REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université de Mohamed El- Bachir El -Ibrahimi -Bordj Bou Arreridj
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Génie de l'environnement

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

FILIERE : Génie des Procédés

Spécialité : Génie des Procédés de l'Environnement

Par : Chahinaz Saadaoui
Chaima Hamimid

Intitulé

Étude de l'effet inhibiteur de l'extrait de Juglans regia sur la corrosion de l'acier en milieu acide

Soutenu le : 21/06/2026

Devant le Jury composé de :

Mme Faid Hayette	M.C.A	Univ-BBA	Président
Mme Zouaoui Hanene	M.C.B	Univ-BBA	Examinatrice
Mme Maghraoui Nadjah	M.C.B	Univ-BBA	Encadrant

Année Universitaire 2025/2026

Remerciements :

Nous tenons tout d'abord à remercier Allah le Tout-Puissant, qui nous a aidés, nous a donné la patience et le courage durant ces longues années d'études, et qui nous a accordé la force d'accomplir ce modeste travail.

Nous adressons nos vifs remerciements à notre encadreur, Madame **Maghraoui Nadjah**, pour sa gentillesse, sa grande générosité tout au long de la réalisation de ce mémoire, pour ses précieux conseils et son soutien moral qui nous ont permis d'arriver à ce résultat. Nous lui sommes extrêmement reconnaissants de nous avoir fait confiance durant tout ce travail.

Nous remercions également Madame **Faid Hayette** pour l'honneur qu'elle nous a fait en présidant ce jury.

Nous tenons à remercier Madame **Zouaoui Hanene** d'avoir accepté d'être l'examinatrice de ce modeste travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à toutes les personnes qui nous ont aidés à élaborer et réaliser ce mémoire, et tout particulièrement aux ingénieurs du laboratoire : Monsieur **Mihoub Foued**, Madame **Habbiche Farida**, ainsi qu'à tous ceux qui nous ont soutenus, de près ou de loin.

Nos remerciements vont également à tous les enseignants de la filière de Génie des Procédés qui ont contribué à notre formation, à travers leurs conseils et leur soutien.

Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues.

Dédicace :

بِسْمِ ٱللَّهِ ٱلرَّحْمَٰنِ ٱلرَّحِيمِ

{فرحين بما أتاهم الله من فضله }

من قال انا لها " نالها"

و أنا لها ان أبت رغما عنها أتيت بها

لم تكن الرحلة قصيرة ولا ينبغي لها ان تكون لم يكن الحلم قريبا و لا الطريق محفوفا بالتسهيلات لكني فعلتها و نلتها
الى نفسي الطموحة ...

التي مشت بثبات في دروب لم تكن سهلة , أنا فخورة بك

الى الذي زين اسمي بأجمل الألقاب , من دعمني بلا حدود و أعطاني بلا مقابل ...

داعمي الأول في مسيرتي و سندي و قوتي ,الى فخري و اعتزازي "أبي "

الى من جعل الجنة تحت أقدامها و احتضنني قلبها قبل يدها و سهلت لي الشدائد بدعائها

الى سر قوتي و نجاحي" أمي"

الى ضلعي الثابت و أمان أيامي , الى من شددت عضدي بهم فكانوا لي ينابيع ارتويت منها , خيرة أيامي و صفوتها

اخوتي " أيوب و سيف " أختي الغالية صاحبة القلب الحنون التي كانت داعما لي "انتصار "و الى كل أولادهم{ توبة,نافع, شاهين, معاذ شهد,جمانة ,اويس}

الى خالتي الحبيبة التي كانت لي أما ثانية , و ابنة خالتي "بشرى " أختي التي لم تنجبها أمي و سندا في الضعف و مبعث تفاؤل.

و الى "سارة " و "كنزة" الغاليتين اللتين كانتا مصدر دعم لي و حضنا عائليا دافئا.

الى صديقتي في المشوار " شهيناز "رفيقة الطريق الطويل التي سارت معي خطوة بخطوة و جعلت المشوار أجمل بتواجدها.

أهديكم هذا الانجاز و ثمرة نجاحي الذي لطالما تمنيته

ها أنا اليوم أكملت و أتممت أول ثمراته بفضله سبحانه و تعالى فالحمد لله على ما وهبني

شيماء

Dédicace :

قال الله تعالى: ﴿وَآخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنِ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ﴾

الحمد لله حمداً طيباً مباركاً فيه، أهدي ثمرة تخرجي هذا...

إلى نفسي، إلى تلك التي صبرت وتعثرت ثم نهضت... إلى إيماني الذي لم يخفت، وجهودي التي لم يرها أحد... أنا فخورة بك، فهذا النجاح ثمرة صبرك وكفاحك.

إلى القلب الذي أحبني دون مقابل، إلى اليد التي أمسكت بيدي في كل تعثر، إلى الدعاء الذي كان يرافقني في كل خطوة...

أهديكِ ثمرة هذا النجاح، فأنتِ النور الذي أنار طريقي، وأنتِ أجمل نعمة رزقني الله بها. امي ليندة

إلى الرجل الذي تعب بصمت، وضحّى كثيرًا من أجل أن أصل، إلى من كان سندًا وأمانًا وفخرًا لي دائمًا...

أهديك هذا التخرج بكل حب وامتنان، فمهما كتبت لن أوفيك حقك ابي صديق

إلى من لم تكونا يومًا مجرد أختين فقط، بل كنتما لي وطنًا صغيرًا ألوذ إليه كلما ضاقت بي الدنيا، وسندًا لا يميل مهما تغيّرت الظروف،

دعاء، التي كانت كلماتها دائمًا كالدعم الخفي الذي يرفعني عندما أضعف، وحنانها يسبق كلامها في كل موقف،

لجين، التي كانت ابتسامتها كضوء يبدّد التعب، ووجودها يبعث في قلبي الطمأنينة مهما كانت الأيام ثقيلة،

إلى السند الحقيقي في حياتي، وإلى من كان وجودهم مصدر قوة وأمان لي في كل المراحل،

إلى ياسر الذي كان دائمًا رمز المسؤولية والدعم،

وإلى نسيم الذي يملأ البيت روحًا خفيفة وكلمات تشجع في أصعب اللحظات،

وإلى عبد الودود الذي كان حضوره يعني الطمأنينة والسند وقت الحاجة،

أسأل الله أن يحفظكم لي،وأن يبارك في حياتكم،ويحقق لكم كل ما تتمنون من نجاح وسعادة وتوفيق

إلى من شاركتني القلق قبل الفرح، والتعب قبل النجاح، وكانت دائمًا كتفًا أستند عليه...

شكرًا لأنكِ كنتِ جزءًا جميلًا من هذه الرحلة حبيبتي شيماء

واهدي شكر خاص الى رفقات العمر {انصاف, ريمة ,منار ,هديل ,مروة ,مارية, بسملة ,سيرين ,نهلة}

كل الشكر والامتنان لدعمكنّ ومحبتكنّ.

إلى كل من دعمني بدعوة صادقة أو كلمة طيبة أو ابتسامة أمل...

أهديكم هذا الإنجاز المتواضع، فهو ثمرة محبتكم وثقتكم بي عائلتي الغالية

شهيناز

Résumé :

Le but de cette étude est d'évaluer l'efficacité des extraits de feuilles de Juglans regia comme inhibiteurs de corrosion de l'acier au carbone XC48 dans une solution d'acide sulfurique 0,5 M. Deux types d'extraits ont été préparés par macération : un extrait aqueux et un extrait méthanolique.l'analyse phytochimique a révélé la présence de flavonoïdes, de saponosides et de tanins, tandis que la spectroscopie UV-Visible a confirmé l'existence de composés flavonoïdes par des pics d'absorbance caractéristiques. Les mesures électrochimiques (potentiel à circuit ouvert, polarisation de Tafel et spectroscopie d'impédance électrochimique EIS) ont démontré que les deux extraits réduisent significativement la vitesse de corrosion de l'acier XC48, avec une efficacité inhibitrice qui augmente avec la concentration. L'efficacité maximale atteinte est de 44,61 % pour l'extrait méthanolique à 0,6 g/L et de 75,72 % pour l'extrait aqueux à 1,2 g/L.

Abstract:

The aim of this study is to evaluate the effectiveness of Juglans regia leaf extracts as corrosion inhibitors for XC48 carbon steel in a 0.5 M sulphuric acid solution. Two types of extract were prepared by maceration: an aqueous extract and a methanolic extract. Phytochemical analysis revealed the presence of flavonoids, saponins and tannins, whilst UV-Vis spectroscopy confirmed the existence of flavonoids compounds through characteristic absorption peaks. Electrochemical measurements (open-circuit potential, Tafel polarisation and electrochemical impedance spectroscopy (EIS)) demonstrated that both extracts significantly reduce the corrosion rate of XC48 steel, with inhibitory efficiency increasing with concentration. The maximum efficiency achieved was 44.61% for the methanolic extract at 0.6 g/L and 75.72% for the aqueous extract at 1.2 g/L.

ملخص :

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم فعالية مستخلصات أوراق Juglans regia كمثبطات للتآكل في الفولاذ الكربوني XC48 في محلول حامض الكبريتيك 0,5 مولار. تم تحضير نوعين من المستخلصات عن طريق النقع: مستخلص مائي ومستخلص ميثانولي. كشفت التحليلات الكيميائية النباتية عن وجود الفلافونويدات، والصابونويدات، والتانينات، في حين أكد التحليل الطيفي للأشعة فوق البنفسجية والمرئية وجود مركبات الفلافونويدية من خلال قمم الامتصاص المميزة. أظهرت القياسات الكهروكيميائية (جهد الدائرة المفتوحة، استقطاب تافل، ومطيافية المعاوقة الكهروكيميائية EIS) أن المستخلصين يقللان بشكل ملحوظ من سرعة تآكل الفولاذ XC48، مع زيادة فعالية التثبيط مع زيادة التركيز. وبلغت الفعالية القصوى 44,61٪ للمستخلص الميثانولي عند 0,6 غ/لتر و75,72٪ للمستخلص المائي عند 1,2 غ/لتر.

Table des matières

Sommaire

Introduction Générale 1

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1. Corrosion 4

I.1.1. Définition 4

I.1.2. Les types de corrosion 4

a) Corrosion chimique 4

b) Corrosion électrochimique 4

c)Corrosion biochimique 5

d) Corrosion accompagnée d'usure 5

1.1.3. Les formes de corrosion 5

1.1.3.1. La corrosion uniforme 5

I.1.3.2. La corrosion par piqûres 6

I.1.3.3. La fissuration par corrosion sous contrainte (CSC) 6

I.1.3.4. La corrosion en crevasse (ou caverneuse) 7

I.1.3.5. La corrosion galvanique 8

I.1.4. Facteurs influençant la corrosion 9

I.1.5. Les impacts environnementaux 9

I.2. Les inhibiteurs de corrosion 10

I.2.1. Définition 10

I.2.2. Critères d'efficacité des inhibiteurs 11

I.2.3. Classification des inhibiteurs de corrosion 11

I.2.3.1. Selon la nature 12

a) Inhibiteurs organiques 12

I.2.3.2. Par mécanisme d'action électrochimique 12

I.2.3.3. Par mécanisme réactionnel 13

I.3. Analyse spectroscopiques par UV-VIS 14

I.4. Méthodes d'études de la corrosion 15

I.4.1. Gravimétrie 15

I .4.2. Méthodes électrochimiques 15

Chapitre II : Partie Expérimentale

II .1. Description de la plante étudiée et procédés d'extraction 20

II.1.1. Présentation de l'espèce étudiée 20

II.1.1.1. Définition de plante 20

II.1.1.2. Description botanique et classification 20

II.1.1.3. Répartition géographique 21

II .1.1.4. Comprendre la toxicité des feuilles de noyer 22

II.2. Extraction solide-liquide 22

II.2.1. Définition 22

II.2.2. Mécanisme de l'extraction 23

II.2.3. Facteurs influençant les performances de l'extraction 23

II.3. Préparation de la matière végétale 24

II.3.1. Séchage 24

II.3.2. Broyage 24

II.3.3. Récolte et identification des plantes 25

II.4. Appareils Utilisés 25

II.5. Méthodes d'extraction 25

II.5.1. Macération 25

II.5.2. Rendement de l'extraction 26

II.6. Screening phytochimique 26

II.7. Caractérisation des extraits obtenus 27

II.7.1. Spectroscopie d'absorption UV-Visible 27

II.8. Matériau étudié 28
II.8.1. Préparation de l'électrode de travail 28
II.8.5. Dispositif expérimental 29
II.8.6. Conditions expérimentales 31

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1. Rendements d'extractions 34
III.2. Taux d'humidité 34
III.3. Teste phytochimiques 35
III.4. Analyse spectroscopiques par UV-VIS 37
III.5. Méthodes de la corrosion 38
III.5.1. Suivi du potentiel en circuit ouvert (PCO) 38
III.5.2. courbe de polarisation 40
III.5.3. Spectroscopie d'impédance électrochimique 42
Conclusion et perspectives 47

Liste des abréviations

UV-Vis : Ultraviolet-visible.

R_{tc}: Résistance de transfert de charge.

P.C.O : Potentiel à circuit ouvert.

ISO : organisation internationale de normalisation.

EI (%) : Efficacité inhibitrice.

XC48 : Acier au carbone.

C_{dl} : Capacité de double couche.

Tafel : Droites de Tafel (courbes de polarisation).

H_2SO_4 : Acide sulfurique.

EMS : Électrode au sulfate mercureux Hg/Hg2SO4.

EIS : Spectroscopie d'impédance électrochimique.

R : Rendement.

pH : Potentiel d'hydrogène.

η: Surtension.

E_{corr} : Potentiel de corrosion

I_{corr} : Courant de corrosion

R_s : Résistance de solution

Liste des figures

Figure I.1: Exemple de corrosion uniforme d'alliages métalliques 5
Figure I.2 : Exemple de corrosion par piqûres sur de l'acier inoxydable 6
Figure I.3: Fissuration par corrosion sous contrainte d'un assemblage après 4 ans dans une piscine intérieure 7
Figure I.4 : Illustration de la corrosion en crevasse 8
Figure I.5 : Exemple de corrosion galvanique dans un assemblage 9
Figure I.6 : Diagrammes d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion du a la présence d'un inhibiteur de corrosion……..……..…14
Figure I.7 : domaine d'absorption de l'UV-Visible……..…….15
Figure I.8 : Représentation schématique de la double couche électrochimique selon le modèle de stern.....18
Figure I.9: Spectres d'impédance électrochimique pour l'étude de l'effet inhibiteur…….…….19
Figure II.1 : Le noyer (Juglans regia).....21
Figure II.2 :Séchage de la plante Juglans regia.....24
Figure II.3 : Poudre de la plante Juglans regie ……..…..……...……..……24
Figure II.4 : spectrophotomètre UV-VIS 1900i……..…...28
Figure II.5 : électrode de travail et acier XC48..……..……..…...29
Figure II.6 : Potentiostat / Galvanostat biologique SP300 30
Figure II.7 : Cellule électrochimique à trois électrodes 31
Figure II.8 : Électrode de référence (ER) 31
Figure II.9 : Contre-électrode (CE) 31
Figure III.1 : Spectres UV-VIS des extraits méthanolique et aqueux.....38
FigureIII.2: Spectres UV-VIS des extraits méthanolique et aqueux en presence de H_2SO_4 (0,5M)……..…….39
Figure III.3 : Variation de potentiel libre de l'acier XC48 dans une solution acide Sulfurique (0,5M) avec différentes concentrations d'extrait de Juglans regia. En Fonction du temps d'immersion ……..…….40
Figure III.4 : Les courbes de Tafel de l'acier XC48 dans H_2SO_4 (0,5 M) sans et avec Addition de différentes concentrations des extraits de Juglans regia……...……41
Figure III.5 : Diagramme de Nyquist de l'acier XC48 pour différentes concentrations des extraits en milieu H_2SO_4 (0 .5 M)……...……..…44

Liste des tableaux :

Tableau I.1 : Classification des inhibiteurs 12

TableauII.1: Classification taxonomique de Le Noyer a (Juglans regia)…….……. …...…21

Tableau II.2 : Données géographiques de site de récolte…….....…...…..….25

Tableau II.3 : Appareils et instruments utilisés…….....…….25

TableauII.4 : composition chimique de l'acier au carbone XC48……...…...29

TableauII.5 : les caractéristiques mécaniques moyennes (état normalise) de l'acier XC48.….....29

TableauIII.1 : Rendements d'extraction des feuilles de Juglans regie selon le type d'extrait.….34

TableauIII.2 : Représente taux d'humidité du matériel végétal……...…...……...34

TableauIII.3 : Résultats du screening phytochimique……...……..…35

TableauIII.4 : Résultats visuels des réactions de caractérisation phytochimique…….....….36

Tableau III.5 : Paramètres électrochimique de la corrosion de l'acier XC48 dans une solution H_2SO_4 0,5 M sans et avec différentes concentrations en inhibiteur……...…….….42

Tableau III.6: Paramètres d'impédance et efficacité inhibitrices de la corrosion de l'acier XC48 à obtenus à différentes concentration d'inhibiteurs en milieu H_2SO_4 0,5 M ..……..…...……45

Liste des symboles :

Symboles	Signification	Unité
E	Potentiel	V
F	Fréquence	Hz
Re	Résistance de l'électrolyte	**Ω**
Rp	Résistance de polarisation	Ω.cm2
Rtc	Résistance de transfert de Charge	Ω.cm2
Ecorr	Potentiel de corrosion	V/ECS
Cdl	Capacité du double Couche	µF/cm2
Icorr	Courant de Corrosion	A
βa	Coefficients de Tafel Anodique	V /decade
βc	Coefficients de Tafel Cathodique	V /decade
$\mathbf{V_{corr}}$	Vitesse de corrosion	mm/ans

Introduction Générale

La corrosion est la détérioration d'un métal causée par l'action chimique ou électrochimique d'un environnement. C'est un problème constant et continu, souvent difficile à éliminer complètement. La corrosion affecte de multiples domaines et notamment dans l'industrie : arrêts de production, remplacement de pièces corrodées, accidents et risques de pollution sont des événements fréquents avec des retombées économiques parfois lourdes. Divers traitements anticorrosion déjà connus sont appliqués aux installations et équipements industriels sensibles à la corrosion. Néanmoins, la combinaison de différents métaux (ferreux et non ferreux) et la prohibition de l'utilisation d'inhibiteurs contenant des composés toxiques (chromate, nitrite, etc.) rendent la mise en œuvre de traitements anticorrosion performants compliquée et motivent donc la recherche de nouvelles techniques de protection. En termes de protection, les inhibiteurs de corrosion occupent une place importante dans la protection contre la corrosion des métaux. Un inhibiteur est une substance chimique qui, lorsqu'il est ajouté à de faibles concentrations dans des milieux corrosifs, diminue ou empêche la réaction du métal avec son environnement. Il est employé soit pour une protection permanente de la pièce (dans ce cas, une surveillance rigoureuse de l'installation s'impose), soit pour une protection temporaire pendant une période où la pièce ou l'installation est particulièrement sensible à la corrosion (décapage, nettoyage). Les inhibiteurs ont l'originalité d'être l'unique moyen d'intervention du milieu corrosif, ce qui en fait une voie facile et peu coûteuse de lutte contre la corrosion, à condition que le ou les produits utilisés soient de coût modéré.

L'utilisation d'extraits de plantes, comme moyen de protection contre la corrosion, est une thématique de recherche en plein essors vu le nombre annuel de publications dans ce domaine. En effet, on énumère de nombreuses familles de composés organiques naturels rentrant dans la composition chimique des extraits naturels (flavonoïdes, tanins, alcaloïdes, ...) « Verts », aisément disponibles et renouvelables [1].

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'efficacité inhibitrice des extraits de Juglans regia contre la corrosion de l'acier XC48 dans une solution de H_2SO_4 0,5 M, en étudiant leur comportement électrochimique et leur potentiel en tant qu'inhibiteurs de corrosion verts, efficaces et respectueux de l'environnement.

Ce manuscrit est constitué de trois chapitres incluant une partie bibliographique et une partie expérimentale et partie résultats et discussions.

Chapitre I : Ce chapitre présente les généralités sur la corrosion, ses différentes formes et types, ainsi que les rappels théoriques sur les inhibiteurs de corrosion.

Chapitre II : Ce chapitre présente les différentes techniques d'analyses utilisées pour réaliser ce travail.

Chapitre III : Ce chapitre présente les résultats l'étude obtenue et leur discussion.

Chapitre I :

Etude bibliographique

I.1Corrosion :

I.1.1Définition :

La corrosion est le phénomène d'interaction entre un métal ou alliage métallique et son environnement et qui entraîne une détérioration des propriétés utiles du métal permettant ainsi un retour à la situation stable de sulfure, d'oxyde qui était la sienne avant les opérations d'élaboration et d'extraction. Les composés non métalliques ne sont pas inclus dans la présente définition, les plastiques peuvent être gonfler ou craquer, le bois peut se fondre où s'ouvrir, le granit peut s'éroder et le ciment portland peut se lessiver mais le terme corrosion est ici limité à l'attaque chimique des métaux.

D'une façon générale, la corrosion peut être de deux types : corrosion sèche et corrosion Electrochimique .La corrosion sèche est le résultat de l'attaque d'un métal par un gaz à des températures-élevées.

La réaction qui se produit est de la forme :

$$A\ (solide)\ +\ B\ (gaz)\quad \rightarrow\ AB\ (solide).$$

La corrosion électrochimique est le résultat de l'attaque d'un métal par un électrolyte. Elle a lieu dans des solutions aqueuses ou dans des sels fondus. Ces derniers sont susceptibles de conduire le courant par déplacement d'ions, les courants ioniques mis en jeu donnent au phénomène de la corrosion un aspect particulier. C'est ce qu'on appelle corrosion électrochimique. Elle diffère de la corrosion sèche par le fait que le milieu corrosif participe au déplacement d'ions de la solution vers le métal [2].

I.1.2 Les types de corrosion :

La corrosion peut se développer suivant différents processus induisant plusieurs types de Corrosion :

a) Corrosion chimique

Il s'agit d'une réaction purement chimique entre la surface d'un matériau et un gaz ou un Liquide non-électrolyte. Par exemple, l'oxydation de l'acier ordinaire à haute température par L'oxygène de l'air est une corrosion chimique.

b) Corrosion électrochimique

C'est une réaction électrochimique entre la surface d'un matériau et un liquide électrolyte.

Elle est accompagnée de la formation de piles qui sont le siège de circulation de courant électrique Telle que la dégradation de l'aluminium par l'acide sulfurique dilué.

c)Corrosion biochimique

C'est l'attaque bactérienne des matériaux métalliques, en particulier dans les canalisations Enterrées et les réservoirs. En effet, le métabolisme du développement de certaines bactéries Provoque la formation d'acide sulfurique qui attaque le métal.

d) Corrosion accompagnée d'usure

Lorsque les produits de corrosion forment un dépôt adhérant et uniforme sur la surface du Métal, ils ralentissent la vitesse de corrosion. Cette couche peut être éliminée en certains points Par usure abrasive ou érosive. Il y' a alors accélération de la corrosion parce que la surface du Métal est mis nu [3] .

1.1.3 Les formes de corrosion :

1.1.3.1La corrosion uniforme :

Elle est la forme la plus classique de corrosion et elle est la plus simple à repérer. Comme son nom l'indique, cette corrosion attaque une surface métallique de manière relativement uniforme. La surface se dégrade plus ou moins rapidement en fonction de son environnement et on observe alors l'apparition d'oxyde de fer (i.e. de rouille). L'impact de la corrosion peut être quantifié en mesurant la diminution d'épaisseur par an (µm/an) et les valeurs moyennes par matériau étant connues, il est possible de calculer l'espérance de vie d'un composant [4].



Figure I.1 : Exemple de corrosion uniforme d'alliages métalliques

I.1.3.2La corrosion par piqûres :

Il s'agit d'une corrosion localisée qui entraîne la création de petite cavité à la surface d'un matériau. Le processus de corrosion intervient lorsque la couche passive* se dégrade de manière localisée. Les trous peuvent se corroder très rapidement en profondeur, tandis que le reste de la surface reste intact. Les métaux et alliages passifs comme l'aluminium, le titane et les aciers inoxydables sont sujet à ce genre de corrosion une fois que la fine couche d'oxyde présent à leur surface est dégradée localement.

Ce type de corrosion s'observe le plus souvent dans des environnements très agressifs, à température élevés à forte concentration d'ions chlorure (comme les piscines intérieures). Contrairement à la corrosion uniforme, ce type de corrosion est plus difficile à détecter, car les trous formés ne sont généralement pas plus larges qu'une tête d'épingle. La quantité de matière consommée en profondeur est difficilement quantifiable ce qui ne permet pas de prédire la durée de vie de la pièce attaquée. C'est pour cette raison que le choix d'une protection adaptée doit être fait au moment du design [4].



Figure I.2: Exemple de corrosion par piqûres sur de l'acier inoxydable

I.1.3.3La fissuration par corrosion sous contrainte (CSC):

Cette forme de corrosion résulte de l'action combinée d'une contrainte de traction et d'un environnement corrosif. Ce type de phénomène peut engendrer la ruine soudaine d'un métal ductile* soumis à un niveau de contrainte inférieur à sa limite élastique. Il suffit qu'une petite cavité soit formée à la surface du métal pour qu'elle se développe en fissure en raison du niveau de contrainte (résiduelle ou bien appliquée) dans la matière (les contraintes étant maximales en front de fissure). Une fois que la fissure existe, la réaction est auto-accélérée, puisque de nouvelle zones actives (non protégées de la corrosion) font leurs apparitions. Ces zones sont alors corrodées ce qui fragilise le métal et entraîne une propagation de la fissure et donc l'apparition d'autres surfaces actives qui se corrodent. La fissure se propage donc en continu et la matière dans la fissure se corrode rapidement jusqu'à la ruine mécanique. Ce qui fait de la

SCC un phénomène dangereux, car malgré un niveau de contrainte très inférieur à la limite élastique, le composant peut être détruit.

*Un matériau ductile est défini par sa capacité à se déformer plastiquement (sans se rompre) une fois la contrainte élastique dépassée. À l'inverse, un matériau fragile lui, se fracture dès que la limite d'élasticité est dépassée.

Généralement la CSC apparaît uniquement avec des métaux alliés, il est par exemple connu que certaines classes d'aciers inoxydables peuvent être sujet à ce genre de corrosion lorsqu'ils sont dans des environnements dit « agressifs » tel que les piscines Intérieures (forte présence de chlorure). Dans ce genre de configuration, des nuances d'acier inoxydable à haute résistance à la corrosion doivent être utilisées. Il est donc important de prévoir en amont la protection anticorrosion adaptée à l'environnement en contact et/ou d'assurer un niveau de contrainte très faible.

Intérieures (forte présence de chlorure). Dans ce genre de configuration, des nuances d'acier inoxydable à haute résistance à la corrosion doivent être utilisées. Il est donc important de prévoir en amont la protection anticorrosion adaptée à l'environnement en contact et/ou d'assurer un niveau de contrainte très faible [4].



Figure I .3: Fissuration par corrosion sous contrainte d'un assemblage après 4 ans dans une piscine intérieure

I.1.3.4 La corrosion en crevasse (ou caverneuse) :

Il s'agit d'une corrosion localisée qui se produit au niveau d'une crevasse ou de l'espace entre deux ou plusieurs métaux d'assemblage. C'est une **corrosion par piqûres** qui se produit précisément dans la région à faible débit d'une crevasse. Ce type d'attaque est généralement associé à de faibles volumes de solution stagnante causés notamment par des trous et des crevasses sous les têtes de boulons et de rivets. La dégradation a lieu en raison de la différence de concentration des constituants, principalement l'**oxygène**, dans les surfaces concernées. La

crevasse ayant une concentration d'oxygène restreinte, elle devient anode et donc la région privilégiée pour la dissolution du métal.

Etant très localisée, la corrosion en crevasse peut être extrêmement rapide. Dans certains cas difficilement détectables, ce type de corrosion constitue un danger pouvant être évité en choisissant les bons matériaux en amont, en adaptant les joints (en optant pour la soudure par exemple) et en concevant un montage peu sujet à l'apparition de crevasse [4].

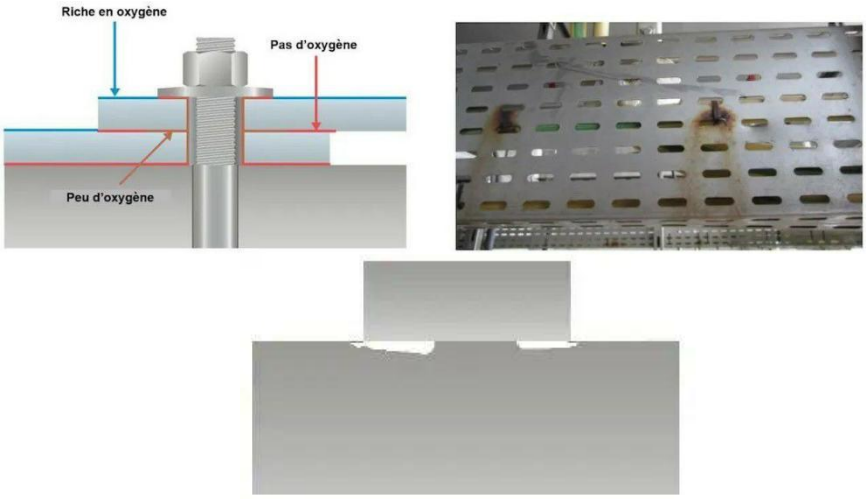


Figure I.4: Illustration de la corrosion en crevasse

I.1.3.5 La corrosion galvanique :

Cette réaction se produit lorsque deux métaux différents sont en contact (ou qu'il existe un chemin électriquement conducteur entre les deux). Le métal moins résistant à la corrosion (le moins « noble ») devient anode et se corrode plus rapidement. Le métal plus résistant à la corrosion quant à lui, devient cathode et voit sa corrosion ralentir. Ce type de corrosion ne provoque la dégradation que d'un seul des métaux en contact. Le plus noble des métaux est lui protégé. Ce phénomène, appelé protection cathodique, est parfois utilisé volontairement pour protéger certains éléments en en sacrifiant d'autres. Cette méthode est notamment utilisée pour protéger des structures métalliques enterrées ou immergées (comme les coques de bateau par exemple).

*on dit qu'un métal est noble lorsqu'il résiste à la corrosion et à l'oxydation (L'or, l'argent, le platine… sont des métaux nobles). Ici, il s'agit d'un abus de langage visant à comparer la résistance à la corrosion entre deux métaux [4]**.**



Figure I.5: Exemple de corrosion galvanique dans un assemblage ici la rondelle est l'élément le moins résistant à la corrosion

I.1.4 Facteurs influençant la corrosion :

Au fur et à mesure que l'environnement change, divers facteurs affectant la corrosion deviennent de plus en plus complexes, qui modifiera le degré ou le type de corrosion et augmentera la sévérité de la corrosion. De nombreux facteurs affectent la corrosion des métaux. La corrosion des métaux est causée par divers facteurs internes et externes, comprenant principalement les éléments suivants :

- Nature du métal : la composition chimique et les impuretés influencent sa sensibilité à la corrosion.
- Température et humidité : leur augmentation accélère les réactions de corrosion.
- Composition du milieu : la nature chimique et le pH de la solution affectent le taux de corrosion.
- Conditions environnementales : l'air, l'eau et les autres milieux en contact avec le métal jouent un rôle important.
- État de surface du métal : les différences de concentration en oxygène peuvent entraîner une corrosion localisée [5].

I.1.5 Les impacts environnementaux :

La corrosion des métaux peut entraîner une pollution environnementale, un gaspillage de ressources et des dommages aux écosystèmes.

La corrosion est un processus naturel qui convertit le métal raffiné en une forme plus stable, telle que son oxyde, son hydroxyde ou son sulfure. Ce processus peut avoir plusieurs impacts négatifs sur l'environnement. Tout d'abord, il peut entraîner une pollution. Lorsque les métaux corrodent, ils peuvent libérer des substances potentiellement nocives dans l'environnement. Par exemple, la rouille du fer peut libérer des oxydes de fer dans le sol, l'eau et l'air, ce qui peut être nocif pour les plantes, les animaux et les humains. De même, la corrosion du plomb ou du mercure peut libérer des substances toxiques qui peuvent contaminer les sources d'eau et nuire à la vie aquatique.

Deuxièmement, la corrosion peut entraîner un gaspillage de ressources. Les métaux sont des ressources précieuses souvent extraites de la terre par le biais de l'exploitation minière, un processus qui peut avoir des impacts environnementaux significatifs. Lorsque ces métaux corrodent, ils ne peuvent plus être utilisés et doivent être remplacés, ce qui nécessite plus d'exploitation minière et de transformation. Cela non seulement épuise les ressources de la terre, mais contribue également à la pollution et à la destruction d'habitats.

Enfin, la corrosion peut endommager les écosystèmes. Par exemple, des structures métalliques corrodées peuvent s'effondrer, causant des dommages physiques à l'environnement environnant. De plus, les substances libérées pendant la corrosion peuvent modifier le pH du sol et de l'eau, ce qui peut affecter la croissance des plantes et la survie des animaux. Par exemple, les oxydes de fer peuvent rendre le sol plus acide, ce qui peut nuire à certains types de plantes.

En conclusion, bien que la corrosion soit un processus naturel, elle peut avoir des impacts environnementaux significatifs. Ceux-ci incluent la pollution, le gaspillage de ressources et les dommages aux écosystèmes. Par conséquent, il est important de gérer et de prévenir la corrosion pour minimiser ses impacts environnementaux [6]**.**

I.2 Les inhibiteurs de corrosion :

I.2.1 Définition :

Un inhibiteur de corrosion est une substance chimique qui, ajoutée en concentration appropriée dans un système soumis à la corrosion, diminue la vitesse de corrosion sans changer la concentration en agent corrosif. Les inhibiteurs de corrosion sont rarement utilisés seuls. Ils sont souvent associés à des inhibiteurs d’entartrage, à des réactifs modifiant sensiblement le milieu (pH et conductivité principalement) et à des biocides. L’emploi de ces produits a souvent un effet sur les processus d’inhibition de la corrosion. Leur rôle et leur mode d’action sont présentés

dans cet article. L'emploi d'un inhibiteur doit être conforme à la législation. Les textes à consulter sont précisés chaque fois que nécessaire [7].

I.2.2 Critères d'efficacité des inhibiteurs :

Un inhibiteur est efficace s'il satisfait un certain nombre de critères. Pour cela, il doit :

- réduire la vitesse de corrosion du métal sans affecter les propriétés physicochimiques du milieu ou du métal ;

- être stable aux températures d'utilisation et en présence des autres constituants du milieu, en particulier avec les oxydant ;

- Être soluble et dispensable dans le milieu ;

- Être efficace à faible concentration ;

- respecter les normes de non-toxicité

- être peu onéreux [8].

I.2.3 Classification des inhibiteurs de corrosion :

Les inhibiteurs de corrosion peuvent être classés selon différentes possibilités sont regroupées dans le tableau suivants.

Tableaux I.1 : classification des inhibiteurs

Classification d'inhibiteurs		
La nature	**Mécanisme d'action électrochimique**	**Mécanisme réactionnel**
* Inhibiteurs organiques * inhibiteurs inorganiques	* Inhibiteurs cathodiques ; * Inhibiteurs anodiques ; * Inhibiteurs mixtes.	*Adsorption ; *Passivation ; *Précipitation.

I.2.3.1Selon la nature :

a)Inhibiteurs organiques :

Les molécules organiques sont promises à un développement plus que certain en termes d'inhibiteurs de corrosion : leur utilisation est actuellement préférée à celle des inhibiteurs inorganiques pour des raisons d'écotoxicité essentiellement. Les inhibiteurs organiques sont généralement constitués de sous-produits de l'industrie pétrolière. À partir d'une molécule « mère » possédant une certaine efficacité, il est toujours possible de synthétiser des composés de plus en plus complexes dans le but d'améliorer l'efficacité inhibitrice ou encore certaines Propriétés physiques (solubilité en milieu aqueux ou non aqueux, pouvoir mouillant, température d'ébullition...). Ils possèdent au moins un centre actif susceptible d'échanger des électrons avec le métal, tels que l'azote, l'oxygène, le phosphore ou le soufre.

b) Inhibiteurs inorganiques :

Les molécules minérales sont utilisées le plus souvent en milieu proche de la neutralité, voire en milieu alcalin, et plus rarement en milieu acide ces composés sont ioniques et ce sont leurs produits de dissociation dans l'eau qui assurent les phénomènes d'inhibition (anions ou cations). Les principaux anions inhibiteurs sont les oxo-anions de type MeO4-x, tels les chromates, molybdates, tungstates, vanadate…Les cations sont essentiellement Ca^{2+} et Zn^{2+} et ceux qui forment des sels insolubles avec certains anions tels que l'hydroxyle OH^- . Le nombre de composés en usage à l'heure actuelle va en se restreignant, car la plupart des produits efficaces sont bannis pour des raisons environnementales [9].

I.2.3.2 Par mécanisme d'action électrochimique :

On peut distinguer les inhibiteurs anodiques, cathodiques ou mixtes. Les inhibiteurs de corrosion forment une couche barrière sur la surface métallique, qui modifie les réactions électrochimiques en bloquant soit les sites anodiques (siège de l'oxydation du métal) soit les sites cathodique (siège de la réduction de l'oxygène en milieu neutre aéré ou siège de la réduction du proton H+ en milieu acide).

a) Les inhibiteurs anodiques :

Les inhibiteurs anodiques diminuent la densité de courant de dissolution du métal et

Déplacent le potentiel de corrosion dans le sens positif. Ce type d'inhibiteurs doit être

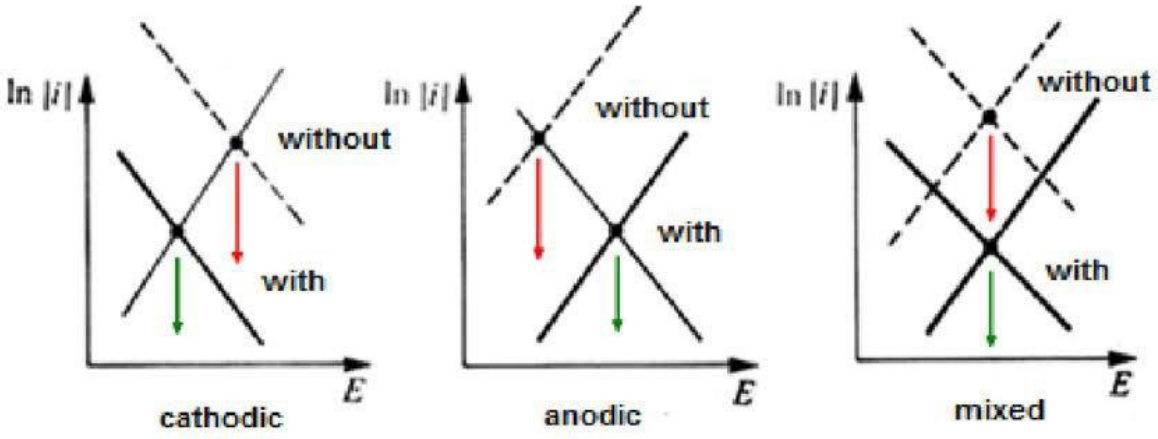
Utilisé en quantité suffisante car dans le cas contraire, ils peuvent accentuer la corrosion des zones non protégées.

b) les inhibiteurs cathodiques :

Les inhibiteurs cathodiques, en revanche, diminuent la densité de courant de réduction du solvant et déplacent le potentiel de corrosion dans le sens négatif. Du fait de leur mode d'action, les inhibiteurs cathodiques sont considérés comme plus sûrs que les inhibiteurs anodiques car ils ne risquent pas de favoriser la corrosion localisée.

c) les inhibiteurs mixtes :

Les inhibiteurs mixtes diminuent la vitesse des deux réactions partielles en modifiant peu le potentiel de corrosion .Les inhibiteurs de corrosion qui augmentent la résistance ohmique de l'électrolyte sont considérés, dans certains cas, comme inhibiteurs filmant (anodique et Cathodique).La résistance de la solution augmente suite à la formation d'un film à la Surface du métal Lorsque le film est déposé sélectivement sur la surface anodique, le potentiel de corrosion se déplace vers des valeurs positives. Dans le cas ou le film est déposé à la surface cathodique, le potentiel de corrosion balance vers des valeur négatives. Dans le cas de la formation d'un film sur les surfaces anodiques et cathodiques, le déplacement du potentiel de corrosion est du côté de la tendance prédominante. Les inhibiteurs mixtes diminuent la vitesse des deux réactions partielles mais modifient Peu le potentiel de corrosion [10].



FigureI.6: Diagrammes d'Evans montrant le déplacement du potentiel de corrosion du a la présence d'un inhibiteur de corrosion.

I.2.3.3 Par mécanisme réactionnel :

Dans la classification liée au mécanisme réactionnel mis en jeu en fonction de leur mode d'action, on peut distinguer différents types d'inhibiteurs : ceux agissant par adsorption, par passivation ou par précipitation.

Les inhibiteurs agissant par adsorption sont en général les inhibiteurs organiques. Ils empêchent l'action du milieu agressif en se fixant sur la surface du métal. Leur fixation se fait

principalement par la fonction active de l'inhibiteur ; cependant, les parties polaires peuvent être également adsorbées. Ceux qui agissent par adsorption chimique s'avèrent souvent plus efficaces que ceux agissant par adsorption physique, car le partage des électrons renforce la liaison entre le métal et l'inhibiteur. Généralement, en présence d'une chimisorption, la molécule inhibitrice agit comme donneur d'électrons alors que le métal agit comme accepteur d'électrons.

Les inhibiteurs agissant par passivation sont en général les inhibiteurs minéraux. Ils provoquent la passivation spontanée du métal en renforçant la couche d'oxyde formée naturellement sur la surface du métal. Ils se réduisent sur les pores de la couche d'oxyde/hydroxyde plus ou moins protectrice qui se forme naturellement sur la surface du métal. L'ion chromate est un des inhibiteurs passivant par excellence mais son caractère cancérigène et sa forte toxicité réduisent notablement son utilisation.

Les inhibiteurs agissant par précipitation provoquent la formation d'un film superficiel constitué de sels minéraux ou de complexes organiques peu solubles formés lors de la précipitation des produits de réaction cathodique tout en bloquant la dissolution anodique. Il s'agit généralement de sels d'acide faible et de base forte comme les borates, Les silicates, les phosphates, les poly phosphates et les sels de zinc [10].

I.3 Analyse spectroscopiques par UV-VIS :

La spectroscopie UV/Vis est une technique analytique qui étudie l'interaction entre la lumière ultraviolette (UV) et visible (Vis) avec les échantillons. Elle mesure la quantité de lumière absorbée ou transmise par l'échantillon à différentes longueurs d'onde dans la gamme UV/Vis. Les résultats sont présentés sous forme d'un spectre UV/Vis, qui constitue une empreinte unique permettant d'identifier et de caractériser la substance analysée.

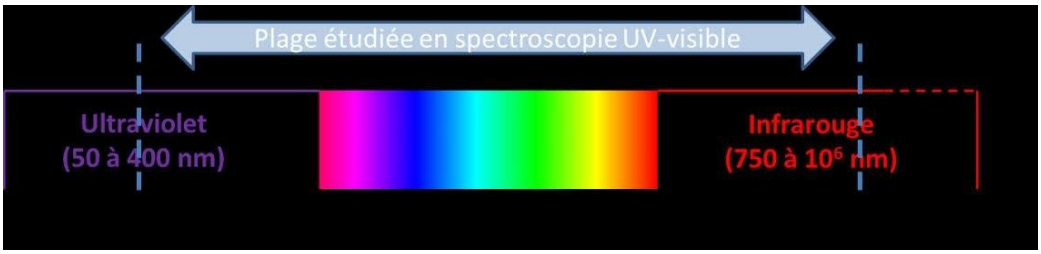
La plage spectrale étudiée s'étend de 180 à 1100 nm, divisée en trois régions principales :

Proche UV : 185–400 nm

Visible : 400–700 nm

Très proche infrarouge : 700–1100 nm

Cette technique est excellente pour l'analyse quantitative grâce à la loi de Béer-Lambert, qui relie l'absorption à la concentration de l'échantillon. L'absorption résulte de l'interaction des photons de la source lumineuse avec les ions ou les molécules de l'échantillon [23].



FigureI.7: domaine d'absorption de l'UV-Visible

I.4 Méthodes d'études de la corrosion :

L'étude de la corrosion et la compréhension de ses mécanismes constituent une étape essentielle pour protéger les métaux et prolonger la durée de vie des équipements industriels. Cela se fait en utilisant des méthodes variées combinant l'analyse électrochimique, physique et chimique, permettant de connaître le taux de corrosion, la nature des réactions et l'effet des inhibiteurs.

I.4.1 Gravimétrie :

La méthode de perte de masse est d'une mise en œuvre simple et ne nécessite pas Un appareillage important ; la vitesse de corrosion est déterminée après 24h d'immersion à température constante égale à 25° C.

La vitesse de corrosion est calculée par la formule suivante :

$$v = \frac{\Delta m}{S * t} \qquad (mg/h.cm2)$$

$$\Delta m = m0 - mf$$

Où, $\Delta m(m_0–m_f)$ représente la différence entre la masse initiale m_0 et la masse finale $m_f$après un temps t égal à 24h. S, est la surface du métal exposée à la solution d'étude. Cette valeur de la vitesse de corrosion est la moyenne de trois essais effectués dans les mêmes conditions pour chaque concentration.

La valeur de l'efficacité inhibitrice est donnée par la formule suivante :

$$P\ (\%)\ = \frac{(v- v_{inhib})}{v}\ x\ 100$$

vet v_{inhib} représentent respectivement les vitesses de corrosion sans inhibiteur

Et en présence d'inhibiteur [11].

I .4.2 Méthodes électrochimiques :

Les méthodes électrochimiques peuvent être classées selon deux groupes distincts :

- Les méthodes stationnaires
- Les méthodes non-stationnaires dites transitoires.

I.4.2.1 Méthode stationnaires :

Les méthodes stationnaires offrent la possibilité d'examiner un système qui se situe dans un état pratiquement en équilibre thermodynamique. Tous les couples redox présents dans la solution sont considérés.

I.4.2.1.1 Suivi du potentiel en circuit ouvert (PCO) :

Suivi du potentiel en mode circuit ouvert, aussi connu sous le nom de potentiel spontané, potentiel d'abandon, de repos ou libre, le potentiel en circuit ouvert (PCO) est l'élément électrochimique mesurable qui se manifeste de la manière la plus directe. Cette méthode facile, qui implique de tracer le potentiel en fonction du temps passé dans l'environnement, est la seule évaluation qui ne provoque absolument aucune affectation de l'état du système examiné. On la quantifie par rapport à un potentiel de référence. L'observation du potentiel en circuit ouvert fournit des indications initiales sur la nature des phénomènes qui se déroulent à l'interface métal/électrolyte (corrosion, passivation, etc.).Cette démarche permet aussi de déterminer le temps d'immersion requis pour instaurer un régime stable indispensable à l'emploi des autres méthodes électrochimiques (polarisation linéaire et impédance électrochimique). L'équilibre dans le système électrochimique se manifeste quand le potentiel reste stable au fil du temps.

I.4.2.1.2 Courbe de polarisation :

La caractéristique essentielle de la cinétique électrochimique, à savoir la courbe de polarisation de l'interface métal-solution, ne représente toutefois que l'étape la plus lente du processus global à cette interface. On utilise un potentiostat pour appliquer différents potentiels entre l'électrode de travail et une électrode de référence afin de déterminer une courbe de polarisation potentiostatique. On évalue le courant stable qui se forme dans le circuit électrique entre cette électrode de travail et une contre-électrode après un certain délai. Cette technique offre la possibilité d'identifier de manière précise les paramètres électrochimiques d'un métal en interaction avec un électrolyte, notamment : le taux de corrosion instantané (I_{corr})le potentiel de corrosion (E_{corr}), les pentes de Tafel, la résistance à la polarisation (R_p) et les courants limites de diffusion. Elle fournit des résultats rapides et son application est assez facile. L'établissement de la vitesse de corrosion basée sur les courbes de polarisation est fortement associé à la dynamique qui gouverne le processus électrochimique. Nous pouvons identifier trois types principaux de cinétique :

- ✓ Vitesse de transfert de charge (activation),
- ✓ Vitesse mixte de transfert de charge - diffusion,
- ✓ Vitesse de diffusion.

Pour établir de manière expérimentale ces paramètres électrochimiques, il est généralement préférable d'utiliser une représentation logarithmique de la densité de courant, car cela souligne le lien linéaire entre le logarithme de cette densité et le potentiel.

a) Méthode de Tafal :

La méthode de Tafel partiellement décrite dans la démonstration de l'équation de Butler-Volmer permet d'obtenir expérimentalement ces paramètres électrochimiques. En effet, la relation entre le courant de corrosion et la surtension d'électrode η(η= *(E*-E_{corr}), est donnée par la formule simplifiée de l'équation fondamentale de Butler-Volmer :

$$I = I_a + I_c = I_{corr}\left(\exp\left(\frac{2.303}{b\,a}\eta\right) - \exp\left(\frac{-2.303}{b\,c}\eta\right)\right)$$

Où I_a et I_c sont les densités des courants partiels anodique et cathodique, I_{corr}le courant De corrosion, b_a et b_c les pentes de Tafel des réactions anodique et cathodique telles que :

$$b_a = \frac{2.303 \times RT}{\alpha nF}$$

$$b_c = \frac{2.303 \times RT}{(1-\alpha)nF}$$

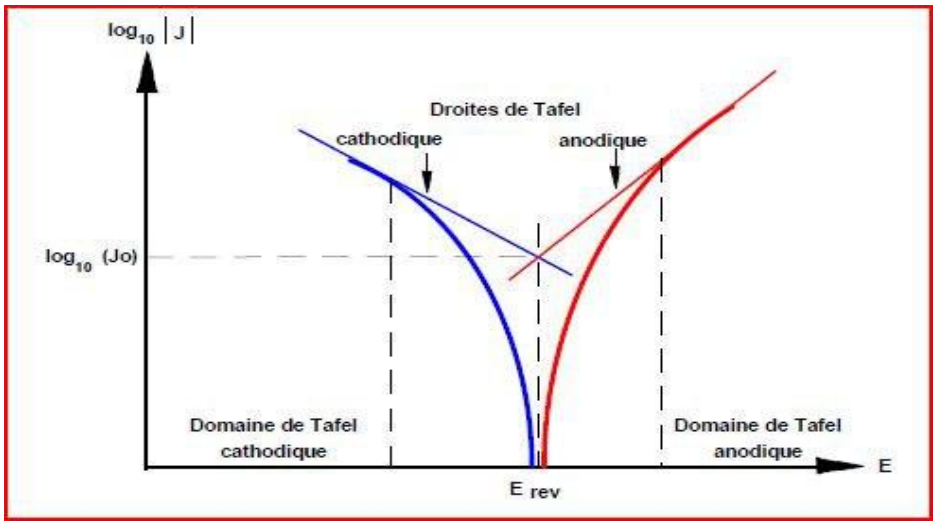
F étant la constante de Faraday, R la constante universelle des gaz parfaits, T la température Absolue, ηle nombre d'électrons transférés, et α le coefficient de transfert de charge.

En présence de surtensions anodiques (η_a) ou cathodiques (η_c) importantes (supérieures à 100 mV, en valeur absolue), l'un des courants anodique ou cathodique de l'équation de Butler-Volmer devient négligeable et le courant mesuré reflète le courant partiel anodique ou cathodique. Cela est démontré par la (figure I.7) qui montre la courbe de polarisation globale résultant de l'addition des deux courbes de polarisation élémentaires (anodique et cathodique, qui ne peuvent pas être mesurées expérimentalement). Ainsi, après simplification de la formule de Butler-Volmer, on arrive à une relation qui lie la surtension d'électrode et le logarithme de la densité du courant mesuré. Cette expression est connue sous le terme de loi de Tafel :

$$\log I = a + \frac{\eta\, a}{b\, a} \qquad \text{Pour la branche anodique}$$

$$\log I = a + \frac{\eta\, c}{b\, c} \qquad \text{Pour la branche cathodique}$$

Où a est une constante. L'extrapolation, au potentiel de corrosion, des droites de Tafel fournit Le courant de corrosion I_{corr} [11].



FigureI.8:Détermination des paramètres électrochimiques a partir des droites de Tafel

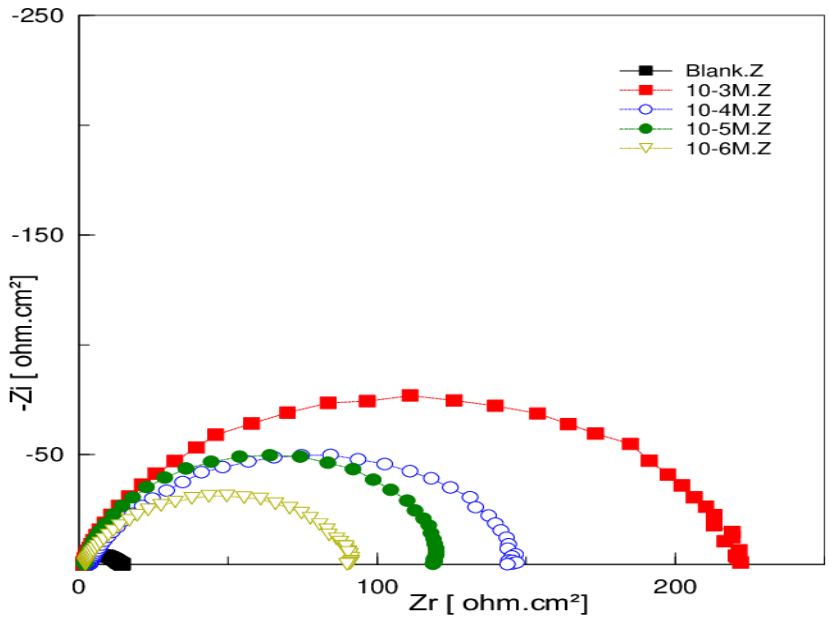
I.4.2.2 Méthodes électrochimiques transitoires :

Ces méthodes aident à étudier les mécanismes de corrosion et de protection des métaux. Elles permettent de différencier les phénomènes réactionnels par leur temps de relaxation. Elles consistent à imposer une variation de potentiel ou de courant, puis à mesurer la réponse du système étudié à cette perturbation. Dans le domaine de la corrosion, la spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) présente la méthode la plus courante ; car elle n'est pas destructive.

I.4.2.2.1 Spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) :

La SIE permet d'identifier les processus à l'interface métal/solution (transfert de charge, passivation, diffusion), chacun caractérisé par sa constante de temps τ. Elle mesure la réponse sinusoïdale du courant à une petite perturbation sinusoïdale du potentiel.

L'impédance Z(ω) est un nombre complexe (fonction de transfert) qui décrit le comportement du système électrochimique face à cette perturbation fréquentielle, comme illustré par le schéma électrique Cette technique permet aussi d'évaluer l'efficacité des inhibiteurs et d'expliquer leur mode d'action [12].



FigureI.9: Spectres d'impédance électrochimique pour l'étude de l'effet inhibiteur

Chapitre II :

Partie Expérimentale

II .1 Description de la plante étudiée et procédés d'extraction :

II.1.1 Présentation de l'espèce étudiée :

II.1.1.1. Définition de plante :

Le noyer, scientifiquement connu sous le nom de Juglans regia, est un grand et beau arbre que l'on trouve dans les zones rurales. Il peut atteindre une hauteur de 30 mètres, surtout lorsqu'il est cultivé en groupe. Il a été observé qu'il est moins vigoureux lorsqu'il est cultivé seul. Son âge moyen est d'environ 150 ans. Il a une large couronne, du bois rouge, de l'écorce gris clair et des feuilles caduques.

Les feuilles se composent de 5 à 9 folioles ; Les folioles sont similaires aux feuilles mais sont en fait des parties d'une feuille composée constituée de plusieurs folioles. Ces folioles sont de forme ovale et se terminent par une pointe pointue.

Les fleurs mâles du noyer apparaissent au printemps à peu près en même temps que les feuilles, et se présentent sous la forme de grappes pendantes (peupliers) accrochées à l'extrémité de petites branches. Les fleurs femelles apparaissent peu après [13].

II.1.1.2 Description botanique et classification :

Le Noyer (Juglans regia) appartient à la famille des Juglandacées. Cette végétation peut grandir jusqu'à une hauteur de 30 mètres. est une plante qui provient de l'Asie occidentale et du sud-est de l'Europe. On peut identifier cette plante grâce à son écorce lisse et douce, de couleur claire. Les feuilles de mon Noyer sont grandes et composées. Il peut y avoir jusqu'à 9 folioles sur les feuilles. Le Noyer possède deux variétés distinctes de fleurs : les fleurs femelles et les fleurs mâles. Le fruit est la noix, enveloppée d'une écorce lisse verte appelée brou. On connaît les feuilles et les noix du Noyer pour leurs bienfaits, effets, propriétés et vertus. Effectivement, il produit des flavonoïdes, de la vitamine C, des tanins et de la juglone [14].



FigureII.1: Le Noyer (Juglans regia)

- **Classification systématique :**

La classification systématique de Le Noyer (Juglans regia) est présentée dans le tableau [15]

Tableau II.1 : Classification taxonomique de Le Noyer (Juglans regia):

Rang taxonomique	Nomenclature
Règne	Plante
Division	Magnoliophyta
Classe	Magnoliopsida
Ordre	Juglandales
Famille	Juglandacea
Genre	Juglans
Espèce	Juglans regia

II.1.1.3 Répartition géographique :

Juglans regia L originaire d'Asie centrale et du Proche-Orient, est largement cultivé et naturalisé dans les régions tempérées et méditerranéennes. En Algérie, il pousse spontanément ou en culture traditionnelle (arbres isolés, bordures de champs ou petits vergers) dans plusieurs wilayas

dont Sétif, Khenchela, Batna, Skikda, Tlemcen et les Aurès. Il préfère les zones fraîches avec un minimum de 700-800 mm de précipitations annuelles et supporte des altitudes jusqu'à 1500 m (particulièrement dans le nord de la wilaya de Sétif), bien que le rendement y soit plus faible [16].

II .1.1.4 Comprendre la toxicité des feuilles de noyer :

- Juglone : responsable de la toxicité principale.
- Effet allélochimique : inhibe la croissance des plantes proches.
- Risque pour les animaux : ingestion potentiellement dangereuse.
- Décomposition lente : attention au compostage.

- Les composés chimiques responsables :

- ❖ Juglone
- ❖ Tanins
- ❖ Acides phénoliques
- ❖ Huiles essentielles
- ❖ Alcaloïdes
- ❖ Flavonoïdes [17].

II.2 Extraction solide-liquide:

II.2.1 Définition:

L'extraction solide-liquide est l'opération fondamentale qui a pour but, par immersion dans un liquide et mise en solution d'extraire un ou plusieurs constituants d'un solide.

Il s'agit d'une opération de transfert ou d'échange de matière entre une phase solide contenant la matière à extraire et une phase liquide.

Le champ d'application de l'extraction solide-liquide étant très vaste, le grand nombre de vocables employés pour définir les opérations et les produits circulants impose la définition de quelques termes couramment utilisés.

Le liquide d'extraction, appelé solvant, dissout un (ou plusieurs) constituant solide ou liquide, dénommé soluté(s) pour donner une solution ou extrait (solvant + soluté(s)). Le solide appauvri en soluté(s) est appelé raffinat ou résidu ; il est inerte ou insoluble [18].

II.2.2 Mécanisme de l'extraction :

L'extraction solide-liquide est réalisée par contact intime du solvant avec le solide et suivi d'une décantation et filtration. Elle se définit comme le résultat du transfert du soluté présent dans le solide vers le liquide. Ce transfert exige un certain temps et introduit la notion de vitesse d'extraction qui est régi par trois processus élémentaires.

- Passage du solvant dans le solide et dissolution du soluté au sein des particules du solide.
- La diffusion du soluté du cœur vers la surface de la particule.
- La diffusion du soluté depuis la surface de la particule vers le cœur du solvant [18].

II.2.3 Facteurs influençant les performances de l'extraction :

L'obtention de composés à partir des plantes est influencée par divers éléments associés à la matière végétale, au solvant employé et aux conditions d'exploitation :

- ✓ **Effet du solide et du soluté:** taille et la structure du solide influencent doublement le transfert de matière Dans un procédé à transfert interne contrôlé, la dimension du substrat est cruciale Pour les cellules intactes, les parois freinent les molécules, favorisant l'osmose et une diffusion lente selon la solubilité. Les composants atteignent la surface après une longue diffusion, déterminant la vitesse d'extraction.

  Si la matière végétale est finement pulvérisée, l'extraction repose uniquement sur la diffusion libre.
- ✓ **La nature et le volume du solvant :** Le choix du solvant dépend de la solubilité de la matrice, de l'interaction matrice-solvant et surtout de la capacité du solvant à absorber les micro-ondes. Le volume du solvant doit être suffisant pour garantir que l'échantillon est bien immergé au cours du processus d'extraction.
  - ✓ **Le temps :** Le temps d'extraction est extrêmement court. En augmentant la durée d'extraction, un risque de dégradation peut se produire.
  - ✓ **La température d'extraction :** Une augmentation de la température induit une diminution de la viscosité des solvants et par conséquent une meilleure diffusion de celui-ci dans les parties internes de la matrice [19].
  - ✓ **pH du milieu d'extraction :** Le pH du milieu d'extraction intervient essentiellement au niveau de la dissolution des composés solubles et au niveau de la solubilisation de la fraction hydrolysable. Les macromolécules douées d'une certaine polarité, sont spécialement concernées par le pH. Enfin, d'une manière

secondaire, le pH peut être mis à profit pour apporter à l'extraction une certaine sélectivité [20].

II.3 Préparation de la matière végétale :

II.3.1 Séchage :

Le matériel végétal (le noyer Juglans regia) a été séché à l'étuve à une température de 45 °C pendant 24 heures.



FigureII.2: Séchage de la plante Juglans regia

II.3.2 Broyage :

Les feuilles de la plante ont été broyées manuellement à l'aide d'un broyeur domestique jusqu'à l'obtention d'une poudre fine. Cette dernière a été conservée dans une boîte stérilisée et propre.



FigureII.3: Poudre de la plante Juglans regia

Cette poudre a été employée pour effectuer les divers essais phytochimiques.

II.3.3 Récolte et identification des plantes :

La partie aérienne de Juglans regia L. a été récoltée à Sétif ; commune Sétif wilaya de Sétif.

Tableau II.2 : **Données géographiques de site de récolte**

Espèce	**Etage bioclimat**	**Latitude**	**Longitude**
Juglans regia	Semi-aride	36,191389	5,409444

II.4 Appareils Utilisés :

Le Tableau représente les appareils et les instruments utilisés.

Tableau II.3: Appareils et instruments utilisés.

Appareils	**Caractéristiques**
Balance de précision	Kern, 0.001 g, m_{max}=220 g
Plaque chauffante et Agitation	
Etuve	
Spectrophotomètre ultraviolet – visible	UV-1900i 240 V
Rota vapeur	Buchi R-210
Potentiostat / Galvanosât	SP 300
Électrode de travail	Disque en acier XC48
Électrode de référence	Electrode $Hg/HgSO_4$
Contre -électrode	Électrode en platine

II.5 Méthodes d'extraction :

II.5.1 Macération :

Nous avons mis la poudre sèche broyée en contact avec deux solvants uniquement, le méthanol et l'eau distillée, à raison de 200 mL de chaque solvant pour 50 g de poudre dans un erlenmeyer, tout en veillant à protéger au maximum les métabolites des effets de l'oxydation induite par la lumière. Nous avons d'abord effectué une agitation manuelle simple afin d'assurer

l'imprégnation complète de la surface de la poudre par les solvants, puis nous avons réalisé une agitation mécanique pour accélérer le processus d'extraction. Après 72 heures à température ambiante, le mélange a été filtré. Le résidu a été réextrait avec 200 mL de chaque solvant dans les mêmes conditions, et l'opération a été répétée une trois fois .Enfin, les extraits méthanolique et aqueux ont été évaporés à l'aide d'un évaporateur rotatif à 45 °C.

II.5.2 Rendement de l'extraction :

Le calcul des rendements est effectué selon la formule :

$$R(\%) = [\frac{Masse_{extrait}}{Masse_{plante}}].100$$

R : Rendement exprimé en %.

$M_{extrait}$: Masse en gramme de l'extrait sec résultant.

M_{plante} : Masse en gramme du matériel végétal à traiter.

II.6 Screening phytochimique :

Le screening est une méthode chimique qui permet d'identifier les divers groupes présents dans un organe végétal. Cela repose sur des réactions de précipitation ou de coloration réalisées à l'aide de réactifs chimiques spécifiques sur les extraits reconstitués provenant de la poudre et des extraits de chaque espèce végétale.

- **Test des saponosides :**

Un mélange de 0,5330g de poudre végétale avec 40 ml d'eau distillée a été chauffé à 100°C sous agitation durant 15 min, puis la solution a été laissée jusqu'au refroidissement pour la filtration. Elle est déposée dans un tube à essai et comparée avec un témoin qui contient l'eau distillée. Agiter le tube pendant 1 min et laisser reposer (15 min), la formation d'une mousse indique la présence des saponosides.

- **Test des flavonoïdes :**

Macérer 0,5543 g de poudre végétale dans 15 ml de solution d'acide hydrochlorique (HCl) 1 % puis filtrer, le filtrat obtenu a subi le test suivant :

Test aux hydroxydes de potassium : prendre 5 ml de filtrat et ajouter quelques gouttes de solution d'hydroxyde de potassium (KOH) 4 %, l'apparition de la couleur jaune indique la présence des flavonoïdes.

- **Test des tanins :**

Peser 0,5 g de poudre végétale et extraire avec 5 ml d'éthanol, 5ml eau distillée à pendant 24 heures, le filtrat a été soumis au test suivant :

Test au chlorure de fer : Prendre 3 ml de l'extrait (le filtrat) et ajouter quelques gouttes de solution de chlorure de fer ($FeCl_3$) 0.2 M. L'apparition de la couleur verte foncée ou bleu-vert indique la présence des tanins.

- **Test des cardinolides :**

Prendre 0,50 g de poudre végétale, 20 ml d'eau distillée, mélanger et laisser macérer pendant 24 h, filtrer sur papier filtre et prélever 10 ml de filtrat. Ensuite, ajouter une solution de 10 ml d'un mélange de 5 ml de chloroforme et 5 ml d'éthanol et à l'aide d'une ampoule à décanter séparer la phase aqueuse et la phase organique, cette dernière est évaporée jusqu'à la sécheresse, le sédiment se dissout dans 3 ml d'acide acétique glacial, puis ajouter quelques gouttes de chlorure de fer ($FeCl_3$) et 1 ml d'acide sulfurique concentré sur la paroi du tube. L'apparition de la couleur verte bleuâtre dans la couche acidique indique la présence des cardénolides.

- **Test des stéroïdes et triterpènes :**

Peser 0,5 g de poudre végétale et extraire par 7ml d'éthanol, 3ml eau distillée. Après 24 heures, l'extrait est filtré et évaporé dans un rota vapeur rotatif, le résidu obtenu a été solubilisé dans 20ml de chloroforme, on obtient une solution. Ajouter à cette dernière 1 ml d'acide sulfurique concentré lentement sur la paroi du tube. L'apparition d'une couleur jaune qui devient rouge indique la présence des stéroïdes et triterpènes.

II.7 Caractérisation des extraits obtenus :

II.7.1 Spectroscopie d'absorption UV-Visible :

La spectroscopie UV-Visible est la plus ancienne et l'une des méthodes d'analyse les plus utilisées dans les laboratoires. Elle est principalement employée pour les analyses quantitatives grâce à l'application de la loi de Beer-Lambert. Cependant, elle fournit relativement peu d'informations structurales (analyse qualitative) par rapport à d'autres techniques spectroscopiques telles que l'IR, la RMN ou la spectrométrie de masse (SM).

Son principe repose sur les transitions électroniques au sein des molécules, qui mettent en jeu des énergies élevées (entre 160 et 665 KJ.mol^{-1}), Comparables à celles des liaisons chimiques. L'absorption de photons provoque le passage d'électrons des orbitales moléculaires de l'état fondamental (électrons de liaisons σ et π, ainsi que les électrons non liants n) vers des orbitales anti-liantes excitées (σ* et π*). Chaque transition est caractérisée par une longueur d'onde maximale (λ max) et un coefficient d'absorption molaire maximal (ε max) à cette longueur d'onde.

Le domaine spectral de la spectroscopie UV-Visible couvre la région de l'ultraviolet (environ 10 à 400 nm) et du visible (400 à 800 nm) [21].



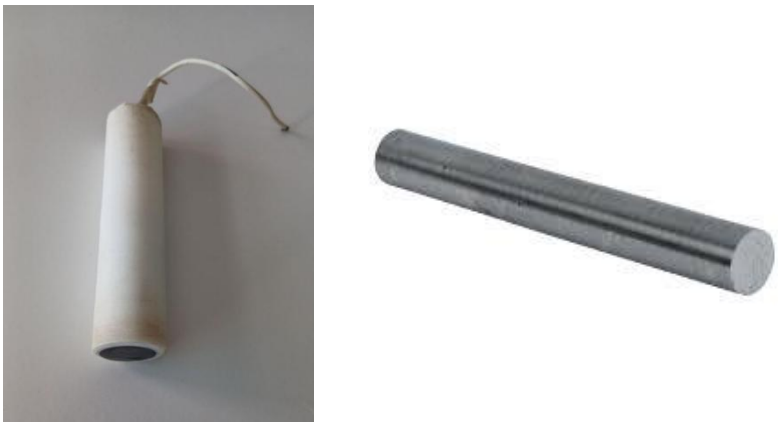
FigureII.4 : spectrophotomètre UV-VIS 1900i

II.8 Matériau étudié :

Dans cette recherche, l'objet d'étude est l'acier au carbone XC48, distribué sous forme de barres cylindriques laminées avec un diamètre de 14,5 mm et une surface visible de 1,767 cm². Le XC48, qui appartient à la catégorie des aciers de teneur intermédiaire en carbone, est couramment employé dans l'ingénierie mécanique générale. Il possède d'excellentes caractéristiques d'usinage et est susceptible de subir différents traitements thermiques. Comparé aux aciers doux, sa résistance mécanique est supérieure, mais cela se fait au détriment de sa ductilité qui est relativement moins prononcée.

II.8.1Préparation de l'électrode de travail :

Pour garantir des résultats précis et réplicables, l'électrode de travail a été minutieusement préparée en utilisant le même type d'acier (XC48). Afin de réduire l'exposition à l'électrolyte, seule la face active de l'électrode a été laissée découverte, le reste du cylindre étant intégralement protégé par un support en téflon. Cette isolation garantit une surface de contact stable et prévient les perturbations causées par l'intrusion de solutions corrosives.



FigureII.5:Électrode de travail et acier XC48.

Le tableau suivant, présente la composition chimique en pourcentage (%).

Tableau II. 4: Composition chimique de l'acier au carbone XC48 [22] **.**

Elément	**C**	**S**	**Mn**	**P**	**Si**
Pourcentage(%)	0,42-0,50	≤0,035	0,50-0,80	≤0,035	0,40 maxi

Le Tableau II.5 Ci-après présente les propriétés mécaniques moyennes (sous condition normalisée) de l'acier XC48 :

Tableau II. 5: Les caractéristiques mécaniques moyennes (état normalisé) de l'acier XC48 [22]**.**

Propriétés	**Rm (N/mm^2)**	**Re(N/mm^2)**	**A%**	**Hb**
Valeur	560-620	275-340	14-16 %	≤190 HB

II.8.5 Dispositif expérimental :

- **Matériel utilisé :**

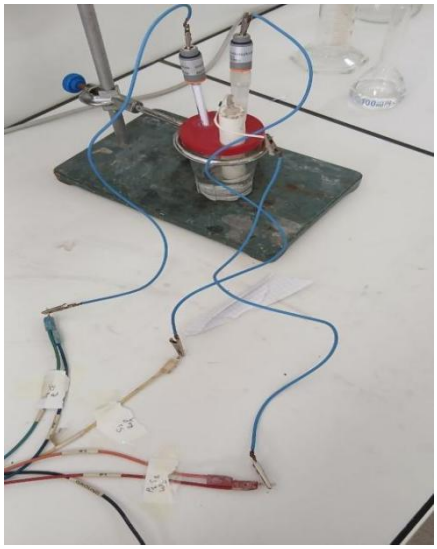
Les mesures électrochimiques ont été réalisées à l'aide d'un potentiostat /galvanostat SP300 piloté par le logiciel EC-Lab , qui assure le contrôle des expériences, l'acquisition des données ainsi que leur traitement.



FigureII.6: Potentiostat /Galvanostat Biologic SP300.

- **Cellule électrochimique :**

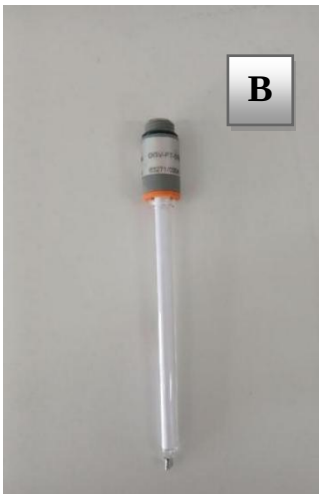
Les essais électrochimiques ont été réalisés dans une cellule conventionnelle à trois électrodes renfermant 50 mL d'une solution corrosive constituée d'acide sulfurique (H_2SO_4 0,5 M), employée seule ou additionnée d'extraits inhibiteurs (aqueux ou méthanolique) de Juglans regia



FigureII. 7: Cellule électrochimique à trois électrodes.

- ✓ **Électrode de travail (ET)**: Acier XC48, disque à surface active de 1,767 cm^2.
- ✓ **Électrode de référence (ER) :** Électrode $Hg/HgSO_4$ (mercure/sulfate de mercure), caractérisée par un potentiel stable et reproductible. Elle est généralement utilisée dans les milieux acides et permet d'obtenir des mesures fiables et précises.(Figure II.8)
- ✓ **Contre-électrode (CE) :**L'électrode en platine ferme le circuit et permet le passage du courant dans la cellule électrochimique. (Figure II.9).





FigureII.8.A : Électrode de référence (ER). **FigureII. 9. B :** Contre-électrode (CE).

II. 8.6 Conditions expérimentales:

Préalablement à chaque mesure, l'électrode de travail est immergée dans la solution à étudier pendant 30 minutes, en circuit ouvert, à une température thermostatique de 25 ± 1 °C, de manière à atteindre un état d'équilibre stable.

Les courbes de polarisation potentiodynamique sont générées en faisant varier le potentiel de E_{oc} -150 mV à E_{co} + 150 Mv à un rythme stable de 0,15 mV/s.

Les mesures d'impédance électrochimique (EIS) sont réalisées autour du potentiel d'équilibre (E_{oc}), sur une plage de frequences de 100 kHz à 10 mHz, à l'aide d'un signal sinusoïdal ayant une amplitude de 10 mV.

Chapitre III :

Résultats et discussions

Dans cette section, nous présentons et analysons les résultats obtenus lors de l'évaluation de l'efficacité inhibitrice de deux extraits naturels du Noyer (Juglans regia) sur la corrosion de l'acier XC48 en milieu acide (H_2SO_4 0,5 M). L'objectif est de comparer les performances des deux extraits, aqueux et méthanol, et de mettre en relation leur composition chimique avec leur comportement inhibiteur. Les résultats sont discutés en détail afin d'identifier les paramètres influents et de comprendre le mode d'action des inhibiteurs testés.

III.1 Rendements d'extractions :

Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus :

Tableau III.1 : Rendements d'extraction des feuilles de Juglans regia .selon le type d'extrait.

Extrait	**E_{aqueux}**	**$E_{méthanolique}$**
Masse d'extrait (g)	3,6454	4,8738
Rendement %	7,27	9.62

L'extrait méthanolique présente le meilleur rendement avec une valeur de 9,62 %, contre 7,27 % pour l'extrait aqueux. Ces résultats indiquent que le taux d'extraction dépend fortement de la nature du solvant et de la méthode employée. On peut ainsi conclure que le méthanol constitue un solvant plus efficace que l'eau dans le cas des feuilles de Juglans regia.

III.2 Taux d'humidité :

Le taux d'humidité correspond à la proportion d'eau présente dans le matériel végétal. Il est évalué à partir de la perte de masse observée après séchage à température constante (105°c). Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau III.2: Représente taux d'humidité du matériel végétal.

Masse initial (g)	**Masse finale (g)**	**Taux d'humidité (%)**
33,593	31,12	7,361 %

Le taux d'humidité obtenu pour les feuilles de Juglans regia est de 7,36 %, ce qui indique une faible teneur en eau du matériel végétal après séchage. Cette valeur reflète un bon état de déshydratation des feuilles, favorisant leur conservation et limitant les risques de dégradation

enzymatique ou de prolifération microbienne. Une faible humidité contribue également à la stabilité des composés bioactifs et améliore l'efficacité du processus d'extraction en concentrant davantage les substances actives présentes dans la plante.

III .3 Teste phytochimiques :

Les résultats du screening phytochimique réalisé sur les extraits aqueux et méthanolique de Juglans regia sont présentés dans le tableau ci-dessous (Tableau III.8). Ce criblage a été effectué à partir de la poudre végétale, dans le but de détecter la présence des principales familles de métabolites secondaires.

Tableau III.3 : Résultats du screening phytochimique.

Métabolites secondaires	**Résultat de présence**
Les saponosides	+++
Les flavonoïdes	++
Les cardinolides	-
Les tanins	++
Les stéroïdes et triterpènes	-

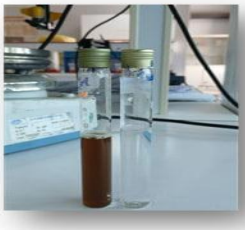
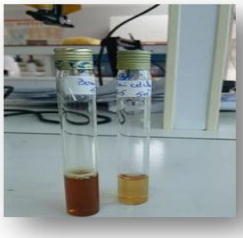
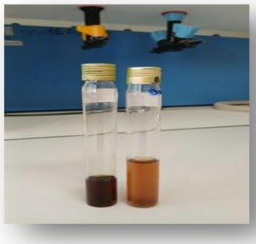
(+++) : Réaction très positive.

(++) : Réaction moyennement positive.

(-): Réaction négative.

L'analyse phytochimique révèle que Juglans regia .est particulièrement riche en saponosides, avec une teneur modérée en flavonoïdes et en tanins. En revanche, aucune trace de cardinolides, stéroïdes ou triterpènes n'a été détectée. Ces résultats mettent en évidence une composition biochimique favorable à une activité inhibitrice de corrosion, principalement grâce à la présence de surfactants naturels (saponosides), connus pour leur capacité à interagir efficacement avec les surfaces métalliques. Les images des réactions de caractérisation sont présentées dans le tableau suivant (Tableau III.4).

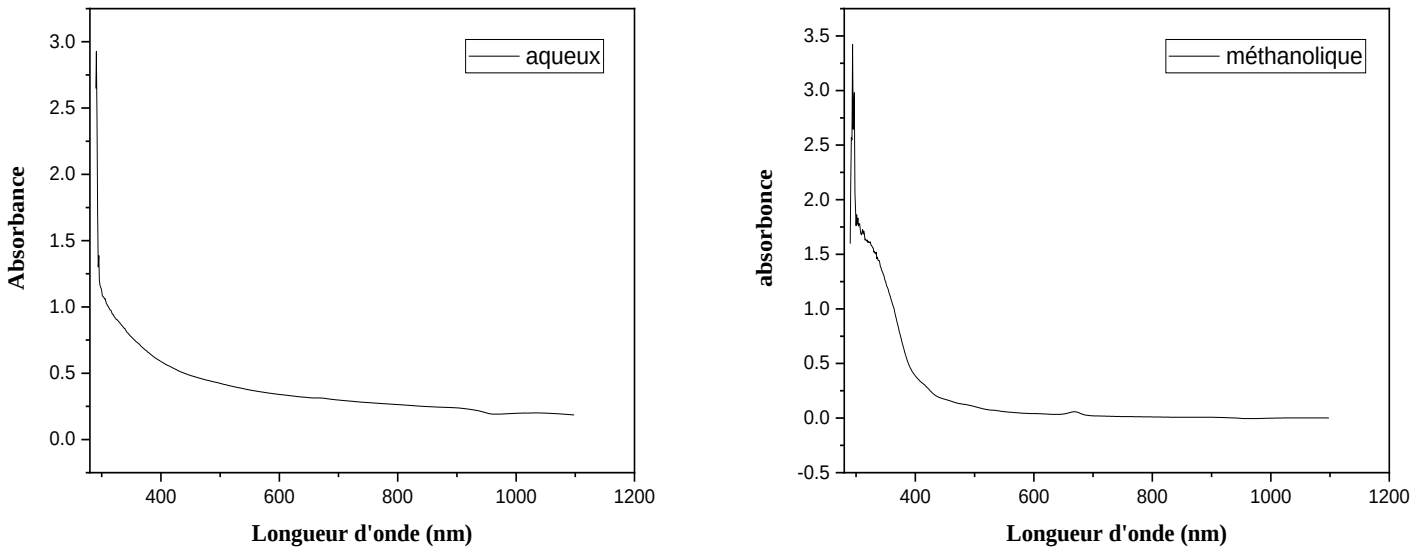
Tableau III.4: Résultats visuels des réactions de caractérisation phytochimique.

Famille de métabolites	Observation visuelle	Image
Les saponosides	L'apparition d'une mousse persistante après agitation avec de l'eau distillée chauffée confirme la présence de ces composés dans la plante.	
Les flavonoïdes	La coloration jaune observée après l'ajout de KOH à 4 % indique une présence modérée de flavonoïdes.	
Les cardinolides	L'absence de coloration vert bleuâtre après réaction avec H_2SO_4 concentré, $FeCl_3$ et acide acétique indique l'absence de ces composés.	
Les tanins	L'apparition d'une coloration vert foncé après l'ajout de chlorure de fer ($FeCl_3$) indique la présence de tanins	
Les stéroïdes et triterpènes	Aucune coloration verte n'a été observée après l'ajout de H_2SO_4 concentré sur l'extrait dans le chloroforme, ce qui indique leur absence.	

III .4 Analyse spectroscopiques par UV-VIS :

- **Etude comparative des extraits méthanoïques et aqueux :**

Les courbes de la spectroscopie UV-Visible ont été obtenues à l'aide d'un spectrophotomètre, à une concentration de 0,1 g/L dans des milieux H_2SO_4 et aqueux, comme illustré dans la figure ci- dessus



FigureIII.1 : Spectres UV-Visible des extraits méthanolique et aqueux dans l'eau

Les deux spectres (méthanoïque et aqueux) présentent une pointe d'absorption très aiguë dans la région de l'ultraviolet courte inférieure à 300 nm. On observe aussi un épaulement entre 300 et 400 nm caractéristiques des flavonoïdes plus marqué dans l'extrait méthanolique en comparaison avec l'extrait aqueux [24].

Nous concluons que le méthanol est un solvant plus efficace que l'eau pour extraire les différentes molécules de cette plante, ce qui donne un extrait plus concentré en principes actifs.

- **Stabilité des extraits dans un milieu acide (H_2SO_4)**

Afin d'évaluer la stabilité des extraits dans un environnement acide, ceux-ci ont été analysés dans un milieu contenant de l'acide sulfurique à 0,5 M. Cette étape est essentielle avant leur utilisation potentielle comme inhibiteurs de corrosion, car elle permet de vérifier si les composés actifs restent résistants dans des conditions agressives.

Les spectres UV-Visible des extraits en milieu acide (figure ci-dessus) montrent peu de variations par rapport aux spectres obtenus en milieu neutre. Les courbes conservent la même allure générale, avec une absorption intense en dessous de 400 nm suivie d'un plateau dans la région visible et proche infrarouge, sans apparition ni disparition de bandes d'absorption significatives.

Cette stabilité spectrale suggère que les composés présents dans les extraits de Juglans regia, tels que les flavonoïdes et les composés phénoliques, ne se dégradent pas en milieu acide. Ceci confirme leur résistance chimique et leur aptitude à être utilisés dans des applications liées à la protection contre la corrosion.

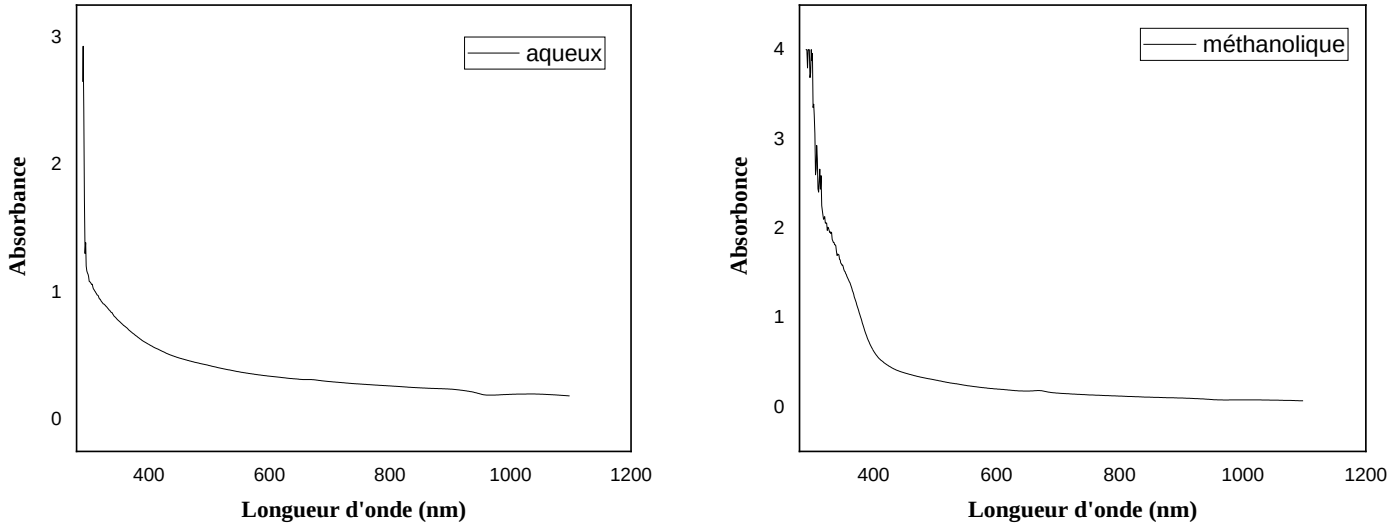


Figure III.2 : Spectres UV-Visible des extraits méthanolique et aqueux en présence de H_2SO_4 (0,5 M).

III.5 Études de la corrosion :

III.5. 1 Suivi du potentiel en circuit ouvert (PCO) :

Le potentiel libre de corrosin (E_{corr}) de l'acier XC48 a été suivi en circuit ouvert pendant 1800 secondes dans une solution de H_2SO_4 (0,5 M), en l'absence et en présence de différentes concentrations des extraits aqueux et méthanolique des feuilles de Juglans regia L. Les concentrations utilisées sont comprises entre 0,1 et 1,2 g/L pour l'extrait aqueux et entre 0,1 et 0,6 g/L pour l'extrait méthanolique. Les courbes d'évolution du potentiel en fonction du temps sont représentées dans la Figure III.4.

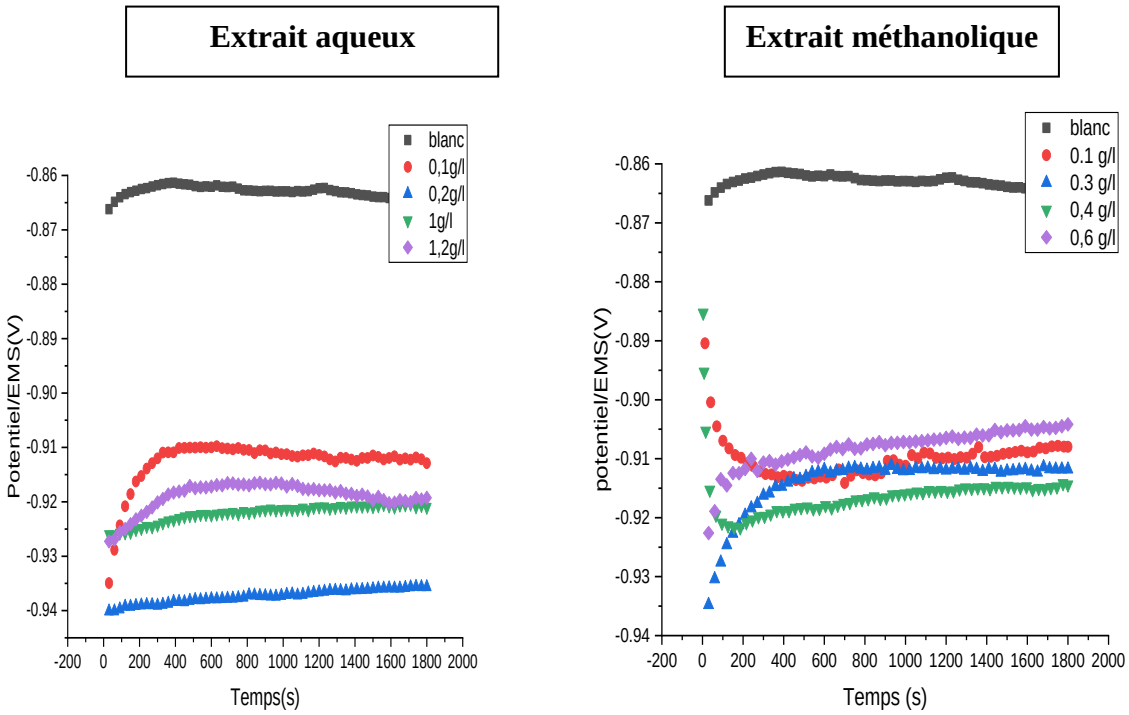


Figure III.3 : Variation de potentiel libre de l'acier XC48 dans une solution acide Sulfurique 0,5 M avec différentes concentrations d'extrait de Juglans regia. En Fonction du temps d'immersion.

D'après les courbes du potentiel à circuit ouvert (P.C.O), on observe que l'ajout des extraits aqueux et méthanolique provoque un déplacement du potentiel de corrosion vers des valeurs légèrement plus négatives par rapport au blanc. Cependant, ce déplacement reste faible et ne dépasse pas généralement ±85 mV.

Les courbes montrent également une évolution progressive du potentiel avec le temps jusqu'à atteindre un état quasi stable après quelques centaines de secondes d'immersion. Cette stabilisation traduit la formation d'un film protecteur adsorbé à la surface de l'acier XC48, limitant les échanges électrochimiques entre le métal et le milieu corrosif.

Pour l'extrait aqueux, les courbes présentent une stabilisation relativement régulière avec une légère amélioration de la protection lorsque la concentration augmente, ce qui suggère une adsorption progressive des composés actifs présents dans l'extrait.

Concernant l'extrait méthanolique, les variations du potentiel apparaissent plus marquées au début de l'immersion avant d'atteindre un plateau stable. Ce comportement peut être attribué à une adsorption plus rapide des composés organiques extraits par le méthanol, favorisant la formation d'une couche protectrice plus compacte sur la surface métallique.

Globalement, les résultats du suivi du potentiel libre confirment que les extraits étudiés réduisent

l'activité corrosive du milieu acide par adsorption des molécules bioactives sur l'acier XC48, ralentissant ainsi le phénomène de corrosion.

III.5.2 courbe de polarisation :

Les courbes de polarisation cathodique et anodique relatives à l'acier XC48 dans un milieu acide sulfurique 0,5 M, en l'absence et en présence de différentes concentrations d'extraits de Juglans regia , sont présentées dans la Figure III.5 ci-après.

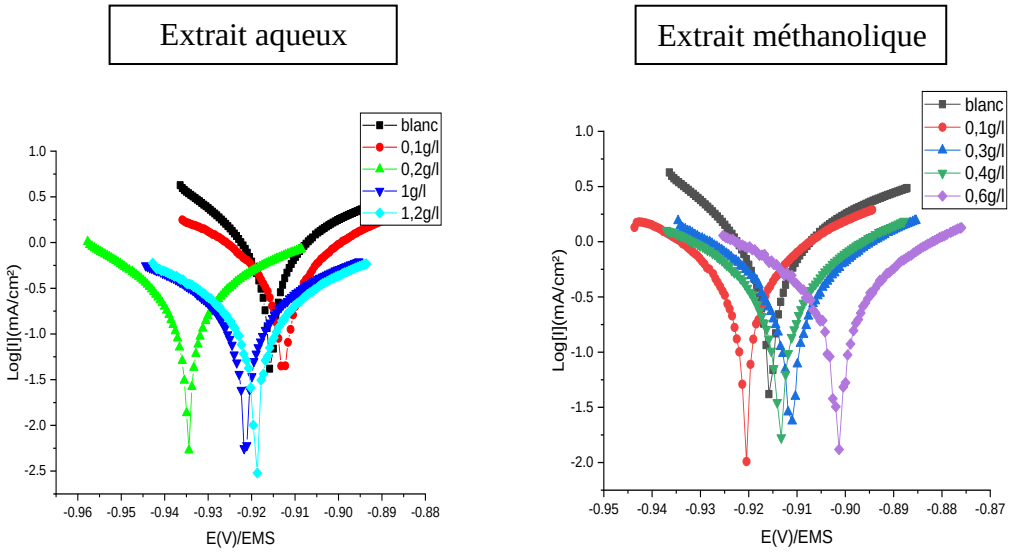


Figure III.4: Les courbes de Tafel de l'acier XC48 dans H2SO4 (0,5 M) sans et avec Addition de différentes concentrations des extraits de Juglans regia.

Les paramètres électrochimiques regroupés dans le Tableau III.5, à savoir la densité de courant de corrosion (I_{corr}), le potentiel de corrosion(E_{corr}), les pentes de Tafel cathodique (βc), et anodique (βa), ainsi que l'efficacité inhibitrice de corrosion(E%) ont été calculés à partir des courbes de polarisation.

L'efficacité inhibitrice est définie par l'équation:

$$EI\% = \frac{I°_{corr} - I_{corr}}{I°_{corr}} * 100$$

Et où ($I°_{corr}$) et (I_{corr}) correspondent respectivement à la densité de courant de corrosion en l'absence et en présence de l'inhibiteur aux différentes concentrations. Ces densités de courant ont été obtenues par extrapolation des branches cathodique et anodique des droites de Tafel au potentiel de corrosion.

TableauIII.5 : Paramètres électrochimiques de la corrosion de l'acier XC48 dans une solution H_2SO_4 0,5 M sans et avec différentes concentrations en inhibiteur.

Concentration (g/l)	**E_{corr} (mV/ECS)**	**I_{corr} (µA/cm)**	**βa (mV/dec)**	**βc (mV/dec)**	**EI%**
Blanc	-916,051	638	36,6	24,6	/
Extrait aqueux					
0,1	-912,523	584	33,4	33,6	8,43
0,2	-934,313	226	25,2	24	58.30
1	-921,442	171	36	34,8	73,19
1,2	-918,623	154	35,3	37	75,72
Extrait méthanol					
0,1	-920,204	536	39	42,5	16,06
0,3	-912,5223	422	32,3	32,3	33,79
0,4	-934,313	388	27,5	29,1	39,12
0,6	-921,442	353	25,5	29,5	44,60

L'observation du tableau ci-dessus met en évidence qu'après l'ajout des extraits méthanolique et aqueux de Juglans regia, la densité du courant de corrosion (I_{corr}) diminue de manière significative par rapport au blanc, ce qui témoigne de l'effet inhibiteur de corrosion exercé par ces extraits.

Pour l'extrait méthanolique, l'efficacité inhibitrice augmente progressivement avec la concentration pour atteindre une valeur maximale de 44,61 % à la concentration de 0,6 g/L. Quant à l'extrait aqueux, il présente une meilleure performance globale, avec une efficacité inhibitrice atteignant une valeur maximale de 75,72 % à la concentration de 1,2 g/L.

Cette différence d'efficacité entre les deux solvants peut s'expliquer par une meilleure extraction des composés actifs (principalement des polyphénols, flavonoïdes et tanins) dans l'eau par rapport au méthanol dans le cas de Juglans regia. L'adsorption de ces molécules riches en hétéroatomes (oxygène et oxygène principalement) sur la surface de l'acier forme un film

protecteur qui limite l'accès des espèces corrosives (H^+ et SO_4^{2-}).

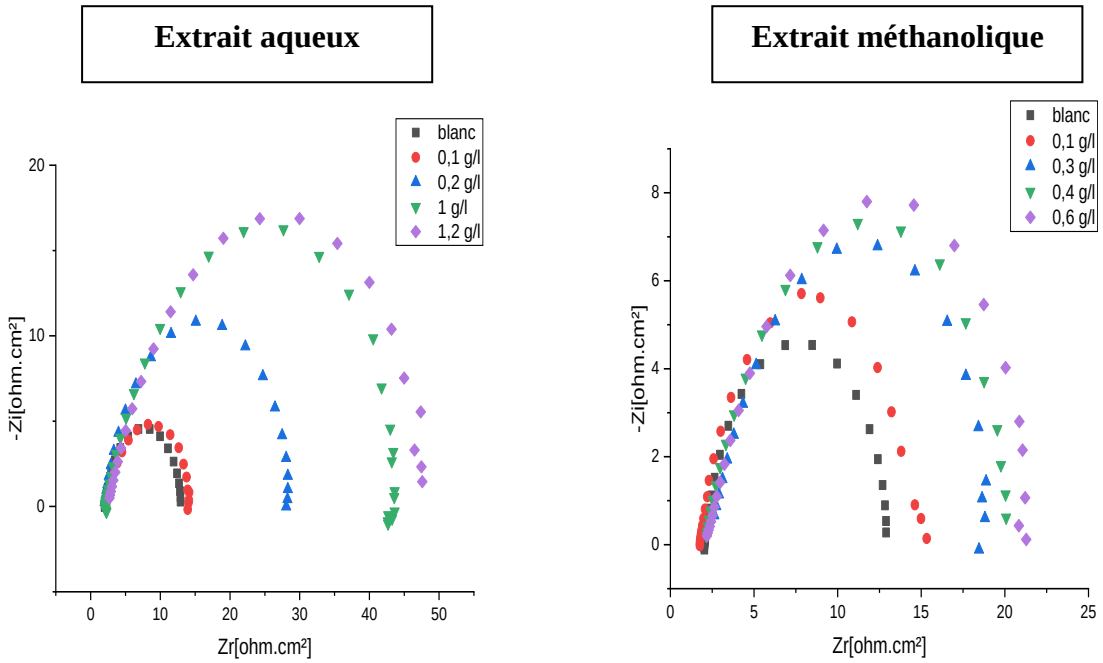
On note également que les pentes de Tafel (βa et βc) varient après l'introduction des extraits, indiquant une modification des mécanismes anodiques et cathodiques. L'analyse des déplacements des potentiels de corrosion (E_{corr}) suggère que l'extrait aqueux agit principalement comme un inhibiteur mixte avec une prédominance cathodique, tandis que l'extrait méthanolique présente un comportement mixte plus équilibré.

III.5.3 Spectroscopie d'impédance électrochimique :

Les essais d'impédance électrochimique (SIE) ont été effectués sur une échelle de fréquences qui s'étend de 100 kHz à 10 mHz, en mode circuit ouvert, en utilisant un signal sinusoïdal de 10 mV d'amplitude et le programme EC-Lab. Les concentrations d'inhibiteurs utilisées sont les mêmes que celles utilisées pour les courbes de polarisation. Sur les diagrammes de Nyquist, le diamètre du demi-cercle observé est lié à la résistance au transfert de charge (Rtc). Cette mesure a été utilisée pour déterminer l'efficacité anticorrosion de l'acier XC48, en fonction de la formule suivante:

$$E\% = \frac{Rtc - Rtc^{\circ}}{Rtc} \times 100$$

L'étude des graphiques d'impédance obtenus au potentiel de corrosion (aussi nommé potentiel d'abandon) pour diverses concentrations d'inhibiteurs a été menée afin d'approfondir notre compréhension des processus de corrosion et d'inhibition de l'acier XC48 dans un milieu acide contenant 0,5 M de H_2SO_4. Les courbes de Nyquist illustrées révèlent un changement notable en relation avec la concentration d'inhibiteur représentée sur la figureIII.6.



FigureIII.4 : Diagramme de Nyquist de l'acier XC48 pour différentes concentrations

Des extraits en milieu H_2SO_4 (0 .5 M).

Les diagrammes de Nyquist des extraits méthanolique et aqueux présentent une seule boucle capacitive, indiquant que le processus de corrosion est contrôlé principalement par le transfert de charge. L'augmentation du diamètre des demi-cercles avec la concentration traduit une amélioration de la résistance au transfert de charge et donc une meilleure protection de l'acier en milieu acide.

Pour l'extrait méthanolique, cette augmentation devient plus marquée aux concentrations de 0,4 g/L et 0,6 g/L, tandis que l'extrait aqueux montre des demi-cercles plus larges, surtout à 1 g/L et 1,2 g/L, révélant une efficacité inhibitrice plus importante. Ces résultats confirment l'activité anticorrosion des deux extraits, avec une meilleure performance de l'extrait aqueux aux fortes concentrations.

TableauIII.6 : Paramètres d'impédance et efficacité inhibitrices de la corrosion de l'acier XC48 à obtenus à différentes concentration d'inhibiteurs en milieu H_2SO_4 0,5 M.

Concentration (g / l)	**R_s (Ω.cm²)**	**R_{tc} (Ω.cm²)**	**C_{dl} (µF/cm²)**	**EI %**
Blanc	2,071	11,02	1808	/
Extrait Aqueux				
0,1	2,34	11,94	1669	7,7
0,2	2,14	26,57	506	58,5
1	2,59	41,81	706,1	73,66
1,2	2,93	45,89	643,6	75,98
Extrait Méthanolique				
0,1	1,817	13,17	1021	16,32%
0,3	2,64	16,98	1173	35,1%
0,4	2,274	18,24	737	39,58%
0,6	2,365	19,82	1491	44,39%

On n'observe que l'efficacité inhibitrice (EI %) augmente de manière significative avec l'augmentation de la concentration des extraits testés. Pour l'extrait aqueux, l'EI passe de 7,7 % à 75,98 % lorsque la concentration augmente de 0,1 g/L à 1,2 g/L, montrant une performance très élevée à forte concentration. Quant à l'extrait méthanolique, l'efficacité inhibitrice est plus modérée, passant de 16,32 % à 44,39 % dans la plage de concentrations étudiée (0,1 à 0,6 g/L). Ces résultats indiquent clairement que les deux extraits possèdent une activité inhibitrice contre la corrosion de l'acier XC48 dans le milieu H_2SO_4 0,5 M, avec une performance nettement supérieure de l'extrait aqueux, particulièrement aux concentrations élevées.

En parallèle, la résistance de transfert de charge (Rtc) augmente avec la concentration en inhibiteur pour les deux extraits. Cette augmentation est particulièrement marquée dans le cas de l'extrait aqueux (de 11,94 à 45,89 Ω.cm²), confirmant l'amélioration de la protection offerte par l'adsorption des molécules inhibitrices à la surface du métal. Une résistance de transfert de

charge plus élevée traduit en effet la formation d'une barrière plus efficace contre le processus corrosif.

En outre, on remarque une diminution globale des valeurs de la capacité de double couche (Cdl) avec l'augmentation de la concentration, surtout visible pour l'extrait aqueux (diminution de 1808 µF/cm² pour le blanc jusqu'à 506 µF/cm² à 0,2 g/L). Cette diminution est généralement attribuée à l'adsorption des molécules inhibitrices à la surface du métal, entraînant un remplacement des molécules d'eau et une réduction de la permittivité locale et/ou de l'épaisseur de la couche double.

Enfin, les résultats obtenus par la méthode d'impédance électrochimique (EIS) sont cohérents et confirment l'efficacité inhibitrice des extraits végétaux testés. Ils soulignent particulièrement le potentiel de l'extrait aqueux comme inhibiteur de corrosion écologique et performant dans le milieu acide sulfurique.

Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives :

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer l'efficacité inhibitrice d'un extrait naturel de feuilles de Juglans regia sur la corrosion de l'acier XC48 dans un milieu acide H_2SO_4 (0,5 M). Afin d'atteindre cet objectif, une méthode d'extraction adaptée a été mise en œuvre, suivie d'une caractérisation de l'extrait à l'aide de tests phytochimiques, UV-Vis et de différentes techniques électrochimiques (P.C.O, Tafel, EIS).

Les résultats obtenus ont permis de dégager plusieurs conclusions importantes :

- Le criblage phytochimique a mis en évidence une richesse de saponosides et tanins, ainsi qu'une présence modérée de flavonoïdes, tandis que les autres métabolites secondaires étaient absents.
- Les analyses électrochimiques ont montré une diminution notable du courant de corrosion après l'ajout de l'extrait, traduisant ainsi son effet inhibiteur important. Une efficacité inhibitrice maximale a été atteinte à une concentration optimale.
- Les faibles variations du potentiel de corrosion observées à partir des courbes P.C.O et Tafel indiquent que l'extrait de Juglans regia agit comme un inhibiteur mixte, influençant simultanément les réactions anodiques et cathodiques.

L'ensemble de ces résultats confirme l'intérêt des extraits de Juglans regia comme inhibiteurs naturels de corrosion, présentant des avantages considérables tels que leur caractère biodégradable, leur faible toxicité et leur respect de l'environnement. Leur aptitude à former une couche protectrice stable à la surface métallique met en évidence leur potentiel prometteur pour des applications industrielles, particulièrement dans des milieux acides agressifs.

Perspectives :

Dans la continuité de cette étude, plusieurs perspectives peuvent être envisagées, notamment l'identification précise des composés actifs responsables de l'effet inhibiteur, l'étude du mécanisme d'adsorption sur la surface métallique ainsi que l'évaluation de l'efficacité de ces extraits dans différents milieux corrosifs et sous diverses conditions opératoires afin d'élargir leur champ d'application industrielle.

Références Bibliographiques

Référence:

[1] Nacer HECHICHE, “Inhibition de la corrosion de l’aluminium pur et de ses alliages. Approche expérimentale : étude du comportement électrochimique en milieu acide et chloruré en présence d’un inhibiteur vert,” THÈSE DE DOCTORAT 3 ème CYCLE LMD, UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU, 2022.

[2] WAHIBA HARZALLAH, “Préparation et Caractérisation de Dépôts Composites Electrodéposés en Présence d’Inhibiteurs Organiques,” diplôme de Magister PHYSIQUE, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER, BISKRA, 2006.

[3] OULABBAS Amel, “Effets des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers ordinaires dans deux milieux acides.,” diplôme de Doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2019.

[4] Arthur-Walid Hassanein, “Les principaux types de corrosion - Espace Ingénierie.” Accessed: May 04, 2026. [Online]. Available: https://www.hilti.fr/engineering/article/lesprincipaux-types-de-corrosion/pzvjbp.

[5] Admin, “Factors Affecting Corrosion And How To Calculate The Corrosion Rate Precision Pipeline Equipment Manufacturer,” Emt Pipe Cleaning Pig. Accessed: May 30, 2026. [Online]. Available: https://emt-pipe.com/factors-affecting-corrosion-and-how-to-calculate-thecorrosion-rate/ [6]

“What are the environmental impacts of metal corrosion? | TutorChase.” Accessed: May 04, 2026. [Online]. Available: https://www.tutorchase.com/answers/igcse/chemistry/what-arethe-environmental-impacts-of-metal-corrosion

[7] Jean Lédion and Pierre Blériot, “Inhibiteurs de corrosion dans le traitement des circuits d’eau,” Techniques de l’Ingénieur, Oct. 2023.

[8] Mina BOULKROUNE, “INHIBITION DE LA CORROSION DU ZINC EN MILIEU ACIDE,” diplôme de DOCTORAT EN SCIENCES EN CHIMIE, UNIVERSITE DE CONSTANTINE 1, CONSTANTINE, 2014.

[9] Imane BOUALI, “Étude d’inhibiteurs de corrosion métallique à base d’orthophosphates de zirconium lamellaires fonctionnalisés : synthèse, caractérisations et applications,” thesis de Docteur, l’université de Lorraine, Nancy, 2018. 51

[10] MEZHOUD BILEL, “SYNTHESE DES INHIBITEURS CONTRE LA CORROSION DES ACIERS,” DIPLOME DE MAGISTER, UNIVERSITE MENTOURI, CONSTANTINE, 2011.

[11] HAMANI HANANE, “Synthèse, caractérisation et étude du pouvoir inhibiteur de nouvelles molécules bases de Schiff.,” diplôme de DOCTORAT EN SCIENCES, FERHAT ABBAS, SETIF-1, 2015.

[12] BOULMERKA Rihane, “Etude de la corrosion des instruments chirurgicaux dentaires lors de la stérilisation,” le diplôme de Doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba.

[13] “Les différentes utilisations des feuilles de noyer - Gamm vert.” Accessed: May 05, 2026. [Online]. Available: https://www.gammvert.fr/conseils-idees/garder-les-feuilles-de-noyer-aupotager

[14] “Noyer - feuille,” Herbonata. Accessed: May 05, 2026. [Online]. Available: http://www.herbonata.fr/boutique/noyer-feuille-13523

[15] “Noyer commun,” Wikipédia. Apr. 26, 2026. Accessed: May 05, 2026. [Online]. Available: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Noyer_commun&oldid=235577711

[16] Kaddouri Ammaria, “Germain E. (1992). Le noyer. In: Amélioration des espèces végétales cultivées, objectifs et critères de sélection. Ed. A. Gallais et H. Bannerot, INRA Editions, Paris, pp 620-632.,” Diplôme de Master, BLIDA 1, BLIDA, 2013.

[17] “Feuilles de noyer: danger pour votre jardin ?” Accessed: May 05, 2026. [Online]. Available: https://www.equirider.fr/est-ce-que-les-feuilles-de-noyer-sont-toxiques/

[18] “Extraction Solide-Liquide : Méthodes et Mécanismes | PDF | La diffusion | Solvant.” Accessed: May 05, 2026. [Online]. Available: https://www.scribd.com/document/544604358/Chapitre-III

[19] NAIT TAHER Ryma and AMMAR Soumia Nadjla, “Etude comparative des méthodes d’extraction des substances bioactives des matrices végétales telle que la figue de barbarie,” Diplôme de Master, Mohamed El Bachir El Ibrahimi, B.B.A., 2019.

[20] Mr N.CHIBANE, “MODELISATION DU TRANSFERT DE MATIERE LORS DE L’EXTRACTION DES ESSENCES DES GRAINES DE CORIANDRE PAR L’ETHANOL,” diplôme d’ingénieur d’état en Génie chimique, École Nationale Polytechnique, El-Harrach, Alger., 2005. 52

[21] Dr. Soulef AZIZI, “Méthode d’analyses spectroscopiques et chromatographiques,” doctor, Université Larbi Ben M’Hidi, Oum El Bouaghi.

[22] Acier Détail Découpe, “Acier XC48 – Acier Détail Découpe.” Accessed: Jun. 17, 2026. [Online]. Available: https://www.acier-detail-decoupe.fr/blogs/blog-acier-et-metaux/acierxc48?srsltid=AfmBOoq1n028-16eP3nmHbbxrcVN4ujeFBX9bHEPUrXz36lvv8b3_hd-

[23] “Spectrométrie UV/Vis : Analyse et Applications | PDF | Spectroscopie ultraviolet-visible | Spectre électromagnétique,” Scribd. Accessed: May 08, 2026. [Online]. Available: https://fr.scribd.com/document/959082384/Chapitre-II-Spectrometrie-UV-Vis

[24] Q. Fardiyah, T. Ersam, Suyanta, A. Slamet, Suprapto, and F. Kurniawan, “New potential and characterization of Andrographis paniculata L. Ness plant extracts as photoprotective agent,” Arab J Chem, pp. 8888–8897, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.arabjc.2020.10.015.