



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Larbi Tébessi

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

MEMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences de la matière

Filière : Chimie

Option : Chimie des produits Naturels

Thème :

Etude de l'efficacité inhibitrice de substances vertes sur la corrosion de l'acier au carbone dans un milieu acide

Présentés par :

TRADI Hanene

KhALED Boutheyna

Devant les jury:

MESSAI Laid	M.C.B U.TEBESSA	Président
HARKATI Brahim	Professeur U.TEBESSA	Rapporteur
BELGUIT Chafik	M.C.B U.TEBESSA	Examineur

Date de soutenance : 23 /06 /2022



Dédicace

Louange à DIEU tout puissant , qui nous a permis de mener

bien ce travail , mille louanges et remerciements ,

*À l'âme de mon cher père KHEMISSI TRADI , que DIEU ait pitié de lui , ait
pitié des justes , et lui pardonne .*

À ceux qui sont mon battement de cœur , mon soutien et ma force , avec

*Leur présence je ne suis jamais tombé , À la femme la plus merveilleuse du monde , ma
mère bien-aimé ANES , À mon frère habibi NASSER , et à mon âme sœur DOUNIA*

*À toute ma chère famille , la famille TRADI et la famille FRIHAOUI ,
à YUCEF et CHQMCHOUMATI .*

*À mes chers amis , JOUJOU , RAHMA et MOUFIDA , KHAOUJA
, RAOUIA , NAIMA , ABOUD , HAMZA .*

À mes camarades de classe , à tous ceux qui m'ont appris une lettre depuis l'enfance .

*À M.HAZEM et AMMAR , SAAD , KHALED , ASMA
, KHALIFA*

À tous ceux qui m'ont aidé et encouragé , même avec un mot

À tous ceux qui ont laissé un bon impact dans mon cœur

Remerciement

*Nous remercions d'abord **ALLAH** le tout puissant de nous avoir accordé la puissance et la volonté, la chance de poursuivre pour terminer ce travail.*

*Nous tenons vivement à exprimer notre profonde reconnaissance à Monsieur **HARKATI Brahim**, **PROFESSEUR** à l'université de Tébessa, pour avoir dirigé ce sujet, pour son suivi permanent, ses conseils judicieux et l'aide constante qu'il nous a orienté au cours de l'élaboration de ce travail et pour sa bonne humeur.*

*Nous exprimons nos remerciements à Monsieur **MESSAI Laïd** Maître Conférences B à l'Université de Tébessa, pour l'honneur qu'il nous a fait en présidant le jury de notre mémoire.*

*Nous remercions vivement **BELGUIT Chafik** Maître de Conférences B à l'Université de Tébessa, qui a accepté d'être examinateurs de cette mémoire.*

nous tenons à remercier et à exprimer notre profonde gratitude à tous les enseignants des sciences de la matière , les remercions vivement pour leurs disponibilités, leurs gentillesse, conseils précieux et leurs rapports scientifiques.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous nos amis de partout et d' ailleurs pour leur présence et leur aide. Nous aimerons encore remercier toute l'équipe du laboratoire pour leur aide inestimable et pour leurs gentillesse à la cour de notre travail.

ملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير مثبط أخضر على تآكل الفولاذ API 5L Gr-B في وسط حمض HCl ذو تركيز 1 مول/لتر، باستعمال مستخلص البيوتانولي لنبات *Tergenia Latofilia* لحماية المعدن من لتآكل فكانت النتائج ايجابية. الجزء الأول من العمل كان الهدف منه استخلاص المواد الفعالة حسب درجة الاستقطاب باستعمال طريقة Markham (1982) مع تعديلات مستلهمة من طريقة Bruneton (1993)

الجزء الثاني خصص لدراسة مستخلص البيوتانولي على تآكل المعدن في وسط حمض HCl باستخدام منحنيات الاستقطاب و الممانعة الكهروكيميائية. حيث بينت الدراسة أن زيادة التركيز المثبط الأخضر يؤدي إلى زيادة في التثبيط إلى غاية تركيز قدره 500 مغ/لتر كما اثبتت الدراسة ان امتزاز المثبط على سطح المعدن يوافق نموذج لانغمير. النتائج الترموديناميكية اثبتت أن نوع الامتزاز فيزيائية استنادا لقيمة التغير في طاقة جيبس.

الكلمات المفتاحية: مستخلص، استقطاب، ممانعة، امتزاز و تثبيط

Résumé

Ce travail porte sur l'inhibition de la corrosion de l'acier API 5L Gr-B en milieu acide 1 M HCl par extrait butanolique de la plante *Tergenia Latofilia* cet inhibiteur pourrait être utilisé pour prévenir la corrosion de l'acier avec des taux d'inhibition acceptables.

La première partie du travail est consacrée à l'extraction des substances actives selon le degré de polarisation par la méthode de Markham (1982), avec modification inspirée selon la méthode de Bruneton (1993). La deuxième partie est consacrée à l'étude de la corrosion par l'extrait butanolique de la plante *Tergenia Latofilia* de l'acier dans l'acide HCl 1M en utilisant des courbes de polarisation et une spectroscopie d'impédance électrochimique. Les résultats montrent l'augmentation du taux d'inhibition avec la concentration de l'inhibiteur vert. Les résultats thermodynamiques montrent l'adsorption est de type physique, en fonction des valeurs de l'énergie de Gibbs.

Les mots clé : Extraction, polarisation, impédance, adsorption et inhibition

Abstract

This work is devoted to the corrosion inhibition of API 5L Gr-B steel in 1M HCl acid medium by a butanolic extract of the plant *Terginia Latofilia*, It can be used to prevent steel corrosion with a very satisfactory inhibition rate. The first part concerns extract the active substances according to the degree of polarization by the method of Markham (1982), with modification inspired by the method of Bruneton (1993).

The second part is devoted to the study the butanolic extract on the corrosion of steel in 1M HCl acid using polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy. The results show that the rate of inhibition increases with increasing concentration of the green inhibitor also proved that the absorption of the inhibitor on the surface of the steel is consistent with Langmuir's model. The thermodynamic results show that adsorption is of physical type, according on the energy values of Gibbs.

Keywords: Extraction, polarization, impedance, adsorption and inhibition

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES

I. Notion théorique sur la corrosion :	3
I. 1. Introduction :	3
I.1. 1. Coût économique de la corrosion :	3
I.1. 2. Définition de la corrosion :	3
I.1.3. Les facteurs de la corrosion :	4
I.1.4. Les types de corrosion :	4
I.1.4.1. Corrosion chimique :	4
I.1.4.2. Corrosion électrochimique :	5
I.1.4.3. Corrosion biochimique (bactérienne) :	6
I.1.4.4. Corrosion accompagnée d'érosion (mécanique) :	6
I.1. 5. Les principales formes de corrosion :	7
I.1.5. 1. Corrosion généralisée ou uniforme :	7
I.1.5.2. Corrosion atmosphérique :	7
I.1.5. 3. Corrosion localisée :	8
Les références bibliographiques	13

chapitre II : Généralités sur les inhibiteurs de corrosion

II.1. Introduction :	16
II.2. Historique :	16
II.3. Définition :	16
II.4. Propriétés et conditions d'utilisation des inhibiteurs :	16
II.5. classification des inhibiteurs :	17
II.5.1. Classification par formation des produits :	17
II.5.1.1. Inhibiteur inorganique :	17
II.5.1.2. Inhibiteur organique :	18
II.5. 2. Classification par mécanisme réactionnel :	18

Sommaire

II.5.2. 1. Mécanisme d'action interfacial d'inhibition :	18
II.5. 3. Classification relative au mécanisme d'action électrochimique :	19
II.5.3. 1. Les inhibiteurs anodiques :	19
II.5.3.2 Les inhibiteurs cathodiques :	19
II.5.3.3. Les inhibiteurs mixtes :	20
II. 5. 4. Classification par domaine d'application :	20
II.5.4.1. Inhibition de la corrosion en milieu acide :	20
II.5.4.2. Inhibition en milieu neutre :	20
II.5.4.3. Inhibition par Adsorption :	21
II.5.4.3.1. Adsorption physique :	21
II.5.4.3.2. La chimisorption :	21
II.5.4.3.3. Interactions entre les inhibiteurs adsorbés :	21
II.5.4.3.4. Relations entre la réactivité et l'efficacité des inhibiteurs :	22
II.5.4.3.5. Isotherme d'adsorption :	22
II.6. Utilisation industrielles courantes :	22
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	23
<i>Chapitre III : Matériaux, solutions d'étude et techniques expérimentales</i>	
III.1. Introduction :	26
III.2. Généralités sur les aciers	26
III.2.1. Introduction.....	26
III.2.2. Les différents types des aciers	26
III.3. Matériau :	27
III.3.1. Préparation des surfaces :	27
III.3.2. Echantillon :	27
III.3.3. Préparation des échantillons	28
III.3.4. Polissage :	28
III.4. Milieu d'étude :	28

Sommaire

III.4.1. Milieu corrosif :	28
III.4.2. Préparation le milieu corrosif:	28
III.4.3. Montage expérimental :	29
III.4.3.1. La cellule électrochimique :	29
II.4.3.3. Protocole expérimental	29
III.5. Généralités sur <i>Turgenia latifolia</i> :	29
III.5.1. Description botanique de la plante :	29
III.5.2. Distribution	30
III.5.3. Classification botanique de <i>Turgenia latifolia</i>	31
III.5.4. Classification	31
III.5.5. Récolte de la plante	31
III.5.6. Synonymes	32
III.5.7. Préparation des extraits de <i>Turgenia latifolia</i>	32
III.6. Méthodes électrochimiques	35
III.6.1 Méthodes stationnaires	35
III.6.1.1. Evolution du potentiel libre en fonction du temps :	35
III.6.1.2 Courbes de polarisation intensité- potentiel	35
III.6.2 Méthodes transitoires :	35
III.6.2.1 La spectroscopie d'impédance électrochimique :	35
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	37

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV. 1. Resultats et Discussions	39
IV. 1. 1. Etude électrochimique	39
IV. 1. 1. 1. Suivi du potentiel en circuit ouvert	39
IV. 1. 1. 2. Les courbes de polarisations	40
IV. 1. 1. 3. Impédance électrochimique et circuit électrique équivalent:	41
IV. 1. 2. Isothermes d'adsorptions	45

Sommaire

IV. 1. 2. 1. Classification des isothermes d'adsorption d'EBTL.....	45
IV.1.2.2. Paramètres thermodynamiques d'adsorption	48
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	52
Conclusion général	54



abréviations & symboles

Symbole	Signification	Unité
C_{dc}	Capacité de la double couche	$\mu\text{F}/\text{cm}^2$
C	Concentration	mg/l
K	Constante d'équilibre de la réaction	l/mg
R	Constante des gaz parfaits	$\text{J}/\text{K}\cdot\text{mol}$
β_a	Coefficients de TAFEL anodique	$\text{V}/\text{décade}$
β_c	Coefficients de TAFEL cathodique	$\text{V}/\text{décade}$
i_{corr}	Densité du courant de corrosion	A/m^2
EI	Efficacité inhibitrice	%
ΔG_{ads}^0	Energie d'adsorption libre	J/mol
ΔH_{ads}^0	L'enthalpie standard d'adsorption	kJ mol^{-1}
ΔS_{ads}^0	L'entropie	$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
E	Potentiel	V
E_{corr}	Potentiel de corrosion	V/ECS
R_p	Résistance de polarisation	$\Omega\cdot\text{cm}^2$
R_{tc}	Résistance de transfert de charge	$\Omega\cdot\text{cm}^2$
R_s	Résistance de la solution	Ω
V_{corr}	Vitesse de corrosion	mm/an
T	Température	K
Θ	Taux de recouvrement	-
S	La surface des Echantillons	cm^2
$i_{\text{corr}}^{\text{inh}}$	densité de courant en la présence de l'extrait	A/m^2

Abréviation	Signification
NACE	ational Association of Corrosion Engineers
1.0 M	Une fois molaire
HCl	Acide chlorhydrique
[1], [2],...	Désignation mentionnée dans la partie bibliographique
OCP	Potentiel Circuit Ouvert
SIE	Spectroscopie d'Impédance Electrochimique
ECS	Electrode au Calomel Saturé
K	Kelvin
Hz	Hertz
i_{corr}	densité de courant en l'absence de l'extrait

abréviations & symboles

ppm	Partie par million
EI	L'efficacité inhibitrice
EBTL	Extrait butanolique de <i>Turgenia latifolia</i>
API 5L Gr-B	Acier au carbone
Ph	Phase



Liste du tableaux

Tableau N°	Titre	Page
I. 1	Les principaux facteurs de corrosion	4
III. 1	Aciers ordinaires ou aciers au carbone non allié	27
III. 2	Composition chimique de l'acier API 5 L Gr B en % massique	28
III. 3	Caractérisations de <i>Turgenia latifolia</i>	31
III. 4	Classification de <i>Turgenia latifolia</i>	31
IV. 1	Paramètres électrochimiques, taux de recouvrement et efficacité inhibitrice de la corrosion de l'acier API 5LGr-B dans HCl 1M sans et avec addition de différentes concentrations d'EBTL à la température 20 °C.	41
IV. 2	Paramètres électrochimiques de la spectroscopie d'impédance électrochimique de l'acier API 5L Gr-B dans HCl 1 M.	42
IV. 3	Paramètres cinétiques, taux de recouvrement et efficacité inhibitrice de l'acier dans HCl 1M à différentes températures sans et avec l'ajout de 500 mg L ⁻¹ d'EBTL	43
IV. 4	Résultats des essais d'impédance électrochimique dans HCl 1M à différentes températures sans et avec l'ajout de 500 mg L ⁻¹ de EBTL	44
IV. 5	Les valeurs de coefficient de corrélation (R ²) obtenus par les isothermes de Langmuir, Temkin, Freundlich et Frumkin à différentes températures.	48
IV. 6	Paramètre thermodynamique d'EBTL en milieu HCl 1 M pour différentes températures	51

Liste des figures

Figures №	Titre	Page
Figure I.1	Corrosion chimique.	5
Figure I.2	Exemple de bactéries responsable de la corrosion bactérienne	6
Figure I.3	Corrosion généralisée	7
Figure I.4	Mécanisme réactionnel de la corrosion atmosphérique de l'acier	8
Figure I.5	Exemple de corrosion galvanique	8
Figure I.6	corrosion par piqûres	9
Figure I.7	Corrosion par crevasse sous un joint	10
Figure I. 8	Corrosion intergranulaire	10
Figure I.9	Corrosion sous contrainte	11
Figure I.10	Corrosion érosion	12
Figure II. 1	Classification des inhibiteurs de corrosion.	19
Figure II. 2	Formation des couches barrières (A) cathodiques et (B) anodiques interférant avec les réactions électrochimiques, dans le cas d'une étude en milieu acide.	20
Figure III. 1	Les fleurs et les feuilles <i>Turgenia latifolia</i> .	30
Figure III. 2	Distribution de <i>Turgenia latifolia</i>	30
Figure IV.1	Evolution du potentiel d'abandon dans la solution à HCl 1 M sans et avec l'ajout d' EBTL	39
Figure IV.2	Courbes de polarisation de l'acier API 5LGr-B dans la solution à HCl 1 M et à différentes concentrations d'EBTL	40
Figure IV. 3	Impédance électrochimique de l'acier API 5LGr-B dans la solution à HCl 1 M et à différentes concentrations d'EBTL (Représentation dans le plan de Nyquist)	42
Figure IV. 4	Courbes de polarisation obtenues pour les températures (20,30, 40) °C dans la solution de HCl 1 M avec l'ajout de 500 mg L ⁻¹ EBTL	44
Figure IV. 5	Courbes de S.I.E obtenues pour les températures (20, 30, 40) °C dans la solution de HCl 1 M avec l'ajout de 500 mg L ⁻¹ EBTL	45
Figure VI. 6	Isotherme d'adsorption de Langmuir de l'acier API 5L Gr-B dans HCl 1 M en présence d'EBTL à différentes température.	46
Figure VI. 7	Isotherme d'adsorption de Freundlich de l'acier API 5LGr-B dans HCl 1 M en présence d'EBTL à différentes température.	47
Figure VI. 8	Isotherme d'adsorption de Temkin de l'acier API 5L Gr B dans HCl 1 M en présence d'EBTL à différentes température.	47
Figure VI. 9	Isotherme d'adsorption de Frumkin de l'acier API 5L Gr-B dans HCl 1 M en présence d'EBTL à différentes température	48
Figure VI. 10	Variation de ΔG_{ads}^0 en fonction de la température	50

Liste des schéma

Schéma N°	Titre	Page
II. 1	Classification des inhibiteurs de corrosion	18
III. 1	Synonymes de <i>Turgenia latifolia</i>	32
III. 2	Protocole d'extraction de <i>Turgenia latifolia</i>	34

Introduction générale

Les solutions acides sont généralement utilisées dans diverses industries, principalement pour nettoyer et enlever la rouille des surfaces métalliques. Cette technique est efficace pour lutter contre la corrosion des structures, généralement en acier ordinaire.

La corrosion des métaux est un phénomène universel de dégradation des matériaux (métalliques en général) par l'environnement. Il s'agit donc d'un phénomène qui concerne la plupart des secteurs industriels notamment les industries pétrolières (transport du carburant). La corrosion peut provoquer des accidents graves à l'environnement et même des pertes en vie humaine puisqu'elle est susceptible d'entraîner des problèmes de santé (pollution, contamination...) [1].

Certains composés chimiques synthétiques du coût élevé et de nature toxique sont actuellement employés comme inhibiteurs de corrosion, il est nécessaire de développer des inhibiteurs écologiques à base des plantes et moins coûteux [2]. Les extraits de plantes contiennent différents composés organiques (par ex. alcaloïdes, tanins, pigments, acides organiques et aminés), qui sont utilisés comme inhibiteurs de corrosion dont l'activité inhibitrice est principalement due à la présence des fonctions polaires dans leurs structures, d'hétéroatomes (O, N, etc.), d'hétérocycles et/ou des électrons π [3], considérées comme responsables du processus d'adsorption de ces inhibiteurs conduisant au blocage des sites actifs de corrosion à la surface métallique [4].

L'objet de notre travail consistait, dans un premier temps, en l'obtention des extraits de plante, et dans un deuxième temps l'étude de l'effet inhibiteur et le mode d'action des substances extraites sur la corrosion de l'acier au carbone API 5L Gr-B en milieu HCl 1M, par les méthodes électrochimiques notamment la méthode de courbes de polarisation et la spectroscopie d'impédance électrochimique. L'influence de concentration et la température ont été examinées et les modèles d'absorption responsables de l'inhibition ont été définis.

Ce manuscrit comporte trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une mise au point bibliographique sur la corrosion et une description générale relative aux inhibiteurs de corrosion.

Le deuxième chapitre présente les généralités sur les inhibiteurs de corrosion.

Le troisième chapitre traite les techniques électrochimiques et les méthodes de caractérisation mises en œuvre ainsi que les conditions expérimentales adoptées.

Le quatrième chapitre traite les résultats obtenus et discussion portée sur :

-
- L'influence de la concentration sur l'efficacité inhibitrice.
 - L'effet de la température sur l'efficacité inhibitrice de l'inhibiteur
 - Le mode et le type d'adsorption sur la surface d'acier

Nous terminons ce manuscrit par une conclusion générale en regroupant l'essentiel de nos résultats et une perspective pour les améliorer prochainement.

[1] **L. Lahcène, Y .Harek,** " *Effect of Iodide Ions on Corrosion Inhibition of Mild Steel in 0.5 M H₂SO₄ by Poly(4-Vinylpyridine)*" Portugaliae Electrochimica Acta, **2004**, Vol(22), pages: 227-247.

[2] R .Hosory, H .Solen, Corros. Eng, **1984**, 1, pages: 63-74.

[3] **A. Khadraoui, A. Khelifa, H. Boutoumi, H. Hamitouche, R. Mehdaoui, B. Hammouti, S.S. Al-Deyab,** " *Adsorption and Inhibitive Properties of Ruta chalepensis L. Oil as a Green Inhibitor of Steel in 1 M Hydrochloric Acid Medium*" Int. J. Electrochem. Sci, **2014**, pages: 3334-3348.

[4] **A. Khadraoui, A. Khelifa, H. Boutoumi, B. Hammouti,** " *Mentha pulegium extract as a natural product for the inhibition of corrosion. Part I: electrochemical studies*" Nat. Prod. Res, **2014**, 28(15), pages:1206-1209.

Chapitre I :
RAPPELS
BIBLIOGRAPHIQUES

I. Notion théorique sur la corrosion :

I. 1. Introduction :

La corrosion est un grand problème mondiale qui touche tous les secteurs sur tous dans l'industrie pétrolière, dans ce chapitre on présente quelques notions principales sur la corrosion, ces types, ces formes et les facteurs qui dues de ce problème.

I.1. 1. Coût économique de la corrosion :

Au point de vue économique la corrosion est d'une importance primordiale. On estime par exemple que chaque année le quart de la protection d'acier est détruit par la corrosion, ce qui correspond environ à 150 millions de tonnes/an ou 5 tonnes /seconde Ces pertes pouvaient être supérieures s'il n'y avait pas la protection contre la corrosion.

La corrosion touche tous les domaines de l'économie. On évalue le coût de la corrosion à 1/4 environ de produit national brut en Algérie [1], ce chiffre prenne en compte :

- **Pertes directes** : Les pertes directes prennent en compte le prix des pièces à changer, la main d'œuvre, le coût de l'entretien et du contrôle, le prix des revêtements, inhibiteurs...etc.
- **Pertes de produits** : À la suite de perforation des installations, on peut assister à des pertes d'eau, d'huile, de gaz et d'autres produits.
- **Pertes de production** : Diminution d'un transfert de masse ou de chaleur, par suite de l'accumulation de produit de corrosion à l'intérieur des canalisations.
- **Pertes par contamination des produits** : Dans une unité de production de détergents le passage d'une petite quantité de Cu provenant d'une faible corrosion de tubes en cuivre peut endommager un bain entier de savon
- **Pertes indirectes** : Elles sont très délicates à évaluer ; elles sont relatives au manque à gagner, aux pertes de production et de productivité [2].

I .1. 2. Définition de la corrosion :

La corrosion est la dégradation des matériaux par des réactions chimiques ou électrochimiques avec l'environnement. C'est en fait milieu environnant [3]. Il est défini comme l'interaction physico-chimique entre les métaux et son environnement provoquent des changements dans les propriétés du métal, et souvent dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système une technique composée de deux facteurs [4].

I.1.3. Les facteurs de la corrosion :

Puisque la corrosion est des interactions chimiques et/ou physiques entre le matériau et son environnement, le réactif est le métal ou l'alliage, il est logique de penser qu'elle dépendra à la fois des caractéristiques du réactif et de celles du métal. En ce qui concerne ces dernières, il convient de souligner que la connaissance de la composition chimique est nécessaire mais tout à fait insuffisante, de même que les traitements thermiques et mécaniques subis par le métal. (Tableau I-1) [5].

Tableau I.1 : Les principaux facteurs de corrosion

Facteurs relatifs au milieu et définissant le mode d'attaque	<ul style="list-style-type: none"> • Concentration du réactif. • Teneur en oxygène, en impuretés, en gaz dissous (CO₂, H₂S). • Acidité (pH) du milieu, salinité, température, pression. • Présence de bactéries.
Facteurs métallurgiques	<ul style="list-style-type: none"> • Composition de l'alliage, hétérogénéités cristallines. • Impuretés dans l'alliage, inclusions • Traitements thermiques, mécaniques • Additions protectrices.
Facteurs définissant les conditions d'emploi	<ul style="list-style-type: none"> • Etat de surface, défaut de fabrication. • Emploi d'inhibiteurs. • Croûtes d'oxydes superficielles. • Force électromotrice extérieure (électrolyse).
Facteurs dépendant du temps	<ul style="list-style-type: none"> • Vieillessement. • Température. • Modalité d'accès de l'oxygène ou autres gaz dissous. • Apparition d'un dépôt (calcaire ou autre).

I .1.4. Les types de corrosion :**I .1.4.1. Corrosion chimique :**

C'est une réaction hétérogène entre une phase solide (métal) et une phase liquide ou gazeuse (l'électrolyte). Le plus souvent c'est l'oxydation des métaux par les gaz. 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. La réaction qui se produit est de la forme [6].



Figure I.1 Corrosion chimique.

I.1.4.2. Corrosion électrochimique :

La corrosion électrochimique résulte principalement de l'oxydation des métaux sous forme ionique ou oxyde et de la réduction des décapants existants dans la solution d'électrolyte [7]. De plus, il provoque un transfert d'électrons entre le métal et la solution électrolytique en contact avec lui [8]. Ce type de corrosion peut être causé par l'hétérogénéité des métaux ou des réactifs. La présence d'hétérogénéité détermine la formation de la cellule [9], par conséquent, le courant circule entre l'anode et la cathode dans le réactif, et la région constituant l'anode est attaquée (corrodée). Il doit avoir un réducteur ; H_2O , H_2 , etc., sans lequel la corrosion du métal (réaction anodique) ne peut pas se produire [7].

- **Une anode** : c'est la partie du métal où se développe la réaction d'oxydation entraînant une dissolution de cette partie sous forme de cations positifs dans le milieu aqueux ;
- **Une cathode** : c'est la partie du métal où se développe la réaction de réduction d'une espèce contenue dans l'électrolyte (dégagement d'hydrogène par réduction d'ions H^+ , formation d'eau par réduction de l'oxygène en milieu acide, formation d'ions OH^- par réduction de l'oxygène en milieu basique et dépôt d'un métal par réduction d'un de ses cations, etc.) ;
- **Un conducteur électrique** : qui puisse véhiculer les électrons libérés de l'anode vers la cathode. Ce rôle est assuré par le métal lui-même ;

- **Un conducteur ionique** : qui puisse permettre la migration des cations libérés de l'anode vers les anions libérés à la cathode pour assurer la neutralité électrique et fermer le circuit électrique. Ce rôle est joué par le milieu électrolytique lui-même.

I.1.4.3. Corrosion biochimique (bactérienne) :

La corrosion biologique, également appelée corrosion bactérienne (**Figure I.2**), combine toutes phénomènes de corrosion dans lequel les bactéries agissent directement ou par l'intermédiaire de bactéries leur métabolisme fonctionne en agissant de manière primitive, ou en accélérant des processus déjà établis.

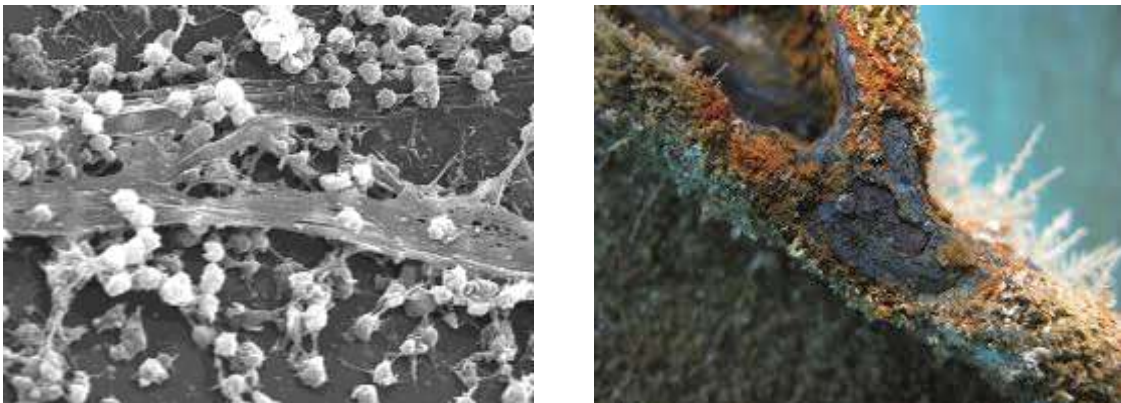


Figure I.2: Exemple de bactéries responsable de la corrosion bactérienne [11].

La présence de micro-organismes altère facilement l'une des réactions cathodiques ou anodiques, accélérant même la corrosion du matériau. Le rôle des bactéries donc ici c'est purement électrochimique et ne correspond pas à une nouvelle forme de corrosion mais modifier la cinétique de la corrosion existante ou l'apparition de la corrosion en modifiant les conditions de fonctionnement du système [10].

I.1.4.4. Corrosion accompagnée d'érosion (mécanique) :

La corrosion mécanique conduit à la formation d'une couche continue d'adhérence produit de corrosion, cette couche ralentit sa propagation phénomène. Il peut être enlevé par abrasion due au mouvement du liquide lui-même, ou comparable aux particules solides qu'il contient. Puis accéléré en raison de la corrosion. Le métal est exposé [11]. Il existe trois principaux modes de corrosion à des effets mécaniques : la corrosion avec érosion, la corrosion avec frottement et la corrosion par cavitation [12-13].

I .1. 5. Les principales formes de corrosion :**I .1.5. 1. Corrosion généralisée ou uniforme :**

C'est l'aspect de corrosion le plus rencontré dans la pratique, mais c'est l'aspect aussi le moins dangereux. Cette corrosion se caractérise par une attaque régulière de toute la surface de l'échantillon exposée au milieu (figure I.3). Le phénomène se caractérise par la vitesse d'attaque, qui se mesure soit en (mm/an) ou ($\mu\text{m}/\text{an}$), soit en ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-2}\cdot\text{jour}^{-1}$). La vitesse de la corrosion n'est pas linéaire elle diminue ou générale dans le temps. Dans ce mode de corrosion on ne distingue pas à l'échelle macroscopique, les lieux cathodiques des lieux anodiques. [14]



Figure I.3 Corrosion généralisée

I .1.5.2. Corrosion atmosphérique :

Comme son nom l'indique, la corrosion atmosphérique fait référence à la réaction de l'oxygène dans l'air. L'humidité et les contaminants forment des membranes électrolytiques lorsque l'air à température ambiante et des métaux se trouvent à la surface de ces dernières.

La vitesse de corrosion atmosphérique dépend de la vitesse à laquelle les fractions anodiques et cathodiques réagissent aux interfaces métal-électrolyte et oxyde-électrolyte. Elle est là moyenne comparables à la corrosion en milieu liquide, sauf que l'électrolyte n'expulse pas de produits de corrosion, et l'électrolyte peut s'évaporer complètement pendant la phase de séchage et se reformer pendant la phase de séchage. Humidité élevée. Par conséquent, les phénomènes de corrosion atmosphérique seront étroitement liés aux polluants existents dans l'air ambiant et son humidité. [15].

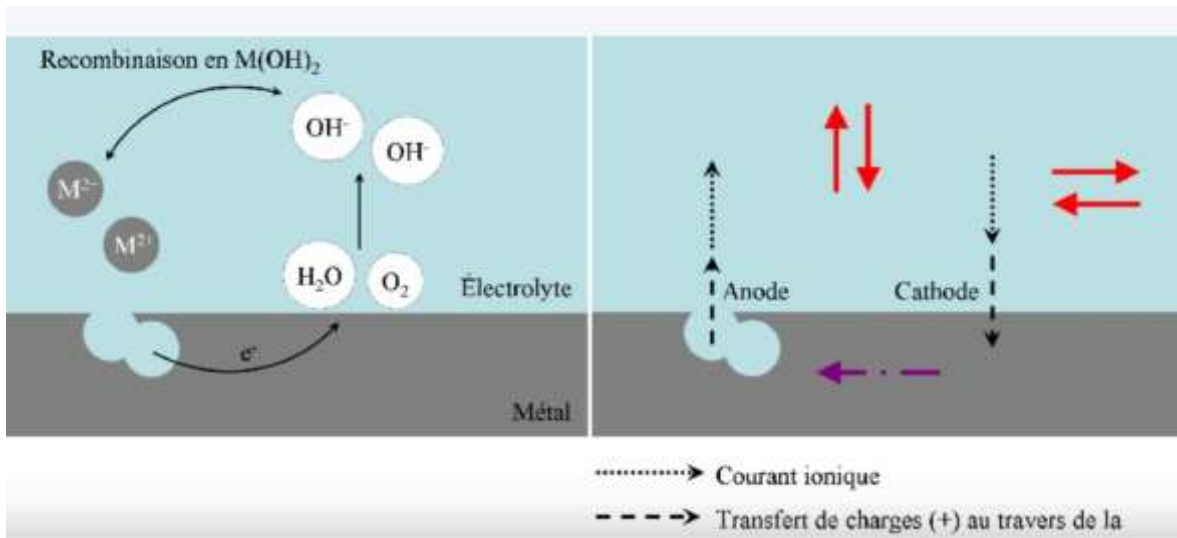


Figure I.4 : Mécanisme réactionnel de la corrosion atmosphérique de l'acier

I.1.5. 3. Corrosion localisée :

La corrosion localisée survient sur une partie du métal à un taux bien supérieur au reste de la surface, elle peut avoir plusieurs formes [16, 17], De façon globale, Si la progression de la corrosion s'accomplit à une vitesse uniforme en tout point de la surface, on parle de corrosion uniforme. Si la progression des vitesses de corrosion est non homogène, on parle de corrosion localisée [18].

I.1.5.3.1. Corrosion galvanique :

C'est l'une des formes les plus courantes de corrosion en milieu aqueux. Elle est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux matériaux dans laquelle une des électrodes (l'anode) se consomme au bénéfice de l'autre (la cathode) qui reste intacte (Figure I.5). Cette sélectivité des réactions est due à une hétérogénéité provenant soit du matériau, soit du milieu ou des conditions physicochimiques à l'interface [19,20].

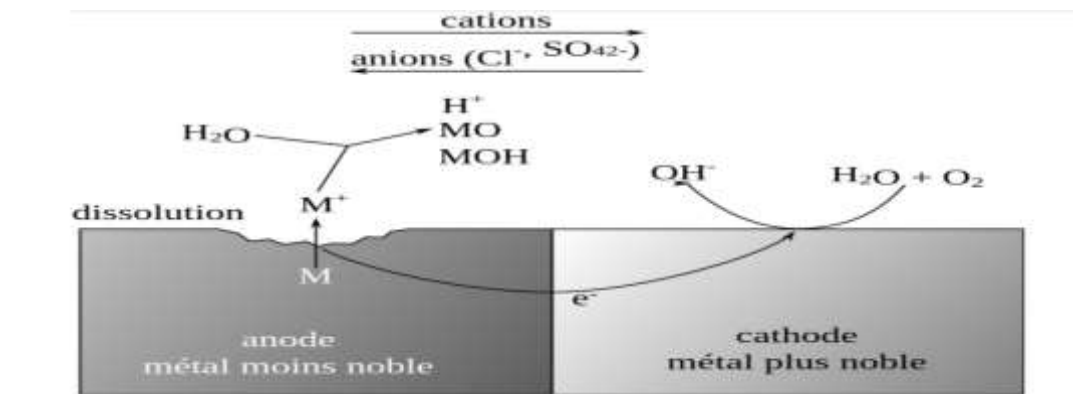


Figure- I.5. Exemple de corrosion galvanique.

I.1.5.3. 2. Corrosion par piqûres :

Cette forme de corrosion est particulièrement insidieuse. L'attaque est limitée aux piqûres, est très localisée et peut progresser rapidement en profondeur, laissant indemne le reste de la surface (**Figure I.6**). Une fois que la fosse commence, les propriétés de la solution environnante changent. Ceci est exacerbé par les phénomènes d'hydrolyse et d'acidification associés à la solution contribue à aggraver la situation. Les solutions les plus corrosives sont celles contenant du chlorure ou du bromure, voire de l'hypochlorite. Les iodures et les fluorures sont beaucoup moins agressifs que ceux mentionnés ci-dessus. La présence de sulfures et d' H_2S augmente le problème de piqûres en réduisant systématiquement la résistance électrique du matériau. L'acier inoxydable est particulièrement sensible à la corrosion par piqûres. Les moyens pour réduire ce type de corrosion sont d'éviter les zones stagnantes et les dépôts, d'agir sur le milieu en travaillant à des températures faibles ou d'utiliser une protection cathodique [21].

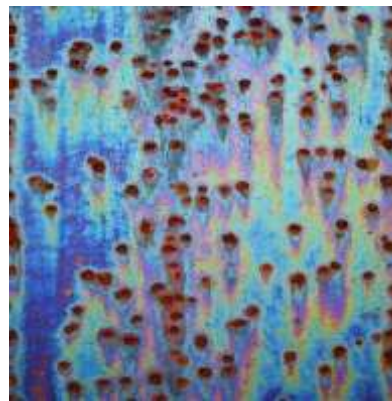


Figure I-6 : corrosion par piqûres

I.1.5.3.3. Corrosion par crevasse (caverneuse) :

Ce type de corrosion est extrêmement répandu car les occasions d'avoir des différences de concentration en un point du côté liquide, sont aussi grandes que d'avoir, du côté métal, des différences de structure [22]. La cause la plus courante est l'oxygénation différentielle, l'eau s'oxygénant par contact avec l'air rencontré, la moindre particule déposée à la surface du métal crée, entre elle et le métal, une zone sous-oxygénée par rapport au liquide en circulation, d'où la formation d'une pile de concentration [23,24], le fer va se dissoudre dans la zone sous-oxygénée (anode) et les ions OH^- vont être générés dans la zone oxygénée (cathode) (**Figure I.7**). Les différences de température peuvent être aussi à l'origine de différences de potentiel [25].



Figure I.7 : Corrosion par crevasse sous un joint

I.1.5.3. 4. Corrosion intergranulaire (intercristalline) :

C'est également une attaque localisée, par contre plus sélective, causée généralement par les traitements thermiques subits par le métal, qui se développe aux points de jonctions des grains de métal. Elle est invisible à l'œil nu, par contre, affecte considérablement la résistance mécanique du métal.

En effet, les points de jonctions constituent, des zones désordonnées par rapport au réseau cristallographique plus régulier des grains. Ils admettent de ce fait de nombreux défauts de structures (lacunes, dislocation), favorables à la précipitation de phases intermétallique ou de composés métalliques tels que les carbures, ainsi qu'à la ségrégation d'impureté en solution solide. Sous prétexte, qu'ils sont chimiquement plus actifs, ils constituent une cible vulnérable lorsqu'ils sont exposés dans un milieu corrosif. A titre d'exemple ; on rencontre cette forme de corrosion dans les aciers inoxydables [26].

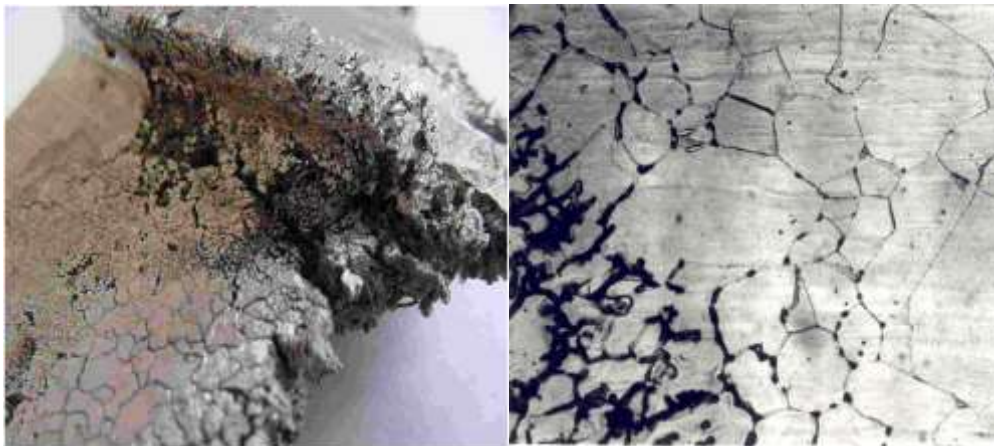


Figure- I. 8.Corrosion intergranulaire

I.1.5.3. 5. Corrosion et dissolution sélective :

Pour certains alliages, l'attaque intervient sélectivement sur l'un des constituants (qu'il s'agisse d'une solution solide ou d'un mélange de phase). Les exemples les plus connus sont l'attaque des laitons par la dézincification (attaque sélective du zinc) qui se traduit par l'existence des zones poreuses de cuivre. Cette attaque peut être très localisée (taches) et se propager alors dans l'épaisseur de l'alliage plutôt que latéralement. L'addition d'arsenic, d'antimoine ou de phosphore dans le laiton permet d'éviter le phénomène. Les fontes grises peuvent être le siège d'une dissolution sélective du fer qui conduit à laisser en place une structure poreuse de graphite, d'où le nom corrosion graphitique ou graphitisation donné à cette forme d'attaque qui est favorisée par les sulfates. Dans tous les cas ces attaques sélectives conduisent à modifier profondément les caractéristiques mécaniques du matériau [27].

I.1.5.3.6. Corrosion sous contrainte et fatigue corrosion :

Ce type de corrosion, particulièrement sournois et dangereux pour les installations, se caractérise par l'apparition de fissures inter ou transgranulaires dont la direction générale de propagation est perpendiculaire à la plus grande contrainte (**Figure I.9**). 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...). Les surfaces de rupture Fissures de CSC présentent un aspect fragile et la perte de matière est généralement très faible. [28].



Figure I-9 : Corrosion sous contrainte

I.1.5.3.8. Corrosion érosion :

Qui 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.10**) [29].



Figure I- 10: Corrosion érosion

I.1.5.3.9. Fragulation par l'hydrogène :

D'une façon générale, la fragilisation à l'hydrogène affecte les alliages à caractéristiques mécaniques élevées comme les alliages de titane et se traduit par la progression rapide de fissure. L'hydrogène par diffusion à l'état atomique pénètre jusqu'au réseau de la matrice métallique et pourrait fragiliser le matériau. En fait, le mouvement de dislocation est rendu plus difficile, autrement dit l'énergie de cohésion entre les atomes est diminuée. Lorsque cette interaction se produit dans des zones sous contraintes, la perte de ductilité qui en résulte conduit à la propagation de fissures [30].

Les références bibliographiques

- [1] **F. Milcard**, "Etude de l'effet des alcaloïdes sur la corrosion de l'acier C38 en milieu acide chlorhydrique 1M" Thèse doctorat, Université des Antilles et de la Guyane, **2013**.
- [2] **P. Parey**, " *Illustrierte Flora von Mitteleuropa*" Pteridophyta, Spermatophyta, **1987**, pages : 1122-1124.
- [3] **H.El bakouri**, " *Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier doux au carbone en milieu acide orthophosphorique par un antibiotique organique*" Mémoire pour du DESA. Université Mohammed 1 – Oujde.
- [4] **S.Guettouch**, " *Récupération du Sulfarlem et synthèse de leurs dérivés en vue d'application dans l'inhibition de la corrosion*" PhD Thesis, Université Kasdi Merbah, Ouargla, **2003**.
- [5] **H.I. Farooqi, M.A. Quraishi, P.A. Saini**, "Natural compounds as corrosion inhibitors for mild steel in industrial cooling systems" Proceedings from European Federation of corrosion (EU-ROCORR.'97), **1997**,I PP. 186.
- [6] **R. Mehibil**, " *Etude de l'efficacité inhibitrice de quelques nouveaux inhibiteurs, dits non polluants, sur la corrosion de deux types d'alliages d'aluminium*" Mémoire de magister, Université de Skikda, **2008**.
- [7] : **S. Bensaada**, " *Cours de corrosion*" Livre en ligne.
- [8] **B. Sutter**, "Les conférences du CETIM corrosion et anticorrosion", **1998**.
- [9] **J. Bernard, A. Michel, J. Philibert, J. Talbot**, " *Métallurgie Générale*" Edition Masson, Paris, **1991**.
- [10] Matériaux métalliques-Phénomène de corrosion: les différentes formes de corrosion aqueuse : Cours en ligne. Disponible sur : <http://www.materiaux.metalliques.com/corrosion.html> (consulté en mars 2007).
- [11] **A. Benali**, " *Synthèse et caractérisation Electrochimique du polypyrrole : application comme primaire*" Magister en Génie des Polymères, Université M'Hamed Bougara-Boumerdes, **2009**, page :73.
- [12] **N. Boudieb**, " *Evaluation des performances des peintures par des techniques Electrochimiques*" PhD Thesis, Université M'Hamed Bougara, Boumerdes, Faculté des Sciences, **2008**, page:103.
- [13] **V. N .Pujol**, " *Etude du mécanisme d'action du monofluoro-phosphate de sodium comme inhibiteur de corrosion des armatures métalliques dans le béton*" Thèse de doctorat, Paris, **2004**.
- [14] **S. Saadoune**, " *Synthèse et caractérisation d'inhibiteurs bi- fonctionnels : application à la corrosion des aciers de construction*" Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas-Setif, Algérie, **2010**.
- [15] **D.Landolt**, " *Traité des matériaux. Corrosion et chimie de surface des métaux. Presses polytechniques et universitaires romandes*" Lausanne, Suisse, **2003**, page: 552.
- [16] **K. E. Heusler, D. Landolt, S. Trasatti**, " *Electrochemical corrosion nomenclature*" Pure and Applied Chemistry, **1989**, 61(1), pages: 19-22.
- [17] **J.C. Scully**, "Corrosion. Protection. Principes fondamentaux " Edition Masson, Paris, **1995**, page:93.
- [18] **B. F. Brown, A. Agrawal**, "Localised Corrosion " Edition R. W. Staehle, NACE, Houston, Texas, **1974**.
- [19] **A. Col, M. Colombié**, " *Phénomènes de Corrosion, 4ème partie. Les différentes formes de corrosion aqueuse* " Dunod, **2010**.
- [20] **C. Defontaine**, " *Mécanismes de corrosion, systèmes de protection et vieillissement accéléré*" Journée thématique, **2011**.
-

-
- [21] **N. El Amine, K. M. Hachemi**, " *Comportement Electrochimique Et Propriétés Mécaniques De L'alliage De Titane Ti6al4v . Effet Des Traitements De Surface*" Thèse de Doctorat Sciences des Matériaux en Métallurgie, Université Mentouri de Constantine, **2009**.
- [22] **Y. Prawoto, et all**, "*Stress Corrosion Cracking of Steel and Aluminum in Sodium Hydroxide: Field Failure and Laboratory Test*" *Advances in Materials Science and Engineering*, **2012**.
- [23] **G. J. Mount, W.R. Hume**, "*Préservation et restauration de la structure dentaire*" De Boeck Supérieur, **2002**.
- [24] **J. Leconte**, "*Tuyauteries-Protection contre la corrosion*" *Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique A830*,**1981**.
- [25] **N.Sridhar,et all**, "*Cervice Corrosion*" ASTM International,**2005**.
- [26] **E. McCafferty** , "*Thermodynamics of Corrosion: Electrochemical Cells and Galvanic Corrosion*" Springer Science & Business Media, **2009**.
- [27] **M. Ashby, D. Jones**, "*Matériaux – Propriétés et applications* " Dunod, Paris, **1998**.
- [28] **F. Dabosi et al**, "*Corrosion localisée*" Ed. Physiques, **1994**.
- [29] **É. Durif**, "*Caractérisation du couplage mécano-électrochimique en pointe de fissure lors de la Fissuration assistée par Corrosion Sous Contrainte - cas du Zircaloy-4 en milieu aqueux halogéné*" thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, **2012**.
- [30] **P.Jean Cunat**, "*Aciers inoxydables Propriétés. Résistance à la corrosion, Technique de l'ingénieur M4541*", **2005**.

chapitre II :
Généralités sur les inhibiteurs
de corrosion

II.1. Introduction :

Pour lutter contre la corrosion, il ne suffit pas de choisir un matériau qui résiste bien à un certain milieu [1]. Alors, Il faut également maitre en évidence des méthodes de protection présentant de bonne efficacité et adéquation d'une part de l'installation et d'autre part a faible cout, ne sont pas toxique. Parmi ces méthodes, les inhibiteurs de la corrosion sont les plus préconisés.

II.2. Historique :

Ce phénomène a été déjà connu par les romains qui avaient mentionné quelques méthodes de protection basées sur l'inhibition pour éviter la corrosion du fer et du bronze. L'étude de la corrosion a débuté aux environs du 17ème siècle, mais ce n'est qu'au cours du 19ème siècle que l'on a étudié scientifiquement les moyens de lutter contre elle. Jusqu'à en 1945 la littérature ne comportait qu'un nombre restreint de références se rapportant aux inhibiteurs de corrosion (<30). Dans un article de 1948, **Waldrip** se référait déjà à un rapport datant de 1943, portant sur la protection contre la corrosion des puits de pétrole [2].

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 et des pétroliers. Les articles publiés durant cette période témoignent d'un grand développement technologique en matière d'inhibition [2].

Durant les quarante dernières années, un nombre croissant de résumés, d'articles et d'autres ouvrages évoquant ce sujet a été recensé : en 1970, 647 articles traitant de l'inhibition sont dénombrés. En 2012, près de 17 000 articles traitent de l'inhibition de la corrosion [3].

II.3. Définition :

Selon la norme internationale ISO 8044 (1999) et la Société nationale des ingénieurs de la corrosion (NACE International, 2007), 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" [4].

II.4. Propriétés et conditions d'utilisation des inhibiteurs :

Un inhibiteur de corrosion doit abaisser la vitesse de corrosion d'un métal sans e affecter les caractéristiques physico-chimiques, il doit être stable en présence des autres constituants du milieu. Un inhibiteur est reconnu comme tel s'il est stable à la température

d'utilisation et efficace à faible concentration, être compatible avec les normes de non toxicité et être peu onéreux [5]. Il peut être utilisé pour une protection permanente (surveillance d'un système...), ou plus couramment en vue d'une protection temporaire (stockage, décapage...) [6].

II.5. classification des inhibiteurs :

Il existe de nombreuses façons de classer les inhibiteurs de corrosion en fonction de leur domaine d'application, de leur composition chimique, de la nature électrochimique du processus, ou de leur mécanisme d'action interfaciale [7]. Le schéma ci-dessous représente ce classement :

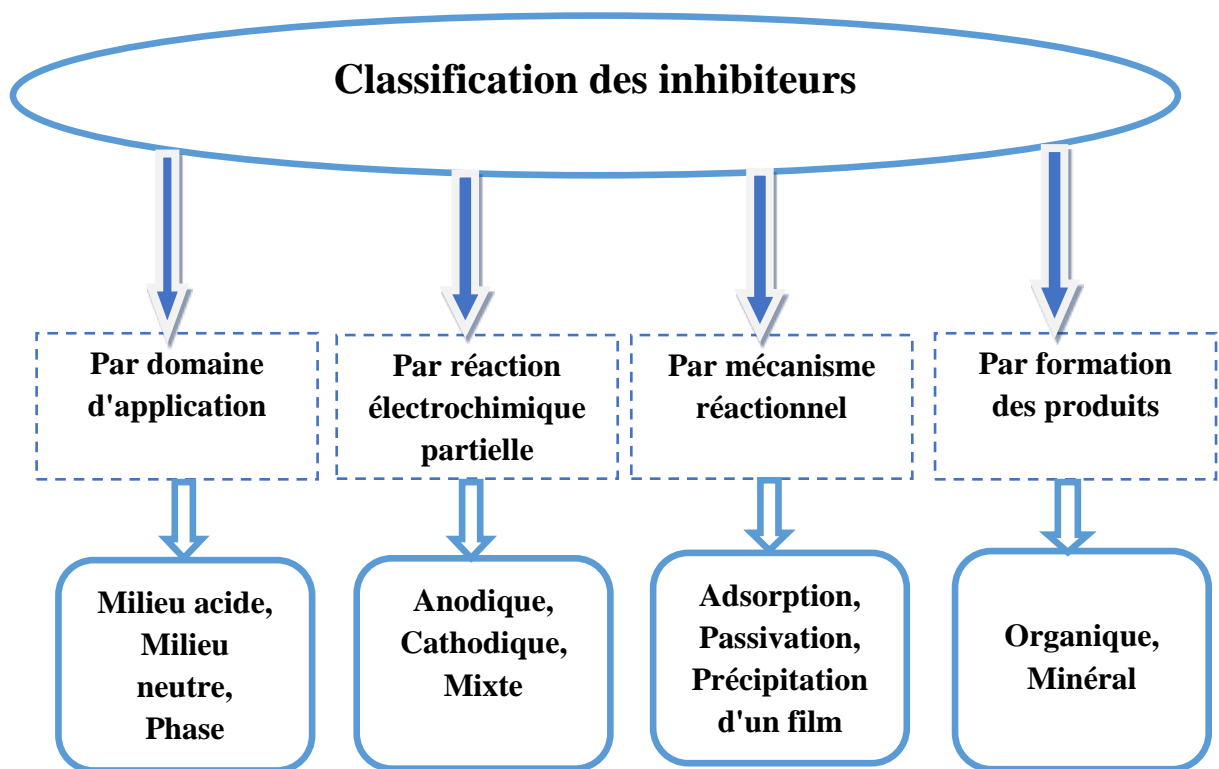


Schéma (II.1): Classification des inhibiteurs de corrosion.

II.5.1. Classification par formation des produits :

II.5.1.1. Inhibiteur inorganique :

Le plus souvent utilisé des inconvénients des métaux en milieu proche de la neutralité, voir 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 et cations).

Les cations inhibiteurs sont essentiellement Ca^{2+} et Zn^{2+} et ceux qui forment des sels insolubles avec certains anions tels que l'hydroxyle (OH^-). Les principaux anions inhibiteurs sont les oxo-anions de type XO_4^{n-} tels que les chromates, les molybdates, les phosphates, les silicates, ... [8-9].

II.5.1.2. Inhibiteur organique :

Les molécules organiques utilisées comme inhibiteurs contiennent une partie non polaire, hydrophobe et relativement volumineuse, constituée principalement d'atomes de carbone et d'hydrogène, et une partie polaire, hydrophile, constituée d'un ou plusieurs groupes fonctionnels, tels $-\text{NH}_2$ (amine), $-\text{SH}$ (mercapto), $-\text{OH}$ (hydroxyle), $-\text{COOH}$ (carboxyle), $-\text{PO}_4$ (phosphate) et leurs dérivés. La molécule se lie à la surface par son groupe fonctionnel, alors que sa partie non polaire, plus volumineuse, bloque partiellement la surface active. Ce phénomène ne se limite d'ailleurs pas aux solutions acides, il s'applique à tous les inhibiteurs organiques [10].

II.5. 2. Classification par mécanisme réactionnel :

Il n'existe pas de mode d'action unique des inhibiteurs de corrosion. Un même composé aura d'ailleurs souvent un mécanisme d'action qui sera fonction du système de corrosion (nature du métal à protéger + milieu corrosif) en présence duquel il se trouvera [11].

Quel que soit le mécanisme par lequel l'inhibiteur de corrosion agit, il existe néanmoins un certain nombre de considérations qui sont valables pour tous les inhibiteurs de corrosion :

- Le côté mécanique ou électrochimique (interférence dans les opérations de base de la corrosion).
- Le côté morphologique (interférence dans la structure internationale).

II.5.2. 1. Mécanisme d'action interfacial d'inhibition :

Les inhibiteurs d'adsorption ou "d'interface" et les inhibiteurs dits "d'interphase". Les différencie à partir de leur mode de fixation sur la surface métallique [12] : Les premiers sont plutôt observés en milieu acide et agissent en formant des films bidimensionnels de molécules par adsorption à la surface du métal alors que les seconds sont spécifiques des milieux neutres ou alcalins et forment des films tridimensionnels qui intègrent les produits de dissolution du substrat [13-14]. Ces derniers ne se contentent ainsi pas d'être adsorbés aux interfaces métal/oxyde et oxyde/électrolyte, mais sont également incorporés dans les couches barrières

(en formant des complexes par exemple) ; conduisant à des réseaux homogènes et denses présentant de fait une faible porosité et une bonne stabilité [15].

II.5.3. Classification relative au mécanisme d'action électrochimique :

On peut distinguer :

- Les inhibiteurs anodiques : L'augmentation de la polarisation anodique (inhibiteur anodique ou anionique).
- Les inhibiteurs cathodiques : L'augmentation de la polarisation cathodique (inhibiteur cathodique ou cationique).
- Les inhibiteurs mixtes.

Les inhibiteurs de corrosion forment une couche barrière sur la surface métallique (**Figure II.1**) qui modifie les réactions électrochimiques en bloquant soit les sites anodiques soit les sites cathodiques.

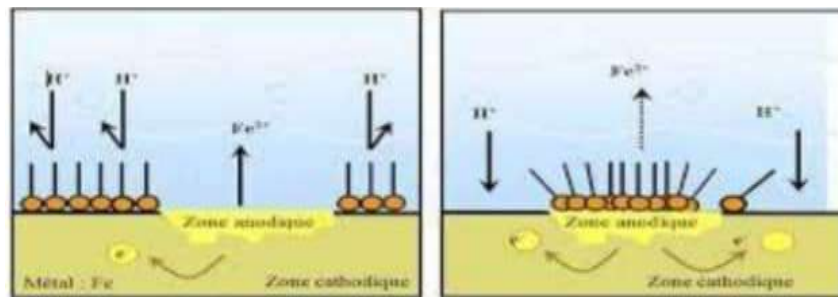


Figure (II.1): Formation des couches barrières (A) cathodiques et (B) anodiques interférant avec les réactions électrochimiques, dans le cas d'une étude en milieu acide.

II.5.3.1. Les inhibiteurs anodiques :

Les inhibiteurs anodiques réduisent la densité de fusion actuelle du métal et déplacent le potentiel de corrosion dans le sens positif. Il est nécessaire d'utiliser ce type d'inhibiteur dans une quantité suffisante sinon cela peut augmenter l'érosion des zones non protégées [16].

II.5.3.2 Les inhibiteurs cathodiques :

Les inhibiteurs cathodiques, diminuent la densité de courant de réduction du solvant et déplacent le potentiel de corrosion dans le sens négatif.

Les inhibiteurs cathodiques sont considérés comme plus sûrs que les inhibiteurs anodiques car ils ne risquent pas de favoriser la corrosion localisée [17].

II.5.3.3. Les inhibiteurs mixtes :

Les inhibiteurs mixtes diminuent la vitesse des deux réactions anodiques et cathodiques partielles mais modifient peu le potentiel de corrosion par augmentation de la résistance de la solution suite à la formation d'un film à la surface du métal. Le déplacement de potentiel de corrosion lié par le sens de la formation de ce film, s'il est déposé à la surface cathodique, le potentiel de corrosion se déplace vers des valeurs négatives ou bien le cas contraire, le potentiel de corrosion se déplace vers des valeurs positives [18].

Les trois types d'inhibiteurs (cathodique, anodique, mixte) selon le déplacement de potentiel sont montré dans la **Figure (II.2)**

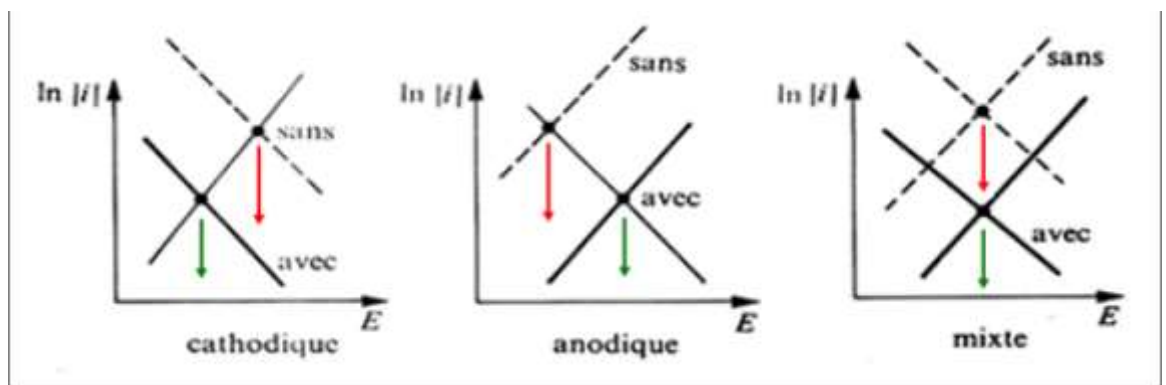


Figure (II.2) Diagrammes d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur de corrosion.

II. 5. 4. Classification par domaine d'application :

II.5.4.1. Inhibition de la corrosion en milieu acide :

Il existe un grand nombre de matériaux diverses substances organiques, parmi les inhibiteurs de solutions acides, en particulier les molécules aromatiques et les macromolécules. Son efficacité dépend de sa structure moléculaire et de sa concentration. Ils s'adsorbent à la surface du métal et ralentissent ainsi la corrosion.

II.5.4.2. Inhibition en milieu neutre :

La corrosion en milieu neutre est due essentiellement à l'oxygène dissous et à la présence des ions agressifs tels les ions chlorure, sulfate et les nitrate. Les risques d'une attaque diminuent si l'on empêche l'oxygène d'accéder à la surface (inhibition cathodique). Alternativement, on peut diminuer la vitesse de la réaction partielle anodique en rendant le métal passif (inhibition anodique). On peut diminuer la vitesse de corrosion par des

substances, telles que les benzoates, les tartrates ou les salicylates etc. qui s'adsorbent à la surface et bloquent les sites de réaction.

II.5.4.3. Inhibition par Adsorption :

II.5.4.3.1. Adsorption physique :

L'adsorption physique résulte d'interaction électrostatique entre les ions ou les dipôles des molécules (en général organiques) et la surface du métal électriquement chargée. La position du potentiel de corrosion de ce métal est définie la charge du métal par rapport à son potentiel de charge nulle E_0 . Lorsque le potentiel de corrosion en métal est dans le domaine positif par rapport à E_0 . Les anions sont adsorbés aisément l'adsorption des cations est favorisée Lorsque le potentiel de corrosion de ce métal est moins que E_0 .

II.5.4.3.2. La chimisorption :

Le plus important type d'interaction entre l'inhibiteur et le métal est la chimisorption. Les espèces adsorbées entrent en contact direct avec la surface métallique. Il est en général admis, que le processus d'adsorption chimique met en jeu un transfert ou un partage d'électrons entre les molécules d'inhibiteur et les orbitales (d) vacantes de la surface du métal. Dans le cas d'un inhibiteur organique, le transfert d'électrons se fait par l'intermédiaire des orbitales ayant des électrons faiblement liés. Cette situation peut se produire avec des molécules ayant des liaisons multiples ou des noyaux aromatiques possédant des électrons. Par ailleurs, le transfert est favorisé par la présence d'hétéroatomes avec des paires libres d'électrons.

II.5.4.3.3. Interactions entre les inhibiteurs adsorbés :

Lorsque la couverture de la surface métallique par les espèces inhibitrices adsorbées augmente, des réactions latérales entre les molécules inhibitrices peuvent survenir, influençant ainsi l'efficacité. Les interactions latérales attrayantes donnent généralement lieu à une adsorption plus forte et plus grande efficacité d'inhibition. Cet effet a été mis en évidence dans le cas de composés contenant de longues chaînes hydrocarbonées, en raison de l'attractivité de forces de vander Waals. En présence d'ions ou de molécules contenant des dipôles, des attractions répulsives peuvent se produire, affaiblissant ainsi l'adsorption et diminuant l'efficacité de l'inhibition.

II.5.4.3.4. Relations entre la réactivité et l'efficacité des inhibiteurs :

La nature de l'inhibiteur initialement présent dans les solutions acides peut changer avec le temps et/ou le potentiel d'électrode à la suite de réactions de réduction, des réactions de polymérisation ou la formation de produits de surface. L'inhibition en raison des produits de réaction est généralement appelée inhibition secondaire, alors que l'inhibition primaire est attribuée au composé initialement ajouté à la solution. L'inhibition secondaire peut être supérieure ou inférieure à la primaire inhibition, en fonction de l'efficacité des produits de réaction.

II.5.4.3.5. Isotherme d'adsorption :

Les observations expérimentales ont mené les chercheurs à développer plusieurs modèles théoriques à savoir :

Langmuir $\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K} + C$

Temkin $\theta = \frac{1}{\alpha} \log KC$

Freundlich $\log \theta = \log K + \alpha \log C$

Frumkin $\log \frac{\theta}{C(1-\theta)} = \log K + \alpha \theta$

II.6. Utilisation industrielles courantes :

- Les inhibiteurs ont plusieurs domaines traditionnels d'application :
- Le traitement des eaux (eaux sanitaires, eaux de procédés industriels, eaux de chaudières, etc.)
- L'industrie du pétrole : forage, extraction, raffinage, stockage et transport, etc.
- Les peintures où les inhibiteurs de corrosion sont des additifs assurant la protection anti corrosion des métaux.
- 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.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. J. Berer; A. Michel; J. Philibert; J. Talbot; *Métallurgie générale*; 2^{ème} édition; Ed; 1984.
2. Waldrip, H.E., Present day aspects of condensate well corrosion. *Corrosion*, 1948. 4 (12): p. 611-618.
3. Eddine, H.N., Utilisation de tétra (2- hydroxy- 3 (méthcryloyloxy) propyl) benzène- 1, 2, 4, 5- tétracarboxylate)(HMBC) dans la synthèse des polymères et dans la lutte contre la corrosion du cuivre en milieu d'acide chlorhydrique HCl 1N. 2015.
4. Popova, A., et al., AC and DC study of the temperature effect on mild steel corrosion in acid media in the presence of benzimidazole derivatives. *Corrosion science*, 2003. 45(1): p. 33-58
5. Patel, N., S. Jauhari, and G. Mehta, Mild steel corrosion inhibition by Bauhinia purpurea leaves extract in 1 N sulphuric acid. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2009. 34(2): p. 61.
6. Corrosion, E.F.o., Proceedings [of The] 4th European Symposium on Corrosion Inhibitors: 82th Manifestation of the European Federation of Corrosion, Ferrara (Italy), 15th-19th September 1975. 1975: Università degli studi di Ferrara.
7. Bellal, Y., Protection d'acier de construction vis-à-vis de la corrosion par des dérivés iminiques. 2018.
8. Sanyal, B., Organic compounds as corrosion inhibitors in different environments—a review. *Progress in Organic Coatings*, 1981. 9(2): p. 165-236.
9. Abd El-Maksoud, S. and A. Fouda, Some pyridine derivatives as corrosion inhibitors for carbon steel in acidic medium. *Materials chemistry and physics*, 2005. 93(1): p. 84-90.
10. Landolt, D., *Corrosion et chimie de surfaces des métaux*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Vol. 12. 1997, Lausanne.
11. Ichchou, I., Étude électrochimique de l'inhibition classique ou par des monocouches auto-assemblées d'un dérivé de la thiourée, vis-à-vis de la corrosion en milieu acide de l'acier au carbone XC38. Mémoire de magistère, université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen, Algérie, 104p, 2011.
12. Lorbeer, P. and W. Lorenz, The kinetics of iron dissolution and passivation in solutions containing oxygen. *Electrochimica Acta*, 1980. 25(4): p. 375-381.
13. Karman, F., et al., The role of oxide layer formation during corrosion inhibition of mild steel in neutral aqueous media. *Electrochimica Acta*, 1998. 43(1-2): p. 69-75.
13. Tsuji, N., K. Nozawa, and K. Aramaki, Ultrathin protective films prepared by modification of an N, N-dimethylalkylamine monolayer with chlorosilanes for preventing corrosion of iron. *Corrosion science*, 2000. 42(9): p. 1523-1538.
14. Landolt, D., *corrosion et chimie de surfaces des métaux*, presses Polytechniques et Universitaire Romands. Lausanne, 1997: p. 386-388.
15. Constantin, F., Etude de l'efficacité d'inhibiteurs de corrosion utilisés dans les liquides de refroidissement. 2011, INSA de Lyon; Universitatea din Pitești. Facultatea de Litere (România).

-
16. BOULKROUNE, M., Inhibition de la corrosion du zinc en milieu acide. Université Constantine, 2014. 1.
 17. BENSABA, A., Etude d'inhibition de la corrosion du fer en milieu acide par l'extrait de periploca. 2020, جامعة غرداية.
 18. Li, P., et al., Electrochemical impedance and X-ray photoelectron spectroscopic studies of the inhibition of mild steel corrosion in acids by cyclohexylamine. *Electrochimica Acta*, 1997. 42(4): p. 605-615.

Chapitre III :
Matériaux, solutions
d'étude et techniques
expérimentales

III.1.Introduction :

A cause de leurs bonnes propriétés mécaniques et de leur coût relativement bas, les aciers au carbone sont des matériaux qui sont très utilisés dans l'industrie. Les pièces couramment usinées sont en grande majorité fabriquées à partir de métaux ferreux. Ainsi , l'étude de l'inhibition de la corrosion de ces matériaux, s'est avéré 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, dans les forages pétroliers et pour le nettoyage des équipements industriels. La grande partie des inhibiteurs utilisés en milieu acide sont des composés organiques contenant des hétéroatomes tels que l'azote, le soufre, le phosphore et l'oxygène [1]. Les données existantes révèlent que la plupart de ces composés agissent par adsorption à la surface du métal et que ce mode d'action dépend essentiellement de la nature et la charge superficielle du métal, du type de l'électrolyte agressif et de la structure chimique des inhibiteurs. Notre travail consiste, à étudier l'effet d'inhibition de corrosion de *Turgenia latifolia*, le substrat étant un acier semi-doux et le milieu agressif l'acide chlorhydrique HCl .Nous nous proposons également d'étudier l'effet de la température sur l'efficacité inhibitrice.

III.2.Généralités sur les aciers

III.2.1. Introduction

L'acier peut être défini comme un matériau composé essentiellement de fer et présentant une teneur en carbone inférieure à 2 %. Il peut encore contenir d'autres éléments mais de tous ces éléments d'alliage, le carbone à l'effet le plus prononcé sur les propriétés de l'acier. Les aciers sont élaborés pour résister à des sollicitations mécaniques ou des agressions chimiques ou une combinaison des deux [2-3].

III.2.2. Les différents types des aciers

Les aciers présentent un très grand nombre de nuance différente. On peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation. L'adsorption de cette dernière nous permet de recenser quatre familles d'aciers :

- Les aciers au carbone d'usage général
- Les aciers de traitements thermiques, alliés ou non
- Les aciers à outils
- Les aciers inoxydables

Les aciers au carbone ou ordinaires : sont des aciers standards d'usage général. Ils sont constituent environ 80% de la production des aciers [4].

Tableau(III.1) : Aciers ordinaires ou aciers au carbone non allié [4]

Nuance	Pourcentage de carbone (C)	Emplois
extra-doux	$C < 0,15$	tôles pour carrosserie, feuillards, quincaillerie, pièces de forge
Doux	$0,15 < C < 0,20$	charpentes métalliques, profilés, constructions mécaniques courantes, boulons, fils ordinaires
demi-doux	$0,20 < C < 0,30$	pièces de machines pour applications mécaniques, pièces ou bâtis moulés, pièces forgées
demi-dur	$0,30 < C < 0,40$	petit outillage, éléments de machines agricoles, organes de transmission
Dur	$0,40 < C < 0,60$	pièces d'outillage, d'armement, glissières, rails et bandages, ressorts, coutellerie, pièces moulées et traitées
extra-dur	$0,60 < C$	outils d'usinage et découpe, câbles, ressorts

Dans notre travail on a utilisé l'acier demi-doux parce qu'il est :

- Faiblement résistant à la corrosion
- Le prix moins cher
- Plus utilisé dans l'industriel
- L'acier le matériau le mieux placé pour relever les défis du futur.

III.3.Matériau :

III.3.1.Préparation des surfaces :

Puisque la corrosion est un phénomène interracial entre le métal et son environnement, alors l'état de surface joue un rôle très important dans le comportement du métal vis-à-vis de la corrosion.

III.3.2. Echantillon :

Le matériau utilisé comme électrode de travail est l'acier API 5L Gr B. Sa composition chimique est donnée dans le **tableau-III.2**

Tableau- III.2: Composition chimique de l'acier API 5 L Gr B en % massique

élément	C	Mn	S	P	Fe
%	0.26	1.15	0.04	0.05	balance

III.3.3. Préparation des échantillons

L'échantillon a été coupé à l'aide d'une tronçonneuse, dans ce cas les échantillons sous forme Trapézoïdal $((0.59\text{cm}+0.686\text{cm})/2*0.827\text{cm})$ de $S = 0.53\text{cm}^2$. Il est lié à un fil conducteur et enrobé dans une résine thermodurcissable et inerte chimiquement. L'enrobage est réalisé dans un moule en plastique et abandonné à l'air ambiant pendant 24 heures pour permettre à la résine de se solidifier.

III.3.4. Polissage :

Afin d'obtenir des résultats fiables, l'électrode de travail subit avant chaque essai, un prétraitement, qui consiste en un :

- L'opération de polissage mécanique a été effectuée avec du papier abrasif de différentes granulométries : 400, 1000, 1200 et 2000 afin d'obtenir un état de surface adéquat.
- Rinçage à l'eau distillée puis à l'acétone et enfin l'eau distillée une autre fois ;
- Séchage à l'air afin d'éviter la formation immédiate des produits de corrosion. Les traitements sont nécessaires afin de rendre la surface chimiquement active.

III.4. Milieu d'étude :

III.4.1. Milieu corrosif :

La solution corrosive est une solution d'acide chlorhydrique HCl 1M (dans cette concentration la susceptibilité du matériau à la corrosion est en fonction du nombre de protons de l'électrolyte. Une forte concentration en protons dans la solution augmente l'agressivité du milieu obtenue, par dilution de l'acide commercial concentré à 37% par l'eau distillée et 1,19 densité.

III.4.2. Préparation le milieu corrosif:

.Après la préparation de la solution corrosive, nous préparons des solutions (HCl +inhibiteurs) à différentes concentrations d'inhibiteurs (00 ppm, 100 ppm, 200 ppm, 300 ppm, 400 ppm, 500 ppm, 600 ppm).

III.4.3. Montage expérimental :

III.4.3.1. La cellule électrochimique :

L'expérience électrochimique est équipée d'un montage classique à trois électrodes ✓
L'acier comme électrode de travail (ET).

- ✓ Une électrode de platine (CE) (assure la fermeture du circuit électrique).
- ✓ Une électrode de référence (ER) au calomel Hg₂/Cl₂ /KCl

III.4.3.3. Protocole expérimental

Dans le présent travail toutes les essais électrochimiques ont été réalisés à l'aide d'un potentiostat radiometer PGZ301 avec un logiciel Volta Master 4, dans une cellule classique (en verre pyrex d'une contenance de 200 ml) à trois électrodes, une électrode de travail (acier API 5L Grade B), une électrode de référence au calomel saturé (ECS) couplée à un capillaire fin dont l'extrémité est placée près de l'électrode de travail afin de minimiser la contribution ohmique, et une contre-électrode inerte chimiquement (en platine). Avant chaque expérience, la cellule a été nettoyée à l'eau distillée et séchée avec du papier absorbant. Le système a été connecté à un ordinateur. Avant la mesure, l'électrode de travail est plongée dans la solution d'essai au potentiel en circuit ouvert pendant 1 heure pour atteindre un état stable. Notons qu'un bain thermostat a été utilisé pour maintenir la température de la solution à la valeur désirée. Pour tracer les courbes, traiter et analyser les mesures électrochimiques, tous les résultats sont transférés du logiciel Volta Master 4 à ORIGINE 6.0 (logiciel de traitement et d'analyse de données scientifiques).

III.5. Généralités sur *Turgenia latifolia* :

III.5.1. Description botanique de la plante :

❖ Partie aérienne

- **Tiges** : dressées à soies raides, sillonnées hispide (10-40 cm).
- **Feuilles** : également à soies raides (face supérieure à poils fins hérissés et étalés, face inférieure à poils fins hérissés et divergents sur les nervures), glauques, pennatiséquées, bords ciliés, segments allongés, lancéolés, pennatifides, dentés.
- **Fleurs** : fleurs assez grandes, ordinairement rouges ou roses en ombelles longuement pédonculées opposées aux feuilles ; calice à 5 dents poilues, avec de 2 à 4 rayons inégaux. Involucre et involucrelle avec de 2 à 4 bractées égales ; pétales échancrés.

➤ **Fruits:** akènes de grosse taille (1 cm de long), ovoïdes, acuminés, comprimé par le côté, hérissé d'aiguillons rougeâtres. Carpophore persistant sur l'inflorescence après la chute du fruit [5].



Figure (III.1) : Les fleurs et les feuilles *Turgenia latifolia*.

III.5.2.Distribution

Afrique du Nord, Europe centrale et méridionale, Iran, Sibérie et Asie occidentale, Afghanistan, Himalaya en Inde et W. Pakistan

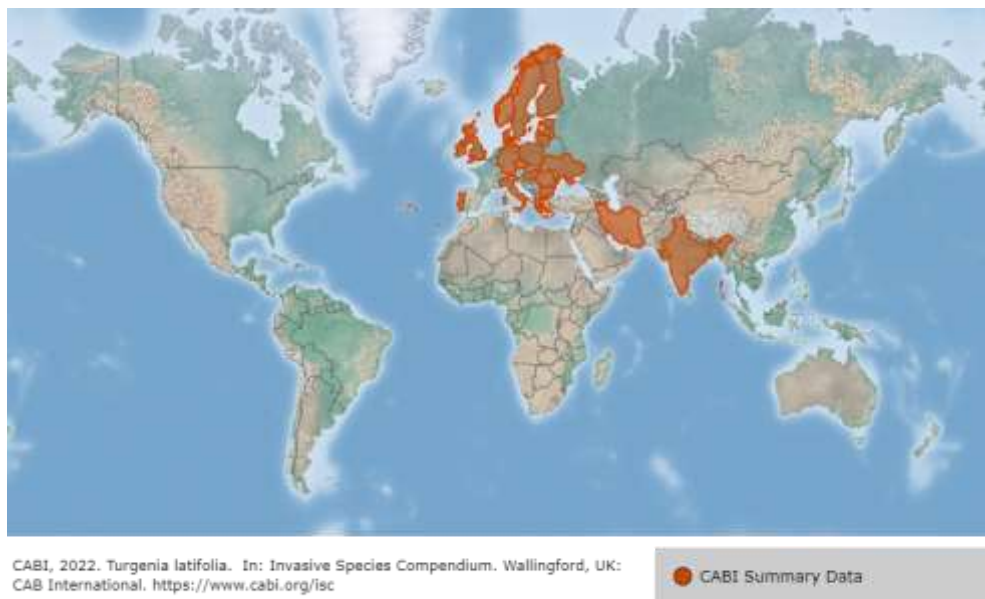


Figure (III.2) : Distribution de *Turgenia latifolia*

III.5.3. Classification botanique de *Turgenia latifolia*.Tableau (III.3) : Caractérisations de *Turgenia latifolia*

Les fleurs	rouges ou roses
Fruits	akènes de grosse taille
Inflorescences	ombelles longuement pédonculées, opposées aux feuilles
La floraison	De Mai à Aout

III.5.4. Classification

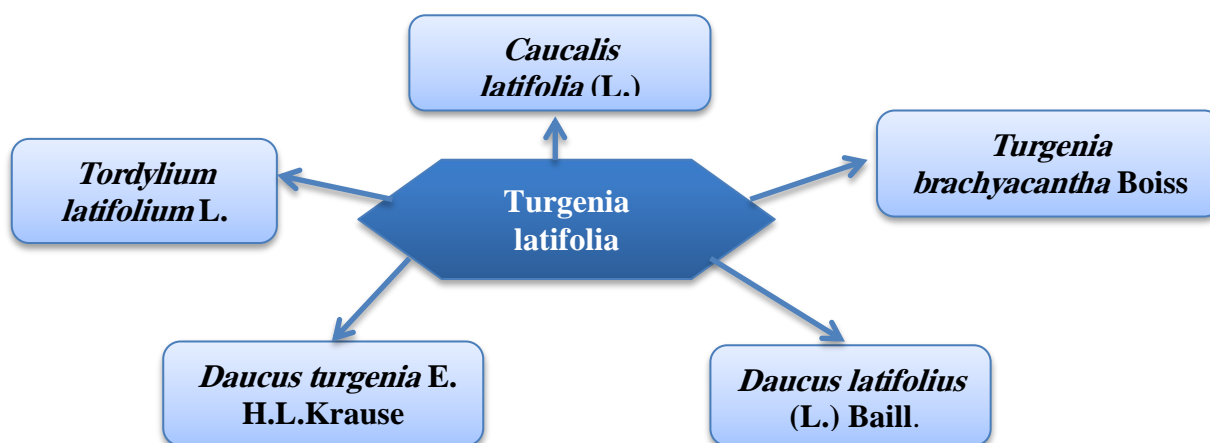
Tableau (III.4) : Classification de *Turgenia latifolia*

Règne	Plantae
Sous règne	Viridaeplantae
Embranchement	Tracheophyta
Sous embranchement	Spermatophyta
Classe	Magnoliopsida
Ordre	Apiales
Famille	Apiaceae
Genre	Turgenia
Espèce	Turgenia latifolia
Nom français	Tordyle à larges feuilles ou Caucalis à feuilles larges
Nom anglais	greater bur-parsley
Nom scientifique	Caucalis latifolia L.

III.5.5. Récolte de la plante

Les parties aériennes de *Turgenia latifolia* (Apiaceae), ont été collectés à la région de Sétif (Est de l'Algérie) pendant la période de floraison en juin (2019), identifiée par le Pr. H. Laouer (Département de biologie, Université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie)

III.5.6. Synonymes

Schéma (III.1) : Synonymes de *Turgenia latifolia*III.5.7. Préparation des extraits de *Turgenia latifolia*

➤ Dans notre travail, nous sommes intéressés à étudier *Turgenia latifolia*, ce dernier est coupée en petites morceaux, après le processus de séchage de la plante à l'abri du soleil, nous pesons une quantité $m=500g$ dans une grande bouteille en verre on a effectué une immersion de toutes les parties de la plante découpés dans une solution méthanolique MeOH (100%) pendant 24heures, cette étape dite la macération; Ensuit, nous le filtrons et répétons le processus deux fois

➤ Après prélèvement de liquide obtenu, on évapore le méthanol sous vide à une température $T=38C^{\circ}$, jusqu'à l'obtention d'un liquide visqueux (3macération).

➤ On ajoute sur ce dernier obtenu $V=600$ ml d'eau distillé très chaude et bien mélanger.; après 1jour ,la solution est filtrée deux fois. Ce dernier aide à éliminer de la chlorophylle, les graisses et les autres impuretés. Après la filtration du mélange et évaporation, en fin on obtient un extrait se forme d'un gel .

➤ L'extrait brut est mélangé avec l'éther de pétrole, après séparation du mélange on récupère la phase organique supérieure. Nous répétons l'opération trois fois , après évaporation sous vide à sec, on obtient l'extrait d'éther de pétrole.

• L'éther de pétrole pour donner une phase aqueuse purifié (ph1).

➤ La phase aqueuse est soumise à une autre extraction par diéthyl éther; on obtient un extrait $m=0.56g$.

• L'éther diéthylique pour obtenir une phase organique contenant les flavonoïdes aglycones et les aglycones méthoxyle (ph2).

- Ensuit par l'acétate d'éthyle, la masse d'extrait est $m=0.52g$
 - L'acétate d'éthyle pour récupérer dans la phase organique certains flavonoïdes aglycones mais surtout les mono glycosides (ph3).
- On extrait la phase aqueuse dans n-butanol; la masse d'extrait butanolique est $m=1.33g$.
 - Le n-butanol pour récupérer notamment les flavonoïdes di et tri glycosides et la phase aqueuse finale comporte surtout les flavonoïdes glycosyles plus polaires (ph4)

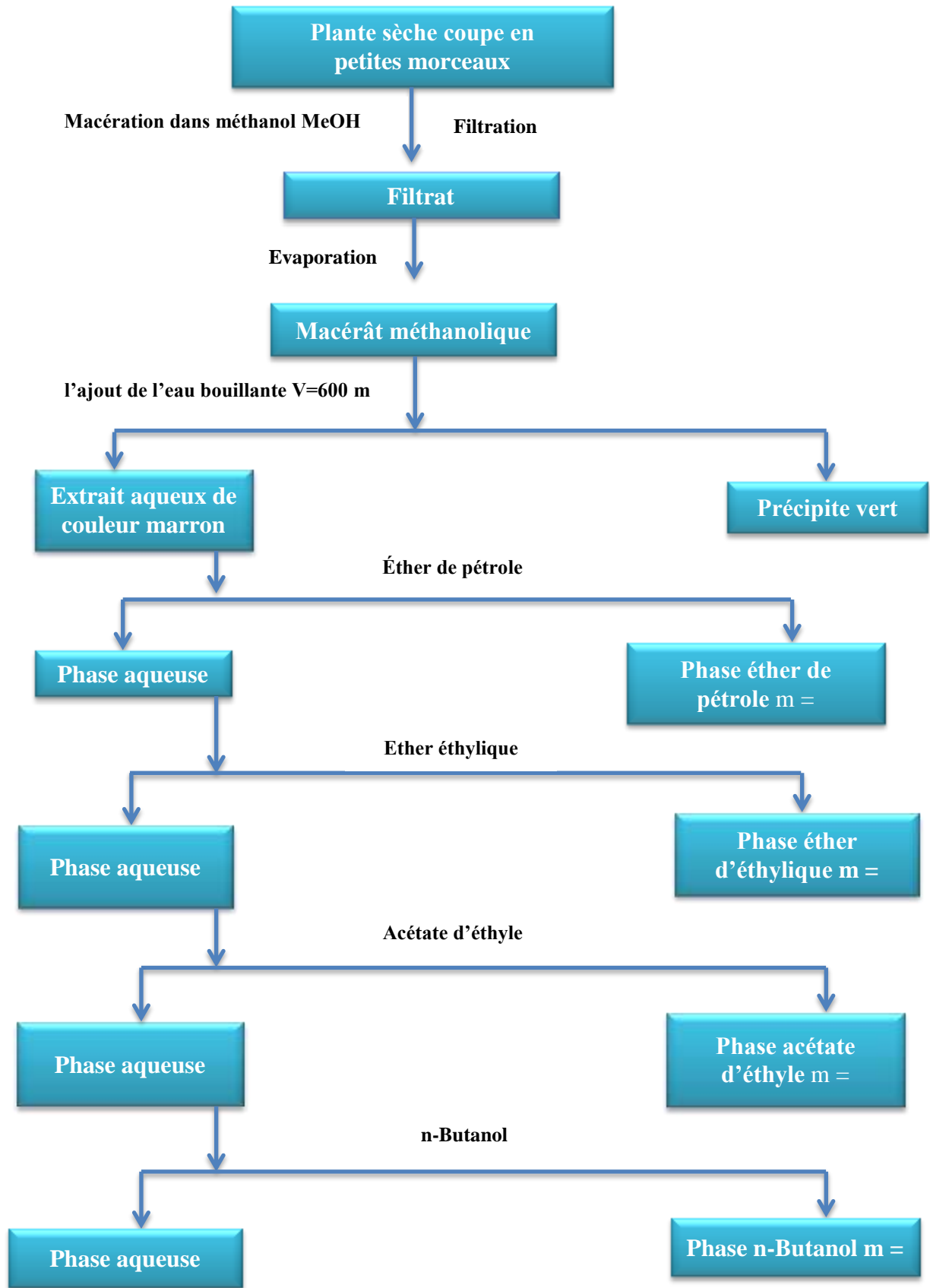


Schéma (III.02) : Protocole d'extraction de *Turgenia latifolia*

III.6. Méthodes électrochimiques

Les méthodes électrochimiques utilisées permettant l'étude du phénomène de corrosion peuvent être divisées en deux catégories :

- Méthodes stationnaires,
- Méthodes transitoires.

III.6.1 Méthodes stationnaires

III.6.1.1. Evolution du potentiel libre en fonction du temps :

C'est le potentiel de l'électrode de travail (à étudier) également désigné par potentiel en circuit ouvert, potentiel spontané, potentiel d'abandon, de repos ou dit aussi de dissolution ou de corrosion. Il doit être mesuré par rapport à une électrode de référence lorsqu'aucun courant ne traverse cette dernière. C'est la seule mesure qui n'entraîne absolument aucune perturbation de l'état du système étudié. Le suivi du potentiel libre en fonction du temps reflète la tendance à la corrosion et donnent le degré de noblesse du métal. Il donne des informations sur les transformations préliminaires, sur la nature des processus en cours à l'interface métal/électrolyte : corrosion, passivation. [6]

III.6.1.2 Courbes de polarisation intensité- potentiel

La détermination des courbes intensité-potentiel des matériaux en milieu corrosif est un outil fondamental de l'étude des phénomènes de corrosion. Elles donnent la variation de l'intensité du courant qui circule entre l'électrode à étudier et une électrode de platine, en fonction du potentiel imposé à l'électrode à étudier, repéré par rapport à une électrode de référence [7]. L'examen de ces courbes permet d'obtenir un grand nombre de renseignements sur le comportement de métal immergé dans l'électrolyte, en particulier en ce qui concerne son aptitude à la passivation ou à la corrosion. Elle permet aussi de déterminer le mécanisme de corrosion (cinétique de transfert de charge, transfert de matière, adsorption des espèces sur l'électrode...) et de distinguer l'influence de l'inhibiteur sur chacune des réactions.

III.6.2 Méthodes transitoires :

III.6.2.1 La spectroscopie d'impédance électrochimique :

L'étude des processus électrochimiques (transport de matière, réactions chimiques et électrochimiques) nécessite l'utilisation de techniques de régulation et d'analyse dynamique des grandeurs fixant l'état d'une interface électrode-solution. Après l'étude préalable du système électrochimique en régime stationnaire si celui-ci est simple, le recours à des

techniques non stationnaires dont la spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) constitue un recours incontournable pour identifier les processus interfaciaux. La SIE est en effet, une méthode transitoire qui permet de séparer théoriquement les contributions des différents phénomènes électrochimiques se déroulant à l'interface métal/solution. C'est une technique très largement utilisée dans les études des phénomènes de corrosion. Notamment pour l'étude des mécanismes réactionnels, la caractérisation des couches superficielles et la mesure de la vitesse de corrosion. [8]

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **D. Landolt**, "*Corrosion et Chimie de Surface des Métaux. Traité des matériaux*, Presses Polytechniques" Universitaires Romandes ,**1993**.
- [2] T.T.X. Hang, T.A. Truc, N.T. Duong, N. Pébère, M.G. Olivier, Prog. Org. Coat. 74 (2012), 343.
- [3] P.B. Raja, M.G. Sethuraman, Materials.Lettrs. 62,(2008),113.
- [4] H. Marouf, Thèse de magister en génie mécanique, Unv. Tizi-Ouzou, 2012.
- [5] **J.A. Battandier**, "*Flore de l'Algérie: Dicotylédones*" Adolphe Jourdan ,**1888**.
- [6] **A. Corrigan** ,"*The Catalysis of the Oxygen Evolution Reaction by Iron Impurities in Thin Film Nickel Oxide Electrodes* " Journal Electrochem. Soc, Vol 134, **1989**.
- [7] **C. Fiaud**, Inhibiteur de corrosion, Technique de l'ingénieur, Méthodes de prévention et lutte contre la corrosion, (1990).
- [8] **C. Gabrielli**. Identification of electrochemical processes by frequency response analysis. Rapport technique 004/83, Solartron, 1998.

Chapitre IV :

Résultats et discussion

IV. 1. Resultats et Discussions

IV. 1. 1. Etude électrochimique

Nous utilisons des techniques électrochimiques stationnaires (suivi temporel du potentiel en circuit ouvert et courbes de polarisation) pour accéder aux paramètres cinétiques décrivant l'état du système (métal/solution) dans cette section, ainsi qu'une technique complémentaire pour décrire les mécanismes impliqués dans la réaction redox.

IV. 1. 1. 1. Suivi du potentiel en circuit ouvert

L'électrode de travail est immergée dans la solution pendant 60 minutes, avec et sans l'ajout d'EBTL, afin de déterminer la sévérité de la solution et d'atteindre un état stable. Pour tracer les courbes de polarisation et les diagrammes d'impédance électrochimique, cela donne un potentiel plutôt stable (potentiel sans corrosion).

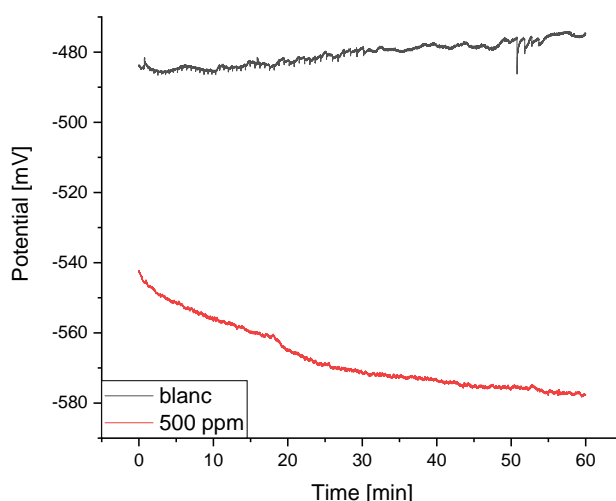


Figure- IV. 1 Evolution du potentiel d'abandon dans la solution à HCl 1 M sans et avec l'ajout d' EBTL

On constate que le potentiel libre de corrosion commence à -480 mV/ECS et augmente progressivement jusqu'à atteindre des valeurs qui varient légèrement autour de -540 mV. Ceci est dû à une dissolution rapide et à la formation d'une couche protectrice à la surface de l'acier [1].

IV. 1. 1. 2. Les courbes de polarisations

La figure 2 représente les courbes de polarisation cathodique et anodique de l'acier API 5L Gr-B dans un milieu HCl 1M en l'absence et en présence de différentes concentrations d'EBTL après une heure à température ambiante.

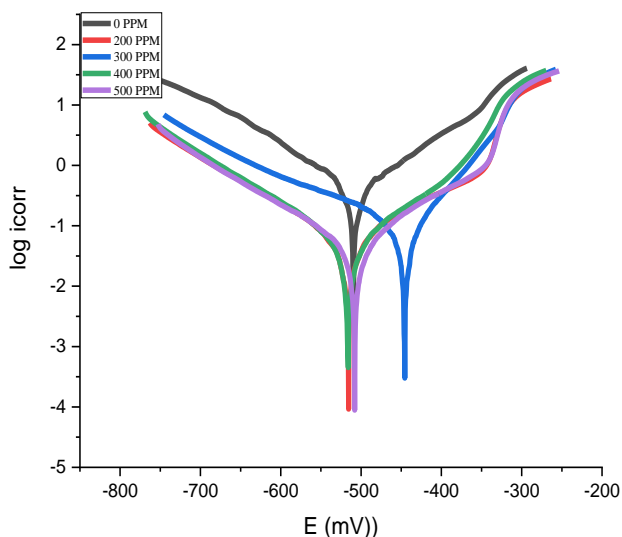


Figure- IV 2 Courbes de polarisation de l'acier API 5LGr-B dans la solution à HCl 1 M et à différentes concentrations d'EBTL

L'analyse de ces courbes révèle que les courbes de polarisation pour des différentes concentrations en EBTL sont assez similaires dans le domaine anodique, qui correspond à la cinétique de dissolution de l'acier, et dans le domaine cathodique, qui correspond au dégagement d'hydrogène. En revanche, les densités de courant de corrosion sont décroissantes. A partir d'un potentiel de -500 mV jusqu'à des valeurs moins négatives, un plateau de la densité de courant de corrosion est observé dans la branche anodique pour la courbe de polarisation sans l'ajout d'EBTL. Ce plateau indique l'existence d'une couche de produit de corrosion qui empêche partiellement la dissolution de l'acier. M.H. Gonzalez et Linter et al. Ont rapporté un comportement similaire. [2,3]

Le potentiel de corrosion fluctue quelque peu avec la teneur en EBTL mais ne modifie pas la géométrie des branches anodiques et cathodiques, ce qui indique la nature mixte de l'extrait [4,6].

Les valeurs des paramètres électrochimiques calculées à partir des courbes de polarisation sont illustrés dans le **tableau IV.1**. La densité de courant de corrosion (I_{corr}), le potentiel de

corrosion (E_{corr}), les constantes de Tafel cathodique et anodique (c et a), l'efficacité inhibitrice de la corrosion EI (%) :

Tableau- IV.1: Paramètres électrochimiques, taux de recouvrement et efficacité inhibitrice de la corrosion de l'acier API 5LGr-B dans HCl 1M sans et avec addition de différentes concentrations d'EBTL à la température 20 °C.

C(mg L ⁻¹)	EBTL				
	$-E_{corr}$ (mV)	i_{corr} (mA.cm ⁻²)	β_a (mV.dec ⁻¹)	$-\beta_c$ (mV.dec ⁻¹)	EI (%)
0	509,5	0,3184	107,6	114,1	-
200	434,13	0,0533	63,1	212,2	83,26
300	445,8	0,0463	63,3	140,6	85,45
400	472,34	0,0423	108,5	116,8	86,71
500	452,57	0,0305	91,2	116,2	90,42

D'après les résultats du tableau IV.1, l'efficacité inhibitrice augmente avec la concentration en EBTL, ce qui implique que la surface active de l'électrode de travail est réduit en raison de la formation d'un film protecteur [7]. En augmentant la concentration d'EBTL, le potentiel de corrosion tend à se déplacer vers des valeurs plus nobles, démontrant ainsi l'efficacité de l'extrait. La diminution de la densité du courant de corrosion est attribuée aux molécules adsorbées de l'extrait qui obstruent les sites actifs à la surface du métal [8], ce qui se traduit par une efficacité maximale d'environ 90 % à 500 mg L⁻¹.

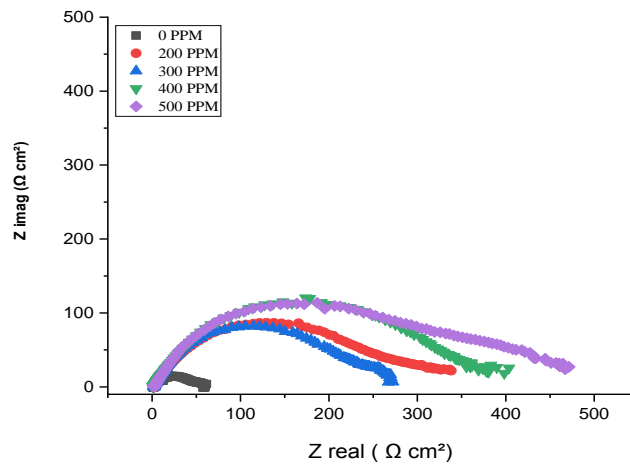
IV. 1. 1. 3. Impédance électrochimique et circuit électrique équivalent:

IV. 1. 1. 3. 1. Impédance électrochimique

L'acquisition de diagrammes d'impédance électrochimique à différentes concentrations et à différents potentiels de corrosion est destinée à compléter la compréhension des mécanismes de corrosion et d'inhibition de l'acier API 5L Gr-B dans le milieu choisi.

La figure IV.3 représente les diagrammes d'impédance basés sur la représentation de Nequist dans les conditions expérimentales suivantes :

- 100 mHz à 100 kHz est la gamme de fréquence.
- Temps d'immersion : 1 heure
- La température est de 20 °C.
- Amplitude de 10 Hz



Figure– IV. 3 Impédance électrochimique de l’acier API 5LGr-B dans la solution à HCl 1 M et à différentes concentrations d’EBTL (Représentation dans le plan de Nyquist)

Les diamètres des demi-boucles capacitives augmentent avec la concentration de l'inhibiteur, ce qui indique que l'efficacité de l'inhibition augmente également. Ces graphiques sont constitués d'une seule boucle capacitive plus ou moins aplatie. Ce type de boucle montre qu'un mécanisme de transfert de charge sur une électrode solide avec une surface hétérogène et irrégulière contrôle la réponse à la corrosion [9].

Le **tableau IV.2** résume les caractéristiques électrochimiques ainsi que l'efficacité inhibitrice (pourcentage EI) à différentes concentrations sans et avec l'ajout d’EBTL, comme déterminé à partir de ces derniers spectres d'impédance.

TableauIV.2: Paramètres électrochimiques de la spectroscopie d’impédance électrochimique de l’acier API 5L Gr-B dans HCl 1 M.

C (mg L ⁻¹)	EBHL			
	R_{tc} (Ωcm^2)	C_{dc} ($\mu\text{F cm}^{-2}$)	θ	EI (%)
0	57,33	222	-	-
200	321,8	156,7	0,7839	78,39
300	379,3	135,9	0,8218	82,18
400	461,4	132,5	0,8488	84,88
500	57,33	122,7	0,8758	87,58

A partir des données présentées par le **tableau IV. 2**, nous pouvons constater : L'ajout d'EBTL diminue la valeur de la capacité double couche C_{dc} et augmente celle de la résistance de transfert de charge. La diminution de la valeur de C_{dc} peut être attribuée à l'adsorption des molécules de l'inhibiteur sur la surface de l'acier API 5L Gr-B formant une couche protectrice [10]. On pense que la double couche formée à l'interface électrode-solution fonctionne comme un condensateur électrique, la capacité diminuant au fur et à mesure que les molécules d'eau de l'électrolyte sont déplacées en faveur des molécules d'inhibiteur adsorbées sur la surface de l'acier API 5L Gr-B, formant une couche protectrice qui réduit le nombre de sites de corrosion actifs [9]. Lorsque la concentration d'EBTL (**Tableau IV.2**) augmente, la résistance de transfert de charge augmente également. Cela peut s'expliquer par une augmentation des valeurs R_{tc} due à une amélioration des caractéristiques de protection de la couche d'oxyde plus inhibitrice.

IV. 1. 1. 3. 2. Effet de la température :

Nous avons effectué les mêmes tests électrochimiques sur l'acier API 5LGr-B dans une solution de HCl 1 M en l'absence et en présence de 500 mg L⁻¹ d'EBTL et à différentes températures car la température est l'un des facteurs qui peuvent modifier le comportement des matériaux dans un environnement corrosif.

Les **tableaux IV.3 et IV.4** fournissent toutes les valeurs des paramètres cinétiques trouvés pour les différentes courbes de polarisation potentiodynamique et les courbes d'impédance électrochimique.

Tableau- IV. 3 : Paramètres cinétiques, taux de recouvrement et efficacité inhibitrice de l'acier dans HCl 1M à différentes températures sans et avec l'ajout de 500 mg L⁻¹ d'EBTL

		EBTL					
T (°C)	C mg L ⁻¹	$-E_{corr}$ (mV)	i_{corr} (mA cm ⁻²)	β_a (mV dec ⁻¹)	$-\beta_c$ (mV dec ⁻¹)	θ	EI (%)
20	0	509,5	0,3184	107,6	114,1	-	-
	500	452,57	0,0305	91,2	116,2	0,9042	90,42
30	0	507,1	0,5478	126,8	123,1	-	-
	500	503,8	0,1010	70,2	115,3	0,8156	81,56
40	0	506,5	1,1082	131,2	166,3	-	-
	500	564	0,2977	123,1	158,9	0,7313	73,13

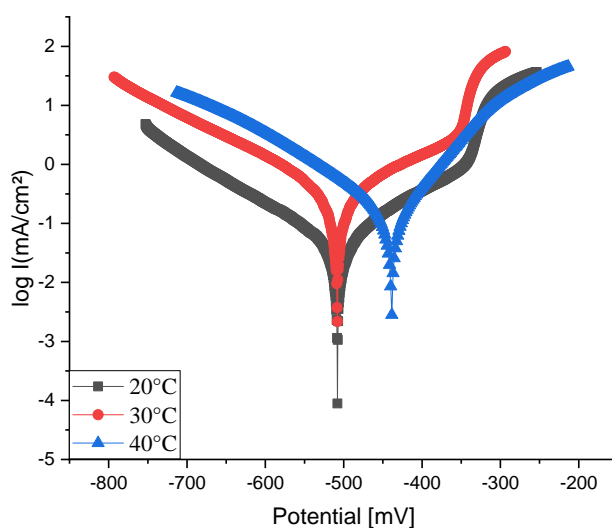


Figure.IV.4 : Courbes de polarisation obtenues pour les températures (20,30, 40) °C dans la solution de HCl 1 M avec l'ajout de 500 mg L⁻¹ EBTL

Tableau- IV. 4: Résultats des essais d'impédance électrochimique dans HCl 1M à différentes températures sans et avec l'ajout de 500 mg L⁻¹ de EBTL

T (°C)	C mg L ⁻¹	R _{tc} (Ωcm ²)	Ext but		
			C _{dc} (μF cm ⁻²)	θ	EI (%)
20	0	57,33	222	-	-
	500	57,33	122,7	0,8758	87,58
30	0	47,28	239,6	-	-
	500	137,6	92,49	0,6563	65,63
40	0	25,57	443,1	-	-
	500	61,60	81,63	0,5849	58,49

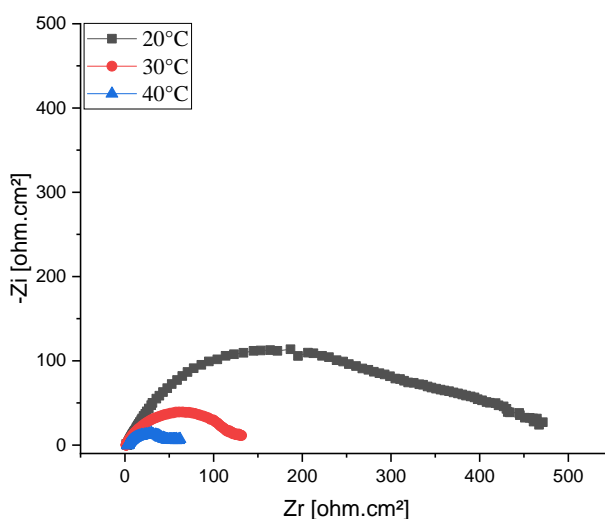


Figure.IV.5 Courbes de S.I.E obtenues pour les températures (20, 30, 40) °C dans la solution de HCl 1 M avec l'ajout de 500 mg L⁻¹ EBTL

Les conclusions suivantes peuvent être tirées de ces résultats :

- Le comportement électrochimique de l'acier API 5LGr-B dépend de la température de la solution en l'absence et en présence d'EBTL. Lorsque la température passe de 20 à 40 °C, la densité du courant de corrosion augmente considérablement, contrairement à la résistance au transfert de charge, qui diminue avec l'augmentation de la température. La physisorption des molécules d'EBTL a été confirmée [9, 11, 12].
- **La figures IV.5** montrent des diagrammes d'impédance produits à des températures de (20,30,40) °C, révélant une configuration de diagrammes qui n'est pas affectée par la température, alors que la taille de la boucle capacitive se réduit au fur et à mesure que la température augmente. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus à partir des courbes de polarisation.

IV. 1. 2. Isothermes d'adsorptions

IV. 1. 2. 1. Classification des isothermes d'adsorption d'EBTL

L'adsorption sur la surface du métal est le mode d'action de la plupart des inhibiteurs organiques. La connaissance du type d'adsorption et la détermination des variables thermodynamiques qui caractérisent cette adsorption peuvent fréquemment aider à déterminer le mode d'action de l'inhibiteur. La valeur de la vitesse de recouvrement de la surface métallique par l'inhibiteur adsorbé est spécifiée à cet effet par la relation suivante :

$$\theta = \frac{i_{corr} - i_{corr}^{inh}}{i_{corr}}$$

Où i_{corr} et i_{corr}^{inh} sont les densités de courant de l'acier en présence et en absence d'inhibiteur, respectivement. L'isotherme liée au processus d'adsorption de ce produit chimique a été déterminée en utilisant les valeurs du taux de recouvrement (θ) pour différentes concentrations d'EBTL obtenues à partir de mesures de polarisation à différentes températures (20 -40) °C (**Tableau IV.4**). Pour découvrir la meilleure isotherme d'adsorption, plusieurs isothermes telles que Langmuir, Temkin, Freundlich et Frumkin ont été examinées (**Figures 6, 7, 8 et 9**). Les équations suivantes se rapportent à la concentration d'inhibiteur C_{inh} en fonction de ces isothermes :

- ✓ Isotherme de Langmuir [13, 14] : $\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K} + C$
- ✓ Isotherme de Temkin [15] : $\theta = \frac{1}{\alpha} \ln KC$
- ✓ Isotherme de Freundlich [16] : $\ln \theta = \ln K + \alpha \ln C$
- ✓ Isotherme de Fremkin [17] : $\ln \left[\frac{C(1-\theta)}{\theta} \right] = \ln K + \alpha \theta$

Où α est une constante d'interaction particule-adsorbé, et est une constante d'interaction particule-adsorbé.

C : la concentration de l'inhibiteur dans la solution.

K est la constante d'équilibre du processus d'adsorption.

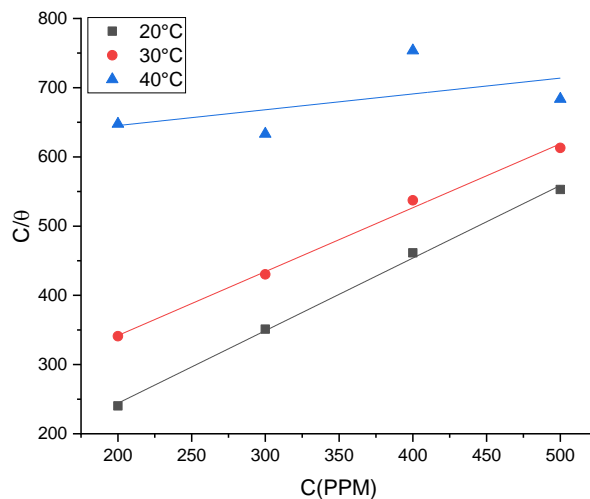


Figure IV.6 : Isotherme d'adsorption de Langmuir de l'acier API 5L Gr-B dans HCl 1 M en présence d'EBTL à différentes température.

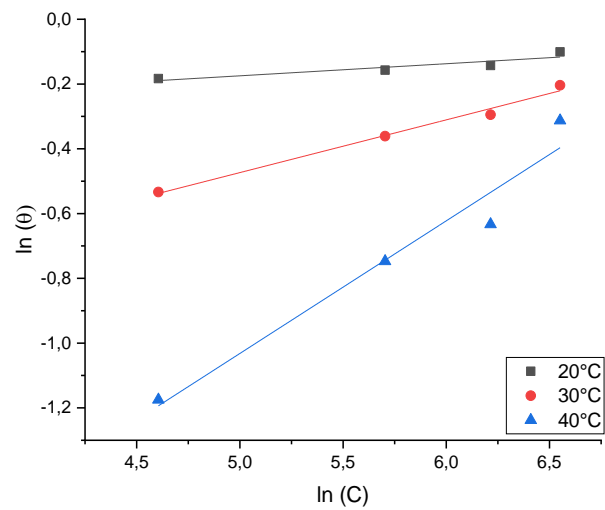


Figure IV.7 : Isotherme d'adsorption de Freundlich de l'acier API 5L Gr-B dans HCl 1 M en présence d'EBTL à différentes température.

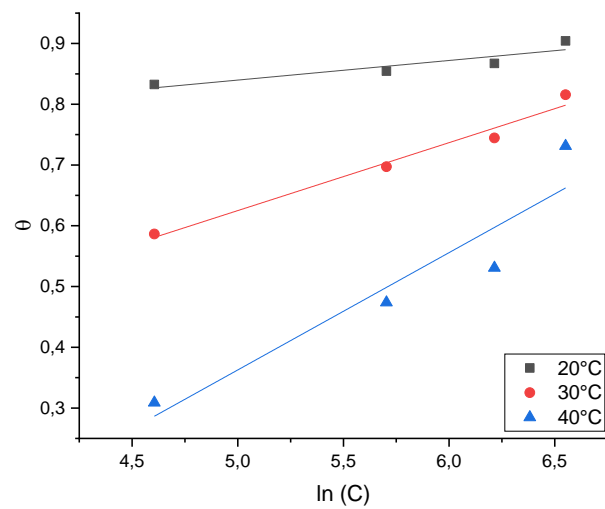


Figure IV.8 : Isotherme d'adsorption de Temkin de l'acier API 5L Gr-B dans HCl 1 M en présence d'EBTL à différentes température.

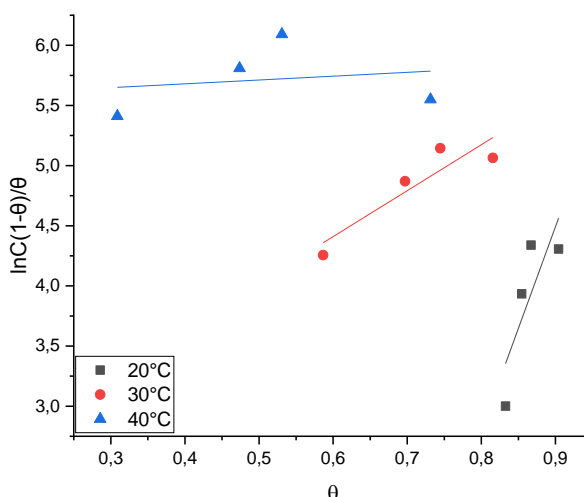


Figure IV.9 : Isotherme d’adsorption de Frumkin de l’acier API 5L Gr-B dans HCl 1 M en présence d’EBTL à différentes température

Les valeurs de sont représentées graphiquement en fonction de l'isotherme d'adsorption appropriée.

Seule la courbe C_{inh}/θ en fonction de la concentration est linéaire sur toute la gamme de température étudiée, et les coefficients de corrélation linéaire sont systématiquement proches de 1 (**Figure IV.5**), ce qui indique que l'adsorption d’EBTL sur la surface de l'acier en milieu sulfurique suit l'isotherme d'adsorption de Langmuir [18].

Pour choisir l'isotherme la plus représentative, les coefficients de corrélation (R_2) ont été utilisés (Tableau VI.5).

Tableau VI.5 : Les valeurs de coefficient de corrélation (R^2) obtenus par les isothermes de Langmuir, Temkin, Freundlich et Frumkin à différentes températures.

Température (°C)	Isotherme de Langmuir R^2	Isotherme de Temkin R^2	Isotherme de Freundlich R^2	Isotherme de Frumkin R^2
20	0.998	0.836	0.846	0.660
30	0.996	0.977	0.988	0.834
40	0.3014	0.887	0.955	0.034

IV.1.2.2. Paramètres thermodynamiques d'adsorption

L'isotherme de Langmuir peut être exprimée mathématiquement de la manière suivante :

$$\frac{\theta}{1 - \theta} = KC_{inh}$$

Cette équation peut être réarrangée pour donner :

$$\frac{C_{inh}}{\theta} = \frac{1}{K} + C_{inh}$$

Où θ est le taux de recouvrement, C_{inh} est la concentration de l'inhibiteur, $\frac{1}{K}$ est la pente de la courbe.

En conditions acides, ce mécanisme d'adsorption est fréquemment rencontré avec les inhibiteurs de corrosion des métaux [19, 20]. Le tableau IV.6 regroupe les variables thermodynamiques K et ΔG_{ads}^0 déterminées à partir des isothermes d'adsorption. Le fait qu'une molécule de l'inhibiteur étudié occupe plusieurs sites actifs explique les pentes supérieures à l'unité [21, 23]. (Pente supérieure à 1). Le modèle de Langmuir modifié [22, 24] a ensuite été utilisé pour calculer les valeurs des paramètres thermodynamiques.

$$\frac{C_{inh}}{\theta} = \frac{n}{K} + nC_{inh}$$

La relation suivante a été utilisée pour calculer les valeurs de ΔG_{ads}^0 à différentes températures :

$$\ln K = \ln \frac{1}{55.5} - \frac{\Delta G_{ads}^0}{RT}$$

R : est la constante des gaz parfaits 8,31 J/mol.K.

T : est la température en Kelvin.

C: est la concentration de l'eau dans la solution (10^6 mol/l).

En conséquence, l'énergie libre standard d'adsorption ΔG_{ads}^0 peut être calculée, et sa fluctuation avec la température (**Figure IV.10**) peut être utilisée pour dériver l'enthalpie standard d'adsorption.

Une énergie libre d'adsorption négative (ΔG_{ads}^0) et des valeurs K élevées impliquent que le processus d'adsorption est spontané et que la double couche adsorbée sur la surface du métal est stable [25]. Selon les chercheurs, les valeurs de ΔG_{ads}^0 proches de -20 kJ/mol ou inférieures correspondent à des interactions entre des molécules chargées et des métaux chargés (adsorption physique), tandis que les valeurs proches de -40 kJ/mol ou plus négatives

impliquent un transfert de charge entre les molécules organiques et la surface métallique (chimisorption) [26, 27].

Le tableau IV.6 révèle que les valeurs de ΔG_{ads}^0 sont proches de -20 kJ.mol^{-1} , ce qui indique que notre inhibiteur est physisorbé sur la surface du métal. Le fait que l'efficacité inhibitrice de c'extrait diminue considérablement à haute température [28, 30] soutient cette opinion.

La fluctuation de l'énergie libre standard d'adsorption avec la température Figure VI.10 permet d'utiliser l'équation de Gibbs-Helmholtz pour calculer l'enthalpie standard d'adsorption ΔH_{ads}^0 et l'entropie standard d'adsorption ΔS_{ads}^0 :

$$\Delta G_{ads}^0 = \Delta H_{ads}^0 - T\Delta S_{ads}^0$$

Les données thermodynamiques obtenues par EBTL, en utilisant l'isotherme d'adsorption sont données dans le tableau IV.6.

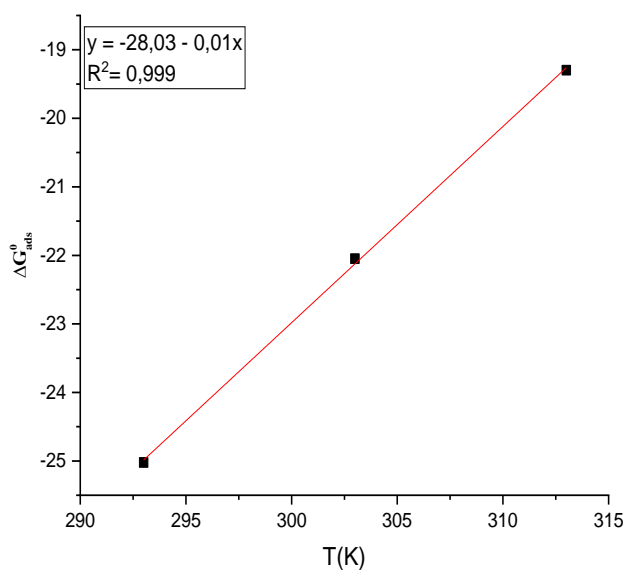


Figure IV.10 : Variation de ΔG_{ads}^0 en fonction de la température

Tableau IV.6 : Paramètre thermodynamique d'EBTL en milieu HCl 1 M pour différentes températures

Temp (°C)	ΔG_{ads}^0 (kJ.mol ⁻¹)	ΔH_{ads}^0 (kJ.mol ⁻¹)	ΔS_{ads}^0 (kJ.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
20	-25.02		-0.01
30	-22.05	-28.03	-0.019
40	-19.30		-0,027

La valeur ΔH_{ads}^0 donne des informations importantes sur le mécanisme d'adsorption de l'inhibiteur. Un processus endothermique d'adsorption ($\Delta H_{\text{ads}}^0 > 0$) est attribué explicitement à la chimisorption [31], alors qu'un processus exothermique d'adsorption ($\Delta H_{\text{ads}}^0 < 0$) peut impliquer une physisorption et/ou une chimisorption. Dans la littérature, les valeurs absolues de $\Delta H_{\text{ads}}^0 < 40 \text{ kJ mol}^{-1}$ impliquent une physisorption tandis que les valeurs absolues de ΔH_{ads}^0 proches de 100 kJ mol^{-1} impliquent une chimisorption [32, 34]. Dans notre cas, la valeur absolue de ΔH_{ads}^0 trouvé est de l'ordre de **-28,03 KJ.mol⁻¹**, cette valeur est à la fois supérieure à la valeur absolue de ΔH_{ads}^0 impliquant la physisorption, ceci indique que cet inhibiteur est physisorbé à la surface de l'acier. Le même résultat a été trouvé par d'autres auteurs [35, 38, 39].

Les valeurs de l'entropie ΔS_{ads}^0 en présence d'EBTL sont négatives, impliquent que le complexe activé dans l'étape déterminante de la vitesse représente une association plutôt qu'une dissociation, signifiant qu'il y a diminution du désordre lors de la transformation des réactifs en complexe activé [40, 41].

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] K. Benchekroun, F. Dalard, J.J. Rameau, *New J. Chem.* 26, 946, 2002.
- [2] C. Kamal, M. G. Sethuraman, *Arab. J. Chem.*, 2010.
- [3] M. Behpour, *Mater. Chem. Phys.*, 131, 621-633, 2012.
- [4] R. L. Sesenes, J. G. G. Rodriguez, G. F. D. Patino, A. M. Villafane, *J. Electrochem. Sci. Eng.*, 2, 77-90, 2012.
- [5] M. Lebrini, *Corros. Sci.*, 53, 687-695, 2011.
- [6] J. A. Dean, *Lange's Handbook of Chemistry*, 8th Edition, McGraw-Hill, New York, 1973.
- [7] A. Yurt, S. Ulutas, H. Dal, *Appl. Surf. Sci.*, 2006, 253, 919-925.
- [8] Y. Tang, F. Zhang, S. Hu, Z. Cao, Z. Wu, W. Jing, *Corros. Sci.*, 2013, 74, 271.
- [9] M. H. GONAZALEZ, Etude d'un traitement multifonctionnel vert pour la protection contre la corrosion de l'acier au carbone API 5L-X65 en milieu CO₂, Thèse de doctorat de l'université de toulouse, 2011.
- [10] Laamar My Rachid., *Les Technologies de laboratoire*, 2010, N° 20.
- [11] E. A. Noor, *Mater. Chem. Phys.*, 2011, 131, 160.
- [12] J.C. da Rocha, J. A. da Cunha Ponciano Gomes, E. D'Elia, *Corros. Sci.*, 2010, 52, 2341.
- [13] M.A. Hegazy, H.M. Ahmed, A.S. El-Tabei, *Corr. Sci.* 53, 671–678, 2011.
- [14] R.A. Prabhu, T.V. Venkatesha, *Corros. Sci.*, 50, 3356–3362, 2008.
- [15] M.Sahin, S.Bilgiç, *Appl. Surf. Sci.*, 147, 27, 1999.
- [16] S. A. Umoren, U. M. Eduok, M.M. Solomon, A. P. Udoh, Corrosion inhibition by leave and stem extracts of sida acta for mild steel in 1M H₂SO₄ solution investigated chemical and spectroscopic technique, *Arabian journal of chemistry* 2011.
- [17] Lj.M. Vracar, D.M. Drazic, *Corr Sci* 44, 1669–1680, 2002.
- [18] H. Keles, M. Keles, İ. Dehri, O. Serindag. *Materials Chemistry and Physics.* 112, 173, 2008.
- [19] R. F.V. Villamil, P. Corio, J.C. Rubin and S.M.L. Agostinho, *J. Electroanal. Chem.* 535, 75, 2002.

-
- [20] S. Cheng, S. Chen, T. Liu, X. Chang and Y. Yin, *Mater. Lett.* 61, 3276, 2007.
- [21] M. Behpour, S.M. Ghoreishi, N. Soltani, *Corros. Sci.* 50,172, 2008.
- [22] L. Larabi, O. Benali, Y. Harek, *Portug. Electrochem. Acta* 24, 337, 2006.
- [23] S. Cheng, S. Chen, T. Liu et al, *Mater. Lett.* 61, 327, 2007.
- [24] Y. Abboud, A. Abouriche, T. Saffaj et al, *Desalination* 237, 175, 2009.
- [25] S. Martinez et I. Stern, *Appl.Surf.Sci.*, 83, 199, 2002.
- [26] F. M. Donahue et K. Nobe, *J. Electrochem. Soc*, 112, 886, 1965.
- [27] G. Benerjee et S.N. Malhotra, *Corros*, 48, 10, 1992.
- [28] M. Abdullach. *Corros. Sci.* 44, 717, 2002.
- [29] H. Fan, *Synthesis and application of new type inhibitors*, Chemical Industry Press, Beijing. 2002.
- [30] W. Li, X. Zhao, F. Liu, B. Hou, *Corros. Sci.*, 50, 3261–3266, 2008.
- [31] W. Durnie, R.D. Marco, A. Jefferson, B. Kinsella, *J. Electrochem. Soc.*, 146, 1751 1999.
- [32] M. Benabdellah, R. Touzani, A. Dafali, M. Hammouti, S. El Kadiri, *Mater. Lett.*, 61, 1197 (2007).
- [33] S. Martinez, I. Stern, *Appl. Surf. Sci.*, 199, 83, 2002.
- [34] A. Ehteram, H. Al-Moubaraki, *Mater. Chem. Phys.*, 110, 145, 2008.
- [35] M. Benabdellah, R. Touzani, A. Dafali, M. Hammouti, S. El Kadiri, *Mater. Lett.*, 61, 1197 (2007).
- [36] S. Martinez, I. Stern, *Appl. Surf. Sci.*, 199, 83, 2002.
- [37] A. Ehteram, H. Al-Moubaraki, *Mater. Chem. Phys.*, 110, 145, 2008.
- [38] L. Tang, G. Mu, G. Liu, *Corros. Sci.*, 45, 2251, 2003.
- [39] X. Li, G. Mu, *Appl. Surf. Sci.*, 252, 1254, 2005.
- [40] J.O'M. Bochriss et A.K.N. Reddy, *Modern Electrochemistry*, Plenum Press, New York, 2, 1267, 1977.
- [41] G. Banerjee et S.N. Malhotra, *Corrosion*, 48, 10, 1992.

Conclusion général

Le présent travail a été consacré à l'étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier API 5L Gr-B par l'extrait de la plante *Terginia Latofilia* dans l'acide chlorhydrique une fois molaire. Il apporte une modeste contribution d'une part, par l'apport scientifique (efficacité et mécanisme de l'inhibition) et d'autre part, pour la protection de l'environnement. L'évaluation des propriétés inhibitrices du sujet de notre étude a été effectuée par méthodes électrochimiques (les courbes de polarisation et la spectroscopie d'impédance électrochimique).

Les résultats trouvés montrent ;

- L'efficacité inhibitrice augmente avec la concentration de l'extrait jusqu'à 500 ppm (concentration critique).

- La diminution de la vitesse de corrosion résulte de l'effet de bloquer les emplacements actifs sur la surface du métal par les molécules adsorbées de l'extrait.

- L'extrait de la plante joue le rôle d'un inhibiteur mixte dont le pouvoir d'inhibition augmente en fonction de la concentration.

- L'étude thermodynamique a montré que l'adsorption de cet inhibiteur à la surface de l'acier est spontanée et suit un modèle d'isotherme d'adsorption de Langmuir.

- La valeur calculée de l'énergie libre met en évidence la nature physique de l'adsorption.

- Les courbes de la SIE montrent l'augmentation de la taille du spectre d'impédance et par conséquent augmentation de la résistance de polarisation (qui est inversement proportionnelle au courant de corrosion) lorsque la concentration en inhibiteur augmente. Preuve de la formation d'une couche protectrice.

- En comparant avec le CHIMEC, notre extrait apparaît mieux vu sa naturalité et son comportement vis-à-vis de l'environnement (non toxique, biodégradable ... etc).

Ce modeste travail n'est qu'une brèche ouverte dans le sens de répondre au besoin industriel et économique afin d'apporter des solutions aux problèmes de corrosion et de protéger notre planète contre les produits chimiques nuisibles. Pour faire suite à ce travail, nous envisagerons un suivi de l'acier au carbone de type API 5L Gr-B (très utilisé dans l'industrie) dans une solution de différentes concentrations d'acide en tenant compte de :

L'influence de la température ; , La durée d'immersion ; , Les différents types d'inhibiteurs (à base de plante)

