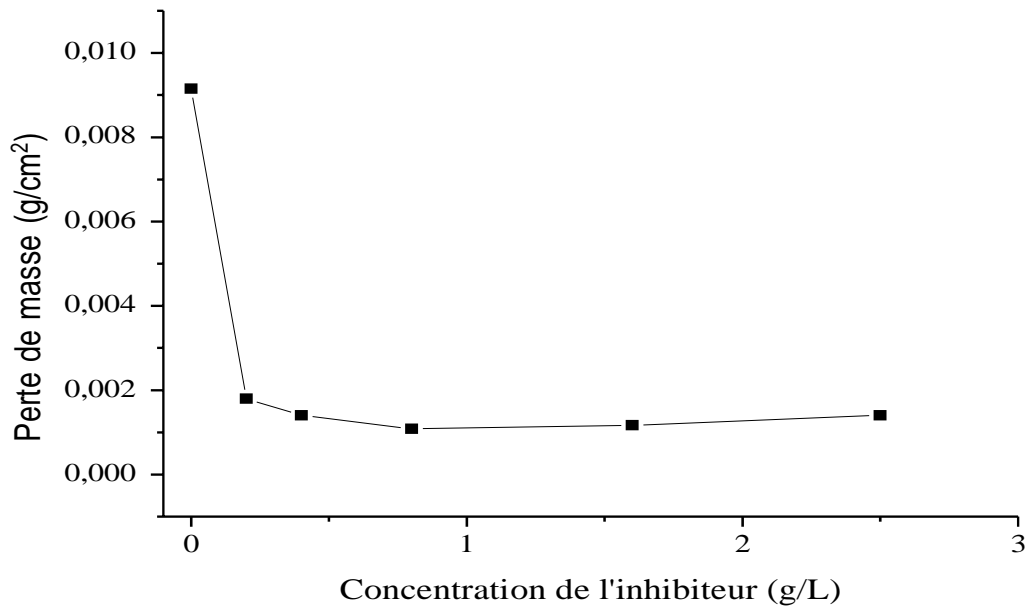
L'analyse de la figure précédente nous permet de constater que la perte de masse de l'acier X60 en milieu de l'acide chlorhydrique (1M) augmente rapidement avec le temps d'immersion, ce qui signifie qu'il y a une dissolution continue du métal dans ce milieu.

### III.2. Etude de l'influence de la concentration de l'inhibiteur sur la corrosion de l'acier dans HCl (1M)

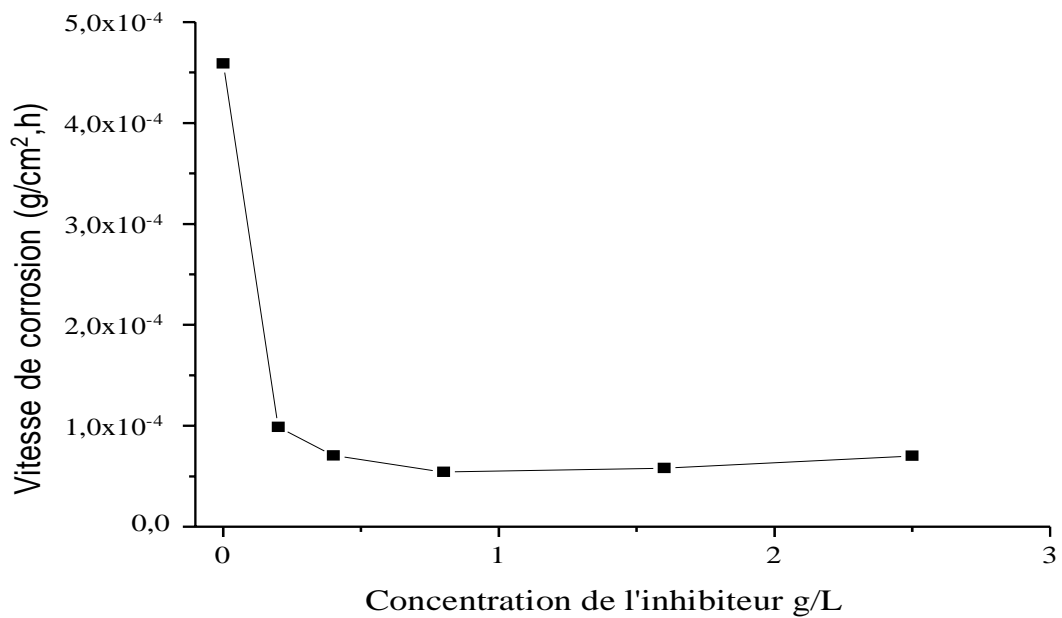
Les évolutions de la perte de masse et la vitesse de corrosion ont été étudiées en fonction de la variation des concentrations de l'inhibiteur dans le milieu d'acide chlorhydrique (1M). Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

**Tableau III.2.** Vitesses de corrosion du métal X60 en fonction de la concentration en inhibiteur sur une durée de 20h.

Concentration d'inhibiteur (g/L)	S (Cm <sup>2</sup> )	Le poids (g)			Vitesse de la corrosion (g/cm <sup>2</sup> .h)
		m <sub>avant</sub>	m <sub>après</sub>	$\Delta m / S$ (g/cm <sup>2</sup> )	
0	7,38	11,6149	11,5473	0,00915	$4,5799 * 10^{-4}$
0,2	5,4	8,5274	8,5167	0,00198	$9,9074 * 10^{-5}$
0,4	6,6	8,1053	8,0960	0,00140	$7,0454 * 10^{-5}$
0,8	6,71	9,6204	9,6131	0,00108	$5,4396 * 10^{-5}$
1,6	6,8	10,7838	10,7758	0,00117	$5,88 * 10^{-5}$
2,5	7,26	11,9250	11,9148	0,0014	$7,0248 * 10^{-5}$



**Figure III.2.** Evolution de la perte de masse en fonction des concentrations de l'HE de lavande en milieux acide.



**Figure III.3.** Evolution des vitesses de corrosion en fonction de la concentration de l'huile essentielle de lavande.

Les résultats obtenus relatifs à l'utilisation de l'huile essentielle de lavande comme inhibiteur de corrosion montrent que :

- ✚ La vitesse de corrosion a diminué lors de l'ajout de l'huile essentielle en comparant avec l'échantillon sans inhibiteur.
- ✚ La vitesse de corrosion diminue progressivement en fonction des concentrations jusqu'à atteindre une valeur minimale  $\Delta m = 0,00108 \text{ g/cm}^2$  de concentration optimale 0,8g/L ; La valeur minimale de la vitesse de corrosion de l'extrait de lavande a été évaluée à  $5,43.10^{-5} \text{ g/cm}^2.\text{h}$ .
- ✚ On peut conclure que l'huile essentielle de lavande possède d'excellentes propriétés inhibitrices de la corrosion de l'acier X60 dans HCl (1M), ce qui explique que l'adsorption des composés organiques présents dans l'huile, sur la surface de l'acier devient de plus en plus importante avec la concentration de l'inhibiteur. Cela conduit à la formation d'un film protecteur empêchant la dissolution de l'acier.

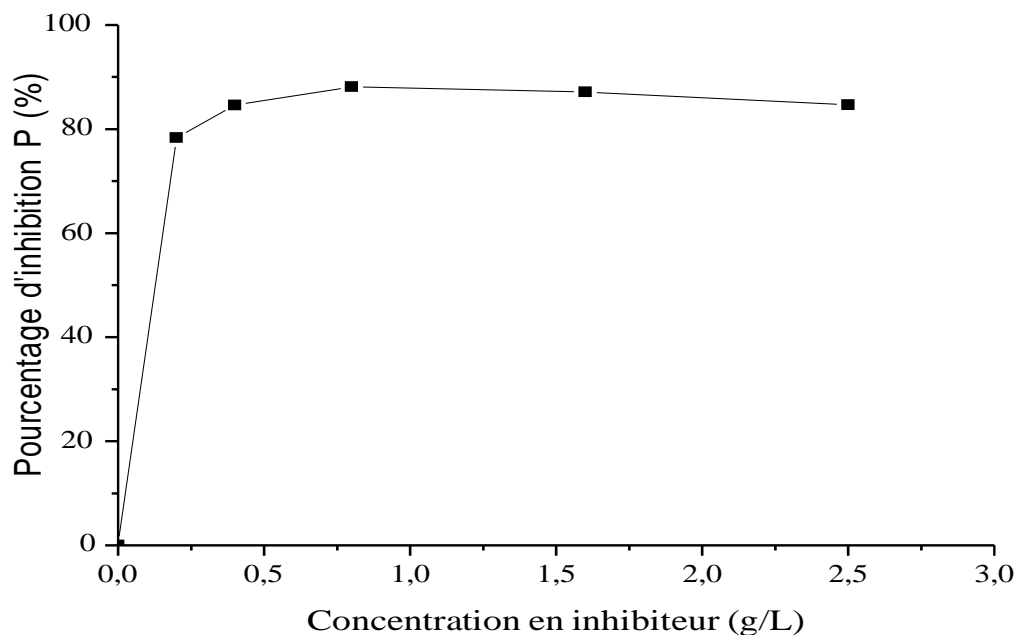
L'efficacité inhibitrice (P) de l'huile essentielle de lavande sur l'acier X60 en fonction de la concentration, a été calculée selon la formule suivante :

$$P(\%) = \frac{V_{\text{corr}} - V'_{\text{corr}}}{V_{\text{corr}}} \times 100$$

Les résultats sont reportés dans le tableau suivant :

**Tableau III.3.** L'efficacité inhibitrice de lavande sur la corrosion de l'acier X60 dans HCl (1M).

Concentration d'inhibiteur (g/l)	Efficacité (%)
0	/
0,2	78,36
0,4	84,61
0,8	<u>88,12</u>
1,6	87,16
2,5	84,66



**Figure III.4.** Evolution de l'efficacité inhibitrice de lavande sur la corrosion de l'acier X60.

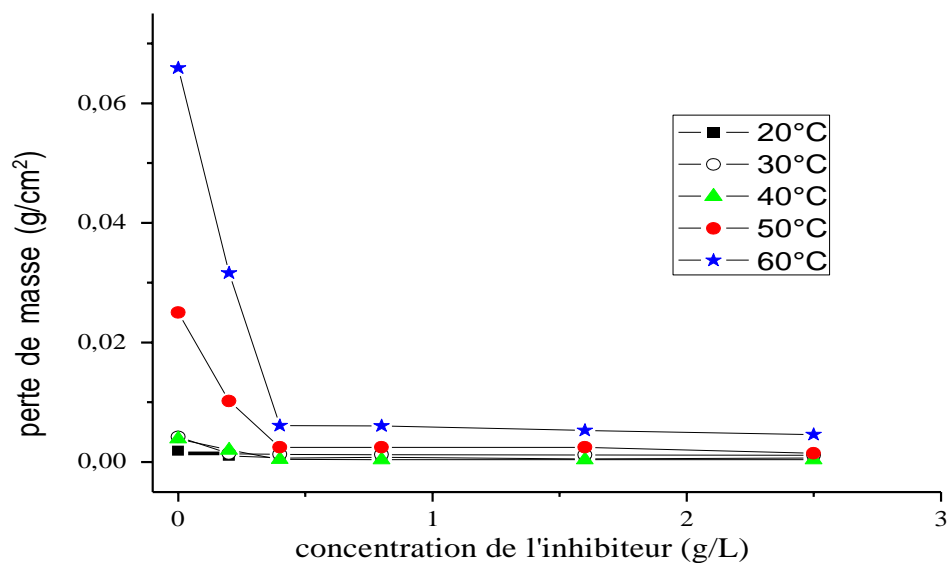
Nous remarquons que l'efficacité d'inhibitrice augmente avec l'augmentation de la concentration en inhibiteur pour atteindre une valeur maximale de 88,12% obtenue à une concentration 0,8 g/L.

### III.3. Etude de l'influence de la température sur l'efficacité de l'inhibiteur

La température est l'un des facteurs qui peuvent modifier à la fois le comportement des inhibiteurs et des substrats dans un milieu agressif. Les composés organiques ou les complexes formés peuvent se dissoudre plus facilement quand la température augmente. L'augmentation de la température peut ainsi provoquer un affaiblissement de la résistance à la corrosion de l'acier [51] ; Dans l'objectif d'examiner l'influence de ce paramètre sur la perte de masse d'un acier X60 nous avons réalisé des mesures gravimétriques pour des températures égales à 20°C ; 30°C ; 40°C ; 50°C et 60°C. Les résultats obtenus après 4h d'immersion sont récapitulés dans le tableau III.4.

**Tableau III.4.** Perte de masse de l'acier dans HCl (1M) en absence et en présence de l'huile essentielle de lavande à différentes températures.

Température (°C)	Concentration d'inhibiteur (g/L)	S (cm <sup>2</sup> )	m <sub>avant</sub> (g)	m <sub>après</sub> (g)	Perte de masse (g/cm <sup>2</sup> )
20	0	7,38	10,5648	10,4344	0,0176
	0,2	5,4	8,0694	8,0634	0,001
	0,4	6,6	7,8924	7,881	0,0006
	0,8	6,71	9,3656	9,3604	0,0007
	1,6	6,8	10,5268	10,5231	0,0005
	2,5	7,26	11,6821	11,6772	0,00067
30	0	7,38	11,4438	11,4126	0,0042
	0,2	5,4	8,4399	8,432	0,0014
	0,4	6,6	8,0401	8,0317	0,0012
	0,8	6,71	9,5240	9,5158	0,0012
	1,6	6,8	10,6919	10,6839	0,0011
	2,5	7,26	11,8356	11,8295	0,0084
40	0	7,38	11,4444	11,3288	0,0156
	0,2	5,4	8,4295	8,3862	0,008
	0,4	6,6	8,0176	8,0060	0,0017
	0,8	6,71	9,4940	9,4826	0,0016
	1,6	6,8	10,6612	10,6501	0,0016
	2,5	7,26	11,8076	11,7965	0,0015
50	0	7,38	11,2846	11,1001	0,025
	0,2	5,4	8,3644	8,3092	0,0102
	0,4	6,6	7,9856	7,9692	0,0048
	0,8	6,71	9,4600	9,4435	0,00459
	1,6	6,8	10,6251	10,6084	0,00455
	2,5	7,26	11,7713	11,7553	0,001460
60	0	7,38	11,0697	10,5833	<b>0.0659</b>
	0,2	5,4	8,2841	8,1134	0,0316
	0,4	6,6	7,9507	7,9101	0,0061
	0,8	6,71	9,4264	9,3858	0,006
	1,6	6,8	10,5905	10,5538	0,0053
	2,5	7,26	11,7361	11,7081	<b>0.0038</b>



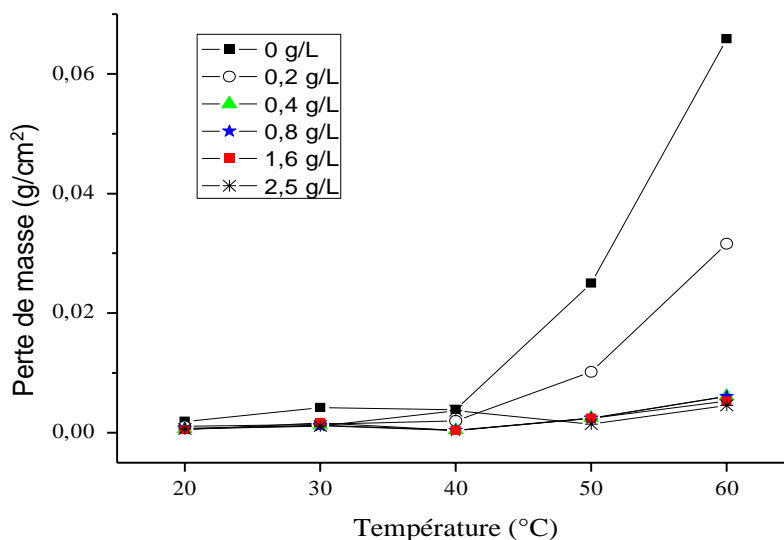
**Figure III.5.** Perte de masse de l'acier dans HCl (1M) en fonction de la concentration de l'huile essentielle de lavande à différentes températures.

La figure III.5 montre que la vitesse de corrosion exprimée par la perte de masse diminue avec l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur pour les différentes températures ce qui confirme que l'huile essentielle de lavande étudiée présente un effet bénéfique vis-à-vis la protection de l'acier dans le milieu HCl et cela quelque soit la température du milieu. Nous remarquons qu'à la température maximale de 60°C par exemple, la perte de masse est réduite à des valeurs comparables à celles obtenues à des températures plus basses. Cela laisse conclure que les composés organiques dans l'huile essentielle de lavande restent stables dans l'intervalle de température étudiée.

Ce résultat a été confirmé par le tracé de la perte de masse en fonction de la température, pour des concentrations différentes (figure III.6). La perte de masse maximale a été enregistrée en absence de l'inhibiteur est à une température de 60°C ; donc plus on augmente la température plus la corrosion est élevée ; ce qui prouve que la température a un effet négatif en augmentant la cinétique de la corrosion.

En présence de l'inhibiteur, la perte de masse est significativement abaissée même à des températures élevées. En absence de l'inhibiteur, la perte de masse est de 0,0659 g/L après 4 heures d'immersion dans l'acide HCl à 60°C tandis qu'en présence de 2,5 g/L de l'inhibiteur et dans les mêmes conditions, elle diminue pour atteindre la valeur de 0,0038 g/L.





**Figure III.6.** Perte de masse de l'acier dans HCl (1M) en fonction de la température à différentes concentrations de l'huile essentielle de lavande.

#### III.4. Effet de la température sur la vitesse de la corrosion

En général, la température a un effet important sur les phénomènes de corrosion : la vitesse de corrosion augmente lorsque la température augmente, et cette augmentation de température induit, de fait, des changements sur l'action des inhibiteurs. Le mécanisme d'inhibition peut être modifié aux températures élevées.

La relation qui lie la vitesse de corrosion et la température est donnée par l'équation d'Arrhenius [52-58]. Cette dernière illustre l'influence de la température sur la vitesse de corrosion.

$$V_{\text{corr}} = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \dots \dots \dots (III.1)$$

$V_{\text{corrosion}}$  : La vitesse de corrosion,

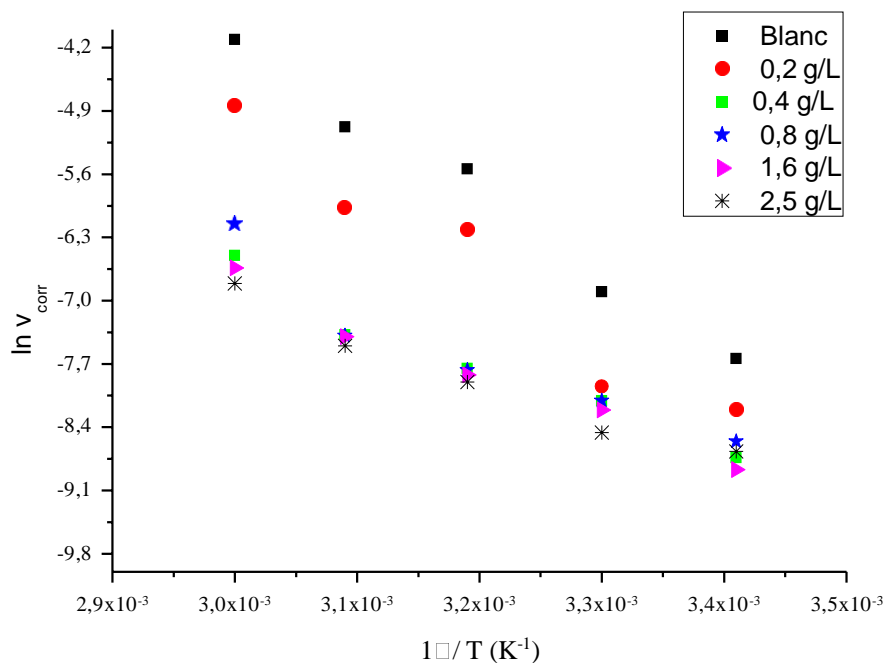
A : Le coefficient d'Arrhenius,

$E_a$  : L'énergie d'activation apparente,

R : La constante des gaz parfaits,

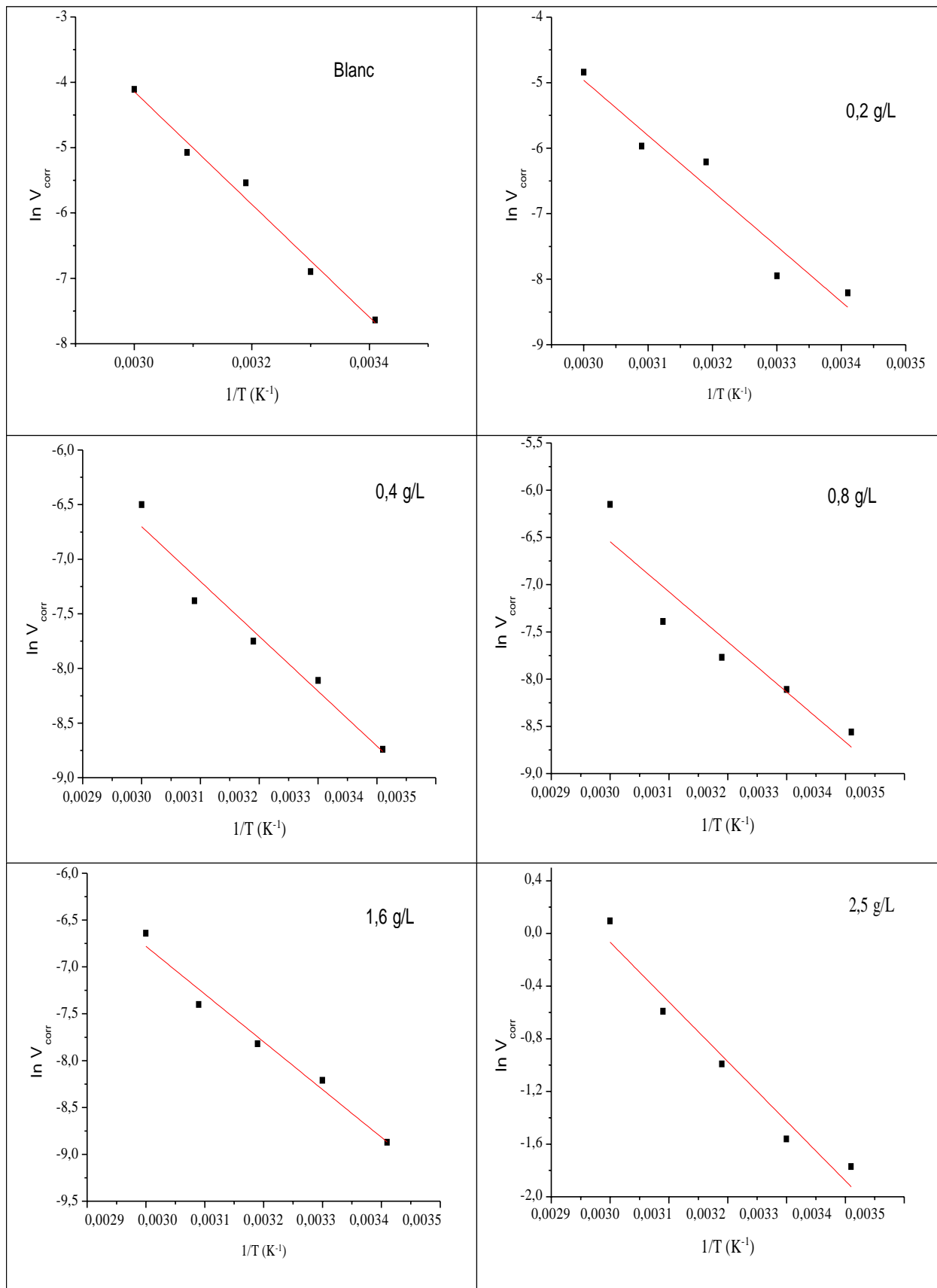
T : La température absolue.

Les courbes dans la figure (III.7) illustrent l'évolution de la variation de  $\ln V_{\text{Corrosion}}$  en fonction de l'inverse de la température exprimée en Kelvin.



**Figure III.7.** Tracés de  $\ln V_{\text{Corrosion}}$  en fonction de l'inverse de la température de l'acier X60 dans HCl (1M) à différentes concentrations d'inhibiteur.

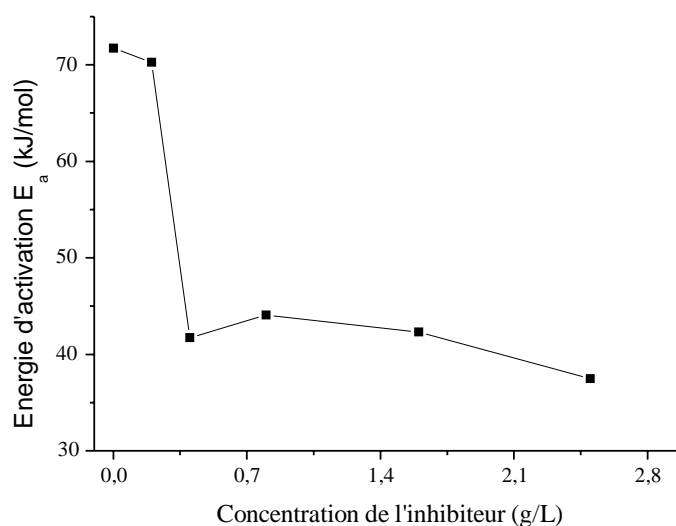
La figure (III.8) représente le tracé en coordonnées d'Arrhénius de la vitesse de corrosion de l'acier dans HCl en l'absence et en présence de l'huile essentielle de lavande. Selon l'équation d'Arrhénius, le calcul de la pente permet d'aboutir à la valeur de l'énergie d'activation. Les énergies d'activation calculées sont données dans le tableau (III.5).



**Figure III.8.** Droites moyennes d'Arrhénius de l'acier dans HCl (1M) en présence et en absence de l'inhibiteur.

**Tableau III.5.** Valeurs de l'énergie d'activation  $E_a$ , pour l'acier X60 dans HCl (1M) sans et avec ajout de l'inhibiteur à différente concentration (0,2g/L ; 0,4g/L ; 0,8g/L ; 1,6g/L et 2,5g/L).

Concentration de l'inhibiteur (g/L)	Energie d'activation $E_a$ (kJ/mol)
0	71,72
0.2	70,26
0.4	41,75
0.8	44,09
1.6	42,33
2.5	37.48



**Figure III.9.** Evolution de l'énergie d'activation  $E_a$  en fonction de la concentration de l'inhibiteur, pour l'acier X60 dans HCl (1M).

Généralement les interactions inhibiteur/métal peuvent être élucidées par l'utilisation de paramètres thermodynamiques. Radovici [59] a proposé un classement des inhibiteurs reposant sur la comparaison des énergies d'activation obtenues en leur présence ( $E_{ai}$ ) ou en leur absence ( $E_a$ ). Il distingue :

Les inhibiteurs pour lesquels  $E_{ai} > E_a$  s'adsorbent sur le substrat par des liaisons de natures électrostatiques (physisorption). Ce type de liaisons sensibles à la température ne permet pas de lutter efficacement contre la corrosion quand la température augmente.

Les inhibiteurs pour lesquels  $E_{ai} < E_a$  : ces inhibiteurs présentent, quant à eux, une augmentation du pouvoir protecteur avec la température. Les molécules organiques de l'inhibiteur s'adsorbent à la surface métallique par des liaisons fortes (chimisorption). Putilova et al. considèrent que l'augmentation du pouvoir protecteur avec l'augmentation de la température est due au changement de la nature de l'adsorption : à des faibles températures, l'inhibiteur est adsorbé physiquement tandis que la chimisorption est favorisée à haute température [60].

D'après les résultats obtenus, nous constatons que les énergies d'activation en présence de l'inhibiteur sont inférieures à celle correspondante à HCl (1M) seul. Cette diminution de l'énergie d'activation peut être attribuée à la chimisorption de cet inhibiteur sur la surface de l'acier [61].

### III.5. Isotherme d'adsorption

Il est noté que le mécanisme d'inhibition de la corrosion par les composés organiques est expliqué par leur adsorption de ces dernières à la surface du métal. Cependant, l'adsorption se distingue en trois types : la physisorption, l'adsorption chimique ou une adsorption mixte c'est-à-dire qu'on a une physisorption ayant tendance à une chimisorption ou l'inverse [62].

- La variation de la quantité adsorbée en fonction de la concentration d'inhibiteur est donnée par l'isotherme d'adsorption de Langmuir. Le choix de cet isotherme est basé sur des travaux réalisés sur la même famille des inhibiteurs, et sur la simplicité du modèle de Langmuir qui suppose la formation d'une monocouche à la surface de l'électrode [63-65].
- Le modèle de Langmuir néglige tout type d'interactions entre les espèces, et considère une adsorption par blocage géométrique des sites [66].

L'équation proposée pour décrire l'isotherme de Langmuir est :

$$\theta = \frac{kC_{inh}}{kC_{inh}+1} \dots\dots\dots (III.2)$$

$C_{inh}$  : La concentration de l'inhibiteur ;

$K$  : La constante d'équilibre du processus de l'inhibition ou le coefficient d'adsorption ;

$\theta$  : est le taux de recouvrement de la surface donné par la relation :

$$\theta = \frac{P}{100} \dots\dots\dots (III.3)$$

**P**: taux d'inhibition.

Le réarrangement de l'équation (III.2) donne :

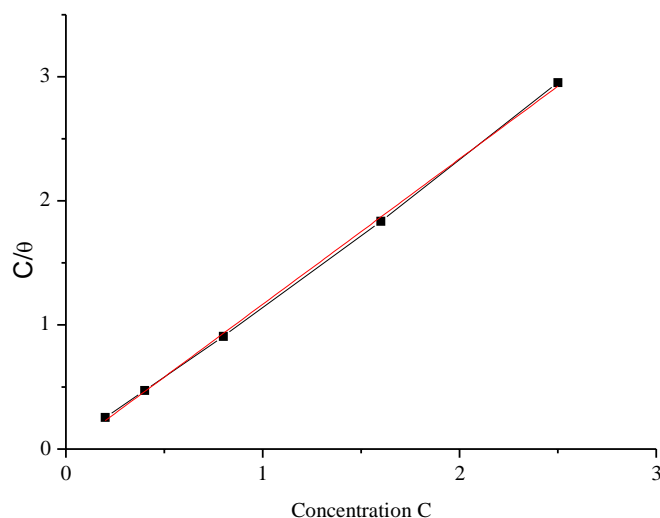
$$\frac{C_{inh}}{\theta} = \frac{1}{k} + C_{inh} \dots\dots\dots (III.4)$$

D'après l'équation précédente, le tracé de  $C_{inh}/\theta = f(C_{inh})$  donne une droite d'une pente égale 1.

Le tableau (III.6) donne les valeurs de  $(C_{inh}/\theta)$  obtenues à la température 20°C en fonction de la concentration, d'après les mesures de perte de masse de l'acier immergé pendant 4h dans des solutions à différentes concentrations d'inhibiteur. Le tracé de ce paramètre est représenté sur la figure (III.10).

$C/\theta$	$C$ (g/L)
0,44	0,255
0,61	0,472
1,36	0,907
2,27	1,835
3,78	2,95

**Tableau III.6.** Valeurs de  $(C_{inh}/\theta)$  obtenues à la température 20°C en fonction de la concentration.



**Figure III.10.** Modèle de l'isotherme d'adsorption de Langmuir de l'acier X60 dans HCl (1M) à différentes concentrations en l'huile essentielle de lavande à 20°C.

La courbe précédente montre bien une droite de pente autour de 1 ce qui est en accord avec l'isotherme d'adsorption de Langmuir. Cela montre clairement la formation d'une monocouche et l'absence des interactions entre les molécules adsorbées elles mêmes [65].

La valeur de  $k$  a été calculée pour accéder à la valeur de l'énergie libre standard d'adsorption ( $\Delta G_{\text{ads}}^{\circ}$ ) en utilisant l'équation suivante :

$$k = \frac{1}{55.5} \exp \left( \frac{-\Delta G_{\text{ads}}^{\circ}}{RT} \right) \dots \dots \dots \text{(III.5)}$$

Le fitting linéaire de la courbe précédente donne une valeur de  $K= 9,58$ . La valeur de  $\Delta G_{\text{ads}}^{\circ}$  est alors :

$$\Delta G_{\text{ads}}^{\circ} = -15.29 \text{ kJ/mol}$$

La valeur négative de ( $\Delta G_{\text{ads}}^{\circ}$ ) indique la forte adsorption de l'inhibiteur sur la surface de l'acier ainsi que la spontanéité du processus d'adsorption.





## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Au cours de ce travail, nous avons étudié le comportement inhibiteur d'une huile essentielle de lavande "Lavandula Officinalis" vis-à-vis de la corrosion d'un acier au carbone de nuance X60 au contact d'un milieu agressif de HCl (1M). Cet acier a été sélectionné pour son large domaine d'utilisation dans les secteurs pétrolier et industriel. L'échantillon a été exposé au milieu corrosif en présence et en l'absence de cet inhibiteur vert dans le but d'étudier son influence sur la résistance à la corrosion.

La méthode d'étude était la mesure de la perte de masse. Pour ce faire, l'influence de la concentration, le temps d'immersion ainsi que la température sur le pouvoir inhibiteur a été étudiée. Certaines valeurs thermodynamiques du processus d'adsorption ( $E_a$  et  $\Delta G$ ) ont été également calculées à partir des droites d'Arrhenius et de l'isotherme d'adsorption .

Les résultats obtenus pour l'influence du temps d'immersion sur la corrosion de l'acier en absence de l'inhibiteur montre que la perte de masse augmente rapidement avec le temps d'immersion, ce qui signifie qu'il y a une dissolution continue du métal dans ce milieu .

La vitesse de corrosion a nettement diminué lors de l'ajout de l'huile essentielle en comparant avec l'échantillon sans inhibiteur. Cette huile essentielle possède alors, d'excellentes propriétés inhibitrices de la corrosion de l'acier X60 dans HCl (1M). En effet, un film protecteur est formé sur la surface de l'acier, par des composés organiques présents dans l'huile empêchant la dissolution de l'acier.

L'efficacité d'inhibitrice augmente avec l'augmentation de la concentration en inhibiteur pour atteindre une valeur maximale de 88,8 %, obtenue à une concentration 1,6 g/L à 20°C.

Quelque soit la température du milieu, la vitesse de corrosion diminue avec l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur ce qui confirme la stabilité et l'efficacité de lavande vis-à-vis la protection de l'acier dans le milieu HCl.

Les énergies d'activation obtenues par le tracé des droites d'Arrhenius, en présence de l'inhibiteur sont inférieures à celle correspondante à HCl (1M) seul. Cette diminution suggère la chimisorption de cet inhibiteur sur la surface de l'acier selon un modèle

d'adsorption de Langmuir. Cela correspond à la formation d'une monocouche sur une surface homogène avec l'absence des interactions entre les molécules adsorbées elles mêmes.

A la lumière de ces résultats, il apparaît que l'huile essentielle de lavande constitue un inhibiteur prometteur dans la panoplie de moyens de lutte contre la dégradation des aciers. Le prochain défi qui devra être relevé dans le cadre de l'utilisation de cet inhibiteur, concerne son extraction et la purification de ses constituants.

Un travail de recherche plus poussé moyennant des techniques électrochimiques telles que le tracé des courbes de polarisation et les diagrammes d'impédances, devra être entrepris pour mieux estimer les paramètres électrochimiques tels que le courant de corrosion, la résistance de polarisation et la capacité de la double couche à l'interface métal/solution. Il faudra étudier la potentialité de cet inhibiteur sur d'autres matériaux et milieux et sa stabilité en fonction d'autres paramètres physicochimiques tels que le PH.



## **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

- [1]. W.F.WAYNE, G.H.SONALD, "Green inhibitors – development and applications for aqueous systems", Corrosion 2004, Paper n° 04407, Schlumberger, Nace International, Houston, TX (2004).
- [2]. Z.Ahmad, Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control, Elsevier, (2006).
- [3]. Jean-Jacques LAMOUREUX, précis de corrosion, édition beau chemin, 1994, page 10, 11, 37, 93.
- [4]. A. Chetouani, B. Hamouti, A. Aouniti, T. Benhadda, Prog. Org. Coat. 45, 373 (2002).
- [5]. O.Radovico, Proc. 7<sup>th</sup> European Symposium on Corrosion Inhibitors, Ann. Univ.Ferrara, Italy, p.330 (1990).
- [6]. H.Mamache. "Etude du problème de corrosion au niveau des installations du surface". Mémoire de fin de période de mise en situation professionnel Ingénieur Exploitation. IAP.2017.
- [7]. Circuits eau de mer, traitements et matériaux ; Editions Technip : Paris, France, 1993.
- [8]. N.Le Bozec, "Réaction de Réduction de l'Oxygène sur les Aciers Inoxydables en Eau de Mer Naturelle", Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale 2000.
- [9]. D.LANDOLT, "Traité des Matériaux Corrosion et Chimie de Surfaces des Métaux", pages 3 ; 9 ; 10 ; 11, 1993.
- [10]. T. LANEZ, "Cours de corrosion" université d'Ouargla, 2010, pages 51-52.
- [11]. M.KHALED, "L'inhibition De La corrosion Par Des Ions Dithiolylium Synthétisés", Mémoire de Magister, université d'Ouargla, 2009, pages 12-13.
- [12]. D.Landolt, Corrosion et Chimie de Surface des Métaux, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 1997.
- [13]. Matériaux Métalliques "Phénomènes de Corrosion, 4<sup>ième</sup> partie " Les différentes Formes de corrosion aqueuse".
- [14]. G.Reihard, U. Rammelt, Proc 7<sup>th</sup> Eur. Symp. Corr. Inh. p. 873-883 Ferrara., (1990).
- [15]. J.Bernard, métallurgie générale, 2<sup>e</sup> édition (Masson), 1997, pp 87, 584, 585, 606-608.

- [16]. Dr. H.Bensabra. Cours de corrosion et protection des métaux. Université de Jijel 2016.
- [17]. A.Jarrah " Développement de méthodes statiques et probabilistes en corrosion par piqures pour l'estimation de la profondeur maximale-application de l'Aluminium A5". Ecole nationale supérieure d'arts et matières. Thèse Doctorat. Paris tech. 2009.
- [18]. H.Ferkous, thèse de magistère "étude de la protection cathodique de l'acier ordinaire par anodes sacrificielles", université de Skikda, (2003).
- [19]. I.Uhlig, Corrosion et Protection, DUNOD, 1970.
- [20]. WALDRIP H.E. Present Day Aspects of Condensate Well Corrosion. Corrosion, 1948, vol. 4, pp. 611-618.
- [21]. HAMNER NORMAN. E. Scope and importance of inhibitor technology. In: Ed. By C.C. Nathan, Houston, NACE Corrosion Inhibitors. USA : National Association of Corrosion Engineers, 1973, p.28-41.
- [22]. A.Popova, E. Sokolova, S. Raicheva, M. Christov, Corros. Sci., 45, 33 (2003).
- [23]. L.O. Riggs Jr., T.J. Hurd, Corrosion, 23, 252 (1967).
- [24]. A.Fiala, thèse Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat D'état en Chimie, Faculté des sciences, Département de Chimie, Université Mentouri Constantine, 2007.
- [25]. F.Bentiss, Thèse HDR, Université de Lille, 2006.
- [26]. F.Khoukhi, Mémoire Magister, Université M'hamed Bougara de Boumerdes, Faculté des Sciences, Département de Chimie, 2008.
- [27]. M.Bounoughaz, les Inhibiteurs de Corrosion, CRD/SH/CALCOR, 17 mai 1995, pp 34-38.
- [28]. P.Bommersbash, INSA Lyon, Décembre 2005, pp 15 – 24.
- [29]. F.Bentiss, M. Lebrini, M. Lagrenee, Corros. Sci., 47, 2915 (2005).
- [30]. C.Fiaud, Inhibiteur de Corrosion, Université Pierre & Marie Curie, ENSC, Paris. Techniques de l'ingénieur, Traité de corrosion – Vieillissement, Vol. Cor. 1005, 2006, pp 1-14.
- [31]. J.L.Crolet, G.Beranger, Corrosion en Milieu Aqueux des Métaux et Alliage, Techniques de l'ingénieur, Traité des matériaux métallurgiques, 2006, Vol M 153, pp 6-12.
- [32]. E.L.Din Stirbu, "Comportement à la Corrosion des Alliages d'Aluminium Utilisés dans l'Industrie Automobile pour la Fabrication de Radiateur de Chauffage", Thèse doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon France, Novembre 2005.

- [33]. Boutemtam.w.2013/2014 ; effet de synergie sur le pouvoir inhibiteur des acides amines. Université de khemismiliana.
- [34]. X.Li, S.Deng, H.Fu, Corrosion Science., 52 (2010) 3413–3420.
- [35]. A.Jayarman, Corrosion Inhibitors in Hydrocarbon Systems, Corrosion 96, paper n°221 Nace International, Houston, TX, 1996.
- [36]. K.Rahmouni, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie CURIE. Paris VI. Déc (2005).
- [37]. [http://www.passeportsante.net/fr/Solutions/PlantesSupplements/Fiche.aspx?doc=la\\_vande\\_ps](http://www.passeportsante.net/fr/Solutions/PlantesSupplements/Fiche.aspx?doc=la_vande_ps). [Consulté le: 29-juin-2015].
- [38]. Werner M, Von Braunschweig R. L'Aromathérapie, Vigot, 2007.
- [39]. Bosson L. L'aromathérapie énergétique, Amyris, 2011.
- [40]. Laboratoire C. Huile-et-sens.com, 2006.
- [41]. Gérard G, Sommerard JC, Béhard C, Mary R. Le guide de l'olfactothérapie, Albin Michel 2011.
- [42]. Monatte-Lassus S. Les effets de l'huile essentielle de la lavande vraie. PasseportSanté.net oct-2014.
- [43]. Bastianetto S. « La lavande pour réduire l'anxiété et l'agitation », PasseportSanté.net, juin-2011. [En ligne]. Disponible sur thèse. 2008: ProQuest.
- [44]. Piochon, M., Étude des huiles essentielles d'espèces végétales de la flore laurentienne: composition chimique, activités pharmacologiques et hémi-syn.
- [45]. Lucchesi, M.-E., Extraction Sans Solvant Assistée par Micro-ondes Conception et Application à l'extraction des huiles essentielles. Thèse de Doctorat, Université de la Réunion. 2005.
- [46]. Bassereau, M., A. Chaintreau, S. Duperrex, D. Joulain, H. Leijts, G. Loesing, N. Owen, A. Sherlock, C. Schippa, and P.-J. Thorel, GC-MS Quantification of suspected volatile allergens in fragrances. 2. Data treatment strategies and method performances. Journal of agricultural and food chemistry, 2007. 55(1): p. 25-31.
- [47]. Djeddi S., 2012. Les huiles essentielles : des mystérieux métabolites secondaires. Ed. Presses académiques francophones, 64p.
- [48]. Lawrence, B.M., The isolation of aromatic materials from natural plant products. 1995.



- [49]. Assouli, B. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, N:02ISAL0103(2002)164.
- [50]. Aljourani, J. Raeissi, K. Golozar, M.A. Corros. Sci. 51 (2009) 1836.
- [51]. J. Crousier, C. Antonione, Y. Massiani, J.P. Crousier, Mat. Chem., 7 (1982) 587.
- [52]. A. E. Stoyanova, E. I. Sokotova, S. N. Raicheva, Corros. Sci., 39 (1997) 1595.
- [53]. A. S. Fouda, S. S. El Kaabi, A. K. Mohamed, Anti-Corrosion., 8 (1989) 9.
- [54]. E. Stupnisek-Usac, Z. Ademovic, Proceedings of the 8th European Symposium on Corrosion Inhibitors, Ann. Univ. Ferrara (Italy), N. S. Sez suppl. 3, 1995, vol. 1, p. 257.
- [55]. B. Sanyal, K. Srivastava, Br. Corros. J., 2 (1974) 103.
- [56]. I. Ahamad, R. Prasad, M.A. Quraishi, Corros. Sci., 52 (2010) 1472.
- [57]. O. Benali, O. Mokhtar, Arab. J. Chem., 4 (2011) 443.
- [58]. N.P. Zhuk, Course on Corrosion and Metal Protection, Metallurgy, Moscow, (1976).
- [59]. Moretti G., Guidi F., Grion G., 2003. Tryptamine as a green iron corrosion inhibitor in 0.5 M deaerated sulphuric acid, Corrosion Science 46, 387.
- [60]. Putilova N., Balezin S.A., Barannik V.P., 1960. Metallic Corrosion Inhibitors, Pergamon Press, Oxford, London.
- [61]. A. Popova, S. Raicheva, E. Sokolova, M. Christov, Langmuir, 12(1996)1083.
- [62]. E. Khamis, Corrosion., 6 (1990) 46.
- [63]. E.A. Noor, A.H. Al-Moubaraki, Mater. Chem. Phys., 110 (2008) 145–154.
- [64]. F. Bentiss, C. Jama, B. Mernari, H. El Attari, L. El Kadi, M. Lebrini, M. Traisnel, M. Lagrenee, Corros. Sci., 51 (2009) 1628–1635.
- [65]. M.B. Valcarce, M. Vazquez, Mater. Chem. Phys., 115 (2009) 313–321.
- [66]. Touhami F., Aouniti A. Abed Y., Hammouti B., Kertit S., Ramdani A., «Corrosion inhibition of armco iron in 1M HCl media by new bipyrazolic derivatives», Corrosion Science 42, (2000), 929-940.