



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ DE 20 AOÛT 1955 - SKIKDA

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE DES PROCÉDÉS

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de :

Master

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie chimique

Synthèse verte de nanoparticules Ag/CoO à partir de Cynara cardunculus : application à la photodégradation du vert de malachite et à l'inhibition de la corrosion d'un acier au carbone

Réalisé par :

- Bouznad Aya
- Bouleknafet Maroua

Soutenu le 04/07/2026, devant le jury suivant :

N°	Nom et Prénom	Grade	Établissement d'affiliation	Qualité
1	Bekouche Karima	MCB	Université de 20 août 1955 –Skikda	Encadreur
2	Zouied Daoiya	MCA	Université de 20 août 1955 –Skikda	Co-encadreur
3	Boultif Walid	MCB	Université de 20 août 1955 - Skikda	Examineur
4	Ahmed chekkat Fatiha	MCA	Université de 20 août 1955 –Skikda	Présidente
5	Hadnine Selma	MCB	Université de 20 août 1955 –Skikda	Examinatrice

Année universitaire 2025-2026.

Remerciement

Avant tout, nous louons Dieu, le Tout-Puissant, et nous Le remercions pour Ses innombrables bienfaits, ainsi que pour la santé, la patience, la détermination et la réussite qu'Il nous a accordées afin de mener à bien cet humble ouvrage ; sans Sa grâce et Sa générosité, cet effort n'aurait pas pu aboutir.

C'est avec une immense reconnaissance et une profonde gratitude que nous adressons nos sincères remerciements à notre directrice de mémoire, Mme Zouied Daouia, qui a éclairé notre chemin tout au long de ce travail grâce à ses connaissances et à ses précieux conseils, et qui a été un modèle de générosité, de patience et de soutien tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Nous adressons nos plus sincères remerciements et notre profonde gratitude aux membres du comité de discussion pour avoir bien voulu accepter de débattre de ce travail et pour leur aimable présence.

**Nous remercions nos enseignants du département génie des procédés
l'université 20 Août 1955 Skikda.**

Nous adressons nos sincères remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidés à mener à bien ce travail au sein du laboratoire de recherche, du laboratoire du département d'ingénierie des procédés et la halle technologique, pour leur soutien et les moyens mis à notre disposition.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre chère famille pour son soutien et ses encouragements constants tout au long de notre parcours universitaire, ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué à nous aider ou à nous soutenir, de près ou de loin, pour mener à bien ce travail.

Marwa et Aya



Louange à Dieu, avec amour et gratitude, du début à la fin

C'est avec tout mon amour que je dédie le fruit de ma réussite et de mon diplôme, ainsi que la récolte de ce que j'ai semé pendant de longues années au service du savoir, à :

À celui dont le nom est indissociable du mien, ce grand homme, à celui qui m'a appris que la vie est un combat et que ses armes sont le savoir et la connaissance, à mon premier soutien et mon pilier, à ma fierté et ma fierté, mon cher père



À la compagne de ma vie et l'amour de mon âme, à celle qui a inclus mon nom dans ses prières nuit et jour, qui a illuminé mon chemin d'amour et éclairé ma route de gentillesse et d'affection, et qui a été pour moi un nuage déversant amour et générosité

Ma chère mère



À ceux qui sont mon soutien et mon pilier inébranlable, qui ne vacillent pas quand le monde chancelle, à ceux qui m'ont inspiré la réussite, à ceux qui m'ont fortifié et ont été pour moi des sources dont je me suis abreuvé, à la fleur et à la quintessence de mes jours, à mes premiers soutiens

Djaber, Mohamed, Iman et Ikram

À mon âme sœur et la joie de mes jours, à celle qui a été mon soutien dans les moments de faiblesse et qui a partagé avec moi la fatigue et la joie tout au long du chemin Ma sœur que ma mère n'a pas mise au monde,

Marwa

À la petite de la famille, Sanad,

À celle qui remplit la maison de joie et d'innocence

À la femme de mon frère, Wassila,

Merci pour ta bonté et ton beau soutien qui ont eu un effet bénéfique sur ce parcours.

À toute ma famille qui a misé sur ma réussite, chacun à sa manière

Bouznad aya





Après un parcours universitaire de plusieurs années, ponctué de nombreuses difficultés, épreuves et fatigues, me voici aujourd'hui à l'aube de l'obtention de mon diplôme, levant fièrement ma toque. Je rends grâce à Dieu de m'avoir permis de mener à bien ce projet et de réaliser mon rêve... Je dédie mon diplôme :



À celui dont le front est baigné de sueur, à celui qui m'a appris que la vie est un combat et que ses armes sont la science et la connaissance, à mon premier soutien, mon pilier, ma force et mon refuge après Dieu, à celui qui a sacrifié ce qu'il avait de plus cher et de plus précieux, à ma fierté et ma fierté,

« Mon père ».

À celle qui a fait du paradis le sol sous ses pieds, qui m'a accueilli dans son cœur avant même de me tendre la main, et qui a allégé mes épreuves par ses prières, à cette femme extraordinaire qui a souhaité que ses yeux se réjouissent de me voir en ce jour, à la lumière de ma vie,

« Ma mère ».



À mon pilier inébranlable, à la sécurité de mes jours, à l'inspiration de ma réussite, à ceux qui m'ont fortifié et ont été pour moi des sources dont je me désaltère, à la prunelle de mes yeux :

« Mes frères Ayoub, Adam et Akram ».

À celle que j'ai considérée comme une sœur avant d'être une amie, à ma compagne de route et à celle qui m'a offert des moments inoubliables, au cœur qui m'a apporté son soutien dans les moments de fatigue et de joie, à la plus belle coïncidence de ma vie :

« Aya ».

À ceux qui me lient par l'amour avant le sang et par la chaleur avant les mots, à ce soutien indéfectible : « ma grande famille ».

Bouleknafet marwa



LISTE DES FIGURES

FIGURES	TITRE	PAGE
I.1.1	Les feuilles et les tiges	8
I.1.2	La fleur ouverte de <i>Cynara cardunculus</i>	8
I.1.3	Les fruits d'artichaut sauvage	8
I.1.4	Les tubercules de <i>Cynara cardunculus</i>	9
I.1.5	Principale répartition mondiale du cardon	9
I.1.6	Structure de l'acide ascorbique	12
I.1.7	Exemples de β -carotène et Zéaxanthine	13
I.1.8	Structure de la proline	13
I.1.9	Structure des polyphénols simples	15
I.1.10	Classification des composés phénoliques	15
I.1.11	Structure chimique de l'acide hydroxybenzoïque et l'acide hydroxycinnamique	16
I.1.12	Flavonoïdes de <i>Cynara</i>	16
I.2.1	Classification des nanoparticules basée sur les matériaux et la dimension.	19
I.2.2	Techniques de synthèse de nanoparticules	22
I.2.3	Représentation schématique de la biosynthèse végétale de nanoparticules métalliques	23
I.3.1.1	Corrosion localisée	28
I.3.1.2	Corrosion uniforme	28
I.3.1.3	Corrosion galvanique	28
I.3.1.4	Corrosion intergranulaire	29
I.3.1.5	Corrosion par piqûres	29
I.3.1.6	Corrosion par érosion	29
I.3.1.7	Corrosion caverneuse	30
I.3.1.8	Corrosion sous contrainte	30
I.3.1.9	Une cellule électrochimique	31

I.3.1.10	Techniques de protection contre la corrosion	31
I.3.2.1	Les eaux usées domestiques	35
I.3.2.2	Les eaux usées industrielles	36
I.3.2.3	Les eaux usées agricoles	36
I.3.2.4	Méthodes de traitement des eaux usées	37
II.1	Extraction des feuilles et des tiges de <i>Cynara cardunculus</i>	51
II.2	Extraction d'eau des feuilles et des tiges de <i>Cynara cardunculus</i> .	52
II.3	Étapes de préparation des nanoparticules Ag/Co	53
II.4	Dégradation de vert malachite (15 ppm) en présence de 0,2 g d'Ag/Co	55
II.5	Dégradation de vert malachite (15 ppm) en présence de 0,2 g d'Ag/Co et T = 30°C.	56
II.6	Préparation des échantillons.	57
II.7	Cellule électrochimique à trois électrodes [LAIGM] [Laboratoire d'analyse industrielle et de génie des matériaux, Université du 8 Mai 1945 Guelma, BP 401, Guelma 24000, Algérie]	58
II.8	Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel.	59
II.9.	Différents processus électrochimiques à l'interface métal/électrolyte	60
II.10.	Circuit de Randles d'une interface électrochimique simple (cas d'une réaction redox avec transfert de charge sans diffusion).	60
III.1	Spectres FTIR de l'extrait des feuilles de la plante <i>Cynara cardunculus</i> et de nanoparticules Ag/CoO (20/80).	63
III.2	Courbe d'étalonnage du vert de malachite au maximum d'absorbance.	65
III.3	La variation de concentration de vert de malachite en fonction du temps en présence des différentes masses d'Ag/CoO.	66

III.4	La variation de l'efficacité de dégradation du vert de malachite en fonction du temps en présence des différentes masses d'Ag/CoO.	67
III.5	Spectres UV-visible de la dégradation du vert de malachite (15 mg/l) à différents moments en présence de 0,2 g d'Ag/CoO.	68
III.6	La variation de concentration de vert malachite en fonction du temps en présence de différentes concentrations et de 0,2 g d'Ag/CoO	69
III.7	La variation de l'efficacité de dégradation du vert de malachite en fonction du temps en présence de différentes concentrations et de 0,2 g d'Ag/CoO.	70
III.8	Spectres UV-visible de la dégradation du vert malachite (9 mg/l) à différents moments en présence de 0,2 g d'Ag/CoO.	71
III.9	Spectres UV-visible de la dégradation du vert de malachite (24 mg/l) à différents moments en présence de 0,2 g d'Ag/CoO	71
III.10	Spectres UV-visible de la dégradation du vert malachite (30 mg/l) à différents moments en présence de 0,2 g d'Ag/CoO	72
III.11	La variation de concentration de vert malachite en fonction du temps en présence de 0,2 g d'Ag/CoO et de différentes températures.	73
III.12	La variation de l'efficacité de dégradation du vert de malachite en fonction du temps en présence de 0,2 g d'Ag/CoO à différentes températures.	73
III.13	Spectres UV-visible de la dégradation du vert de malachite (15 mg/l) à différents moments en présence de 0,2 g d'Ag/CoO et T = 30 °C.	75
III.14	Spectres UV-visible de la dégradation du vert malachite (15 mg/l) à différents moments en présence de 0,2 g d'Ag/CoO à T = 50 °C	75

III.15	Courbes de polarisation de l'acier 1020 dans HCl 1 M obtenues à 25°C sans et avec l'extrait de <i>Cynara cardunculus</i>	76
III.16	Diagrammes de Nyquist de l'acier 1020 dans HCl à 1 M pour différentes concentrations d'inhibiteur CC à 25°C.	77
III.17	Circuits équivalents	87
III. 18	Isothermes d'adsorption de Langmuir pour CC sur l'acier au carbone dans HCl 1 M à différentes concentrations	80

LISTE DES TABLEAUX

N°	Intitulé	Page
I.1.1	Classification botanique de la plante <i>Cynara cardunculus</i>	7
I.1.12	Revue bibliographique sur l'activité antioxydante de <i>Cynara cardunculus</i>	17
I.2.1	Exemples de champs d'application en fonction du type de nanoparticule	20
I.2.11	Revue bibliographique sur quelques applications des nanoparticules vertes	24
I.3.1.1	Principaux facteurs de corrosion	30
I.3.1.10.1	Revue bibliographique sur les inhibiteurs naturels de corrosion	33
II.1	Les appareils utilisés et les produits chimiques et le matériel de laboratoire	50
II.2	Composition chimique de l'acier C1020	56
III.1	Présente le rendement de dégradation du vert de malachite en fonction de la masse d'Ag/CoO utilisés.	67
III.2	Rendement de dégradation (R %) en fonction de la concentration de vert malachite avec une masse de 0,2 g d'Ag/CoO.	70
III.3	Rendement de dégradation (R %) en fonction de la température avec une concentration optimale de 15 ppm de vert malachite et une masse optimale de 0,2 g d'Ag/CoO.	74
III.4	Paramètres électrochimiques et efficacités inhibitrices de la corrosion de l'acier 1020 dans un milieu de HCl 1 M avec et sans inhibiteur CC à 25°C	76
III.5	Paramètres d'impédance électrochimique de l'acier au carbone 1020 dans HCl 3 % contenant différentes concentrations d'inhibiteur à 298 K.	79

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Référence.....	4
Chapitre I : Étude bibliographique de <i>Cynara cardunculus</i>, de la synthèse verte des nanoparticules et de leurs applications dans l'inhibition de la corrosion et le traitement des eaux usées.	
Introduction.....	6
I.1. Présentation de <i>Cynara cardunculus</i>	6
I.1.1. Définition.....	6
I.1.2. Noms communs.....	7
I.1.3. Classification.....	7
I.1.4. Description botanique.....	7
a. Les tiges et les feuilles	7
b. Les inflorescences	8
c. Le fruit	8
d. Les racines	9
I.1.5. Habitat naturel	9
I.1.6. Distribution géographique	9
I.1.7. Leur utilisation	10
I.1.7.1. Utilisation en médecine traditionnelle	10
I.1.7.2. Utilisation alimentaire.....	10
I.1.8. Données photochimiques	10
I.1.9. La toxicité.....	10
I.1.10. L'activité antioxydante.....	11
I.1.10.1. Les antioxydants	11
I.1.10.2. Mécanisme d'action des antioxydants.....	11
I.1.10.3 Type des antioxydants.....	11
a. Les antioxydants enzymatiques.....	11
b. Antioxydants non enzymatiques	12
I.1.11. Les composés actifs d'origine végétale	13
I.1.11.1. Les métabolites	13
I.1.11.2. Les métabolites secondaires.....	13
I.1.11.3. Origines et voie de synthèse des métabolites secondaires.....	14
I.1.11.4. Classification.....	14

I.1.11.4.1. Les polyphénols.....	14
a. Définition	14
b. Structure de base.....	14
c. Classification.....	15
I.1.12. Revue bibliographique sur l'activité antioxydante de <i>Cynara cardunculus</i>	17
I.2. Synthèse verte des nanoparticules.....	18
I.2.1 Définition d'une nanoparticule.....	18
I.2.2. Classification des nanoparticules.....	18
I.2.3. Propriétés des nanomatériaux.....	19
I.2.3.1. Propriétés physiques.....	19
I.2.3.2. Propriétés chimiques.....	20
I.2.4. Les domaines d'application des nanoparticules	20
I.2.5. La synthèse verte.....	20
I.2.5.1. Mécanisme de la synthèse des nanoparticules métalliques.....	21
I.2.6. Les nanoparticules de cobalt.....	21
I.2.7. Les nanoparticules d'argent.....	21
I.2.8. Les nanoparticules d'Ag/Co.....	22
I.2.9. Les méthodes de synthèse des nanoparticules.....	22
I.2.10. Synthèse des nanoparticules à partir des extraits des plantes.....	23
I.2.11. Revue bibliographique sur quelques applications des nanoparticules vertes.....	24
I.3. Applications des extraits des plantes et des nanoparticules biosynthétisées.....	27
I.3.1. Inhibition de la corrosion.....	27
I.3.1.1. Définition de la corrosion.....	27
I.3.1.2. Importance de l'étude de la corrosion	27
I.3.1.3. Morphologies de la corrosion.....	27
a. Corrosion localisée.....	27
b. Corrosion uniforme.....	28
c. Corrosion galvanique.....	28
d. Corrosion intergranulaire.....	28
e. La corrosion par piqûres.....	29
f. Corrosion par érosion.....	29
g. Corrosion caverneuse.....	29

h. Corrosion sous contrainte.....	30
I.3.1.4 Facteurs de la corrosion.....	30
I.3.1.5. Mécanisme de la corrosion	30
I.3.1.6. Protection contre la corrosion.....	31
I.3.1.7. Définition d'inhibiteurs de corrosion.....	32
I.3.1.8. Classification des inhibiteurs de corrosion	32
I.3.1.8.1 Les inhibiteurs de corrosion organiques	32
I.3.1.8.2. Inhibiteurs de corrosion inorganiques	32
I.3.1.9. Mécanismes d'action des inhibiteurs.....	32
I.3.1.10. Généralités sur les inhibiteurs verts.....	33
I.3.1.10.1. Revue bibliographique sur les inhibiteurs naturels de corrosion.....	33
I.3.2. Traitement des eaux usées.....	35
I.3.2.1. Définition des eaux usées.....	35
I.3.2.2. Origine des eaux usées.....	35
I.3.2.2.1. Les eaux usées domestiques.....	35
I.3.2.2.2. Les eaux usées industrielles.....	35
I.3.2.2.3. Les eaux pluviales.....	36
I.3.2.2.4. Les eaux usées agricoles.....	36
I.3.2.3. Caractéristiques des eaux usées.....	36
I.3.2.4. Traitement des eaux usées.....	36
I.3.2. 4.1 L'objectif du traitement des eaux usées.....	36
I.3.2.4.2. Méthodes et procédés des traitements des eaux usées.....	37
I.3.2.5. Pollution par les colorants.....	37
I.3.2.5.1 Généralités.....	37
I.3.2.5.2. Le colorant triphénylméthane	37
I.3.2.5.2.1. Le vert de malachite.....	38
I.3.2.6. Photodégradation.....	38
Conclusion	38
Référence chapitre I.....	40

Chapitre II : méthodes et matériel utilisés

II.1. Introduction.....	50
II. 2. Matériels et méthodes.....	50
II.3. Récolte manuelle et préparation des plantes.....	51
II.4. Préparation de l'extrait de plante.....	51

II.5. Préparation des NPs	52
II.6. Application des nanoparticules.....	53
II.7. Étude de l'inhibition de la corrosion.....	56
II.7.1. Étude électrochimique	56
II.7.1.1 Matière étudiée.....	56
II.7.1.2. Préparation des échantillons.....	57
II.7.1.3. Cellule, montage et électrolyte.....	58
II.7.1.4. Techniques électrochimiques.....	59
II.7.1.4.1. Courbes de polarisation.....	59
II.7.1.4.1.1. Principe de la méthode.....	59
II.7.1.4.1.2. Représentation de Tafel	59
II.7.1.4.2. La spectroscopie d'impédance électrochimique.....	59
II.7.1.4.2.1. Utilisation de schémas électriques équivalents.....	60
II.8. Conclusion.....	60
Références chapitre II.....	62

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1 Introduction.....	63
III.2. Analyse FTIR de l'extrait des feuilles de la plante <i>Cynara cardunculus</i> et de nanoparticules Ag/CoO (20/80)	63
III.3. La synthèse verte des nanoparticules d'Ag/CoO.....	64
III.4. Étude de photodégradation.....	65
III.4.1 Établissement de la courbe d'étalonnage du vert de malachite.....	65
III.4.2 Rendement de l'activité.....	65
III.4.3. L'efficacité de dégradation de vert de malachite en présence d'Ag/CoO (20/80) à différentes masses.....	65
III.4.4. L'efficacité de dégradation du vert malachite en présence d'Ag/CoO (20/80) à différentes concentrations.....	68
III.4.5. L'efficacité de dégradation du vert de malachite en présence d'Ag/CoO à différentes températures.....	72
III.5. Évaluation de l'effet des extraits des feuilles de la plante <i>Cynara cardunculus</i> comme inhibiteur de la corrosion de l'acier C1020.....	75
III.5.1 Courbes de polarisation	75
III.5.2. La spectroscopie d'impédance électrochimique.....	77
III.5.3. Isotherme d'adsorption.....	79

III.6. Conclusion	81
Références chapitre III.....	83
Conclusion générale	87

Chapitre I :

Étude bibliographique de Cynara cardunculus, de la synthèse verte des nanoparticules et de leurs applications dans l'inhibition de la corrosion et le traitement des eaux usées



Introduction

La tendance à recourir à des matières naturelles dans les domaines environnemental et industriel constitue l'un des axes majeurs de la recherche scientifique moderne, compte tenu des alternatives écologiques et durables qu'elles offrent. Parmi les plantes qui suscitent un intérêt croissant figure le *Cynara cardunculus*, en raison des composés bioactifs qu'il contient et qui sont capables de contribuer à la synthèse écologique de nanoparticules. Ces nanoparticules ont révélé des propriétés distinctives qui ont permis leur utilisation dans de nombreuses applications, notamment dans le traitement des eaux usées et l'élimination de divers polluants. Les extraits végétaux ont également prouvé leur efficacité dans la lutte contre la corrosion en servant d'inhibiteurs naturels qui réduisent la dégradation des métaux dans des milieux agressifs. Ce chapitre a pour objectif de présenter une étude botanique de la plante *Cynara cardunculus*, de définir la synthèse verte de nanoparticules, et de passer en revue les principales applications de cette plante dans le traitement des eaux usées et l'inhibition de la corrosion.

I.1. Présentation de *Cynara cardunculus*

I.1.1. Définition

Le *Cynara cardunculus*, connu sous le nom de cardon ou d'artichaut, est une plante herbacée vivace originaire du bassin méditerranéen. Cette espèce appartient à la famille des Astéracées, qui est la plus grande et la plus prospère des familles de plantes dicotylédones. Elle comprend un ensemble complexe de formes sauvages et cultivées d'importance écologique et économique.

Parmi ces formes

- *Cynara Cardunculus* oriental : originaire de l'est du bassin méditerranéen, il se caractérise par des plantes de petite taille, des capitules plus petits et des bractées épineuses allongées. Il est considéré comme l'ancêtre de l'artichaut cultivé.
- *Cynara Cardunculus* occidental : présent dans l'ouest du bassin méditerranéen, il se distingue par des plantes plus robustes, des bractées à bords jaunâtres et des épines moins nombreuses et plus courtes. Il est supposé être génétiquement plus proche du cardon cultivé.
- *Cynara altilis* : il est cultivé pour ses tiges comestibles dans la péninsule ibérique, le sud de la France et l'Italie, et il est également utilisé dans la fabrication du fromage.
- *Cynara scolymus* : largement cultivé dans les régions méditerranéennes et tempérées, il se caractérise par de gros capitules et une faible présence d'épines. [1]

I.1.2. Noms communs

- ❖ **Noms français** : cardon, artichaut
- ❖ **Noms anglais** : Artichoke, Cardon
- ❖ **Noms arabes** : Kharechef, Lkhorchef, Lkhorchef Ardi, Lkhorchef Chok [2]

I.1.3. Classification

Tableau I.1.1. Classification botanique de la plante *Cynara cardunculus* [3]

Taxonomies	Description
Règne	Plantae
Division	Magnoliophyta
Classe	Magnoliopsida
Ordre	Asterales
Famille	Asteraceae
Genre	Cynara
Espèce	<i>Cynara cardunculus</i>

I.1.4. Description botanique

Le *Cynara cardunculus* est une plante vivace robuste non domestiquée, caractérisée par une rosette de grandes feuilles épineuses et de tiges florales ramifiées, largement répandue dans la région méditerranéenne, prospérant dans des environnements chauds, secs et de basse altitude. [4]

a. Les tiges et les feuilles

La cynara possède une tige épaisse, droite et longue (0,5 à 2 cm), densément recouverte de poils arachnéens gris ou blancs et légèrement agglomérée.

Les feuilles sont grandes, formant une rosette large à la base de la tige, et sont recouvertes d'un duvet arachnidé. Les feuilles inférieures sont oblongues ou larges, en forme de lance, mesurant environ un mètre de long et 50 cm de large, imbriquées, repliées deux fois sur le plan vertical, Les parties primaires sont inclinées sur un axe alaire et divisées en lobes dentelés ou irrégulièrement dentelés ; les lobes et les dents sont transparents et verts sur le dessus, et recouverts d'un tomento dense sur le dessous.

Les feuilles caulinaires moyennes et supérieures sont tronquées, fixes et faiblement courbées ; elles se prolongent par des feuilles terminales linéaires et oblongues de 5 à 6 cm de long.



Figure I.1.1 Les feuilles et les tiges [2]

b. Les inflorescences

Il s'agit de grandes têtes isolées de 7 à 10 cm de long, se terminant par de courtes branches de forme ovale ou globuleuse ; les branches internes sont opaques, lisses, transparentes, avec une base relativement charnue ; les branches externes sont légèrement inclinées, dressées et courbées ; les bractées médianes et internes sont droites, effilées et comprimées. Un grand nombre de fleurs se caractérisent par une corolle de couleur bleue tirant vers le violet.



Figure I.1.2. La fleur ouverte de *Cynara cardunculus* [2]

c. Le fruit

Il s'agit d'une gousse oblongue de 6 à 7 cm de long, de couleur brun rougeâtre, avec des côtes blanches peu saillantes et des taches plus foncées, parfois noires ; elle porte un bec de 2 à 3 cm de long, tirant vers le jaune. [5]



Figure I.1.3. Les fruits d'artichaut sauvage [2]

d. Les racines

Le système racinaire de la cardamine des champs est ramifié et profond à maturité ; il peut être utilisé stratégiquement comme culture pour augmenter la fertilité du sol et le stabiliser. Sa racine vivace se développe chaque année et peut persister jusqu'à 10 ans. [6]



Figure I.1.4. Les tubercules de *Cynara cardunculus* [7]

I.1.5. Habitat naturel

Le ciste est une plante méditerranéenne qui pousse naturellement dans des conditions environnementales difficiles : forte salinité, températures élevées et sécheresse estivale [8] ; on la trouve dans les zones périphériques de la campagne ou le long des sentiers [9].

I.1.6. Distribution géographique

Le *Cynara cardunculus* est répandu dans le bassin méditerranéen, en Macaronésie, en Afrique du Nord, à Chypre et en Turquie ; il s'est également naturalisé au Mexique, en Chine, en Californie, au Pérou, au Chili, en Australie, en Argentine et en Afrique de l'Ouest. Sa production se concentre principalement dans le sud de l'Europe, notamment en Espagne, en France, au Portugal, en Grèce et en Italie. Le cynara a démontré une grande capacité d'adaptation aux conditions climatiques, ce qui permet de le cultiver comme plante vivace sur des terres marginales à faible humidité. [10]



Figure I.1.5. Principale répartition mondiale du *cynara cardunculus* [11]

I.1.7. Leur utilisation

I.1.7.1. Utilisation en médecine traditionnelle

Les feuilles de cardon sont traditionnellement utilisées à des fins médicinales en raison de leur richesse en composés phénoliques. Elles ont des effets diurétiques et protecteurs pour le foie, et contribuent à améliorer le fonctionnement de la vésicule biliaire. De plus, elles stimulent la sécrétion des sucs digestifs, en particulier la bile, et pourraient contribuer à inhiber la synthèse du cholestérol [12]. Des études récentes indiquent également que l'extrait de feuilles de cardon prévient la perte de fonction vasculaire liée à l'âge. De plus, elles sont considérées comme antidiabétiques [13].

I.1.7.2. Utilisation alimentaire

Cynara Cardunculus est un ingrédient traditionnel du régime méditerranéen et une source importante de composés bioactifs et de nutriments, car il contient des composés phénoliques, de l'inuline, des fibres alimentaires, des vitamines, des minéraux et bien d'autres éléments. [14]

Les têtes non mûres et les tiges charnues sont les parties comestibles ; elles sont utilisées dans la cuisine méditerranéenne pour préparer des soupes et des salades. De plus, les fleurs servent de coagulant végétal pour la fabrication de différents types de fromages dans plusieurs pays, notamment au Portugal, en Espagne et en Italie. [15]

I.1.8. Données photochimiques

Les feuilles et les têtes de *Cynara* sont riches en composés phénoliques, notamment des dérivés benzoïques, cinnamiques, des flavones et des tanins. Il a été constaté que les flavones constituent les composés principaux dans les feuilles, tandis que dans la tige, ce sont les acides caféoylquinique qui sont les plus abondants.

L'huile de graines d'artichaut présente une qualité nutritionnelle exceptionnelle et une composition variée en acides gras.

Certaines études ont montré que plusieurs variétés possèdent la plus forte teneur en acide caféoylquinique, représentant 95 % du total des polyphénols mesurés, par exemple 'Sylvestris Creta' (var. sylvestris, wild cardon) et 'Violetto di Sicilia' (var. scolymus, globe artichoke). [16]

I.1.9. La toxicité

Bien que l'artichaut soit généralement considéré comme un légume sain et sans danger, il peut provoquer certaines réactions indésirables chez certaines personnes, en particulier celles qui présentent une allergie aux plantes de la famille des Astéracées, pouvant se traduire par des symptômes digestifs tels que des flatulences, ou des symptômes cutanés et respiratoires. Des cas d'allergies ont également été signalés chez les personnes travaillant dans le domaine de sa

culture ou de sa manipulation, tels que la rhinite, l'asthme et l'urticaire, ainsi que des réactions cutanées chez les non-travailleurs ; on pense que certains composés végétaux sont responsables de ces allergies. [17]

Par ailleurs, l'artichaut est également confronté à un problème majeur au niveau de la production, car il est exposé à un grand nombre de virus végétaux, notamment en Europe et dans le bassin méditerranéen, ce qui entraîne une dégradation de la qualité de la récolte et une baisse de son rendement. [18]

I.1.10. L'activité antioxydante

I.1.10.1. Les antioxydants

On définit les antioxydants comme « toute substance présente à des concentrations faibles par rapport à celles du substrat susceptible de s'oxyder, et qui influence ou empêche de manière significative l'oxydation de ce substrat » (Haliouil, 1990-1995). Ces antioxydants agissent en inhibant et en retardant l'oxydation des composants alimentaires, ce qui permet d'empêcher leur détérioration et de prolonger leur durée de conservation. [19]

I.1.10.2. Mécanisme d'action des antioxydants

Les mécanismes d'action des antioxydants varient en fonction de leur type et de leur degré d'activité. Les antioxydants primaires agissent directement pour interrompre les réactions d'oxydation en chaîne, et ce par l'intermédiaire des radicaux libres. Cela se fait en fournissant un atome d'hydrogène ou un électron, ce qui stabilise le radical libre et le transforme en un composé moins réactif.

En revanche, les antioxydants secondaires n'interviennent pas directement dans la neutralisation des radicaux libres, mais contribuent à limiter le déclenchement de ces réactions ou à les ralentir en provoquant des modifications dans le milieu environnant. Leurs mécanismes d'action comprennent la chélation des métaux de transition et la décomposition des peroxydes lipidiques.

I.1.10.3 Type des antioxydants

a) Les antioxydants enzymatiques

Les antioxydants enzymatiques agissent en éliminant les radicaux libres, en les décomposant et en les transformant en peroxyde d'hydrogène ; ce peroxyde est ensuite métabolisé par l'enzyme catalase en eau et en oxygène au cours d'une réaction progressive en présence de cofacteurs [20].

Les principaux antioxydants enzymatiques sont les suivants :

- **Superoxyde dismutase (SOD)**

Cette enzyme décompose le superoxyde, qui joue un rôle majeur dans l'oxydation des lipides, à l'aide du cuivre, du zinc, du manganèse et du fer, en oxygène et en peroxyde d'hydrogène. Elle est présente dans la plupart des cellules aérobies et dans les fluides extracellulaires.

➤ **Catalase**

Cette enzyme transforme le peroxyde d'hydrogène en eau et en oxygène en utilisant le fer et le manganèse comme cofacteurs ; elle complète ainsi le processus de détoxification initié par l'enzyme SOD.

➤ **Sélénoprotéines**

Ces enzymes contiennent du sélénium, qui aide à décomposer le peroxyde d'hydrogène et les peroxydes organiques en alcools. Elles sont présentes en grande quantité, notamment dans le foie.

➤ **Glutathion peroxydase**

Elle stimule l'élimination du peroxyde d'hydrogène et des peroxydes organiques (R-O-O) par l'oxydation du glutathion réduit (GSH).

➤ **Glutathion réductase**

Elle stimule la réduction du disulfure de glutathion (GSSG) et constitue une molécule essentielle dans la lutte contre le stress oxydatif. [21]

b. Antioxydants non enzymatiques

Ces enzymes agissent en inhibant les réactions impliquant les radicaux libres [20]. Parmi celles-ci, on trouve :

➤ **La vitamine C (acide ascorbique)**

L'acide ascorbique est un antioxydant non enzymatique qui a la capacité de réduire ou de limiter les effets nocifs des espèces réactives de l'oxygène (ERO) chez les plantes. Il peut en effet fournir des électrons à de nombreuses réactions enzymatiques et non enzymatiques. Il transforme également le peroxyde d'hydrogène en eau par l'intermédiaire de la réaction enzymatique de l'ascorbate peroxydase.

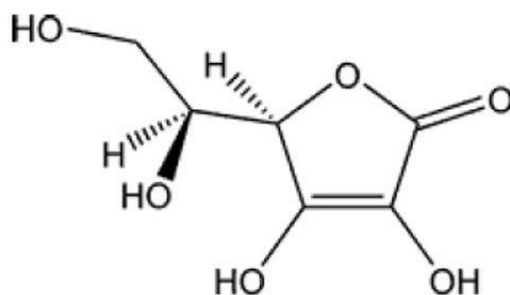


Figure I.1.6. Structure de l'acide ascorbique [22]

➤ Les carotènes

Ce sont des pigments organiques naturels solubles, également connus sous le nom de composés isoprénoides ou trapézoïdes. On les trouve dans les plantes et les micro-organismes.

Elles protègent le système photosynthétique en inhibant la chlorophylle III (Chl^3) et les formes réactives de l'oxygène, en particulier l'oxygène singulet ($^1\text{O}_2$) produit naturellement au cours de la photosynthèse, et jouent ainsi un rôle important en tant qu'antioxydants.

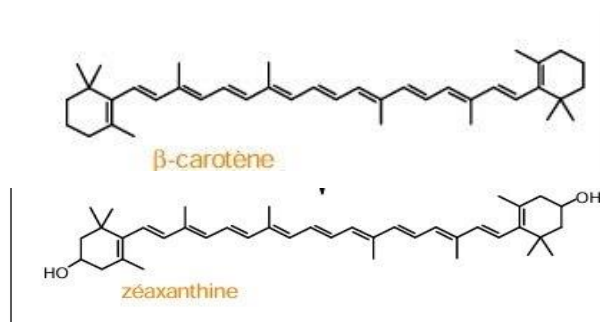


Figure I.1.7. Exemples de β -carotène et zéaxanthine [23]

➤ La proline

La proline est un acide aminé participant à la synthèse des protéines. Sa concentration dans les tissus végétaux est proportionnelle à l'intensité et à la durée du stress subi par la plante. Elle joue un rôle important dans la stabilisation des membranes cellulaires. Elle est également considérée comme un antioxydant, car elle se caractérise par sa capacité à réduire les radicaux hydroxyles ($\text{OH}\cdot$) et le monoxyde d'oxygène ($^1\text{O}_2$), en plus d'inhiber l'oxydation des lipides. [24]

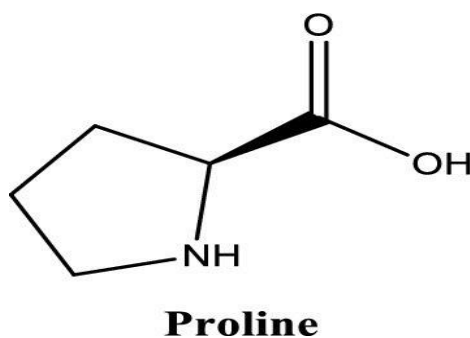


Figure I.1.8. Structure de proline [25]

I.1.11. Les composés actifs d'origine végétale

I.1.11.1. Les métabolites

Sont de petites molécules biologiques présentes sous forme de médiateurs et de produits finaux dans tous les processus cellulaires ; elles peuvent déclencher des chaînes de signaux cellulaires et régulent divers processus biologiques. [26]

I.1.11.2. Les métabolites secondaires

Ce sont de petits composés organiques qui ne jouent pas un rôle très important dans la croissance des plantes, notamment : les alcaloïdes, les flavonoïdes, les terpénoïdes, les acides organiques et la lignine. Ces récepteurs jouent un rôle dans la régulation de la croissance des plantes. [27]

I.1.11.3. Origines et voie de synthèse des métabolites secondaires :

Les voies de biosynthèse sont responsables de la formation des récepteurs primaires et secondaires, dont les plus courants sont :

- La voie des pentoses pour la formation des glycosides et des polysaccharides,
- La voie de l'acide shikimique pour la synthèse des phénols, des tanins et des alcaloïdes aromatiques,
- La voie de l'acétate-malonate pour la production de phénols et d'alcaloïdes,
- La voie de l'acide mévalonique, responsable de la formation des terpènes, des stéroïdes et des alcaloïdes. [28]

I.1.11.4. Classification

Les métabolites secondaires sont classés en fonction de leur structure chimique (par exemple, la présence de cycles ou de sucres), de leur composition chimique (présence ou absence d'azote) et de leur solubilité dans différents solvants. Ou en fonction des voies de biosynthèse par lesquelles ils sont produits :

De manière générale, les composés secondaires se divisent en trois grandes catégories : les composés phénoliques, les terpènes et les stéroïdes, ainsi que les alcaloïdes, sans oublier les flavonoïdes. [29]

I.1.11.4.1. Les polyphénols

a) Définition

Les polyphénols constituent une vaste catégorie de composés chimiques naturels présents dans les plantes. Ils se caractérisent par la présence de plusieurs groupes phénoliques dans leur structure moléculaire.

Ces composés jouent un rôle important dans la physiologie végétale et contribuent à la croissance, à la coloration et à la défense contre les agents pathogènes et les rayons ultraviolets. Dans le domaine de la nutrition humaine, les polyphénols sont connus pour leurs propriétés antioxydantes et anti-inflammatoires, ainsi que pour leur contribution à la prévention de diverses maladies. [30]

B) Structure de base

L'une des caractéristiques communes des polyphénols est la présence d'un ou plusieurs cycles aromatiques (cycles benzéniques) liés à des groupes hydroxyles (-OH). [31]

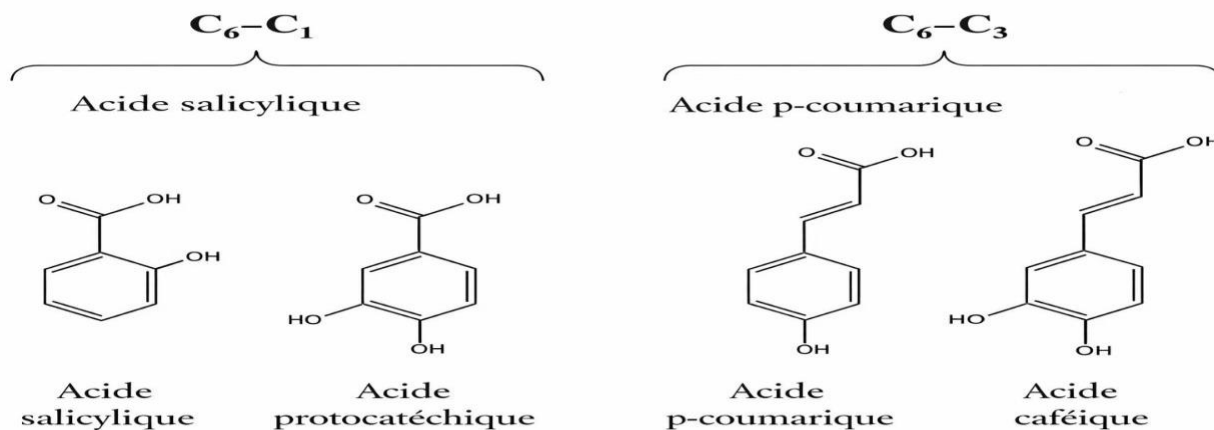


Figure I.1.9 : Structure des polyphénols simples [32]

C) Classification

Les polyphénols sont classés en fonction de leur composition chimique, du nombre et de la disposition des cycles phénoliques, ainsi que des éléments qui relient ces cycles. Les principales catégories de polyphénols comprennent : les flavonoïdes, les acides phénoliques, les stilbènes et les lignanes. [30]

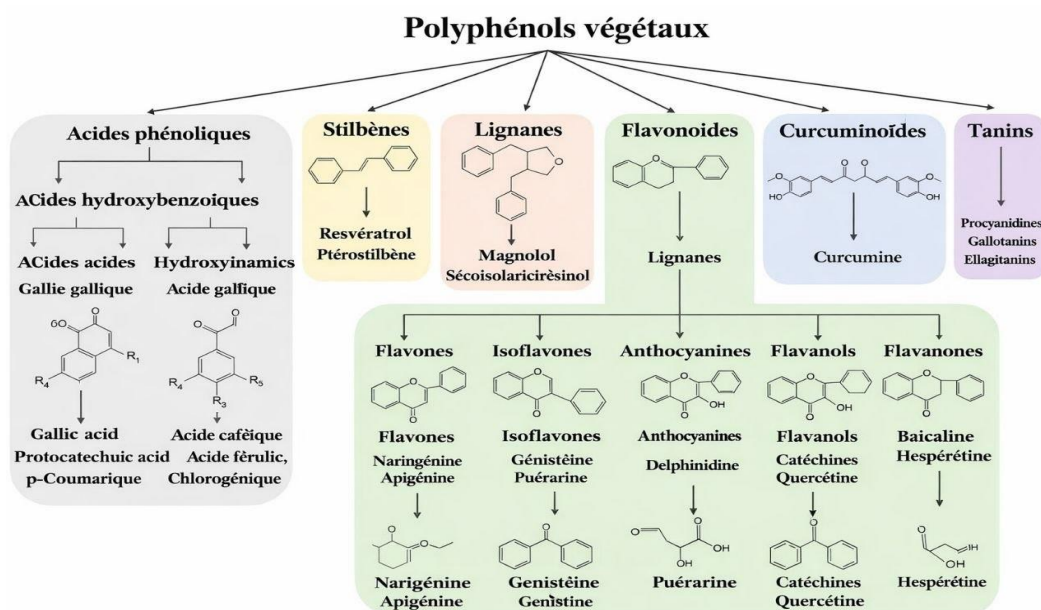


Figure I.1.10. Classification des composés phénoliques [33]

Les polyphénols de *Cynara cardunculus*

Les polyphénols constituent un vaste groupe de composés phytochimiques présents en grande quantité dans la cynara ; ils peuvent être classés en deux catégories : les acides phénoliques et les flavonoïdes.

a. Les acides phénoliques

Les acides phénoliques comprennent deux grandes catégories : les acides hydroxybenzoïques et les acides hydroxycinnamiques, tels que l'acide coumarique, l'acide caféique et l'acide férulique, qui se trouvent le plus souvent sous forme liée et non sous forme libre.

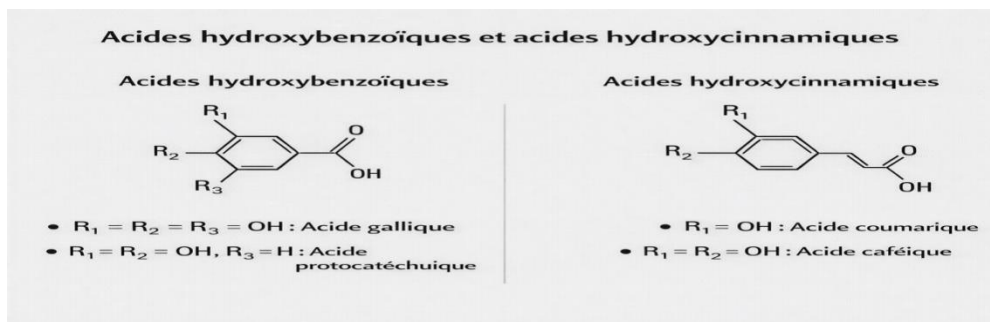


Figure I.1.11. Structure chimique de l'acide hydroxybenzoïque et l'acide hydroxycinnamique [34]

La plante *C. cardunculus* est une source importante d'esters de l'acide caféique et de l'acide quinique, dont les plus importants sont l'acide chlorogénique (acide 5-O-caféoylquinique) et certaines formes diesters telles que le 1,5-di-caféoylquinique, ainsi que d'autres dérivés moins abondants.

b. Les flavonoïdes

Les flavonoïdes comptent parmi les composés polyphénoliques les plus importants des plantes ; ils sont présents dans *C. cardunculus* principalement sous forme de flavones telles que l'apigénine et la lutéoline et leurs dérivés, ainsi que de flavanones. La plante contient également des anthocyanines, telles que les glycosides de cyanidine, responsables de la couleur violette de certaines de ses parties.

Ces composés jouent un rôle protecteur chez la plante contre les rayons ultraviolets en réduisant le stress oxydatif (ROS). [35]

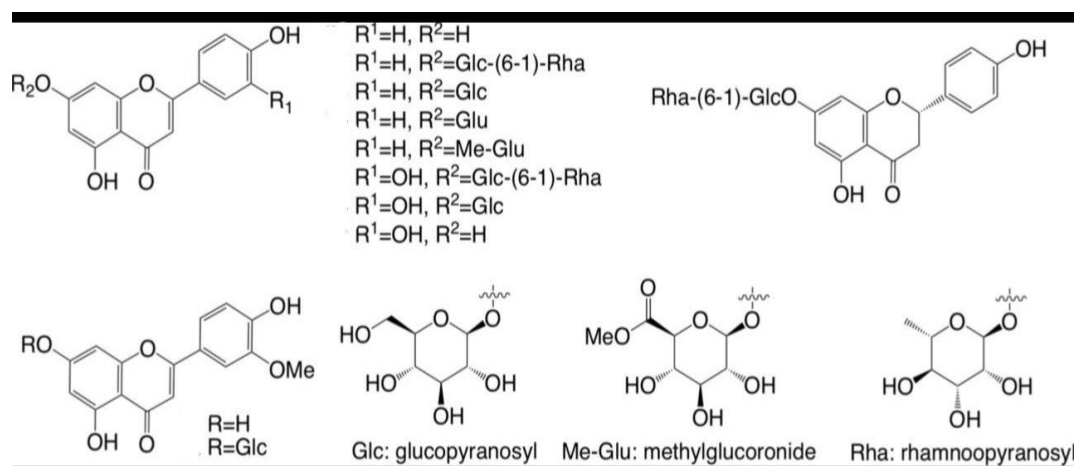


Figure I.1.12. Flavonoïdes de *Cynara* [36]

I.1.12. Revue bibliographique sur l'activité antioxydante de *Cynara cardunculus*

Le titre:	Auteur:	Année:	Efficacité:
The genus <i>Cynara</i> : the potential of valuable natural compounds – insights from phytochemistry and pharmacological activities	Pham Van Huyen, Tran Thi Ngoc Hanh, Nguyen Thi Thu Hien, Tran Kim Diep, Phan Nha Hoa, Nguyen Huu Huong Duyen & Nguyen Huu Toan Phan	2026	Sur la base des données disponibles, un ensemble de composés de la cynara, en particulier les acides caféoylquiniques et les flavonoïdes, a été évalué quant à son activité antioxydante à l'aide de plusieurs tests, tels que les tests de piégeage des radicaux et les tests de chélation des métaux, entre autres. Chez <i>C. scolymus</i> , les études ont montré que les composés dicaféoylquiniques (diCQAs) et les glycosides de lutéoline possèdent la plus forte activité antioxydante, la cynarine étant considérée comme l'un des composés les plus puissants, suivie de la lutéoline 7-O-rutinoside et du cynaroside. En revanche, l'acide chlorogénique et l'acide caféoylquinique ont enregistré une activité moyenne, tandis que des composés tels que la narrotine et l'apigénine 7-rutinoside ont montré la plus faible activité parmi les composés étudiés (Wang et al. 2003).
A systematic review on <i>Cynara cardunculus</i> L.: bioactive compounds, nutritional properties and food-industry applications	Carla Buzzanca, Vita Di Stefano, Angela D'Amico, Alessandro Gallina & Maria Grazia Melilli	2025	Les études se sont concentrées sur les différences d'activité biologique du cardon en fonction du stade de croissance et des parties de la plante. Les résultats ont montré que les bractées et les capitules sont plus actifs aux stades intermédiaires, tandis que les tiges et les feuilles présentent une meilleure capacité à inhiber l'oxydation des lipides aux stades

of a sustainable food.			immatures, et que les graines enregistrent une activité plus élevée aux stades avancés. L'effet inhibiteur de l'oxydation varie également selon la partie de la plante et le stade de maturité, avec des valeurs d'IC ₅₀ faibles dans certains tissus, ce qui indique une activité antioxydante plus forte. (Mandim et al. 2020; Mandim et al. 2021)
Exploring Cynara cardunculus L. by-products potential: Antioxidant and antimicrobial properties	Ássia H. Barbosa, Maria Paula Duarte, Mariana Andrade, Ana Rita Mateus, Fernanda Vilarinho, Ana Luísa Fernando, Ana Sanches Silva	2024	Dans une autre étude, Dias et al. (2018) ont évalué l'activité antioxydante d'un extrait de fleurs de Cynara cardunculus à l'aide du test de piégeage des radicaux libres DPPH. Les résultats ont montré des valeurs d'EC ₅₀ comprises entre 0,16 et 1,71 mg/ml, ce qui indique une activité antioxydante élevée.

I.2. Synthèse verte des nanoparticules

I.2.1 Définition d'une nanoparticule

Les nanoparticules sont des matériaux naturels ou synthétiques dont la taille varie entre 1 et 100 nanomètres. Elles possèdent des propriétés physiques, chimiques et biologiques uniques par rapport aux matériaux classiques, ce qui explique leur utilisation dans de nombreux domaines tels que la médecine, la pharmacie, les capteurs, les catalyseurs et l'électronique. [37]

I.2.2. Classification des nanoparticules

Les nanoparticules sont classées en fonction des matériaux utilisés dans leur synthèse et de leurs dimensions.

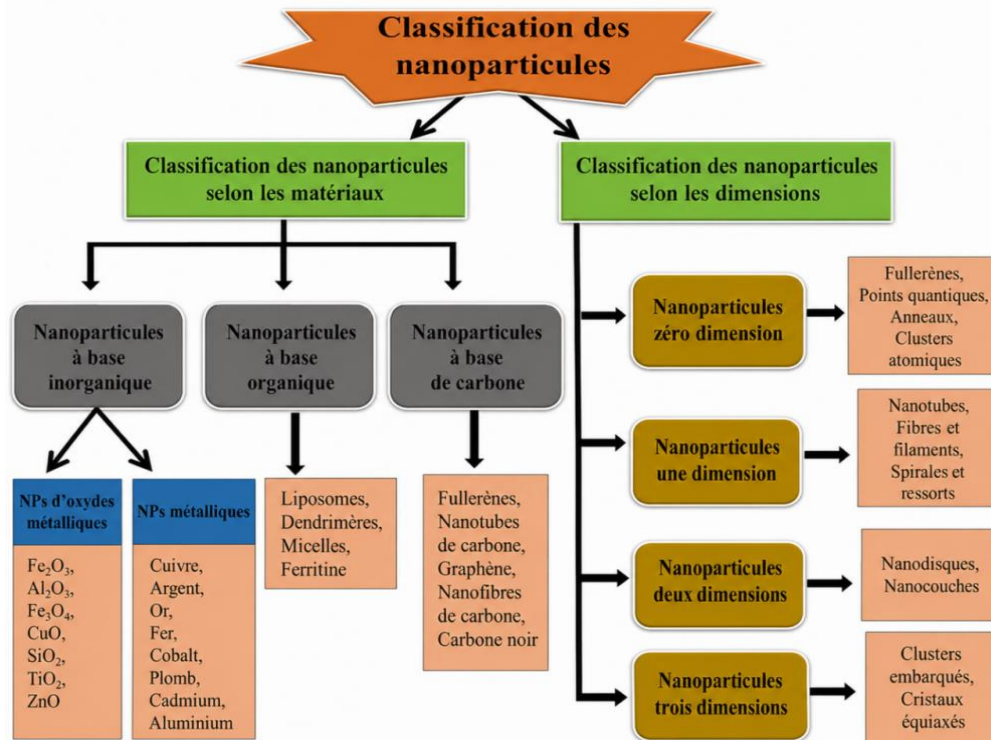


Figure I.2.1. Classification des nanoparticules basée sur les matériaux et la dimension. [38]

I.2.3. Propriétés des nanomatériaux

De manière générale, les propriétés des nanoparticules peuvent être classées en deux catégories, chimiques et physiques :

I.2.3.1. Propriétés physiques

- **Propriétés optiques**

Les propriétés optiques des nanoparticules comprennent leur couleur, ainsi que leur capacité à absorber, transmettre et réfléchir la lumière et les rayons ultraviolets, ce qui constitue l'une de leurs principales propriétés physiques.

- **Propriétés mécaniques**

Les propriétés mécaniques d'un matériau comprennent sa résilience, sa souplesse et sa résistance à la traction, autant de facteurs essentiels qui déterminent son efficacité dans diverses applications.

- **Propriétés magnétiques et électriques**

Les nanoparticules possèdent d'importantes propriétés magnétiques et électriques qui permettent de les utiliser dans le développement de technologies électroniques de pointe et d'applications liées à l'énergie durable.

- **Les propriétés hydrophiles, hydrophobes, de suspension, de diffusion et de sédimentation**

Sont quelques-unes des autres caractéristiques que l'on retrouve dans de nombreux éléments courants.

I.2.3.2. Propriétés chimiques

Les propriétés chimiques des nanoparticules comprennent leur réactivité, leur stabilité et leur sensibilité à des facteurs environnementaux tels que la chaleur, l'humidité et la lumière, ainsi que l'influence de leur inflammabilité et de leur corrosivité sur la détermination de leurs utilisations. [39]

I.2.4. Les domaines d'application des nanoparticules

La nanotechnologie permet d'utiliser des nanoparticules dans un large éventail d'applications dans divers domaines tels que le textile, les cosmétiques, l'alimentation, l'imagerie médicale, l'administration de médicaments, l'environnement, l'électronique, la chimie et la construction. Certaines de ces applications sont résumées dans le tableau 1 [40].

Tableau I.2.1. Exemples de champs d'application en fonction du type de nanoparticule

Champ d'application	Type de nanoparticule	Propriété
Textiles à usage clinique : Pansements Traitement de surfaces	Nanoparticule d'argent	Antibactérien
Industrie électronique	Fullerènes	Supraconductivité
Cosmétique : crèmes solaires, laques, peintures	Nanoparticule dioxyde de titane	Filtre UV Photocatalytique
Dépollution des eaux usées et des sols	Nanoparticule de fer, Nanoparticule d'aluminium	Membrane « filtrante », nano-adsorbants
Additif dans les carburants diesel	nanoparticule de dioxyde de cérium	Catalytiques

I.2.5. La synthèse verte

À l'heure actuelle, plusieurs méthodes sont utilisées pour synthétiser des nanomatériaux métalliques, mais la tendance actuelle est de privilégier la synthèse verte plutôt que les méthodes chimiques et physiques, car elle est moins gourmande en énergie et moins nocive pour l'environnement. [41]

La synthèse verte des nanomatériaux est l'une des méthodes modernes qui s'appuie sur des sources naturelles et biologiques pour produire des nanoparticules de manière durable et respectueuse de l'environnement. Ce processus s'effectue par le biais de réactions biologiques et chimiques simples dans des conditions modérées, en utilisant des micro-organismes et des extraits végétaux qui contribuent à la formation de nanoparticules dotées de propriétés distinctives. [42]

Cette approche vise à réduire la pollution environnementale en remplaçant les produits chimiques nocifs par des agents biologiques naturels tels que les bactéries, les champignons, les algues et les extraits végétaux dans la préparation des nanoparticules, ce qui la rend plus sûre et plus durable tout en obtenant des particules stables et dotées de propriétés améliorées par rapport aux méthodes traditionnelles. [43]

I.2.5.1. Mécanisme de la synthèse des nanoparticules métalliques

Le processus de synthèse de nanoparticules métalliques à partir d'extraits végétaux comprend trois étapes principales.

- **L'étape d'activation** : les ions métalliques sont réduits pour former des atomes métalliques primaires.
- **Phase de développement** : les nanoparticules s'agregent et grandissent pour former des particules plus grosses, un phénomène appelé « maturation d'Ostwald » qui renforce leur stabilité thermodynamique.
- **Phase de terminaison** : la structure finale et la stabilité des nanoparticules sont déterminées. [44]

I.2.6. Les nanoparticules de cobalt

Les nanoparticules de cobalt sont des structures nanométriques généralement préparées à partir de sels de cobalt, tels que le nitrate de cobalt, et se caractérisent par d'importantes propriétés physiques, chimiques et magnétiques. Grâce à ces propriétés et à leur taille réduite, elles peuvent être utilisées dans de nombreux domaines tels que le stockage d'énergie, la catalyse, la médecine, la microélectronique, comme agents de contraste et dans les systèmes d'administration de médicaments, sans oublier leur potentiel en tant que capteurs de précision pour la détection de différentes substances. [45]

I.2.7. Les nanoparticules d'argent

Les nanoparticules d'argent (AgNPs) comptent parmi les nanomatériaux les plus étudiés ; leur taille varie entre 1 et 100 nanomètres et elles présentent des propriétés importantes telles qu'une conductivité électrique élevée, un rapport surface/volume important et une efficacité antimicrobienne. Elles se caractérisent également par une surface spécifique et une activité de surface

élevées, ce qui leur confère un fort pouvoir catalytique, en plus de leur supériorité par rapport à l'argent ordinaire en matière de résistance aux bactéries. [46], [47].

I.2.8. Les nanoparticules d'Ag et Co

Les nanoparticules d'argent se distinguent par leur efficacité catalytique et leurs propriétés physiques et chimiques uniques, ce qui les rend peu coûteuses et moins toxiques. Quant aux nanoparticules de cobalt, elles sont connues pour leurs propriétés magnétiques et leurs nombreuses applications dans la catalyse et les industries pétrochimiques. Ainsi, le système binaire Ag Co présente des propriétés distinctives résultant de la combinaison de métaux magnétiques et non magnétiques. Des études récentes ont montré qu'il possède une résistance magnétique élevée, ce qui renforce son utilisation dans les domaines de la catalyse, du traitement de l'eau, de la production d'énergie et des capteurs. [48]

I.2.9. Les méthodes de synthèse des nanoparticules

La synthèse des nanoparticules vertes a été classée en deux grandes catégories selon la méthode de préparation :

- L'approche descendante (top-down) : elle consiste à réduire la taille de matériaux de grande taille en nanoparticules à l'aide de méthodes mécaniques ou physiques telles que le broyage à billes, la lithographie, l'ablation laser et les traitements thermiques.
- L'approche de bas en haut (bottom-up) : les nanoparticules sont construites à partir d'atomes ou de molécules, à l'aide de techniques telles que le dépôt chimique en phase vapeur (CVD), la méthode sol-gel, la centrifugation et la pyrolyse. [49]

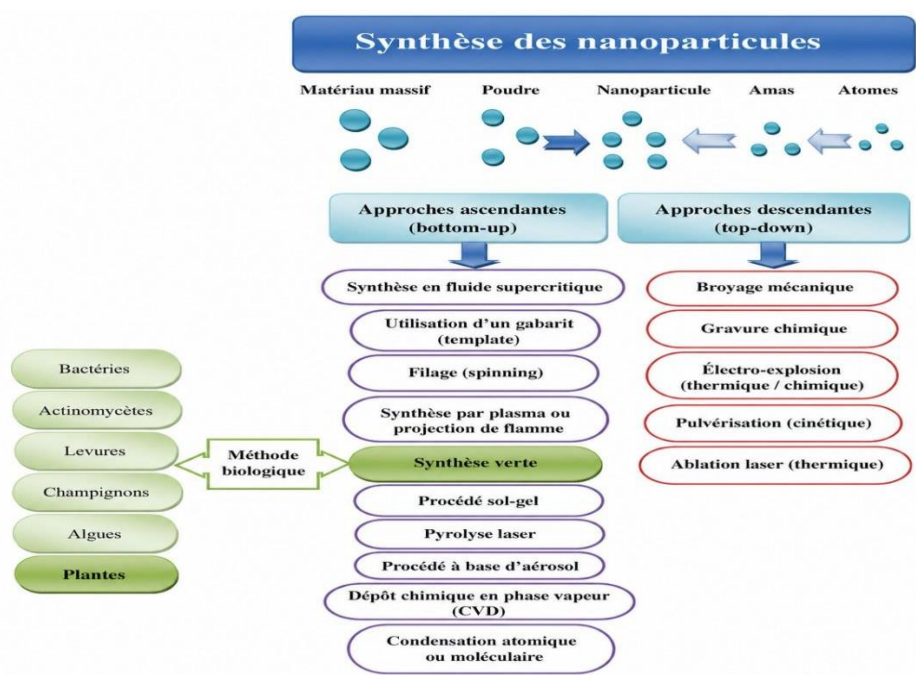


Figure I.2.2. Techniques de synthèse de nanoparticules [50]

I.2.10. Synthèse des nanoparticules à partir des extraits des plantes

Parmi les diverses stratégies de synthèse des nanoparticules, la synthèse verte par les plantes est l'une des approches modernes les plus remarquables qui a suscité un vif intérêt ces dernières années, en raison de sa capacité à surmonter les contraintes économiques, environnementales et techniques liées aux méthodes physiques et chimiques traditionnelles. [51]

La synthèse verte de nanoparticules à l'aide de plantes est considérée comme l'une des méthodes les plus prometteuses de la nanotechnologie moderne ; elle repose sur des extraits végétaux riches en composés naturels tels que les flavonoïdes, les polyphénols, les tanins et les terpénoïdes. Ces composés agissent comme des agents réducteurs qui transforment les ions métalliques en nanoparticules, et comme des agents stabilisants qui empêchent leur agglomération et préservent leur stabilité. Cette méthode se distingue par son caractère écologique, sûr et peu coûteux, et permet de produire des nanoparticules présentant une grande stabilité et des propriétés biologiques améliorées par rapport aux méthodes chimiques traditionnelles. [52], [53]

La biosynthèse de nanoparticules métalliques à partir de plantes s'effectue en sélectionnant la partie végétale appropriée, puis en la séchant, en la broyant et en la préparant avec de l'eau distillée afin d'obtenir un extrait végétal. L'extrait est ensuite porté à ébullition et filtré, puis on y ajoute une solution contenant des ions métalliques à la concentration souhaitée. Le changement de couleur de la solution est considéré comme le premier indicateur de la réduction des ions et de la formation des nanoparticules métalliques. [54]

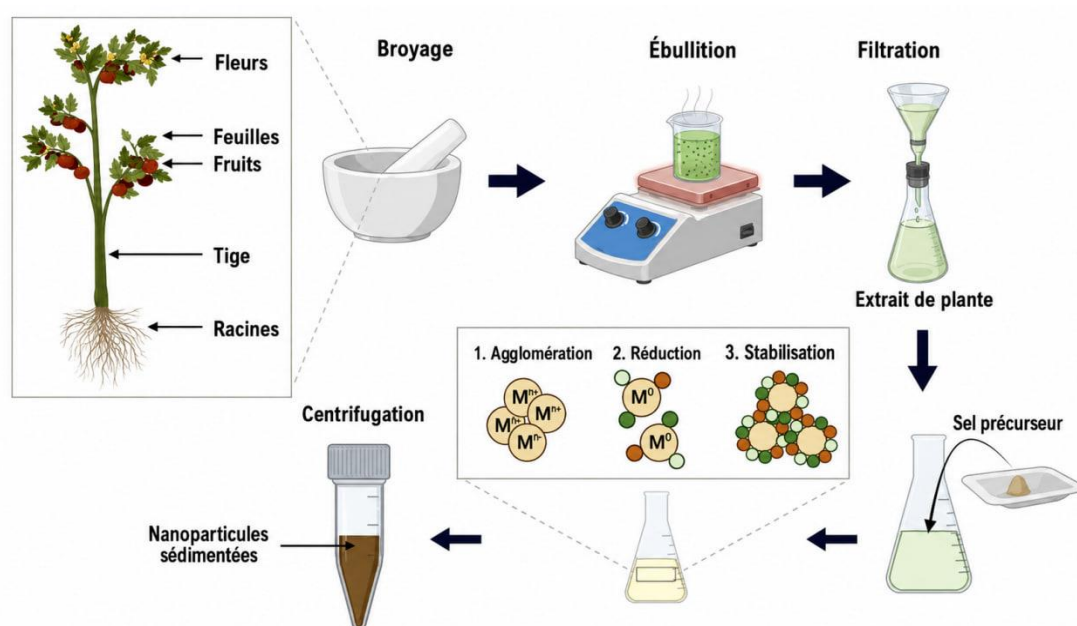


Figure I.2.3. Représentation schématique de la biosynthèse végétale de nanoparticules métalliques

I.2.11. Revue bibliographique sur quelques applications des nanoparticules vertes

• L'argent

Le titre	Les auteurs	L'année	Application
Assessing the anti-fungal resistance of synthesized tannic acid-modified silver nanoparticles against <i>Aspergillus niger</i> isogenic mutants	Konstantina Avdala, Christos Skertsos, Eleni Kollia, Maria Theodosiou, Evangelia Tsitsou, Eleni Efthimiadou, Vasilis Val-dramidis	2026	Anti-microbienne
Phytochemical profiling and evaluation of antimicrobial, cytotoxic, wound-healing, and photocatalytic properties of green-synthesized silver nanoparticles using <i>Verbascum splendidum</i>	Ömer Hazman, Ibrahim Erol, Gofur Khamidov.	2025	Anticancer Applications de traitement de l'eau Activité antioxydante
Bioinspired and Green Synthesis of Silver Nanoparticles for Medical Applications: A Green Perspective	Fareeha Arshad, Gowhar A. Naikoo Israr U. Hassan	2024	Antibactérienne

	Sai Raghuveer Chava		
	Mohamed El-Tanani, Alaa A. ALJabali		
	Murtaza M. Tam-buwala		

- Cobalt

Le titre	Les auteurs	L'année	Application
Antioxidant activity, DNA cleavage ability, and antibacterial properties of ceramic membrane coated with cobalt nanoparticles	Pinar Belibagli, Ali Can Dogan, Gul Kaya, Nadir Dizge, Kasim Ocakoglu, Sardin Özdemir, Gülsah Tollu.	2025	Antibactérienne
A review on plant extract-based route for synthesis of cobalt nanoparticles: Photocatalytic, electrochemical sensing and antibacterial applications	Arun K. Singh	2022	Traitement photo catalytique des eaux polluées Stockage de l'énergie solaire Semi-conducteurs magnétiques Activité antimicrobienne
Potential application of in-situ synthesized cobalt nanoparticles	Awais, Naurman Ali, Adnan Khan,	2021	Élimination des colorants organiques de l'eau

on chitosan-coated cotton cloth substrate as catalyst for the reduction of pollutants	Abdullah M. Asiri, Tahseen Kamal		Photocatalyse Traitement de l'eau
---	----------------------------------	--	--

• Ag/ Co

Le titre	Les auteurs	L'année	Application
Robust Ag-Co bimetallic nanoparticles: Dual role in catalytic and triboelectric performance	Nanditha T.K, Shreepooja Bhat, Sebghatullah Amini, Rumana Farheen S.M., Maqsood R. Waiker, Rajendra G Sonkawade, Sangamesha M. A., Mamatha Ballal, Krishnaveni S, Gurumurthy S.C.	2024	Traitement de l'eau Production d'énergie
Synthesis of low toxic silver-cobalt nanoparticles using Annona muricata leaf extract: Antimicrobial evaluation	Anuoluwa Abimbola Akinsiku, Ruth Opiotu Odaudu, Christianah De Campos, Alaba Oladipupo Adeyemi, Oluwaseun Ejilude	2023	anti microbienne

Facile synthesis by laser ablation in liquid of nonequilibrium cobalt-silver nanoparticles with magnetic and plasmonic properties	Andrea Guadagnini, Stefano Agnoli, Denis Badocco, Paolo Pastore, Diego Coral, Marcela Fernández van Raap, Daniel Forrer, Vincenzo Amendola.	2021	Traitement de l'eau Stimulation électrochimique Antibactérienne
---	---	------	---

I.3. Applications des extraits des plantes et des nanoparticules biosynthétisées

I.3.1. Inhibition de la corrosion

I.3.1.1. Définition de la corrosion

La corrosion est un processus naturel qui dégrade les métaux au contact de l'environnement, entraînant une perte de leurs propriétés. Elle cause des coûts économiques importants, des risques pour la sécurité et touche plusieurs secteurs industriels. [55]

I.3.1.2. Importance de l'étude de la corrosion

La corrosion est un phénomène grave qui entraîne la détérioration des métaux en raison de leur interaction avec l'environnement. Elle entraîne des pertes économiques importantes, présente des risques pour la sécurité (accidents, fuites, effondrements) et a des répercussions environnementales dues à la pollution. De plus, elle réduit l'efficacité des ouvrages. Son étude est donc indispensable pour protéger les matériaux, réduire les pertes et garantir la sécurité et la durabilité des infrastructures. [56]

I.3.1.3. Morphologies de la corrosion

a. Corrosion localisée

La corrosion localisée est un type de corrosion qui touche uniquement certaines zones du métal en raison de variations dans le milieu, notamment au niveau de la concentration en oxygène : les zones pauvres en oxygène sont alors soumises à la corrosion, tandis que celles riches en oxygène sont protégées. [57]



Figure I.3.1.1. Corrosion localisée [58]

b. Corrosion uniforme

La corrosion uniforme est un type de corrosion qui affecte l'ensemble de la surface du métal de manière homogène sous l'effet de l'air, de l'humidité ou de substances chimiques. Elle se caractérise par une évolution lente et est plus facile à prévoir et à surveiller que la corrosion localisée.



Figure I.3.1.2. Corrosion uniforme [58]

c. Corrosion galvanique

La corrosion galvanique se produit lorsque deux métaux différents sont en contact électrique au sein d'un milieu électrolytique. Dans ce cas, le métal le plus actif (l'anode) subit un taux de corrosion plus élevé, tandis que le métal le moins actif (la cathode) est relativement protégé (KM et al. 2024).

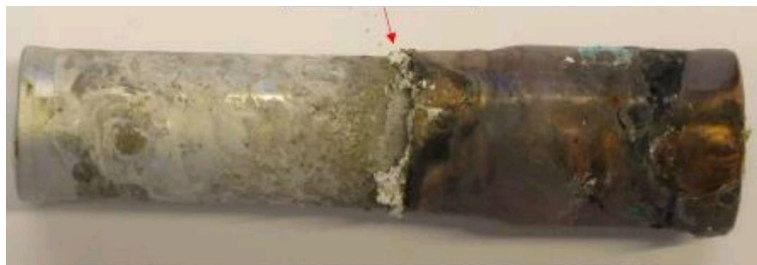


Figure I.3.1.3. Corrosion galvanique [58]

d. Corrosion intergranulaire

L'usure intergranulaire se produit aux limites des grains métalliques en raison de la présence d'impuretés ou d'une ségrégation chimique. Elle affaiblit considérablement le matériau et réduit sa résistance mécanique.



Figure I.3.1.4. Corrosion intergranulaire [58]

e. La corrosion par piqûres

La corrosion par piqûres provoque de petites cavités à la surface du métal sous l'effet des ions chlorure ; elle peut s'étendre en profondeur et causer des dommages importants malgré une perte de matière minime.

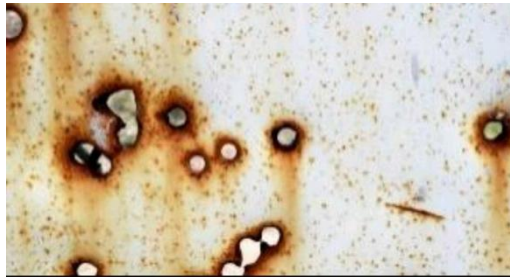


Figure I.3.1.5. Corrosion par piqûres [58]

f. Corrosion par érosion

La corrosion-érosion est une dégradation du métal résultant de l'action d'un fluide en mouvement rapide associée à une corrosion chimique, ce qui entraîne une érosion progressive de la surface du métal.



Figure I.3.1.6. Corrosion par érosion [58]

g. Corrosion caverneuse

La corrosion interstitielle est un phénomène de corrosion qui se produit dans des zones étroites et confinées, telles que les interstices et sous les dépôts, en raison d'un manque d'oxygène et d'une accumulation d'ions, ce qui accélère la détérioration du métal.

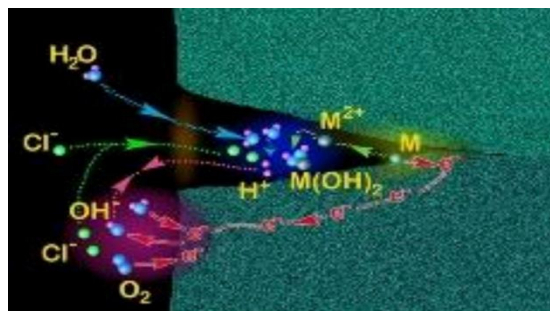


Figure I.3.1.7. Corrosion caverneuse [58]

h. Corrosion sous contrainte

L'usure sous contrainte est un type d'usure qui résulte de l'interaction entre des contraintes mécaniques et un milieu corrosif, entraînant la fissuration ou la rupture du métal. [59]



Figure I.3.1.8. Corrosion sous contrainte [58]

I.3.1.4 Facteurs de la corrosion

Tableau I.3.1.1. Principaux facteurs de corrosion [60]

Facteurs du milieu corrosif	Facteurs métallurgiques	Facteurs définissant les conditions d'emploi	Facteurs dépendant de temps
• Concentration du réactif • Teneur en oxygène • PH du milieu • Température • Pression	• Composition de l'alliage • Procédés d'élaboration • Impuretés • Traitement thermique • Traitement mécanique	• État de surface • Forme des pièces • Emploi d'inhibiteurs • Procédés d'assemblage	• Vieillessement • Tension mécanique • Modification des revêtements protecteurs

I.3.1.5. Mécanisme de la corrosion

La corrosion est un phénomène chimico-électrochimique résultant de la formation de cellules entre les zones anodiques et cathodiques. L'oxydation du métal se produit dans les zones anodiques tandis que les zones cathodiques restent protégées, avec un transfert d'électrons et d'ions

pour maintenir l'équilibre. Il s'agit d'un processus spontané d'oxydation du métal qui peut être accéléré par des défauts ou des variations dans la structure du métal.

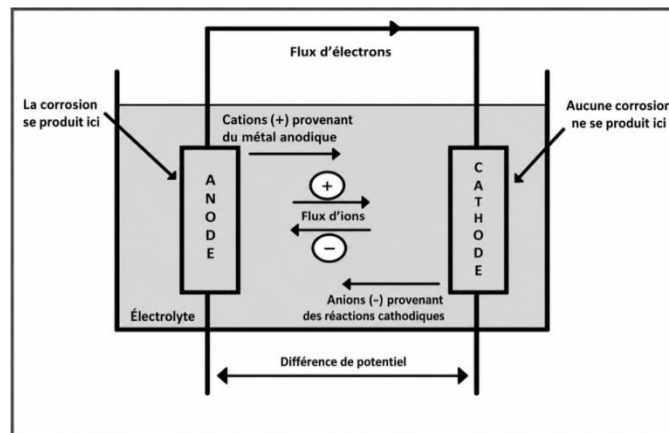


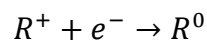
Figure I.3.1.9. Une cellule électrochimique

- **Réaction anodique**

Dans la zone anodique, le métal se dissout en libérant des électrons :

- **Réactions cathodiques**

Les électrons libérés lors de la réaction anodique sont consommés par les réactions cathodiques du milieu :



Ces réactions dépendent de la nature du milieu, notamment de la présence d'oxygène ou d'ions hydrogène. [61]

I.3.1.6. Protection contre la corrosion

Les techniques de protection contre la corrosion sont essentielles pour protéger les métaux contre les attaques chimiques et électrochimiques. Elles reposent sur plusieurs méthodes principales (figure) [62]

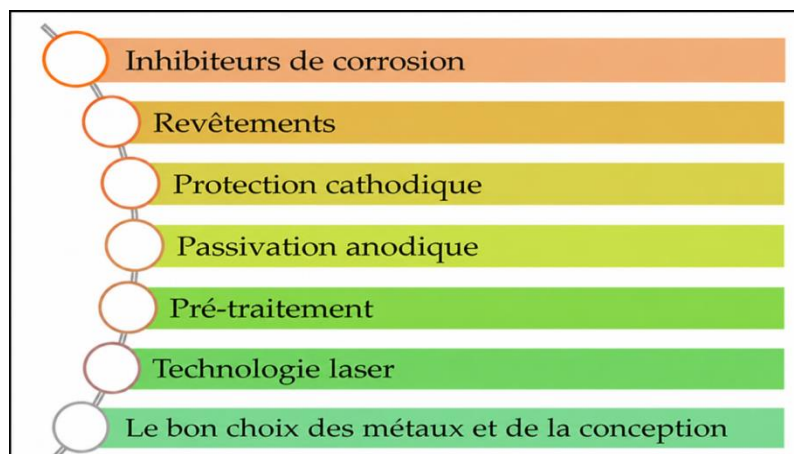


Figure I.3.1.10. Techniques de protection contre la corrosion

I.3.1.7. Définition d'inhibiteurs de corrosion

Les inhibiteurs de corrosion sont des substances chimiques ajoutées en petites quantités au milieu corrosif afin de réduire la vitesse de corrosion des métaux. Ces substances forment une fine couche protectrice à la surface du métal par adsorption, empêchant ainsi le contact direct entre le métal et le milieu corrosif. Elles peuvent également ralentir les réactions électrochimiques au niveau de l'anode ou de la cathode, réduisant ainsi efficacement le taux de corrosion. [63]

I.3.1.8. Classification des inhibiteurs de corrosion

Les inhibiteurs de corrosion se divisent en deux grandes catégories :

I.3.1.8.1 Les inhibiteurs de corrosion organiques

Les inhibiteurs de corrosion organiques sont des composés chimiques qui se fixent à la surface du métal et forment une couche protectrice qui réduit la corrosion. Ils peuvent être synthétiques (coûteux et parfois toxiques) ou naturels (biodégradables et respectueux de l'environnement).

En fonction des groupes fonctionnels qui constituent les sites actifs d'absorption, les inhibiteurs organiques sont classés en plusieurs groupes, dont les principaux sont :

- Les inhibiteurs au nitrite
- Les inhibiteurs à base d'acide phosphorique
- Inhibiteurs d'acides carboxyliques
- Inhibiteurs d'acide thiophosphorique
- Inhibiteurs à base d'éthylène diamine
- Inhibiteurs aminés
- Inhibiteurs phénoliques

I.3.1.8.2. Inhibiteurs de corrosion inorganiques

Ces inhibiteurs contiennent des composés métalliques et agissent en formant une couche protectrice à la surface du métal, empêchant ainsi la formation de cellules de corrosion. En fonction de leur mécanisme d'action, ils sont classés en plusieurs types principaux, dont les plus importants sont : [64]

- Les inhibiteurs anodiques
- Les inhibiteurs cathodiques
- Inhibiteurs d'ionisation, de précipitation et de phase vapeur
- Les inhibiteurs mixtes. [65]

I.3.1.9. Mécanismes d'action des inhibiteurs

De manière générale, le mécanisme d'action des inhibiteurs peut reposer sur un ou plusieurs des mécanismes suivants :

- L'adsorption de l'inhibiteur à la surface du métal (adsorption chimique), ce qui conduit à la formation d'une fine couche protectrice limitant la corrosion, ou par la liaison des ions de l'inhibiteur à la surface du métal.
- La formation d'une couche protectrice résultant de l'oxydation de la surface du métal de base.
- L'interaction de l'inhibiteur avec les composants corrosifs du milieu aqueux, ce qui conduit à la formation de complexes réduisant l'activité du milieu corrosif. [66]

I.3.1.10. Généralités sur les inhibiteurs verts

Les inhibiteurs de corrosion écologiques sont des substances utilisées pour limiter la corrosion des métaux ; ils se caractérisent par leur respect de l'environnement et sont issus de sources naturelles ou renouvelables, telles que les extraits végétaux, les biopolymères, les micro-organismes ou les composés à base d'acides aminés. Ces inhibiteurs constituent une alternative prometteuse aux inhibiteurs traditionnels.

Ils visent à réduire les impacts environnementaux négatifs liés aux processus de protection contre la corrosion, tout en conservant une bonne efficacité d'inhibition dans divers milieux corrosifs et sur de nombreux types de métaux. La classification d'un inhibiteur comme « vert » repose sur un ensemble de critères, parmi lesquels figurent notamment : la biodégradabilité, la faible toxicité, la viabilité économique, ainsi que son efficacité dans différents milieux électrolytiques. [67]

I.3.1.10.1. Revue bibliographique sur les inhibiteurs naturels de corrosion

Le titre:	Auteur:	Année:	Efficacité:
Blackberry leaf extract as a green inhibitor for copper corrosion: Insights from coordination complexes, thermodynamics, RSM optimization, and DFT calculations	Milica Zdravković, Robert Vianello, Vesna Grekulović, Nada Štrbac, Bojan Zdravković, Milan Gorgievski,	2026	Des études antérieures ont montré que l'extrait de feuilles de mûre (<i>Rubus fruticosus</i> L.) dans une solution de chlorure de sodium à une concentration de 0,5 M constitue un inhibiteur de corrosion du cuivre efficace. Des analyses électrochimiques, telles que la polarisation dynamique de potentiel, l'imprégnation électrochimique à haute fréquence et l'analyse de la résistance électrochimique, ont également montré que cet extrait agit comme un inhibiteur de type mixte. Ceci est dû à l'adsorption de ses molécules à la surface du cuivre, ce qui réduit l'effet

	Miljan Markovi.		des ions chlorure agressifs et limite le processus de corrosion.
Phytochemicals as green and sustainable corrosion inhibitors for mild steel and aluminum: Review	Chakanaka P. Mungwari, Babatunde A. Obadele, Cecil K. King'onde	2025	Selon plusieurs études, les extraits végétaux se révèlent efficaces pour inhiber la corrosion de l'acier doux en milieu acide. Par exemple, une étude menée par Raja et al. (Omorin et al., 2019b) a montré que la corrosion de l'acier doux dans une solution d'HCl à une concentration de 1 mol/l pouvait être considérablement réduite grâce à l'utilisation d'un extrait de feuilles d'<i>Alstonia angustifolia</i>, l'efficacité de l'inhibition atteignant environ 80 % à une concentration de 5 mg/l. L'efficacité des extraits végétaux a également été démontrée dans des milieux contenant du chlorure, comme l'a montré une autre étude (Al-Said et al. Omorin et al., 2023) qui a montré que l'extrait de feuilles de <i>Ficus carica</i> contribuait à réduire la corrosion de l'acier doux dans une solution de NaCl à 3,5 %, avec une efficacité d'inhibition atteignant 90 % lorsque la concentration était augmentée.
Plant extracts as green corrosion inhibitors for different kinds of steel: A review	Bhoomika R. Holla, R. Mahesh, H.R. Manjunath, V. Raghu Anjanapura	2024	Khadoum et ses collègues ont mené une étude sur la possibilité d'utiliser un extrait de feuilles de <i>Cardaria draba</i> associé à de l'iodure de potassium comme inhibiteur de la corrosion de l'acier doux dans un milieu d'acide chlorhydrique à une concentration de 1 mol/l. Les résultats ont montré que l'inhibiteur forme une couche monomoléculaire à la surface du métal par chimisorption. L'isotherme de Langmuir a confirmé ce mécanisme de chimisorption, et l'étude a démontré une efficacité d'inhibition élevée

			atteignant 96 %, notamment à une température de 60 °C.
--	--	--	--

I.3.2. Traitement des eaux usées

I.3.2.1. Définition des eaux usées

Les eaux usées désignent l'ensemble des effluents liquides contenant des substances toxiques, issus des activités domestiques, agricoles et industrielles, qui sont acheminés vers les réseaux d'assainissement et rejetés dans l'environnement par divers moyens. [68]

I.3.2.2. Origine des eaux usées

Les eaux usées sont classées, selon leur origine, en quatre grandes catégories :

- Les eaux usées domestiques
- Les eaux usées industrielles
- Les eaux pluviales
- Les eaux usées agricoles.

I.3.2.2.1. Les eaux usées domestiques

Les eaux usées domestiques proviennent des activités quotidiennes et se composent principalement d'eau, mais contiennent également certains polluants et micro-organismes.



Figure I.3.2.1. Les eaux usées domestiques [69]

I.3.2.2.2. Les eaux usées industrielles

Les eaux usées industrielles proviennent des activités industrielles ; leur volume et leur composition varient en fonction du type de processus. Elles contiennent souvent des concentrations élevées de polluants, ce qui rend leur analyse complexe. [70]



Figure I.3.2.2. Les eaux usées industrielles [69]

I.3.2.2.3. Les eaux pluviales

Les eaux de pluie urbaines contiennent divers polluants provenant des véhicules, des bâtiments, des parcs et des zones industrielles. Ces polluants comprennent des huiles, des métaux, des nutriments et des sels, ce qui entraîne une dégradation de la qualité de l'eau. [71]

I.3.2.2.4. Les eaux usées agricoles

Les eaux usées agricoles proviennent d'activités agricoles telles que l'irrigation et l'élevage. Elles contiennent des nutriments, des pesticides et des matières organiques, et peuvent entraîner une pollution de l'eau et un déséquilibre écologique. [72]

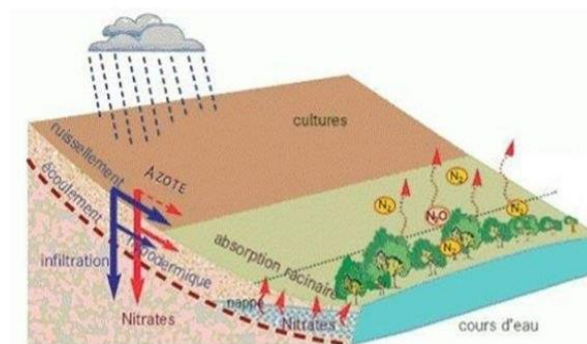


Figure I.3.2.3. Les eaux usées agricoles [69]

I.3.2.3. Caractéristiques des eaux usées

Les eaux usées sont principalement composées d'eau, avec une faible proportion de matières organiques et inorganiques ainsi que de micro-organismes. Elles présentent des caractéristiques physiques et chimiques (telles que la DBO, la DCO, le pH, les sels et les métaux) et biologiques (telles que les bactéries, les virus et les agents pathogènes). [68]

I.3.2.4. Traitement des eaux usées

I.3.2. 4.1 L'objectif du traitement des eaux usées

Le traitement des eaux usées vise à éliminer les polluants et à protéger l'environnement et les ressources en eau, ainsi qu'à réutiliser l'eau et à récupérer l'énergie et les nutriments, ce qui contribue au développement durable. [69]

I.3.2.4.2. Méthodes et procédés des traitements des eaux usées

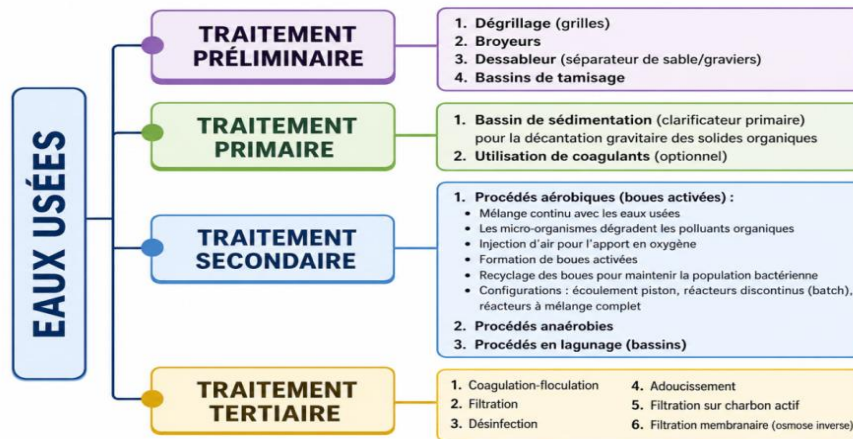


Figure I.3.2.4. Méthodes de traitement des eaux usées [73]

I.3.2.5. Pollution par les colorants

I.3.2.5.1 Généralités

Les colorants synthétiques comptent parmi les principales sources de pollution de l'eau dans les industries du textile, du papier et du plastique, car ils se caractérisent par leur stabilité et leur faible dégradabilité, ce qui entraîne leur accumulation dans les milieux aquatiques pendant de longues périodes. Ces substances peuvent être toxiques ou cancérigènes et constituent un danger pour la santé humaine et les organismes vivants. Elles ont également un impact négatif sur l'équilibre écologique en réduisant la pénétration de la lumière et la quantité d'oxygène dissous dans l'eau. Bien qu'il existe certaines méthodes de traitement, celles-ci s'avèrent souvent insuffisantes, ce qui nécessite le développement de techniques plus efficaces et durables. [74], [75]

I.3.2.5.2. Le colorant triphénylméthane :

Les colorants triphénylméthanes (TPM) sont des colorants synthétiques largement utilisés dans les industries du textile, du papier et du cuir, ainsi que dans les secteurs pharmaceutiques, cosmétique et alimentaire. Elles se caractérisent par une composition chimique stable qui les rend résistantes à la dégradation naturelle, ce qui entraîne leur accumulation dans les eaux usées industrielles. Ces substances sont considérées comme dangereuses pour l'environnement et la santé humaine, car elles peuvent être toxiques et parfois cancérigènes. Elles peuvent également causer des problèmes de santé tels que des irritations cutanées et des troubles respiratoires, en plus de leur impact négatif sur les écosystèmes aquatiques. Leur traitement et leur élimination sont donc indispensables pour protéger l'environnement et la santé publique. [76]

I.3.2.5.2.1. Le vert de malachite

Le vert de malachite est un colorant synthétique appartenant à la famille des triphénylméthanes, utilisé dans le textile, le papier et le cuir, dont la formule chimique est $C_{23}H_{25}N_2Cl$. Il se caractérise par sa nature cationique, sa solubilité dans l'eau et sa couleur verte intense et distinctive. Elle est également utilisée dans certaines applications biologiques, en microscopie et en aquaculture comme antifongique, en raison de sa capacité à interagir avec les composants cellulaires chargés négativement. Elle est toutefois considérée comme un polluant environnemental dangereux, car elle résiste à la biodégradation et persiste longtemps dans l'eau.

Cette stabilité entraîne son accumulation dans les écosystèmes aquatiques et a un impact négatif sur les organismes vivants, pouvant également perturber l'équilibre écologique. De plus, une exposition prolongée peut avoir des effets néfastes sur la santé humaine, tels que des irritations cutanées et des troubles hépatiques. Il est donc recommandé d'en limiter l'utilisation et de développer des méthodes efficaces pour l'éliminer de l'environnement. [77]

I.3.2.6. Photodégradation

La photodégradation est un processus qui se produit sous l'effet de la lumière du soleil, au cours duquel les polluants organiques présents dans l'eau sont décomposés en composés plus simples et moins nocifs. Elle peut être directe, lorsque les molécules polluantes absorbent la lumière et se décomposent, ou indirecte, par l'intermédiaire de substances actives formées sous l'effet de la lumière et qui favorisent l'oxydation des polluants. Ce procédé est utilisé dans le traitement de l'eau, notamment pour éliminer les substances difficiles à décomposer telles que les colorants. Il repose sur l'énergie solaire et transforme les polluants en substances inoffensives telles que l'eau et le dioxyde de carbone, sans ajout de produits chimiques ni génération de pollution secondaire, ce qui en fait une méthode efficace et respectueuse de l'environnement. [78], [79]

Conclusion

Dans ce travail, la plante *Cynara cardunculus* a été étudiée sous plusieurs aspects ; il est apparu qu'il s'agit d'une plante d'une grande importance en raison de ses caractéristiques botaniques et de sa composition riche en composés actifs.

L'étude a mis en évidence la possibilité d'utiliser cette plante pour la synthèse verte de nanoparticules, selon une méthode à la fois écologique et efficace, ce qui en fait une bonne alternative aux méthodes chimiques traditionnelles.

De plus, son importance a été mise en évidence dans des applications environnementales majeures telles que l'inhibition de la corrosion et le traitement des eaux usées, grâce à sa capacité à réagir et à sa teneur en composés naturels actifs. En conclusion, *Cynara cardunculus* constitue

une ressource végétale prometteuse qui contribue au développement des domaines de la chimie verte, de la protection de l'environnement et des nanotechnologies.

Références chapitre I

- [1] A. Paulino *et al.*, “Unravelling the molecular mechanisms of vegetative-to-reproductive transition in *Cynara cardunculus* by RNA-Seq analysis,” *Plant Molecular Biology* 2026 116:1, vol. 116, no. 1, pp. 15–, Jan. 2026, doi: 10.1007/S11103-025-01679-2.
- [2] N. Chaachouay, R. W. Bussmann, and M. Elachouri, “*Cynara cardunculus* L. Asteraceae,” pp. 1–10, 2024, doi: 10.1007/978-3-031-13933-8_89-1.
- [3] P. Goetz and R. Le Jeune, “Artichaut, *Cynara scolymus*,” *Phytotherapie*, vol. 5, no. 4, pp. 219–222, Oct. 2007, doi: 10.1007/S10298-007-0256-0/METRICS.
- [4] I. Ben Ammar, G. Sonnante, and B. A. M. Dridi, “Genetic variability in wild cardoon (*Cynara cardunculus* L. var. *sylvestris*) revealed by SSR markers and morphological traits,” *Sci. Hortic.*, vol. 185, pp. 76–81, Mar. 2015, doi: 10.1016/J.SCIENTA.2015.01.017.
- [5] R. W. Bussmann *et al.*, “*Cynara cardunculus* L. Asteraceae,” pp. 1983–1991, 2025, doi: 10.1007/978-3-031-91369-3_278.
- [6] F. Mandim, C. Santos-Buelga, I. C.F.R. Ferreira, S. A. Petropoulos, and L. Barros, “The wide spectrum of industrial applications for cultivated cardoon (*Cynara cardunculus* L. var. *Altilis* DC.): A review,” *Food Chem.*, vol. 423, p. 136275, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.FOODCHEM.2023.136275.
- [7] C. Porro *et al.*, “Functional and Therapeutic Potential of *Cynara scolymus* in Health Benefits,” *Nutrients* 2024, Vol. 16, Page 872, vol. 16, no. 6, p. 872, Mar. 2024, doi: 10.3390/NU16060872.
- [8] H. Falleh *et al.*, “Phenolic composition of *Cynara cardunculus* L. organs, and their biological activities,” *C. R. Biol.*, vol. 331, no. 5, pp. 372–379, 2008, doi: 10.1016/J.CRVI.2008.02.008/.
- [9] N. Alvarenga *et al.*, “Impact of different *Cynara cardunculus* L. extracts on the physicochemical, microbial, and sensory properties of Serpa cheese,” *Int. Dairy J.*, vol. 162, p. 106159, Mar. 2025, doi: 10.1016/J.IDAIRYJ.2024.106159.
- [10] L. R. Silva, T. A. Jacinto, and P. Coutinho, “Bioactive Compounds from Cardoon as Health Promoters in Metabolic Disorders,” *Foods* 2022, Vol. 11, Page 336, vol. 11, no. 3, p. 336, Jan. 2022, doi: 10.3390/FOODS11030336.
- [11] C. Buzzanca, V. Di Stefano, A. D’Amico, A. Gallina, and M. G. Melilli, “A systematic review on *Cynara cardunculus* L.: bioactive compounds, nutritional

- properties and food-industry applications of a sustainable food,” *Nat. Prod. Res.*, vol. 39, no. 22, pp. 6592–6611, Nov. 2025, doi: 10.1080/14786419.2024.2423046.
- [12] A. Cerulli, M. Masullo, A. Paolillo, C. Pizza, and S. Piacente, “Guaiane-type sesquiterpenes from Carciofo Bianco di Pertosa, a cultivar of *Cynara cardunculus* subsp. *scolymus* (L.), leaf: Isolation and evaluation of tyrosinase inhibitory activity,” *Fitoterapia*, vol. 191, p. 107262, Jun. 2026, doi: 10.1016/J.FITOTE.2026.107262.
- [13] J. Kukić *et al.*, “Antioxidant and antimicrobial activity of *Cynara cardunculus* extracts,” *Food Chem.*, vol. 107, no. 2, pp. 861–868, Mar. 2008, doi: 10.1016/J.FOODCHEM.2007.09.005.
- [14] L. Tortosa-Díaz, J. Saura-Martínez, A. Taboada-Rodríguez, G. B. Martínez-Hernández, A. López-Gómez, and F. Marín-Iniesta, “Influence of Industrial Processing of Artichoke and By-products on The Bioactive and Nutritional Compounds,” *Food Engineering Reviews 2025 17:2*, vol. 17, no. 2, pp. 384–407, Jan. 2025, doi: 10.1007/S12393-024-09391-5.
- [15] C. H. Barbosa, M. A. Andrade, F. Vilarinho, A. S. Silva, and A. L. Fernando, “Extension of Poultry Meat Shelf Life Using *Cynara cardunculus* L. Leaf Extracts as a Natural Preservative,” *Foods 2025, Vol. 14, Page 2592*, vol. 14, no. 15, p. 2592, Jul. 2025, doi: 10.3390/FOODS14152592.
- [16] T. K. Lim, “*Cynara cardunculus*,” *Edible Medicinal And Non-Medicinal Plants*, pp. 291–328, 2014, doi: 10.1007/978-94-007-7395-0_20.
- [17] A. I. Gostin and V. Y. Waisundara, “Edible flowers as functional food: A review on artichoke (*Cynara cardunculus* L.),” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 86, pp. 381–391, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.TIFS.2019.02.015.
- [18] C. Comino, A. Moglia, A. Repetto, and R. Tavazza, “Globe Artichoke Tissue Culture and Its Biotechnological Application,” pp. 41–64, 2019, doi: 10.1007/978-3-030-20012-1_3.
- [19] A. Zeb, “Concept of Antioxidants in Foods,” *Phenolic Antioxidants in Foods: Chemistry, Biochemistry and Analysis*, pp. 3–23, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-74768-8_1.
- [20] A. Łepecka and D. Kołożyn-Krajewska, “Antioxidant Properties of Food-Derived Lactic Acid Bacteria: A Review,” *Microb. Biotechnol.*, vol. 18, no. 9, p. e70229, Sep. 2025, doi: 10.1111/1751-7915.70229.

- [21] S. Dontha, "A REVIEW ON ANTIOXIDANT METHODS," vol. 9, 2016, doi: 10.22159/ajpcr.2016.v9s2.13092.
- [22] R. Kadi, "Étude théorique de l'effet de substitution d'un groupement OH par un halogène sur l'acide ascorbique," 2017, Accessed: May 16, 2026. [Online]. Available: <https://www.ummto.dz/dspace/bitstream/ummto/2223/1/Kadi%2C%20Rokia.pdf>
- [23] S. Savy, "Biosynthèse de caroténoïdes aromatiques hydroxylés par des bactéries non photosynthétiques: Des carotènes aux xanthophylles.," 2005, Accessed: May 16, 2026. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-00193188/>
- [24] Y. AL-Aloosy, A. AL-Tameemi, S. J.-P. Archives, and undefined 2019, "The role of enzymatic and non-enzymatic antioxidants in facing the environmental stresses on plant: a review," *researchgate.netYAM AL-Aloosy, AJH AL-Tameemi, SS JumaaPlant Archives, 2019•researchgate.net*, Accessed: May 16, 2026. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Yousif-Mahmood-3/publication/333557871_THE_ROLE_OF_ENZYMATIC_AND_NON-ENZYMATIC_ANTIOXIDANTS_IN_FACING_THE_ENVIRONMENTAL_STRESSES_ON_PLANT_A_REVIEW/links/5cf39782299b1fb1850362f/THE-ROLE-OF-ENZYMATIC-AND-NON-ENZYMATIC-ANTIOXIDANTS-IN-FACING-THE-ENVIRONMENTAL-STRESSES-ON-PLANT-A-REVIEW.pdf
- [25] T. Umumararungu *et al.*, "Proline, a unique amino acid whose polymer, polyproline II helix, and its analogues are involved in many biological processes: a review," *Amino Acids* 2024 56:1, vol. 56, no. 1, pp. 50-, Aug. 2024, doi: 10.1007/S00726-024-03410-9.
- [26] Y. Lu, L. Lin, and J. Ye, "Human metabolite detection by surface-enhanced Raman spectroscopy," *Mater. Today Bio*, vol. 13, p. 100205, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MTBIO.2022.100205.
- [27] L. Zhaogao, W. Yaxuan, X. Mengwei, L. Haiyu, L. Lin, and X. Delin, "Molecular mechanism overview of metabolite biosynthesis in medicinal plants," *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 204, p. 108125, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.PLAPHY.2023.108125.
- [28] J. N. Kabera, E. Semana, A. R. Mussa, and X. He, "Plant Secondary Metabolites: Biosynthesis, Classification, Function and Pharmacological Properties," *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, vol. 2, pp. 377–392, 2014.

- [29] R. Tiwari and C. S. Rana, “Plant secondary metabolites: a review,” *International Journal of Engineering Research and General Science*, vol. 3, no. 5, Accessed: May 16, 2026. [Online]. Available: www.ijergs.org
- [30] P. Perrone and S. D’Angelo, “Hormesis and health: molecular mechanisms and the key role of polyphenols,” *Food Chemistry Advances*, vol. 7, p. 101030, Jun. 2025, doi: 10.1016/J.FOCHA.2025.101030.
- [31] T. G. Bas, “Dietary Polyphenols (Flavonoids) Derived from Plants for Use in Therapeutic Health: Antioxidant Performance, ROS, Molecular Mechanisms, and Bioavailability Limitations,” *International Journal of Molecular Sciences* 2026, Vol. 27, Page 1404, vol. 27, no. 3, p. 1404, Jan. 2026, doi: 10.3390/IJMS27031404.
- [32] N. V. Zagorskina *et al.*, “Polyphenols in Plants: Structure, Biosynthesis, Abiotic Stress Regulation, and Practical Applications (Review),” *International Journal of Molecular Sciences* 2023, Vol. 24, Page 13874, vol. 24, no. 18, p. 13874, Sep. 2023, doi: 10.3390/IJMS241813874.
- [33] H. Gong, H. Zhang, Y. Liu, X. Mao, and J. Wang, “Role and mechanisms of plant polyphenols in ovarian aging,” *Journal of Ovarian Research* 2025 18:1, vol. 18, no. 1, pp. 239–, Nov. 2025, doi: 10.1186/S13048-025-01799-9.
- [34] M. Abbas *et al.*, “Natural polyphenols: An overview,” *Int. J. Food Prop.*, vol. 20, no. 8, pp. 1689–1699, Aug. 2017, doi: 10.1080/10942912.2016.1220393.
- [35] G. Pandino, S. Lombardo, G. Williamson, and G. Mauromicale, “Polyphenol Profile and Content in Wild and Cultivated *Cynara Cardunculus* L.,” *Italian Journal of Agronomy*, vol. 7, no. 3, p. e35, Jan. 2012, doi: 10.4081/IJA.2012.E35.
- [36] P. Van Huyen *et al.*, “The genus *Cynara*: the potential of valuable natural compounds—insights from phytochemistry and pharmacological activities,” *Genetic Resources and Crop Evolution* 2026 73:4, vol. 73, no. 4, pp. 156–, Mar. 2026, doi: 10.1007/S10722-026-02775-Y.
- [37] Y. Ji *et al.*, “Beyond the promise: Exploring the complex interactions of nanoparticles within biological systems,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 468, p. 133800, Apr. 2024, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2024.133800.
- [38] A. Dhaka, S. Chand Mali, S. Sharma, and R. Trivedi, “A review on biological synthesis of silver nanoparticles and their potential applications,” *Results Chem.*, vol. 6, p. 101108, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.RECHEM.2023.101108.

- [39] Y. Khan *et al.*, “Classification, Synthetic, and Characterization Approaches to Nanoparticles, and Their Applications in Various Fields of Nanotechnology: A Review,” *Catalysts* 2022, Vol. 12, Page 1386, vol. 12, no. 11, p. 1386, Nov. 2022, doi: 10.3390/CATAL12111386.
- [40] F. Greco *et al.*, “Reprotoxicité des nanoparticules,” *Gynecol. Obstet. Fertil.*, vol. 43, no. 1, pp. 49–55, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.GYOBFE.2014.11.014.
- [41] S. Ying *et al.*, “Green synthesis of nanoparticles: Current developments and limitations,” *Environ. Technol. Innov.*, vol. 26, p. 102336, May 2022, doi: 10.1016/J.ETI.2022.102336.
- [42] F. Arshad *et al.*, “Bioinspired and Green Synthesis of Silver Nanoparticles for Medical Applications: A Green Perspective,” *Applied Biochemistry and Biotechnology* 2023 196:6, vol. 196, no. 6, pp. 3636–3669, Sep. 2023, doi: 10.1007/S12010-023-04719-Z.
- [43] H. M. Abuzeid, C. M. Julien, L. Zhu, and A. M. Hashem, “Green Synthesis of Nanoparticles and Their Energy Storage, Environmental, and Biomedical Applications,” *Crystals* 2023, Vol. 13, Page 1576, vol. 13, no. 11, p. 1576, Nov. 2023, doi: 10.3390/CRYST13111576.
- [44] K. Deka *et al.*, “Understanding the mechanism underlying the green synthesis of metallic nanoparticles using plant extract(s) with special reference to Silver, Gold, Copper and Zinc oxide nanoparticles,” *Hybrid Advances*, vol. 9, p. 100399, Jun. 2025, doi: 10.1016/J.HYBADV.2025.100399.
- [45] A. A. Vodyashkin, P. Kezimana, F. Y. Prokonov, I. A. Vasilenko, and Y. M. Stanishevskiy, “Current Methods for Synthesis and Potential Applications of Cobalt Nanoparticles: A Review,” *Crystals* 2022, Vol. 12, Page 272, vol. 12, no. 2, p. 272, Feb. 2022, doi: 10.3390/CRYST12020272.
- [46] P. Nie, Y. Zhao, and H. Xu, “Synthesis, applications, toxicity and toxicity mechanisms of silver nanoparticles: A review,” *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 253, p. 114636, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.ECOENV.2023.114636.
- [47] J. J. Park and E. M. Faustman, “Silver nanoparticle (AgNP), neurotoxicity, and putative adverse outcome pathway (AOP): A review,” *Neurotoxicology*, vol. 108, pp. 11–27, May 2025, doi: 10.1016/J.NEURO.2025.02.001.
- [48] N. T.K. *et al.*, “Robust Ag-Co bimetallic nanoparticles: Dual role in catalytic and triboelectric performance,” *Mater. Res. Bull.*, vol. 180, p. 113061, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.MATERRESBULL.2024.113061.

- [49] S. Vijayaram *et al.*, “Applications of Green Synthesized Metal Nanoparticles — a Review,” *Biol. Trace Elem. Res.*, vol. 202, no. 1, p. 1, Jan. 2023, doi: 10.1007/S12011-023-03645-9.
- [50] A. Bouafia *et al.*, “The Recent Progress on Silver Nanoparticles: Synthesis and Electronic Applications,” *Nanomaterials 2021, Vol. 11, Page 2318*, vol. 11, no. 9, p. 2318, Sep. 2021, doi: 10.3390/NANO11092318.
- [51] N. Shehata, S. Singh, R. Varshney, D. Singh Dhanjal, and P. C. Ramamurthy, “Plant-extract-mediated synthesis of copper oxide nanoparticles for sustainable lead detoxification: experimental evaluation and docking studies,” *pubs.rsc.orgN Shehata, S Singh, R Varshney, DS Dhanjal, PC RamamurthyNanoscale Advances, 2026•pubs.rsc.org*, 2026, doi: 10.1039/d5na01027f.
- [52] I. A. Baba *et al.*, “Influence of plant-derived extracts on the synthesis, physico-chemical properties, and applications of metal and metal oxide nanoparticles,” *Hybrid Advances*, vol. 13, p. 100666, Jun. 2026, doi: 10.1016/J.HY-BADV.2026.100666.
- [53] M. A. Fareid *et al.*, “Plant-mediated green synthesis of selenium nanoparticles using *Schinus molle* (L.) leaf extract: Antimicrobial activity against MRSA, anti-virulence properties, and anticancer potential,” *Microb. Pathog.*, vol. 216, p. 108509, Jul. 2026, doi: 10.1016/J.MICPATH.2026.108509.
- [54] B. Cardoso, G. Nobrega, I. S. Afonso, J. E. Ribeiro, and R. A. Lima, “Sustainable green synthesis of metallic nanoparticle using plants and microorganisms: A review of biosynthesis methods, mechanisms, toxicity, and applications,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 13, no. 3, p. 116921, Jun. 2025, doi: 10.1016/J.JECE.2025.116921.
- [55] C. Verma, A. R. Pathania, I. Barsoum, K. Y. Rhee, Y. Qiang, and A. Alfantazi, “Coordination chemistry in corrosion science and engineering: Role of coordination bonding and coordination materials,” *Coord. Chem. Rev.*, vol. 549, p. 217258, Feb. 2026, doi: 10.1016/J.CCR.2025.217258.
- [56] R. W. Revie and H. H. Uhlig, “Corrosion and Corrosion Control(Fifth Edition),” 2025, Accessed: May 17, 2026. [Online]. Available: https://books.google.com/books/about/Corrosion_and_Corrosion_Control.html?hl=fr&id=GaNfEQAAQBAJ

- [57] S. Kumar, S. Harsimran, K. Santosh, and K. Rakesh, "OVERVIEW OF CORROSION AND ITS CONTROL: A CRITICAL REVIEW," vol. 03, no. 1, pp. 13–24, 2021, doi: 10.24874/PES03.01.002.
- [58] B. Samah, "Étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier en milieu acide par l'extrait des plantes," *archives.univ-biskra.dzBENC Samaharchives.univ-biskra.dz*, Accessed: May 17, 2026. [Online]. Available: http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/27673/1/benchennaf_samah.pdf
- [59] T. Silaban, ... A. S.-J. of the C., and undefined 2026, "Types, mechanisms, and efficiency rate of galvanized steel as corrosion protection in atmospheric corrosion: A systematic review," *researchgate.netTOJ Silaban, AF Setiawan, S Siswosukarto, A Wiranata, RA Putra, G Priyotomo, SA KudusJournal of the Civil Engineering Forum, 2026•researchgate.net*, Accessed: May 17, 2026. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Angga-Setiawan-5/publication/403024572_Types_Mechanisms_and_Efficiency_Rate_of_Galvanized_Steel_as_Corrosion_Protection_in_Atmospheric_Corrosion_A_Systematic_Review/links/69c002303c61894306696fa9/Types-Mechanisms-and-Efficiency-Rate-of-Galvanized-Steel-as-Corrosion-Protection-in-Atmospheric-Corrosion-A-Systematic-Review.pdf
- [60] B. Med, I. & Guendafa, and Y. Idir, "étude de l'effet inhibiteur decorrosion de l'huile essentielle de ruta chalepensis," 2021, Accessed: Jun. 19, 2026. [Online]. Available: <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/27477>
- [61] O. D.-Anticorros. Nanomater. Futur. Perspect and undefined 2022, "An overview of corrosion," *books.google.comO DAGDAGAnticorros. Nanomater. Futur. Perspect, 2022•books.google.com*, Accessed: May 17, 2026. [Online]. Available: [https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=GK5wE-AAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA44&dq=DAGDAG,+O.+\(2022\).+An+overview+of+corrosion.+Anticorros.+Nanomater.+Futur.+Perspect,+56,+44.&ots=X0VNghWyuy&sig=PyseMjLx57ZP0-46_T1oZjbb4gw](https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=GK5wE-AAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA44&dq=DAGDAG,+O.+(2022).+An+overview+of+corrosion.+Anticorros.+Nanomater.+Futur.+Perspect,+56,+44.&ots=X0VNghWyuy&sig=PyseMjLx57ZP0-46_T1oZjbb4gw)
- [62] D. I. Răuță, E. Matei, and S. M. Avramescu, "Recent Development of Corrosion Inhibitors: Types, Mechanisms, Electrochemical Behavior, Efficiency, and Environmental Impact," *Technologies 2025, Vol. 13, Page 103*, vol. 13, no. 3, p. 103, Mar. 2025, doi: 10.3390/TECHNOLOGIES13030103.

- [63] B. R. Holla, R. Mahesh, H. R. Manjunath, and V. R. Anjanapura, "Plant extracts as green corrosion inhibitors for different kinds of steel: A review," *Heliyon*, vol. 10, no. 14, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.HELIYON.2024.E33748.
- [64] A. A. Al-Amiery, W. N. R. W. Isahak, and W. K. Al-Azzawi, "Corrosion Inhibitors: Natural and Synthetic Organic Inhibitors," *Lubricants 2023, Vol. 11, Page 174*, vol. 11, no. 4, p. 174, Apr. 2023, doi: 10.3390/LUBRICANTS11040174.
- [65] M. R. Vegi, "Quinoxaline derivatives as eco-friendly corrosion inhibitors for steel and non-ferrous metals: A comprehensive review," *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 20, p. 100620, Aug. 2025, doi: 10.1016/J.RSURFI.2025.100620.
- [66] C. Dariva, A. G.-D. in corrosion protection, and undefined 2014, "Corrosion inhibitors—principles, mechanisms and applications," *books.google.comCG Dariva, AF GalioDevelopments in corrosion protection, 2014•books.google.com*, Accessed: May 17, 2026. [Online]. Available: [https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=MSqhDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA365&dq=Dariva,+C.+G.,+%26+Galio,+A.+F.+\(2014\).+Corrosion+inhibitors%E2%80%93principles,+mechanisms+and+applications.+Developments+in+corrosion+protection,+16,+365-378.&ots=f10MdFRtTW&sig=aahcf7jc6zG_W_eoEAIE-xzVH0s](https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=MSqhDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA365&dq=Dariva,+C.+G.,+%26+Galio,+A.+F.+(2014).+Corrosion+inhibitors%E2%80%93principles,+mechanisms+and+applications.+Developments+in+corrosion+protection,+16,+365-378.&ots=f10MdFRtTW&sig=aahcf7jc6zG_W_eoEAIE-xzVH0s)
- [67] J. Aslam *et al.*, "Navigating practical challenges and implementing solutions of green corrosion inhibitors: A directive review," *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 24, p. 100791, Aug. 2026, doi: 10.1016/J.RSURFI.2026.100791.
- [68] S. SAIM, "Devenir des produits pharmaceutiques en relation avec le traitement des eaux usées," Apr. 2025, Accessed: May 17, 2026. [Online]. Available: <http://dspace.univ-mascara.dz:8080/jspui/handle/123456789/1210>
- [69] A. Othmani, "Smart Wastewater Management and Resource Recovery," *Waste Engineering and Management*, pp. 207–217, 2026, doi: 10.1007/978-3-032-15915-1_10.
- [70] G. Karia, R. Christian, and N. JARIWALA, "Wastewater treatment: Concepts and design approach," 2023, Accessed: May 17, 2026. [Online]. Available: [https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=plzjEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=P1&dq=Karia,+G.+L.,+Christian,+R.+A.,+%26+JARIWALA,+N.+D.+\(2023\).+Wastewater+treatment:+Concepts+and+design+approach.+PHI+Learning+Pvt.+Ltd&ots=IYvgC49I0t&sig=WjZcRmq3qgG8blg443txFsy3su0](https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=plzjEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=P1&dq=Karia,+G.+L.,+Christian,+R.+A.,+%26+JARIWALA,+N.+D.+(2023).+Wastewater+treatment:+Concepts+and+design+approach.+PHI+Learning+Pvt.+Ltd&ots=IYvgC49I0t&sig=WjZcRmq3qgG8blg443txFsy3su0)

- [71] V. J. Taguchi *et al.*, “It Is Not Easy Being Green: Recognizing Unintended Consequences of Green Stormwater Infrastructure,” *Water* 2020, Vol. 12, Page 522, vol. 12, no. 2, p. 522, Feb. 2020, doi: 10.3390/W12020522.
- [72] M. N. Abonyi, C. C. Obi, J. T. Nwabanne, and C. O. Aniagor, “Emerging and ecofriendly biological methods for agricultural wastewater treatment,” *Environmental Systems Research* 2024 13:1, vol. 13, no. 1, pp. 45-, Oct. 2024, doi: 10.1186/S40068-024-00373-4.
- [73] J. Shamshad and R. Ur Rehman, “Innovative approaches to sustainable wastewater treatment: a comprehensive exploration of conventional and emerging technologies,” *Environmental Science: Advances*, vol. 4, no. 2, pp. 189–222, Feb. 2025, doi: 10.1039/D4VA00136B.
- [74] M. K. Wimalasena *et al.*, “In-vitro evaluation of synthetic dye decolourisation by filamentous ascomycetous fungi isolated from freshwater environments in Sri Lanka and development of a prototype for addressing environmental pollution from synthetic dye contamination,” *Front. Cell. Infect. Microbiol.*, vol. 15, p. 1650835, Oct. 2025, doi: 10.3389/FCIMB.2025.1650835/FULL.
- [75] R. Dadashi, M. Nouri, M. Bahram, and K. Akbari Dilmaghani, “Fabrication of synergistic calix[4]arene–PVC–MWCNT–graphite films for fast and sustainable adsorption of dye pollution,” *Scientific Reports* 2025 15:1, vol. 15, no. 1, pp. 44377-, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-28147-7.
- [76] N. H. Adenan, Y. Y. Lim, and A. S. Y. Ting, “Removal of triphenylmethane dyes by *Streptomyces bacillaris*: A study on decolorization, enzymatic reactions and toxicity of treated dye solutions,” *J. Environ. Manage.*, vol. 318, p. 115520, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2022.115520.
- [77] C. T. Umeh *et al.*, “Recent approach in the application of nanoadsorbents for malachite green (MG) dye uptake from contaminated water: A critical review,” *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.*, vol. 20, p. 100891, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.ENMM.2023.100891.
- [78] D. Liu, L. Liu, P. Yin, Y. Tian, and J. Zhang, “Roles of dissolved organic matter, Cl[−], and NO₃[−] in the photodegradation of β -estradiol in seawater,” *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 228, p. 119595, Jul. 2026, doi: 10.1016/J.MARPOLBUL.2026.119595.
- [79] J. Dai, Y. Wu, Y. Yao, and B. Zhang, “Constructing a porous CuO/TiO₂ heterojunction catalyst for enhanced photodegradation of dyes in wastewater,” *Journal*

of Physics and Chemistry of Solids, vol. 213, p. 113597, Jun. 2026, doi:
10.1016/J.JPCS.2026.113597.

Chapitre II :

Méthodes et matériel utilisés



II.1. Introduction

Ce chapitre présente les matériaux et les réactifs chimiques utilisés, ainsi que les différentes méthodes et techniques expérimentales employées dans cette étude. La partie consacrée à la biosynthèse des nanoparticules et à l'étude de leur activité photocatalytique a été réalisée au laboratoire d'ingénierie des procédés et au laboratoire de recherche de l'université du 20 août 1955 à Skikda, tandis que les expériences d'étude de la corrosion ont été menées à l'université du 8 mai 1945 à Guelma.

Ce travail vise à valoriser l'extrait de cardon sauvage (*Cynara cardunculus*) à travers deux applications principales. La première application consiste en la biosynthèse verte de nanoparticules métalliques (Ag/Co) à l'aide de l'extrait végétal comme agent réducteur et stabilisateur, puis leur utilisation pour l'élimination des polluants organiques colorés par photodégradation catalytique. La deuxième application consiste à étudier l'efficacité de l'extrait de *Cynara cardunculus* en tant qu'inhibiteur de corrosion écologique et agent de protection des métaux en milieu acide.

Le travail expérimental a été organisé autour de quatre axes principaux :

Premier axe : collecte et préparation de la plante *Cynara cardunculus* et extraction de ses composés actifs.

Deuxième axe : la biosynthèse de nanoparticules métalliques à partir de l'extrait végétal et leur caractérisation à l'aide de différentes techniques physiques et chimiques.

Axe 3 : Étude de l'efficacité des nanoparticules préparées dans la photodégradation catalytique des colorants organiques.

Axe 4 : Étude du comportement à la corrosion et évaluation de l'efficacité de l'extrait de *Cynara cardunculus* en tant qu'inhibiteur de corrosion écologique par des techniques électrochimiques.

II. 2. Matériels et méthodes

Tableau II.1. Les appareils utilisés et les produits chimiques et matériel de laboratoire

Produits	Les appareils utilisés	Matériel de laboratoire
- Eau distillée - Éthanol - Acide acétique $AgNO_3$ $CoNO_3$ - NaOH	- Balance électrique - Agitateur magnétique - Pompe à filtre - Appareil Soxhlet - L'étuve statique - Appareil centrifugeuse	- Béchers. - Verre de montre. - Spatula. - Entonnoir. - Erlenmeyer. - Barreau manétique. - Fioles et pipettes

• Poudre de Cynara cardunculus • Acier	• Appareil spectroscopie UV • Un Rotavapeur	• Papier filtre • Eprouvettes
---	--	--

II.3. Récolte manuelle et préparation des plantes

✚ La matière végétale utilisée dans cette étude était issue de la plante *Cynara cardunculus*, récoltée à la main dans l'ouest de la province de Skikda, plus précisément dans la région de Zitouna.

✚ La plante est bien lavée à l'eau du robinet, puis à l'eau distillée pour éliminer les impuretés et la poussière. Puis laissez bien sécher dans un endroit sombre (éviter le soleil pour ne pas perdre ses propriétés) pendant 20 jours à température ambiante. Après le séchage, le matériel végétal a été broyé jusqu'à l'obtention d'une poudre.

II.4. Préparation de l'extrait de plante

✚ Extrait d'éthanol

- Nous préparons une solution en mélangeant 240 ml d'éthanol avec 60 ml d'eau distillée dans un bécher de 500 ml de verre.
- Nous diminuons 1 ml de solution, on ajoute 1 ml d'acide acétique à la solution.
- Dans l'appareil de Soxhlet, nous mettons 20 g de la plante avec la solution préparée pendant 2 h.
- Nous séparons complètement L'extrait du solvant est séparé entièrement par un appareil rotavapeur.
- Ensuite on met l'extrait à sécher dans l'étuve.

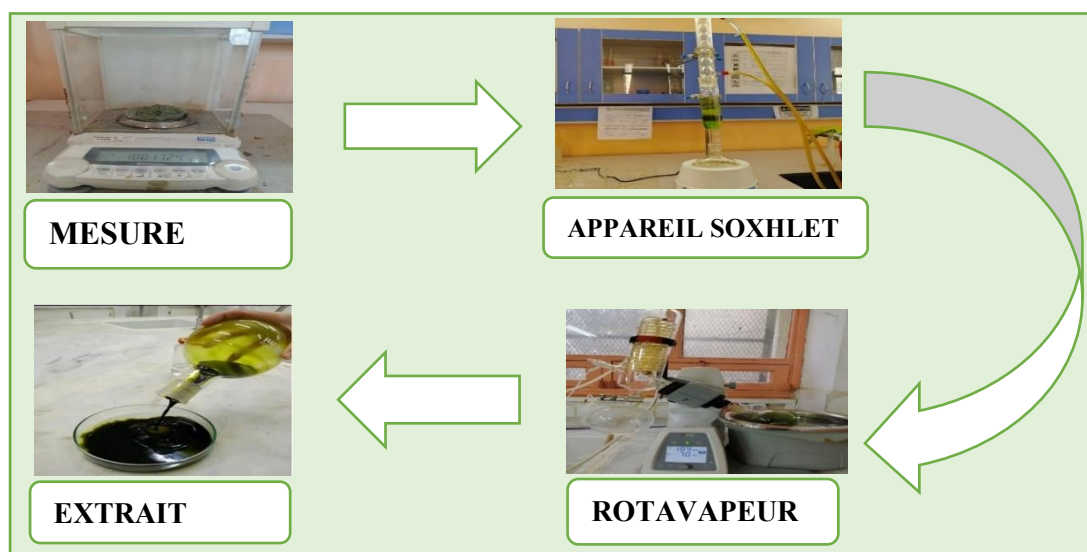


Figure II.1. Extraction des feuilles et des tiges de *Cynara cardunculus*.

✚ Extrait d'eau

- Nous mettons 20 g de la plante avec 1000 ml d'eau distillée dans un bécher de 2000 ml de verre.
- On fait une agitation magnétique avec chauffage pendant une heure.
- L'extrait a été filtré par pompe et papier filtre.
- Ensuite on met l'extrait à sécher dans l'étuve.

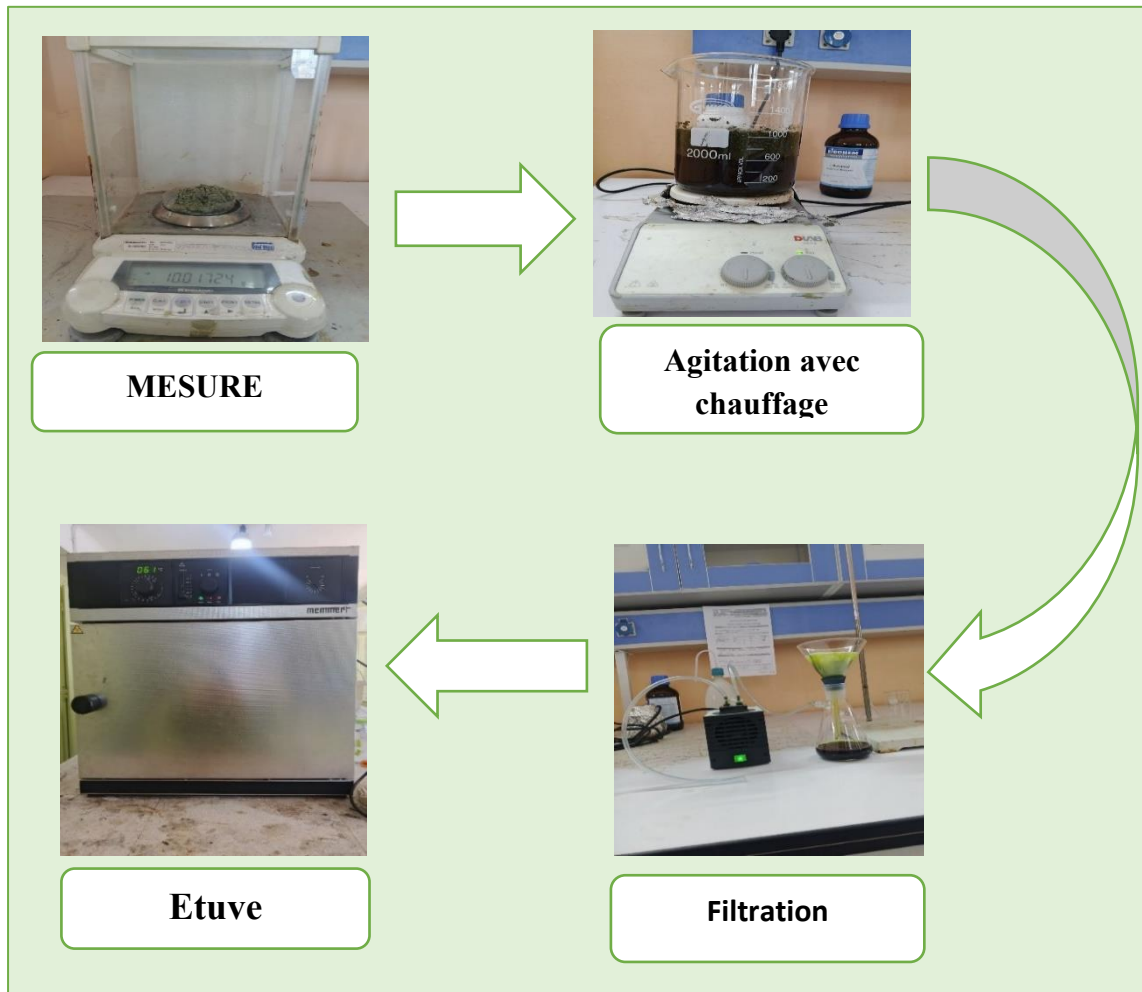


Figure II.2. Extraction d'eau des feuilles et des tiges de *Cynara cardunculus*.

II.5. Préparation des NPs (Ag/CoO)

✚ Étape 1 :

- Dans un bécher de 1000 ml, nous mettons 5 g d'extrait éthanol, on ajoute 500 ml d'eau distillée.
- Agitation pendant 15 min avec chauffage.

✚ Étape 2 :

- Dans un bécher de 2000 ml, nous mettons 3,39 g d'AgNO₃ et 23,28 g de CoNO₃ ; on ajoute 1000 ml d'eau distillée.

- Agitation pendant 15 min avec chauffage.

+ Étape 3 :

- Prendre des béchers (1) 500 ml et 1000 ml de bécher (2).
- Mélanger dans un bécher de verre de 2000 ml pendant 15 minutes avec chauffage.

+ Étape 4 :

- Mélanger 80 g de NaOH + l'eau distillée dans une fiole de 1000 ml.
- Titrer le premier mélange (étape 3) à partir de la solution NaOH goutte à goutte jusqu'à ce que le couleur change vers le noir et que les NPs se forment.
- On laisse le mélange décanté.
- On sépare l'eau à propos du mélange.
- Stockage extrait (Ag+ Co) avec température 80 °C jusqu'à 24 H.

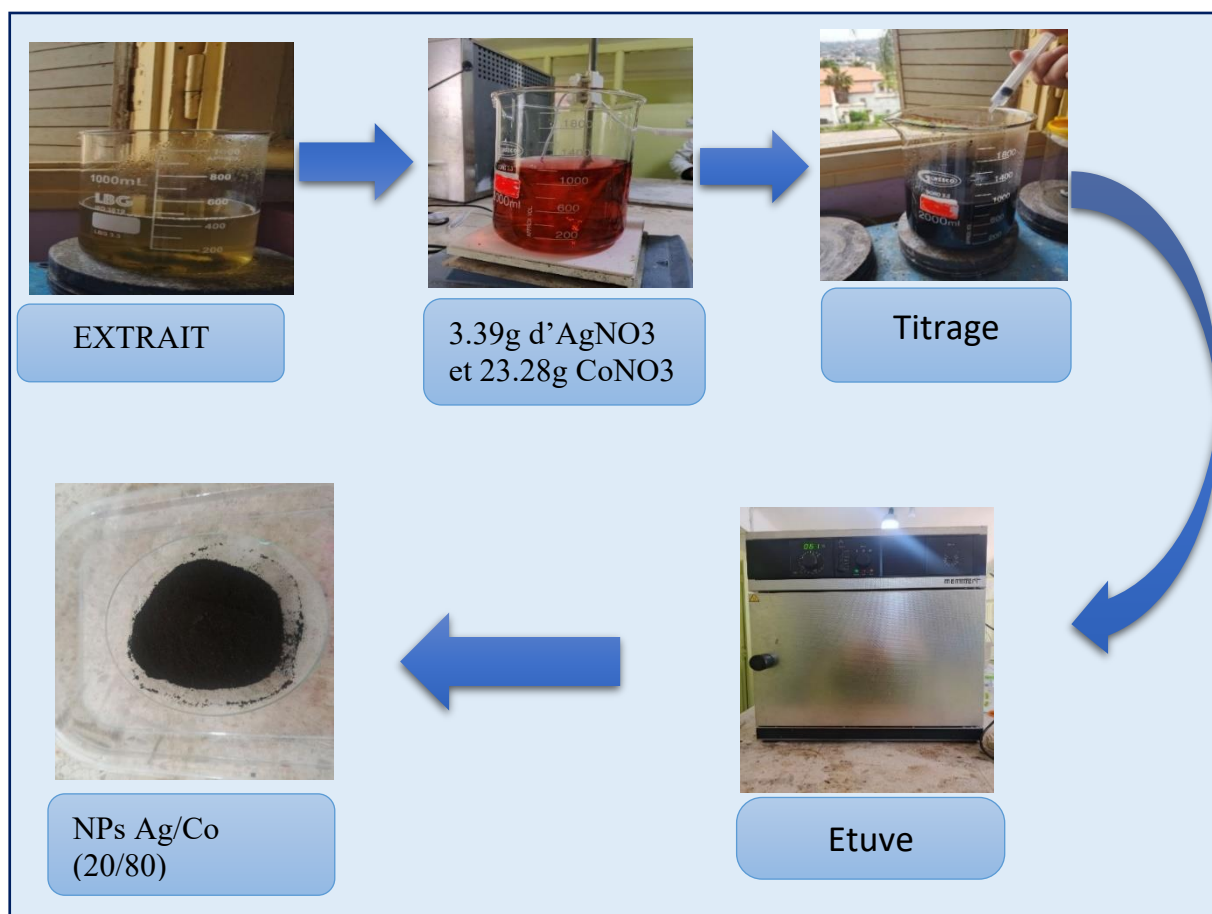


Figure II.3. Étapes de préparation des NPs Ag/Co

II.6. Application des nanoparticules

+ Évaluation de l'activité photodégradation

Pour évaluer l'activité photodégradation des nanoparticules (Ag/Co) obtenues, nous avons suivi la dégradation du colorant vert malachite (VM) comme suit :

❖ Étape 1

- Nous préparons une solution mère (SM) à concentration de 300 ppm (par l'ajout de 0,3 g de VM dans 1 L d'eau distillée).
- Nous diminuons les concentrations suivantes :
 - 15 ppm (prendre 50 ml de SM et ajouter l'eau distillée jusqu'au trait de jauge). Solution 1
 - 9 ppm (prendre 30 ml de SM ET en ajouter l'eau distillée jusqu'au trait de jauge). Solution 2
 - 30 ppm (prendre 100 ml de SM et ajouter l'eau distillée jusqu'au trait de jauge). Solution 3
 - 24 ppm (prendre 80 ml de SM ET ajouter l'eau distillée jusqu'au trait de jauge). Solution 4

❖ Étape 2

Dégradation par NPs de (Ag/Co) (20/80)

- Verser 200 ml (solution 2) de la solution 15 ppm dans un bécher.
- On ajoute 0,2 g des NPs de mélange avec la solution 1 dans un agitateur.
- On agit pendant une durée de 30 minutes. Dans une chambre sombre en prenant un échantillon chaque 5 minutes.
- On procède ensuite à une irradiation (sous les rayons du soleil) et on prélève les échantillons restants toutes les dix minutes pendant une heure, et nous avons suivi la dégradation durant cette période.
- On a directement introduit les échantillons dans la centrifugeuse afin de séparer les particules du liquide.
- On a mesuré le taux de dégradation du colorant en utilisant un spectrophotomètre UV Vis (1800 SHIMADZU).

On a répété les mêmes étapes avec les masses : 0.1g et 0.3g d'Ag/Co (15 ppm)

On a répété les mêmes étapes avec les concentrations : 9 ppm, 24 ppm et 30 ppm (0.2g d'Ag/Co).

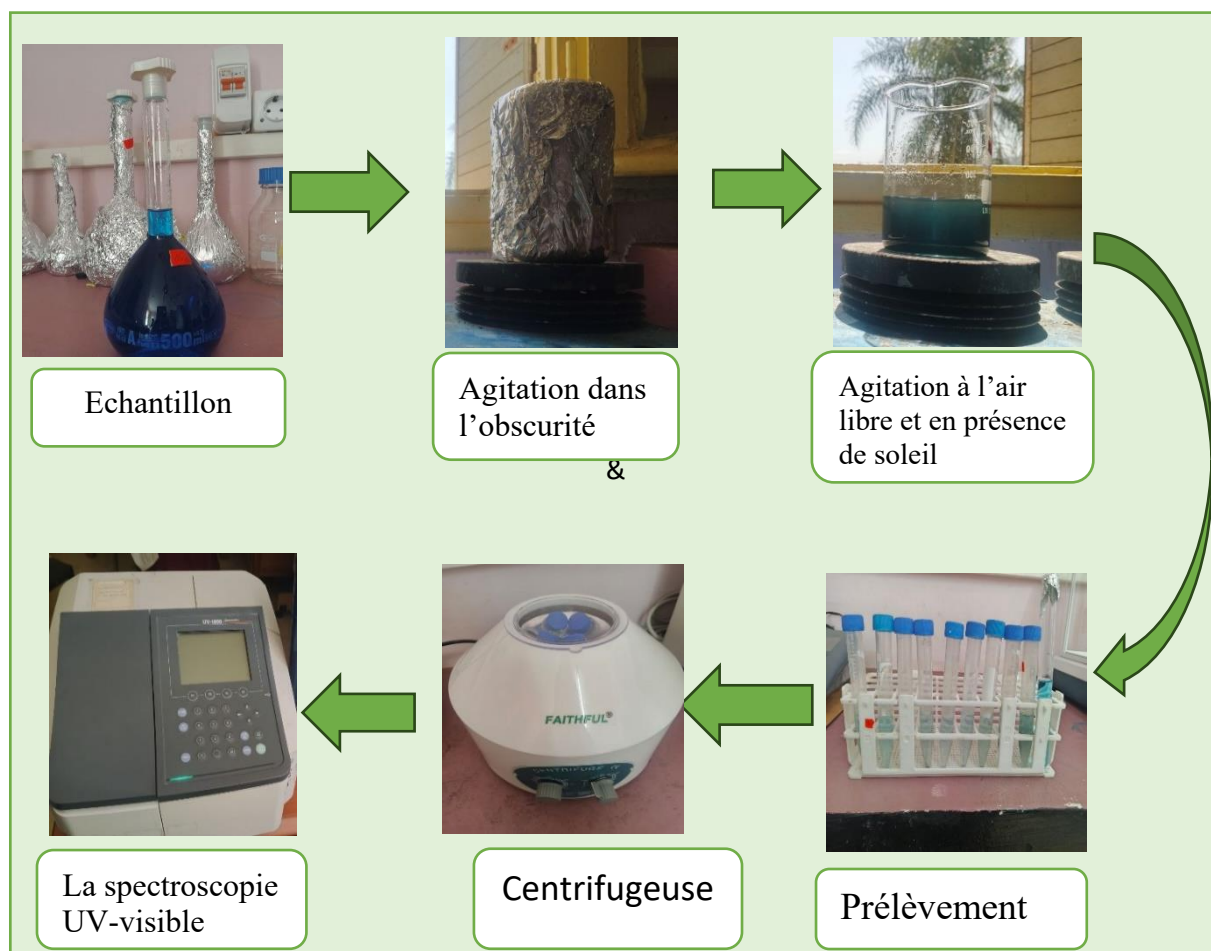


Figure II.4. Dégradation de vert malachite (15 ppm) en présence de 0,2 g d'Ag/Co

🔧 Dégradation par NPs de (Ag/Co) (20/80) avec température

- Verser 200 ml (solution 2) de la solution 15 ppm dans un bécher.
- On ajoute 0,2 g des NPs de mélange avec la solution 1 dans un agitateur.
- Avant de commencer l'agitation, nous avons réglé la température à 40 °C et l'avons surveillée à l'aide d'un thermomètre, en la maintenant constante tout au long de l'expérience.
- On agit pendant une durée de 30 minutes. Dans une chambre sombre en prenant un échantillon chaque 5 minutes.
- On procède ensuite à une irradiation (sous les rayons du soleil) et on prélève les échantillons restants toutes les dix minutes pendant une heure, et nous avons suivi la dégradation durant cette période.
- On a directement introduit les échantillons dans la centrifugeuse afin de séparer les particules du liquide.

- On a mesuré le taux de dégradation du colorant en utilisant un spectrophotomètre UV Vis (1800 SHIMADZU).

On a répété les mêmes étapes avec $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

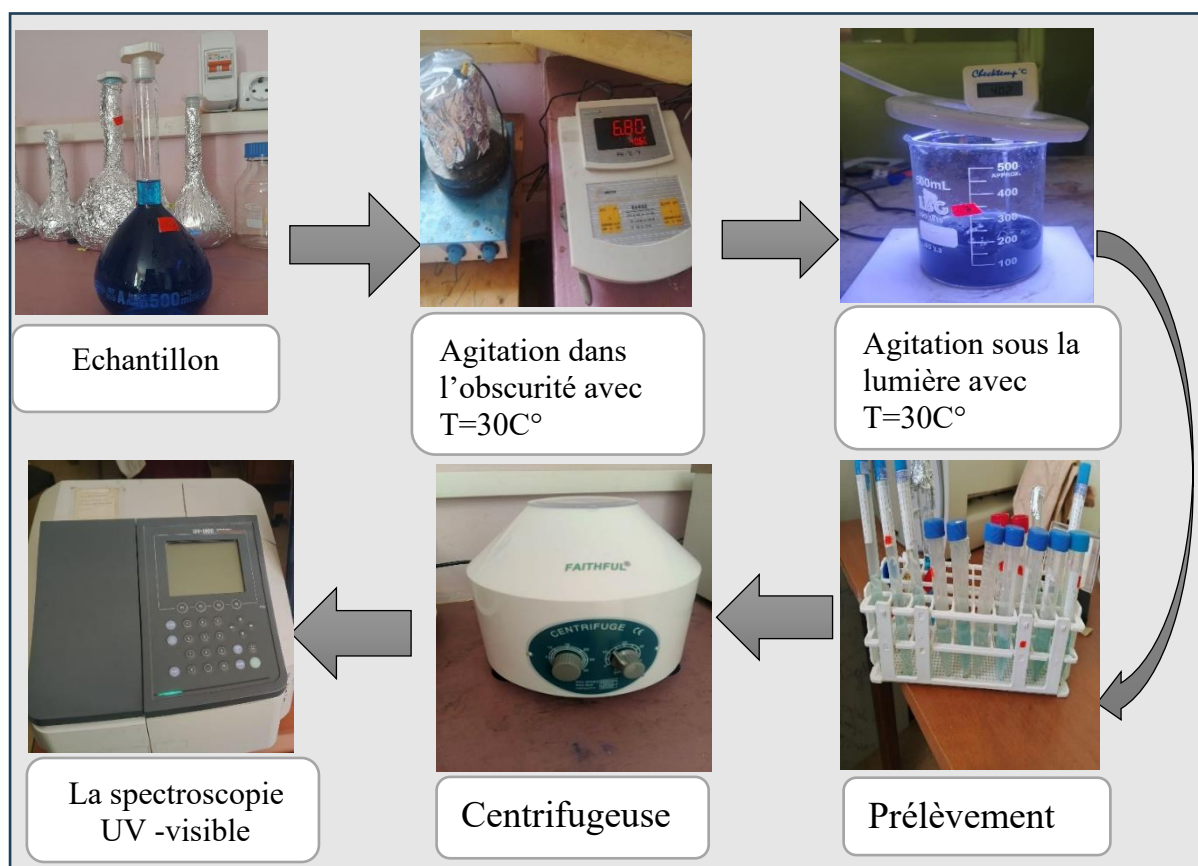


Figure II.5. Dégradation de vert malachite (15 ppm) en présence de 0,2 g d'Ag/Co et $T = 30^{\circ}\text{C}$.

II.7. Étude de l'inhibition de la corrosion

II.7.1. Étude électrochimique

II.7.1.1 Matière étudiée

Le matériau utilisé dans cette étude est un acier au carbone de type C1020, provenant de la raffinerie Sonatrach de Skikda. Cet acier se caractérise par une composition chimique qui détermine ses performances dans différents milieux, notamment en ce qui concerne le phénomène de corrosion. Cette composition est présentée dans le tableau suivant

Tableau II.2. Composition chimique de l'acier C1020

Éléments	%
Fe	98,26
Mn	0,48

Cu	0,23
Ni	0,15
Cr	0.09
Ti	0,03
Mo	0,03
Nb	0,00

II.7.1.2. Préparation des échantillons

- Nous avons découpé des échantillons d'acier au carbone C1020 en carrés de 1 cm × 1 cm.
- Nous avons poncé progressivement la surface des échantillons à l'aide de feuilles abrasives de grains de plus en plus fins (200, 400, 800, 1 000 et 1 200) afin d'obtenir une surface lisse et homogène.
- Nous avons ensuite lavé les échantillons à l'eau distillée pour éliminer les impuretés.
- Enfin, nous les avons bien séchés avant de les utiliser.

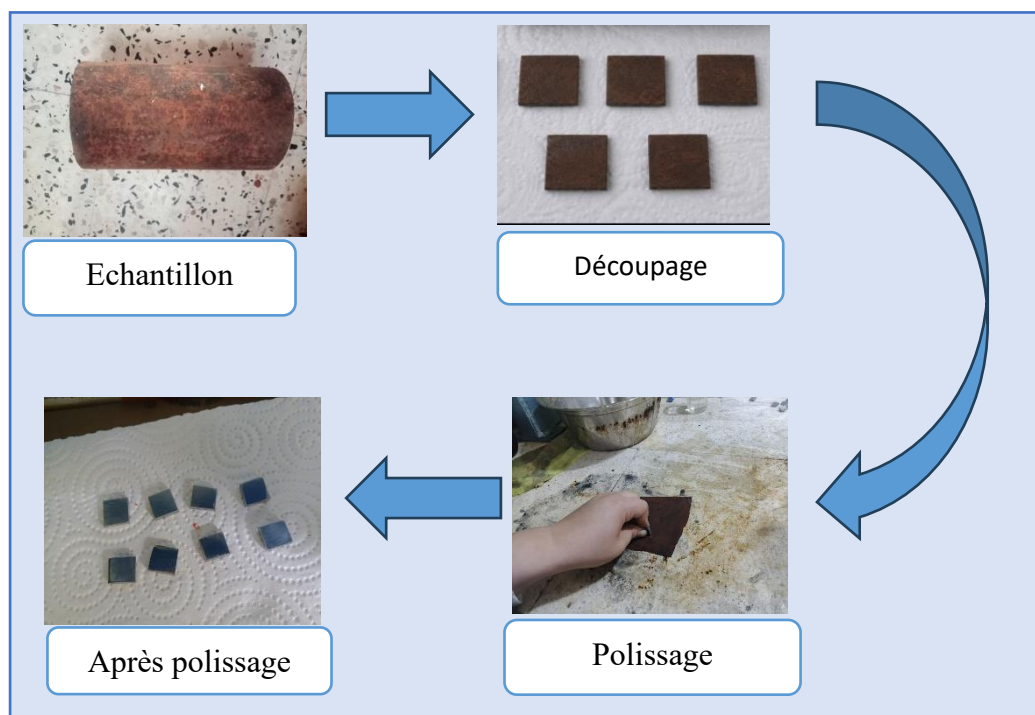


Figure II.6. Préparation des échantillons

II.7.1.3. Cellule, montage et électrolyte

Toutes les expériences électrochimiques ont été réalisées dans une cellule en verre pyrex d'une capacité de 75 ml à double paroi avec solution électrolytique immergée.

Trois électrodes : électrode de référence (électrode Ag/AgCl), électrode de travail (acier 1020), et une contre-électrode (électrode de platine).

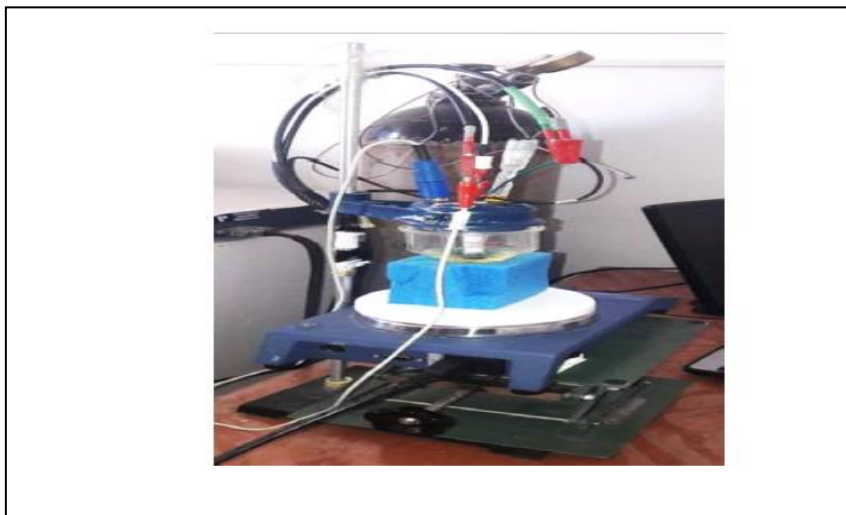


Figure II.7. Cellule électrochimique à trois électrodes [LAIGM] [Laboratoire d'Analyse Industrielle et de Génie des Matériaux, Université du 8 Mai 1945 Guelma, BP 401, Guelma 24000, Algérie]

L'électrode de l'acier au carbone a une surface de 1 cm^2 . La cellule électrochimique était une cellule en verre à trois électrodes, avec une contre-électrode en platine et une électrode de référence Ag/AgCl. Pour avoir une bonne reproductibilité des mesures, il est nécessaire d'avoir un état de surface bien propre. C'est pour cette raison que la surface de nos échantillons a subi un polissage mécanique par frottement sur papiers abrasifs de granulométrie croissante allant de 100/250/300/400/600/800/1000 à la granulométrie la plus fine, 1200, suivi d'un rinçage à l'eau distillée, puis d'un séchage.

Toutes les mesures électrochimiques ont été effectuées à l'aide d'un potentiostat/galvanostat 273A (Princeton Applied Research) ou d'un potentiostat/galvanostat VersaSTAT 3 (Princeton Applied Research, AMETEK, USA), ce dernier ayant été spécialement utilisé pour réaliser la spectroscopie d'impédance électrochimique (SEI).

Les expériences de polarisation ont été réalisées en utilisant un taux de balayage de $10 \text{ mV} / \text{s}$. En fait, le potentiel de mesure était entre -1200 et 200 mV . L'impédance, Z , et le déphasage, Θ , ont été enregistrés dans le domaine fréquentiel 100 KHz à 100 MHz . Le signal alternatif superposé était de 10 mV d'amplitude crête à crête. Les logiciels utilisés pour traiter les résultats sont Le Vista Star, l'Origine 8 et l'EC lab.

II.7.1.4. Techniques électrochimiques

Dans le présent travail, nous nous sommes servis des techniques électrochimiques stationnaires issues de l'exploitation des courbes I-E ainsi que des méthodes transitoires basées sur la mesure de l'impédance électrochimique.

II.7.1.4.1. Courbes de polarisation

Cette technique stationnaire permet d'étudier un système dans un état quasiment d'équilibre thermodynamique ; elles prennent en compte tous les couples redox en solution [1].

II.7.1.4.1.1. Principe de la méthode

Cette technique consiste à imposer, entre l'électrode de travail et celle de référence, une variation de potentiel E linéaire et à enregistrer l'évolution de la densité de courant I qui circule entre l'électrode de travail et la contre-électrode : $I = f(E)$, qui renseigne sur la cinétique globale des réactions d'électrode mises en jeu (transfert de charges, transfert de matière, adsorption des espèces sur l'électrode...). [2]

II.7.1.4.1.2. Représentation de Tafel

Afin de déterminer expérimentalement les paramètres cinétiques I_{corr} , β_a et β_c , une représentation logarithmique de la densité de courant est préférable, car elle met en évidence la relation linéaire entre le logarithme de I et la surtension η , lorsque cette dernière, en valeur absolue, est élevée (figure IV.7). Dans ce cas, les pentes de Tafel anodique et cathodique peuvent.

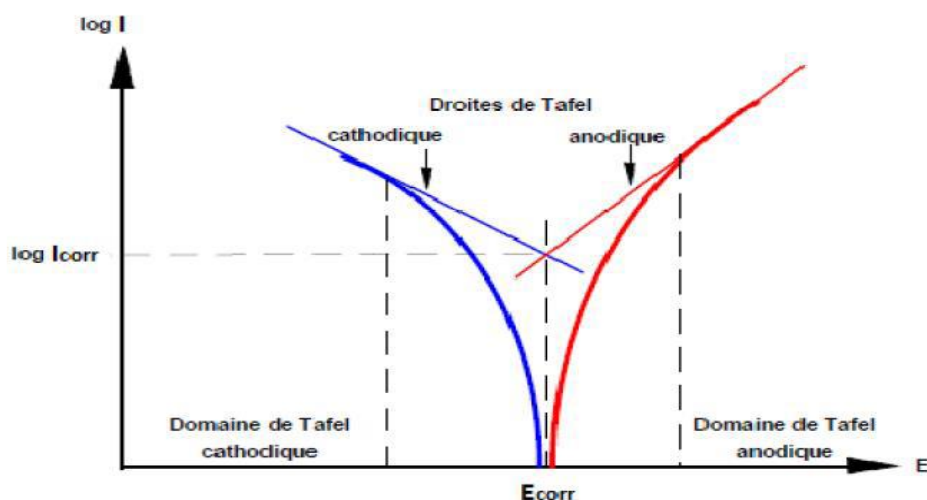


Figure II. 8. Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel.

II.7.1.4.2. La spectroscopie d'impédance électrochimique

La spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) est une technique non destructive adaptée à l'étude des propriétés électriques interfaciales[3], [4].

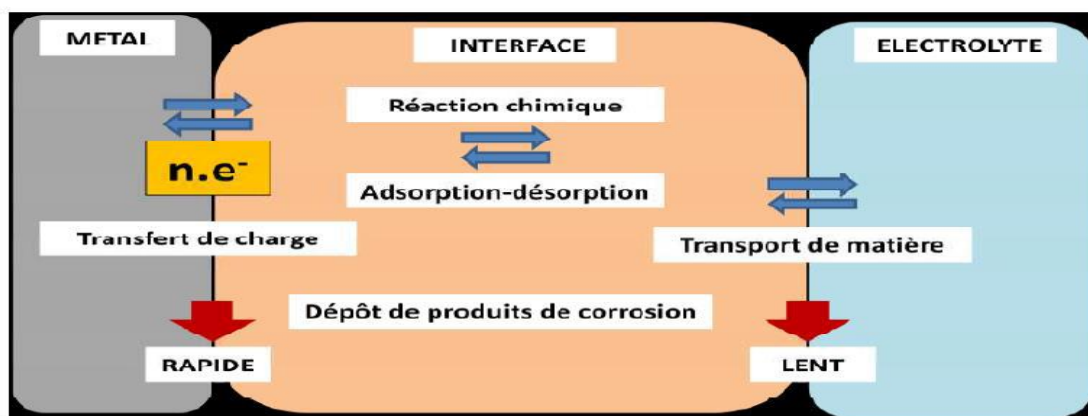


Figure II.9. Différents processus électrochimiques à l'interface métal/électrolyte [5].

II.7.1.4.2.1. Utilisation de schémas électriques équivalents

L'impédance d'un système électrochimique peut être assimilée par analogie à une impédance électrique. Les différents processus se déroulant à l'interface électrode/électrolyte peuvent être modélisés par la construction d'un circuit électrique équivalent.

Le comportement en régime dynamique d'une réaction redox en l'absence de gradient de concentration des espèces électroactives est donc analogue à celui du circuit électrique de la figure IV.11, appelé circuit de Randles généralisé.

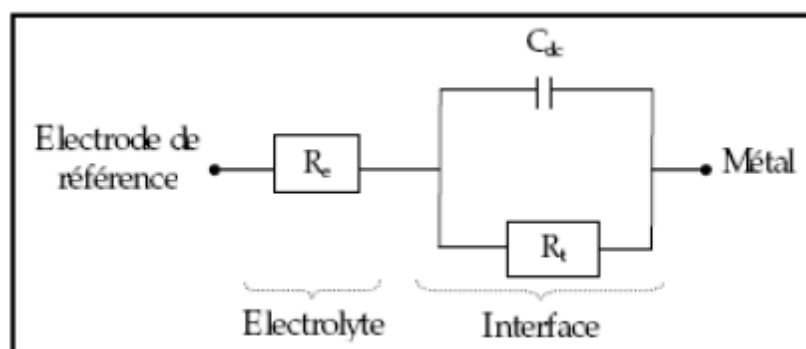


Figure II.10. Circuit de Randles d'une interface électrochimique simple (cas d'une réaction redox avec transfert de charge sans diffusion). [5]

Ce circuit comprend la résistance de transfert de charges (R_t), la résistance de l'électrolyte (R_e) qui représente la chute ohmique dans l'électrolyte entre les électrodes de travail et de référence lorsqu'un courant passe. Notons que C_{dc} et R_t sont introduits en parallèle pour rendre compte qu'au niveau de l'interface.

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthode d'extraction de l'extrait végétal de *Cynara cardunculus*, ainsi que la méthode de préparation de différentes nanoparticules. Nous avons ensuite abordé les différentes méthodes de caractérisation de ces nanoparticules et leurs

applications. L'extrait de *Cynara cardunculus* a également été utilisé comme inhibiteur écologique de la corrosion de l'acier en milieu acide ; son efficacité inhibitrice a été évaluée à l'aide de méthodes électrochimiques, à savoir la polarographie et l'analyse par impédance électrochimique. Ces techniques ont permis d'étudier le comportement de la corrosion et le mécanisme d'inhibition de l'extrait, ainsi que de déterminer son efficacité à réduire le taux de corrosion.

Références chapitre II

- [1] C. Brett, O. B.- Electrochemistry, and undefined 1993, “Principles, methods, and applications,” *academia.edu* CMA Brett, O Brett *Electrochemistry, 1993*•*academia.edu*, Accessed: Jun. 26, 2026. [Online]. Available: https://www.academia.edu/download/46559826/Electrochemistry_principles__methods__and_applications.pdf
- [2] D. S. Gnanamuthu, J. V Petrocelli, G. H. Fraser, and R. G. Barradas, “Electrochemical Polarization: I . A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 104, no. 1, p. 56, Jan. 1957, doi: 10.1149/1.2428496.
- [3] P. Monk, R. Mortimer, and D. Rosseinsky, “Electrochromism: fundamentals and applications,” 2008, Accessed: Jun. 25, 2026. [Online]. Available: [https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=1R2FDJdPnoMC&oi=fnd&pg=PP2&dq=P.+Monk,+R.+Mortimer,+D.+Rosseinsky,+Electrochromism:+fundamentals+and+applications:+Wiley-VCH.\(2008\).+&ots=ilMwe2Eb5w&sig=dYOvX2VG046uXyTQp4-9-A0c0BM](https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=1R2FDJdPnoMC&oi=fnd&pg=PP2&dq=P.+Monk,+R.+Mortimer,+D.+Rosseinsky,+Electrochromism:+fundamentals+and+applications:+Wiley-VCH.(2008).+&ots=ilMwe2Eb5w&sig=dYOvX2VG046uXyTQp4-9-A0c0BM)
- [4] A. J. B. Larry R. Faulkner, “Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications,” 2000, Accessed: Jun. 25, 2026. [Online]. Available: <http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/13089>
- [5] C. Ribaut, “Elaboration d’un biocapteur cellulaire impédancemétrique pour la mesure des changements physiologiques affectant la cellule parasitée,” 2008, Accessed: Jun. 25, 2026. [Online]. Available: <https://theses.fr/2008TOU30310>

III.1 Introduction

Ce travail a été consacré sur l'étude de l'utilisation des extraits des feuilles de la plante *Cynara cardunculus* comme inhibiteur de la corrosion de l'acier C1020 et pour la synthèse des nanoparticules de Ag/CoO (20/80) et l'utilisation de ces produits pour la photodégradation d'une solution aqueuse du Cristal Violet, on va présenter dans lequel, tous les résultats trouvés lors de l'extraction et la synthèse des ces nanoparticules. Nous avons utilisées la méthode spectrophotométrique pour étudiées l'effet de masse de catalyseur, l'effet de concentration et l'effet de temperature ainsi que l'effet d'extraction dans la corrosion inhibition.

III.2. Analyse FTIR de l'extrait des feuilles de la plante *Cynara cardunculus* et de nanoparticules Ag/CoO (20/80)

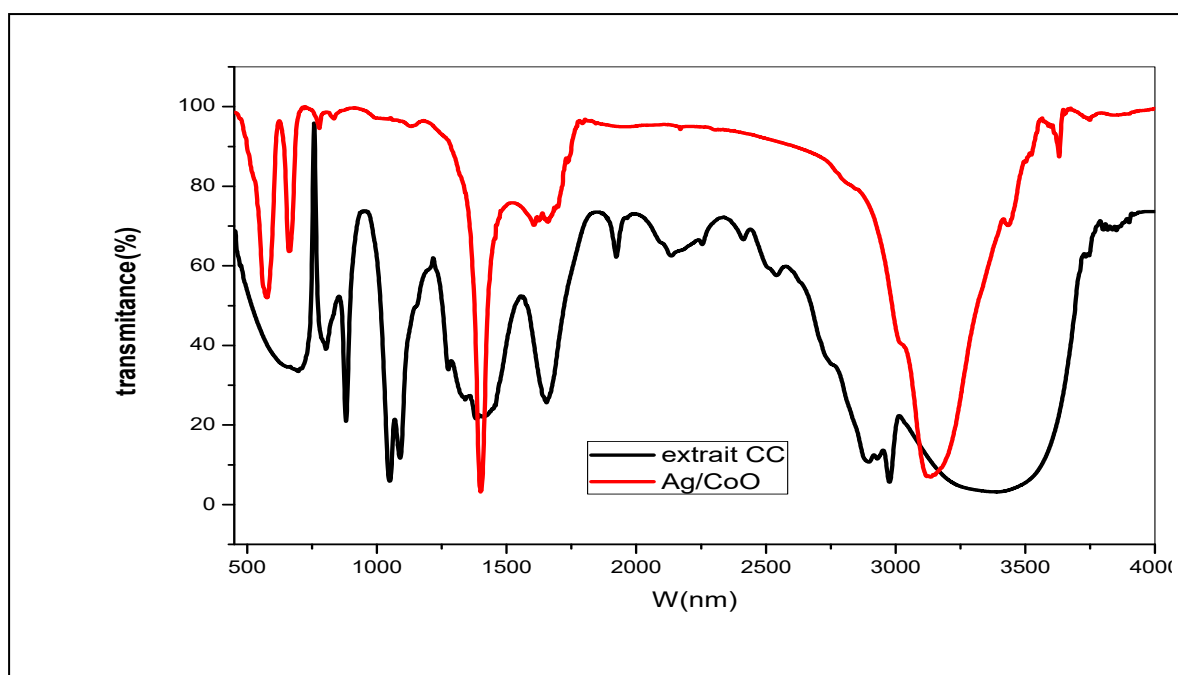


Figure III.1 Spectres FTIR de l'extrait des feuilles de la plante *Cynara cardunculus* et de nanoparticules Ag/CoO (20/80).

Les spectres FTIR de l'extrait des feuilles de la plante *Cynara cardunculus* et de nanoparticule Ag/CoO (20/80) sont présentés dans la **Figure III.1**.

L'analyse FTIR de l'extrait de *Cynara cardunculus* et des nanoparticules Ag/CoO a permis d'identifier les principaux groupements fonctionnels impliqués dans le processus de biosynthèse. La large bande observée dans la région de 3200–3500 cm^{-1} est attribuée aux vibrations d'élongation des groupements hydroxyles (O–H) provenant des polyphénols, flavonoïdes et alcools présents dans l'extrait végétal [1,2]. Les bandes localisées autour de

2920 cm^{-1} correspondent aux vibrations des liaisons C–H des chaînes aliphatiques [3]. Les pics observés entre 1600 et 1700 cm^{-1} sont associés aux vibrations des groupements carbonyles (C=O) et des structures aromatiques contenant des doubles liaisons C=C [1,3]. Les bandes comprises entre 1000 et 1400 cm^{-1} sont attribuées aux vibrations des liaisons C–O, C–N et C–O–C des biomolécules présentes dans l'extrait végétal [2,4]. Après la synthèse des nanoparticules Ag/CoO, le déplacement ou la diminution de l'intensité de certaines bandes indique l'implication des métabolites secondaires dans la réduction des ions métalliques et la stabilisation des nanoparticules [2,5]. Enfin, les bandes observées à faible nombre d'onde ($<700 \text{ cm}^{-1}$) sont caractéristiques des vibrations métal–oxygène, confirmant la formation du nanocomposite Ag/CoO [4,5].

III.3. La synthèse verte des nanoparticules d'Ag/CoO

La synthèse « verte » des nanoparticules repose sur l'utilisation d'extraits végétaux comme alternative écologique aux produits chimiques traditionnels utilisés dans les processus de réduction et de stabilisation [6]. La plante *Cynara cardunculus* est considérée comme très prometteuse dans ce domaine en raison de sa richesse en nombreux composés phytochimiques bioactifs, tels que les polyphénols, les flavonoïdes, les acides phénoliques et les terpénoïdes, notamment les dérivés de la lutéoline, de l'apigéine et des acides caffeoylquiniques, ainsi que l'acide gallique et l'acide phénylique [7]. [8]. Ces composés confèrent à la plante une activité antioxydante et une grande capacité à céder des électrons aux ions métalliques, ce qui entraîne leur réduction et leur transformation en atomes métalliques qui s'agrègent pour former les noyaux primaires des nanoparticules. Les groupes fonctionnels présents dans ces composés, tels que les groupes hydroxyle, carbonyle et carboxyle, jouent un rôle central dans les processus de transfert d'électrons et dans le contrôle de la formation des noyaux et de la croissance des nanoparticules. Au fur et à mesure que le processus de synthèse se poursuit, ces composés se lient à la surface des nanoparticules en formation et agissent comme des agents stabilisants qui empêchent leur agglomération et limitent leur agrégation, tandis que les protéines, les sucres et les acides aminés contribuent à renforcer leur stabilité en formant des liaisons ioniques ou covalentes avec les ions métalliques. D'autres groupes fonctionnels, tels que les amines, les aldéhydes, les alcools et les acides carboxyliques, participent également aux processus de formation et de stabilisation, ce qui fait de la synthèse verte une approche efficace pour produire des nanoparticules stables avec un haut rendement, de manière durable et respectueuse de l'environnement. [9]

III.4. Étude de photodégradation

III.4. 1 Etablissement de la courbe d'étalonnage du vert de malachite

La Figure III.2 représente la courbe d'étalonnage du colorant du vert de malachite. La courbe d'étalonnage est linéaire sur l'intervalle de concentrations choisies. Grâce à l'application de la loi de Beer-Lambert, la valeur 8 ppm en vert de malachite expérimentalement choisie pour notre étude réactionnelle est vérifiée dans ce domaine de concentrations.

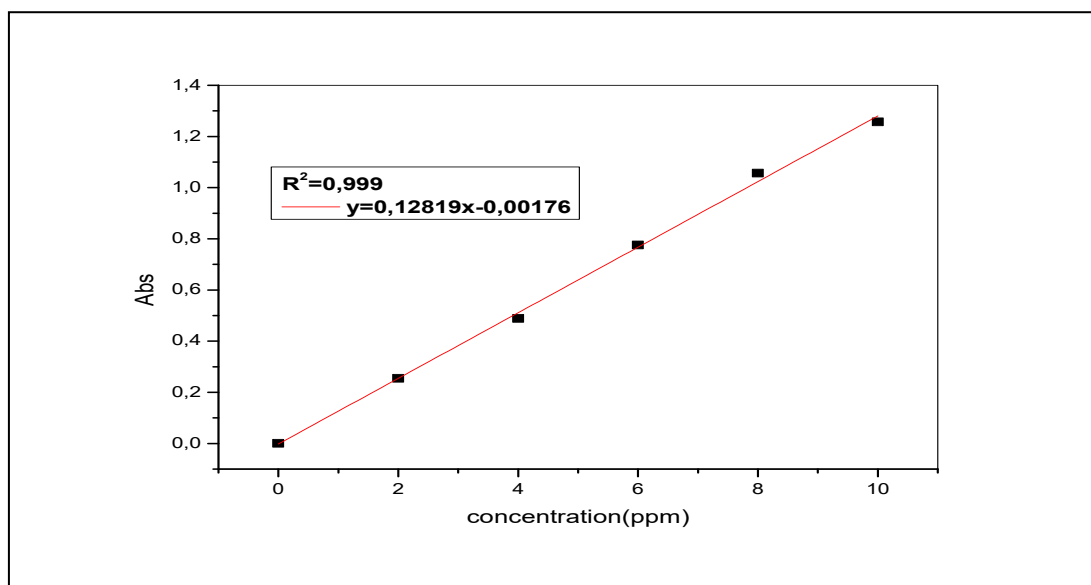


Figure III.2 Courbe d'étalonnage du vert de malachite au maximum d'absorbance

III.2. 2 Rendement de l'activité

Dans ce partie, nous avons étudiées l'effet de cellulose à partir des feuilles Phoenix dactyliferaL comme biosorbant d'une solution aqueuse du vert de malachite. Le rendement d'élimination a été déterminé à l'aide de l'équation (1). [10]

$$\text{efficacité de dégradation}(\%) = \frac{C_0 - C_F}{C_0} \times 100$$

Où : C_0 est la concentration initial de colorant, C_F est la concentration de colorant après adsorption

III.4.2. L'efficacité de dégradation de vert de malachite en présence d'Ag/CoO (20/80) à différents masses

La dégradation photochimique du colorant vert de malachite (Malachite Green) a été suivie à l'aide d'un spectromètre UV-Vis. Les figures III.3 et III.4 illustrent l'évolution de la concentration du colorant et l'efficacité d'élimination en fonction du temps, pour différentes

quantités de catalyseur Ag/CoO (0,1, 0,2 et 0,3 g) à une concentration initiale de 15 ppm. Les résultats ont montré une diminution progressive de la concentration du colorant à mesure que la durée d'irradiation augmentait, ce qui indique qu'un processus de photodégradation.

Les résultats ont également montré que l'efficacité de photodégradation augmente avec le temps, la plus grande efficacité ayant été enregistrée avec l'utilisation de 0,2 g de catalyseur : le taux de dégradation a atteint environ 96 % après 80 minutes d'irradiation, tandis que l'efficacité était relativement moindre avec les quantités de 0,1 et 0,3 g. Cela indique que la quantité de catalyseur influe directement sur le rendement de la photodégradation et que la masse de 0,2 g représente la dose optimale pour obtenir les meilleures performances.

Ce comportement s'explique par la présence d'un nombre adéquat de sites actifs à la surface du catalyseur, tout en garantissant une bonne pénétration de la lumière au sein du milieu réactionnel, ce qui favorise la formation d'espèces actives capables d'oxyder et de décomposer les molécules de colorant [11-13]. Ces résultats confirment l'efficacité des nanoparticules d'Ag/CoO pour éliminer le vert de malachite des solutions aqueuses. [14]

Le tableau III.1 présente le rendement de dégradation du vert de malachite en fonction de la masse des Ag/CoO utilisés.

Masse (g)	Le rendement (%)
0.1	91,27
0.2	96
0.3	93,26

Nos résultats obtenus de notre étude montrent que :

✓ Toutes les masses de catalyseur étudiées (0,1, 0,2 et 0,3 g) ont montré une bonne efficacité dans la dégradation du colorant vert de malachite, le taux d'élimination augmentant avec la durée d'irradiation.

✓ La dose de 0,2 g a enregistré la plus grande efficacité de photodégradation, avec un taux d'élimination d'environ 96 % après 80 minutes d'irradiation.

✓ Les résultats confirment que la quantité de catalyseur influe directement sur l'efficacité de la photodégradation, et que la masse de 0,2 g représente la dose optimale pour obtenir le meilleur rendement en matière d'élimination du vert de malachite.

Les spectres d'absorption UV-Vis du colorant du vert de malachite (**Figure III.5**), pour différentes masses de (Ag/Co O) (0,1 ; 0,2 ; 0,3 g), montrent que tous les échantillons présentent un pic d'absorption principal caractéristique du colorant à environ 620 nm. Avec

l'augmentation de la durée d'irradiation, l'intensité de ce pic diminue progressivement pour toutes les masses, en particulier à 0,2 g, ce qui indique une diminution de la concentration du colorant due au processus de photodégradation. On observe également une baisse de l'absorption dans la région des ultraviolets, ce qui reflète la dégradation de la structure moléculaire du colorant et la désintégration des groupes responsables de la couleur.

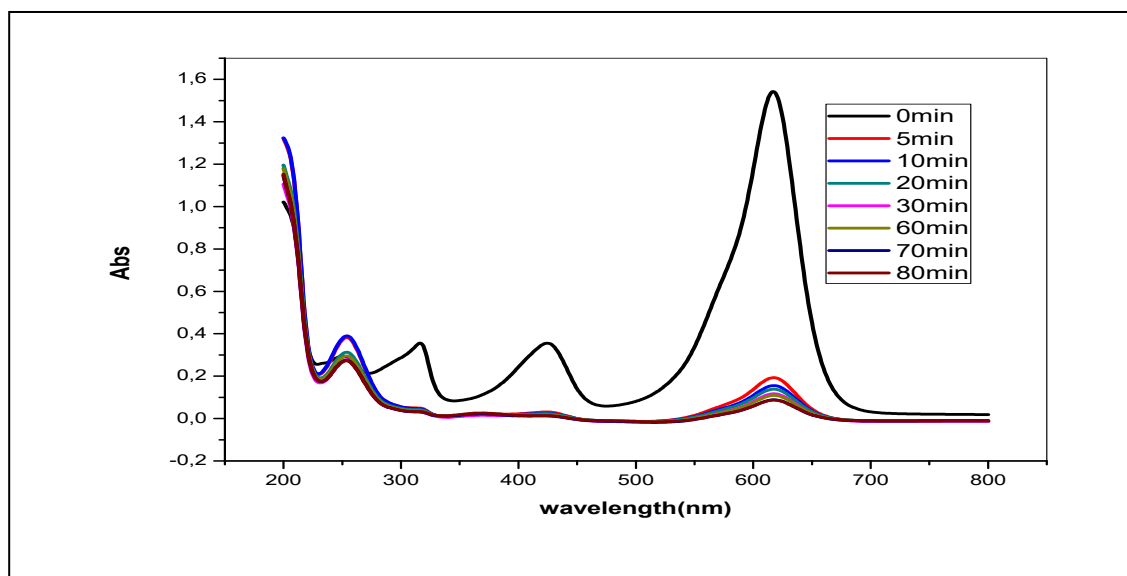


Figure III.5 Spectres UV-visible de la dégradation du vert de malachite (15 mg/l) à différents moments en présence de 0,4 g d'Ag

III.4.3 L'efficacité de dégradation de vert de malachite en présence d'Ag/CoO

Les figures III.6 et III.7 montrent l'évolution de la concentration du colorant vert de malachite et de l'efficacité de la photodégradation en fonction du temps, en utilisant une masse fixe de nanoparticules Ag/CoO de 0,2 g et différentes concentrations initiales du colorant (9, 15, 24 et 30 ppm).

Les résultats ont montré que la concentration initiale du colorant influence de manière significative sur l'efficacité de la photodégradation à l'aide de nanoparticules Ag/CoO. Une diminution progressive de la concentration du colorant a été observée en fonction du temps pour toutes les concentrations étudiées, ce qui confirme l'efficacité du catalyseur dans la dégradation du colorant. L'efficacité la plus élevée a été enregistrée à une concentration de 9 ppm, atteignant 96,38 % après 80 minutes d'irradiation, tandis que l'efficacité a diminué progressivement à mesure que la concentration augmentait, pour s'établir à environ 85 % à 30 ppm. Cette baisse d'efficacité aux concentrations élevées s'explique par l'augmentation du nombre de molécules de colorant dans la solution par rapport au nombre de sites actifs à la surface du catalyseur, ce qui limite l'interaction des espèces oxydantes actives avec

l'ensemble des molécules de colorant. De plus, l'augmentation de la concentration entraîne une absorption accrue de la lumière au sein de la solution et réduit son accès à la surface du catalyseur, ce qui se traduit par une diminution de la production de radicaux actifs tels que $\bullet\text{OH}$ et $\text{O}_2\bullet$ responsables du processus de photodégradation. Ces résultats indiquent que la concentration en colorant est un facteur important pour le rendement de la photodégradation, l'efficacité étant plus élevée à des concentrations faibles et moyennes qu'à des concentrations élevées [15 -17]. Ces résultats confirment que les nanoparticules Ag/CoO présentent une excellente capacité de dégradation du vert de malachite en solution aqueuse, démontrant ainsi leur fort potentiel en tant que photocatalyseur pour le traitement des eaux contaminées. [18]

Tableau III.1. Rendement de dégradation (R %) en fonction de la concentration de vert malachite avec une masse de 0,2 g d'Ag/CoO.

Concentration (ppm)	Le rendement (%)
9	96.38
15	96
24	90
30	85.88

Nos résultats obtenus de notre étude montrent que :

- ✓ L'efficacité maximale de la photodégradation a atteint 96 % à une concentration de 15 ppm après 80 minutes(Tableau III.1).
- ✓ L'efficacité d'élimination a diminué à mesure que la concentration initiale du colorant augmentait.
- ✓ Les résultats confirment que la concentration du colorant a une influence directe sur le rendement de la photodégradation.
- ✓ Les spectres d'absorption UV-Vis du colorant à différentes concentrations (9, 15, 24 et 30 ppm) en présence du 0.2g d'Ag/CoO(**Figure III.8,9et 10**) montrent que tous les échantillons présentent un pic d'absorption principal caractéristique du colorant à environ $\lambda_{\text{max}} = 620 \text{ nm}$. En fonction du temps , l'intensité de ce pic diminue progressivement pour toutes les concentrations, ce qui indique une diminution de la concentration du colorant due au processus de photodégradation. On observe également une baisse de l'absorbance dans la région des ultraviolets, ce qui reflète la dégradation de la structure moléculaire du colorant et la désintégration des groupes responsables de la couleur.

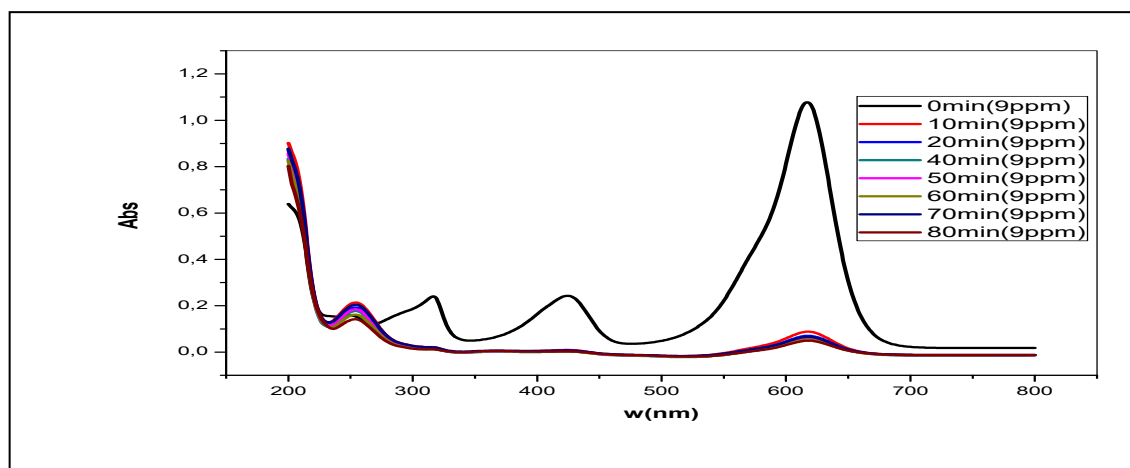


Figure III.8 Spectres UV-visible de la dégradation du vert malachite (9 mg/l) à différents moments en présence de 0,2 g d'Ag/CoO

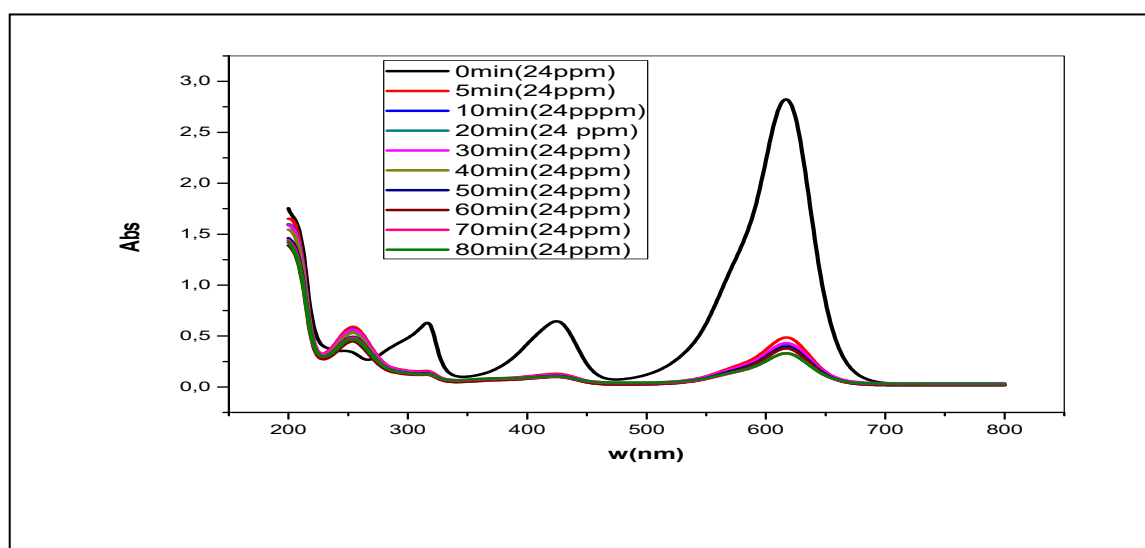


Figure III.9 Spectres UV-visible de la dégradation du vert de malachite (24 mg/l) à différents moments en présence de 0,2 g d'Ag/CoO

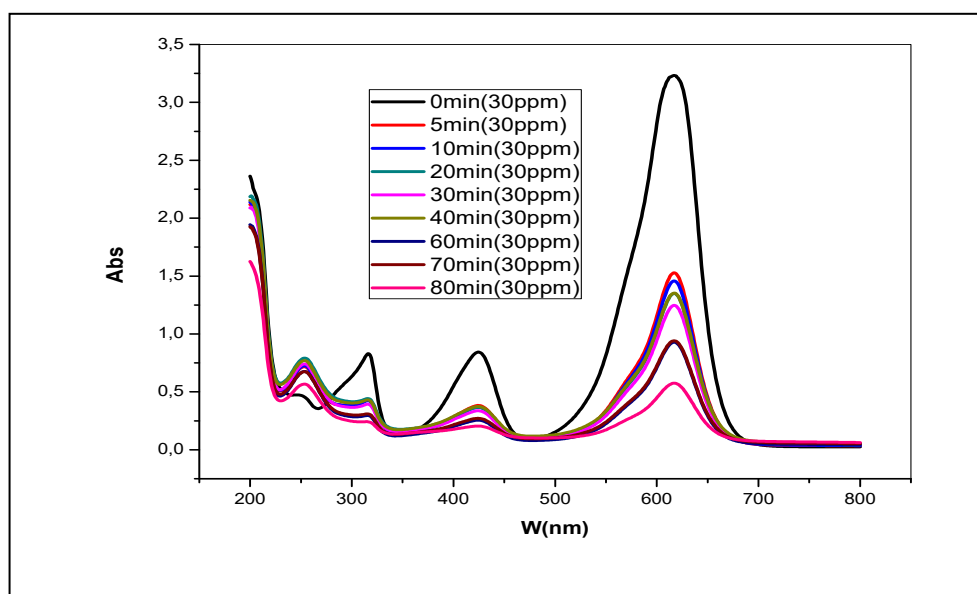


Figure III.10 Spectres UV-visible de la dégradation du vert malachite (30 mg/l) à différents moments en présence de 0,2 g d'Ag/CoO

III.4.4. L'efficacité de dégradation du vert de malachite en présence d'Ag/CoO à différentes températures

Les figures III.11 et III.12 illustrent l'influence de la température (20, 30 et 50 °C) sur le processus de photodégradation du colorant à une concentration initiale de 15 ppm, en utilisant 0,2 g d'Ag/CoO.

Les résultats ont montré que la température influence de manière significative sur l'efficacité de la photodégradation du colorant [19].

L'augmentation de la température de 20 à 30 °C améliore le rendement photocatalytique. Cette amélioration peut être expliquée par :

- une meilleure diffusion des molécules du colorant ;
- une augmentation de la vitesse des réactions de surface ;
- un transfert de matière plus rapide entre la solution et le photocatalyseur.

En revanche, à 50 °C, le rendement diminue légèrement. Cette baisse peut être attribuée :

- à une augmentation de la recombinaison électron-trou ;
- à une diminution de l'adsorption du colorant sur la surface du catalyseur ;
- à une instabilité partielle des espèces réactives générées.

La température optimale de fonctionnement est donc de 30 °C, avec un rendement maximal de 98 %. Cela s'explique par le fait qu'une température modérée favorise le transfert des molécules de colorant vers la surface du catalyseur et contribue à la formation d'espèces réactives telles que les radicaux hydroxyles ($\text{OH}\cdot$) et les ions superoxydes ($\text{O}_2\cdot^-$), responsables de l'oxydation et de la décomposition des molécules de colorant. Une température trop élevée peut entraîner une diminution de l'adsorption du colorant à la surface du catalyseur, ce qui explique la légère baisse de l'efficacité de la photodégradation à 50 °C par rapport à 30 °C. [20 ; 21]

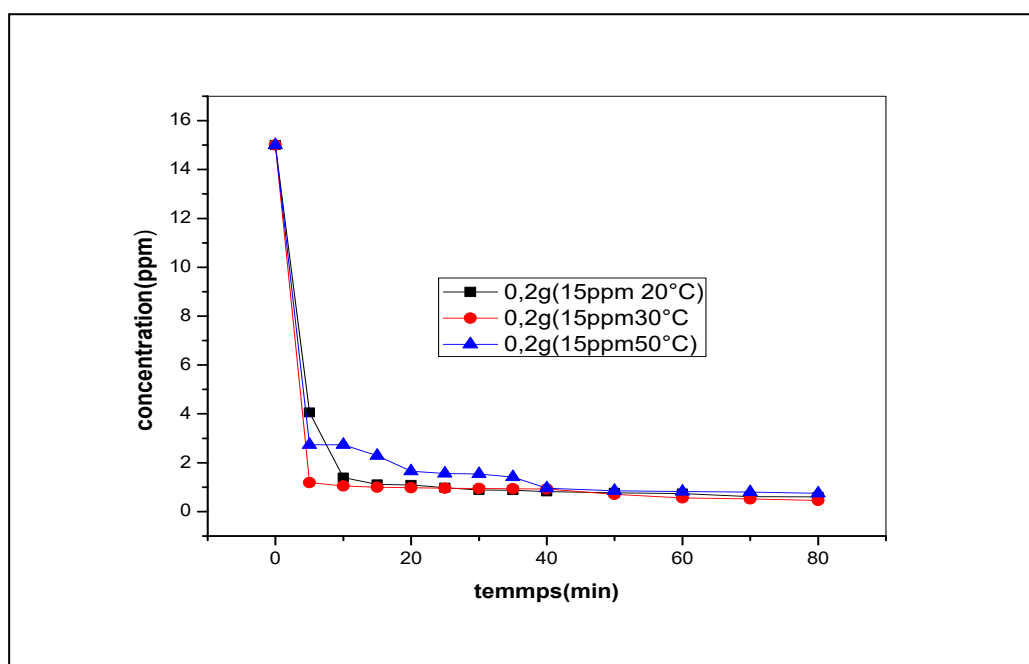


Figure III.11 La variation de concentration de vert malachite en fonction du temps en présence de 0,2 g d'Ag/CoO et de différentes températures.

Tableau III.2 Rendement de dégradation (R %) en fonction de la température avec une concentration optimale de 15 ppm de vert malachite et une masse optimale de 0,2 g d'Ag/CoO.

Température (°C)	Le rendement (%)
20	96
30	98
50	95

Nos résultats obtenus de notre étude montrent que :

- ✓ Toutes les températures étudiées ont montré une grande efficacité dans la dégradation du vert de malachite.
- ✓ Le meilleur taux d'élimination (98 %) a été enregistré à 30 °C après 80 minutes d'irradiation.
- ✓ Les résultats indiquent que 30 °C est la température optimale pour le processus de photodégradation.

La dégradation du colorant vert de malachite à une concentration de 15 ppm en présence de 0,2 g de photocatalyseur Ag/CoO a été suivie à des températures de 20, 30 et 50 °C à l'aide de spectres d'absorption UV-Vis (**Figure III. 13 ; 14**). Les résultats montrent une diminution

progressive de l'intensité d'absorption à la longueur d'onde maximale $\lambda_{\max} \approx 620$ nm en fonction du temps, ce qui indique une diminution de la concentration du colorant due au processus de photodégradation. Cette diminution était plus marquée à 30 °C qu'aux températures de 20 et 50 °C.

Cette diminution de l'absorbance est attribuée à la désintégration des groupes chromophores et de la structure associée responsables de la couleur du colorant, ce qui conduit à la formation de produits d'oxydation plus simples et moins complexes. De plus, l'absence de nouveaux pics d'absorption dans les spectres UV-Vis indique que les molécules de colorant se sont progressivement décomposées en composés plus petits avant de se transformer en produits finaux plus stables.

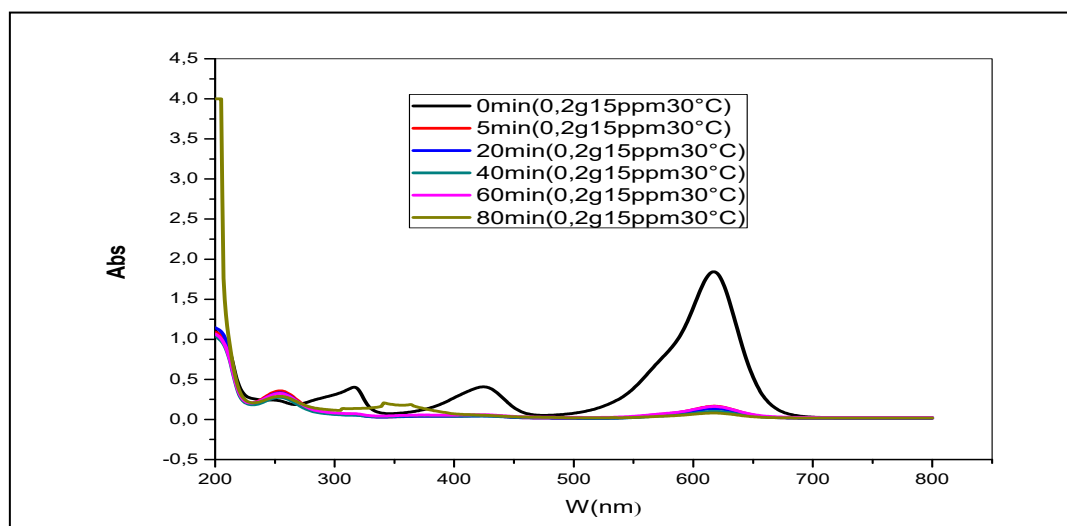


Figure III.13 Spectres UV-visible de la dégradation du vert de malachite (15 mg/l) à différents moments en présence de 0,2 g d'Ag/CoO et T = 30 °C

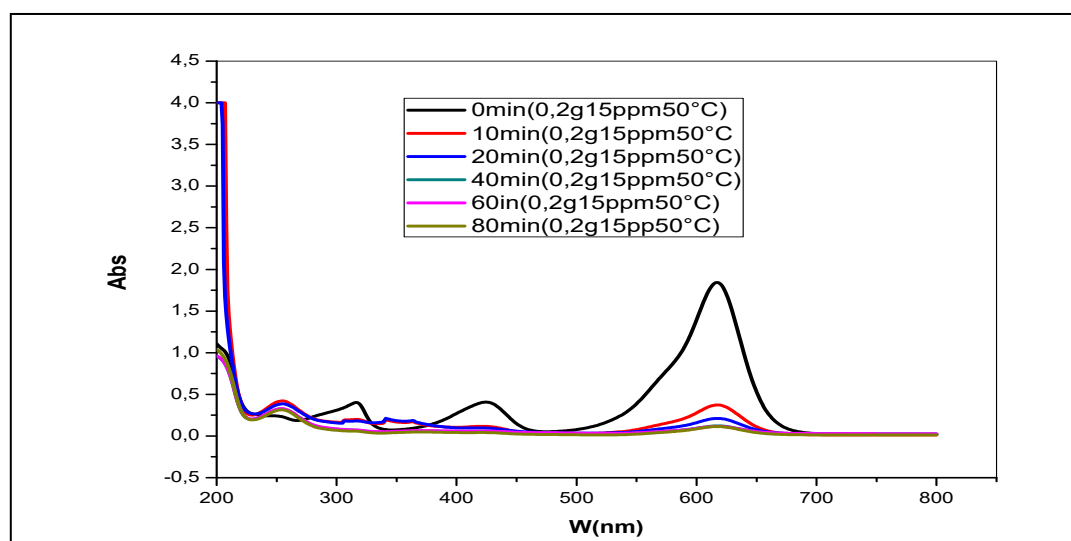


Figure III.14 Spectres UV-visible de la dégradation du vert malachite (15 mg/l) à différents moments en présence de 0,2 g d'Ag/CoO à T = 50 °C

III.4. Évaluation de l'effet des extraits des feuilles de la plante *Cynara cardunculus* comme inhibiteur de la corrosion de l'acier C1020

III.4.1 Courbes de polarisation

La **figure III.15** représente les courbes de polarisation de l'acier au carbone C1020 dans une solution de HCl 1M .en absence et en présence de l'extrait de *Cynaracardunculus* à différentes concentrations.

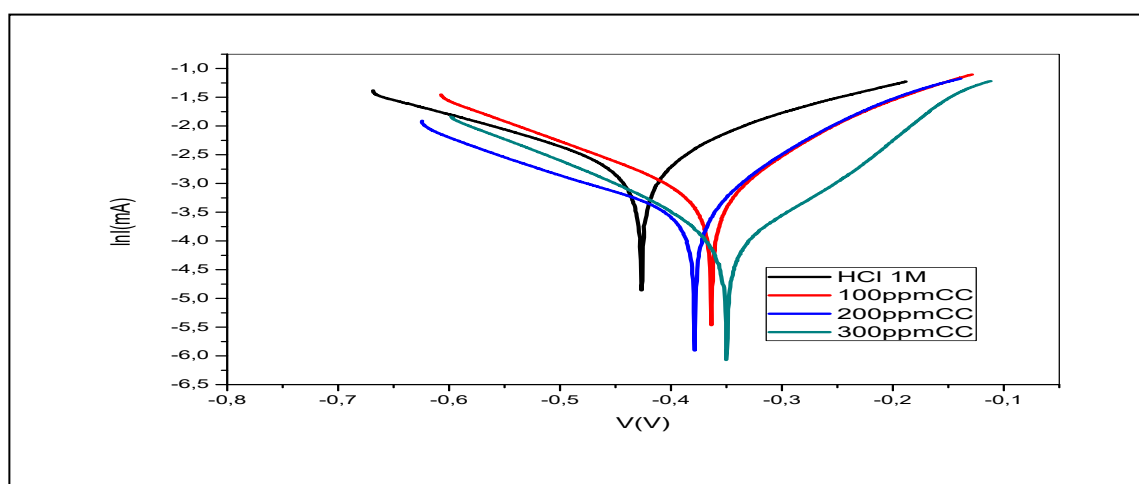


Figure. III.15 Courbes de polarisation de l'acier 1020 dans HCl 1M obtenues à 25°C sans et avec l'extrait de *Cynaracardunculus*

Les valeurs de la densité de courant de corrosion i_{corr} , du potentiel de corrosion E_{corr} , des pentes de Tafel cathodiques b_c et anodique b_a et de l'efficacité inhibitrice ($E\%$) pour différentes concentrations de *Cynaracardunculus* sont reportés dans le **tableau (1)**. L'efficacité inhibitrice est définie comme suit :

$$E\% = \frac{I_{corr} - I_{corr}^0}{I_{corr}^0} \times 100$$

Ou' I_{corr}^0 et I_{corr} sont les valeurs de densité de courant de corrosion d'acier au carbone déterminées par extrapolation des droites de Tafel, après immersion en milieu HCl 1M respectivement sans et avec addition de l'inhibiteur.

Tableau III.3 Paramètres électrochimiques et efficacités inhibitrices de la corrosion de l'acier 1020 dans un milieu de HCl 1M avec et sans inhibiteur CC à 25°C.

Concentration (ppm)	-E _{corr} (mV)	I _{corr} (μA)	B _a (mV)	B _c (mV)	E%
0	428,565	1,775	136,7	181,1	0
100	364,565	0,608	98	142,7	65,75
200	381,661	0,257	84,1	160,7	85,52
300	-0,35	0,218	68,3	126,9	87,72

L'analyse de données représentées dans le tableau **III.3**, montre clairement que les densités de courant de corrosion (I_{corr}) diminuent au fur et à mesure que la concentration en **CC** croît, et que l'efficacité inhibitrice E(%) augmente avec l'accroissement de la concentration en inhibiteur pour atteindre un maximum de 87% pour 300ppm **CC**.

En présence de différentes concentrations d'extrait **CC**, le potentiel de corrosion se déplace vers des valeurs positives. Selon Ferreira et col. [22] et Li et col. [23], si le potentiel de corrosion en présence de l'inhibiteur se déplace d'une valeur supérieure à 85 mV par rapport au blanc, l'inhibiteur peut être considéré comme inhibiteur anodique ou cathodique. si le potentiel de corrosion en présence de l'inhibiteur se déplace d'une valeur inférieure à 85 mV par rapport au blanc, l'inhibiteur peut être considéré comme mixte. Dans notre étude l'inhibiteur est considéré comme mixte avec prédominance cathodique.

IV.3.1.4 Isotherme d'adsorption

L'adsorption de molécules organiques fournit des informations sur l'interaction entre les molécules adsorbées elles-mêmes ainsi que leur interaction avec la surface de l'électrode. Des mesures ont été effectuées pour connaître le type d'adsorption de l'inhibiteur. Dans la littérature il existe une gamme de modèles d'isothermes tels que Langmuir, Temkin, Frumkin etc.[32]

Le taux de recouvrement(Θ) pour différentes concentrations de molécules inhibitrices dans HCl 1M a été calculé à partir de l'équation suivante :

$$\theta = \frac{R_{ct(inh)} - R_0}{R_{ct(inh)}} \quad (5)$$

Selon les résultats obtenus dans le Tableau III.4, la valeur de (θ) augmente avec l'addition de L'extrait de CC. Les données ont été testées sous forme graphique par ajustement avec L'isotherme de Langmuir, correspondante au **Figure III.18**.

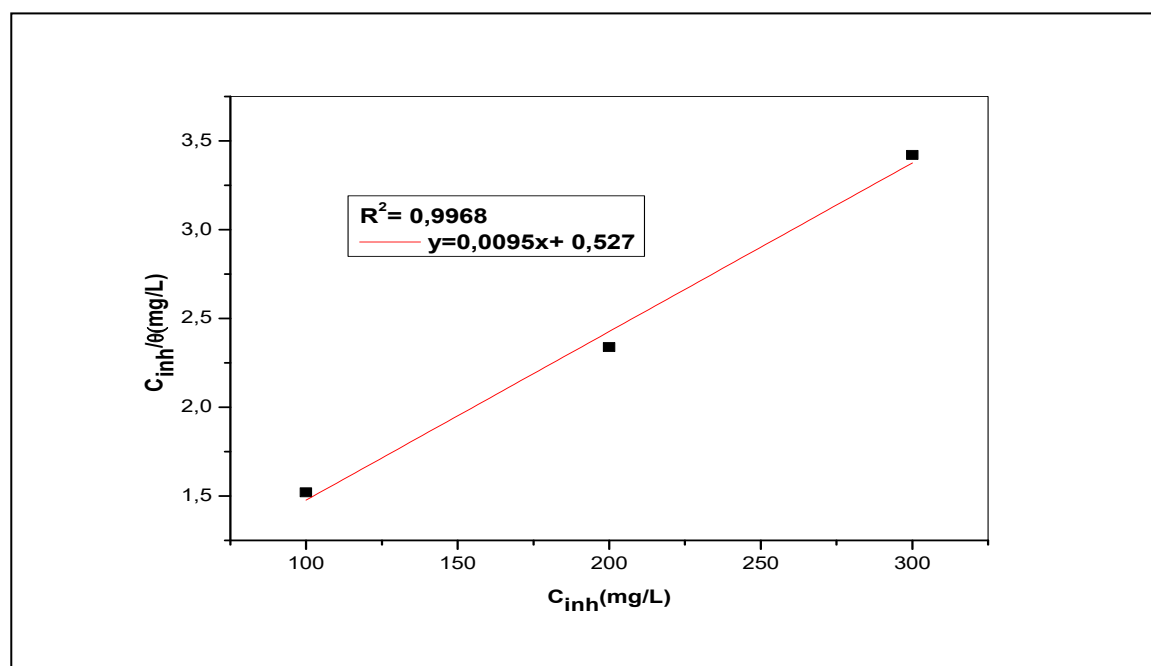


Figure III. 18 Isothermes d'adsorption de Langmuir pour CC sur l'acier au carbone dans HCl 1M à différentes concentrations

Sont donnée par les équations suivantes [42]:

$$\frac{C_{inh}}{\theta} = C_{inh} + \frac{1}{K_{ads}} \quad (6)$$

D'après le résultat obtenue, nous avons observées un coefficient de corrélation (R^2) de 0.9968. Ces résultats suggèrent que les données expérimentales sont bien décrites et meilleure par l'isotherme de Langmuir. Cet isotherme implique l'hypothèse, que tous les sites d'adsorption sont équivalents et que les liaisons des particules se produisent indépendamment des sites proches qu'ils sont occupés ou non [30,34], par conséquent, les molécules inhibitrices sont adsorbées à la surface métallique pour former un film qui isole la surface de l'acier.

L'énergie libre d'adsorption standard ΔG_{ads} (kJ / mol) est évaluée à partir de l'équation suivante:

$$K_{ads} = \left(\frac{1}{55,55} \right) \exp((- \Delta G_{ads})/RT) \quad (7)$$

$K_{ads} = 1,897$; R est la constante de gaz parfait ($8,314 \text{ J. mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), T est la température absolue, et la valeur 55.5 est la concentration d'eau en solution exprimée en M.

Généralement, pour des valeurs de ΔG_{ads} d'adsorption autour de -20 KJ.mol^{-1} , le type d'adsorption est considéré comme une physisorption; ceux autour de -40 KJ. mol^{-1} ou plus négatifs sont associés à des chimisorptions [34].

D'après les résultats obtenus la valeur de ΔG_{ads} est égale à $-11,35 \text{ kJ / mol}$. La valeur négative de ΔG_{ads} pour le système étudié implique que l'adsorption des inhibiteurs sur la surface de l'acier au carbone était spontanée, et le film adsorbé sur la surface métallique est stable.

Dans ce cas, nous avons remarqués que les valeurs de ΔG_{ads} d'adsorption sont autour de -20 kJ/ mol , ceci correspond aux interactions électrostatiques entre les molécules chargées ainsi les charges du métal (physisorption).

III.5 Conclusion

Les résultats obtenus au cours de cette étude ont mis en évidence les performances remarquables des nanoparticules Ag/CoO en tant que photocatalyseur pour la dégradation du vert de malachite et des extraits des feuilles de la plante *Cynara cardunculus* (CC) comme inhibiteur de corrosion de l'acier au carbone en milieu agressif.

L'étude de la photodégradation a montré que la quantité de catalyseur, la concentration initiale du colorant et la température sont des paramètres déterminants influençant le rendement du procédé. La masse optimale de catalyseur a été fixée à $0,2 \text{ g}$, permettant d'atteindre un rendement maximal de 96% après 80 minutes d'irradiation pour une concentration initiale de 15 ppm . Les analyses UV-Visible ont confirmé une diminution progressive de l'absorbance du vert de malachite au cours du temps, traduisant la dégradation continue de la structure moléculaire du colorant. Par ailleurs, l'augmentation de la concentration initiale du colorant a entraîné une diminution de l'efficacité de dégradation, tandis qu'une température modérée de $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ s'est révélée optimale avec un rendement atteignant 98% . Ces observations sont attribuées à une amélioration du transfert de matière, à une meilleure diffusion des molécules de colorant et à une génération plus efficace des espèces réactives responsables de l'oxydation du polluant.

L'étude de l'inhibition de la corrosion a montré que l'efficacité inhibitrice de l'extrait CC augmente avec sa concentration pour atteindre 87% à 300 ppm . Les mesures de polarisation

potentiodynamique ont révélé que l'extrait agit comme un inhibiteur mixte à prédominance cathodique, tandis que les mesures d'impédance électrochimique ont mis en évidence une augmentation de la résistance au transfert de charge (R_{ct}), traduisant la formation d'un film protecteur à la surface de l'acier. L'étude de l'isotherme d'adsorption a montré que les données expérimentales sont parfaitement décrites par le modèle de Langmuir ($R^2 = 0,9968$), indiquant une adsorption en monocouche sur des sites énergétiquement équivalents. La valeur de l'énergie libre d'adsorption ($\Delta G_{ads} = -11,35 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) confirme que le processus d'adsorption est spontané et essentiellement de nature physique (physisorption).

Références chapitre III

- [1] Osman, A. I., Zhang, Y., Farghali, M., et al. (2024). Synthesis of green nanoparticles for energy, biomedical, environmental, agricultural, and food applications: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 22, 841–887.
- [2] Thomas, S., Gonsalves, R. A., Jose, J., et al. (2024). Plant-based synthesis, characterization approaches, applications and toxicity of silver nanoparticles: A comprehensive review. *Journal of Biotechnology*, 394, 135–149.
- [3] Velgosova, O., Dolinská, S., Podolská, H., et al. (2024). Impact of Plant Extract Phytochemicals on the Synthesis of Silver Nanoparticles. *Materials*, 17(10), 2252.
- [4] El-Seedi, H. R., Omara, M. S., et al. (2024). Updated Review of Metal Nanoparticles Fabricated by Green Chemistry Using Natural Extracts: Biosynthesis, Mechanisms, and Applications. *Bioengineering*, 11(11), 1095.
- [5] Zulfiqar, Z., Khan, R. R. M., Summer, M., et al. (2024). Plant-mediated green synthesis of silver nanoparticles: Synthesis, characterization, biological applications, and toxicological considerations: A review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 103121.
- [6] Villagrán, Z., Anaya-Esparza, L. M., Velázquez-Carriles, C. A., Silva-Jara, J. M., Ruvalcaba-Gómez, J. M., Aurora-Vigo, E. F., ... & Martínez-Esquivias, F. (2024). Plant-based extracts as reducing, capping, and stabilizing agents for the green synthesis of inorganic nanoparticles. *Resources*, 13(6), 70.
- [7] The Role of Extracts of Edible Parts and Production Wastes of Globe Artichoke (*Cynara cardunculus* L. var. *scolymus* (L.)) in Counteracting Oxidative Stress

- [8] Biosynthesis of Ag nanoparticles using *Cynara cardunculus* leaf extract: Evaluation of their antibacterial and electrochemical activity
- [9] Recent advances in the green synthesis of metal and metal oxide nanoparticles from plant extracts for biomedical and water remediation applications.
- [10] Ahmed, S., et al. (2024). Photocatalytic Dye Degradation from Textile Wastewater: A Review. *ACS Omega*, 9(22), 23973–23998.
- [11] Haleem et al. (2024) In-depth photocatalytic degradation mechanism of the extensively used dyes malachite green, methylene blue, Congo red, and rhodamine B via covalent organic framework-based photocatalysts. *Water*, 16(11), 1588
- [12] Gnanaprakasam, A., Sivakumar, V. M., & Thirumarimurugan, M. (2015). Influencing parameters in the photocatalytic degradation of organic effluent via nanometal oxide catalyst: a review. *Indian Journal of Materials Science*, 2015(1), 601827.
- [13] Akpan, U.G.; Hameed, B.H. (2009) Parameters affecting the photocatalytic degradation of dyes using TiO₂-based photocatalysts: A review
- [14] Sarathi et al. (2023) Photocatalytic degradation of malachite green dye by metal oxide nanoparticles – mini review. *Journal of Chemical Reviews*, 5(1), 15–30.
- [15] Daneshvar, N., Salari, D., & Khataee, A. R. (2007). Photocatalytic degradation of azo dye acid red 14 in water: Investigation of the effect of operational parameters. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 157, 111–116.
- [16] Reza, K. M., Kurny, A. S. W., & Gulshan, F. (2017). Parameters affecting the photocatalytic degradation of dyes using TiO₂: a review. *Applied Water Science*, 7(4), 1569-1578.
- [17] Xu, Z., Zada, N., Habib, F., Ullah, H., Hussain, K., Ullah, N., ... & Ullah, H. (2023). Enhanced photocatalytic degradation of malachite green dye using silver–manganese oxide nanoparticles. *Molécules*, 28(17), 6241.
- [18] Chen, G., Si, X., Yu, J., Bai, H., & Zhang, X. (2015). Doping nano-Co₃O₄ surface with bigger nanosized Ag and its photocatalytic properties for visible light photodegradation of organic dyes. *Applied Surface Science*, 330, 191-199.

- [19] Mesoporous and macroporous Ag-doped Co_3O_4 nanosheets and their superior photocatalytic properties under solar light irradiation
- [20] Kumar, A., & Pandey, G. (2017). A review on the factors affecting the photocatalytic degradation of hazardous materials. *Mater. Sci. Eng. Int.J.*, 1(3), 1-10.
- [21] Mechanistic Insights into Photodegradation of Organic Dyes Using Heterostructure Photocatalysts
- [22] T. Koide, et al , —Leishmanicidal Effect of Curcumin in Vitro‖ Biol. Pharm. Bull Vol. 50, No. 1 (2002) PP 131—133.
- [23] Sidhu, et al, —Enhancement of wound healing by curcumin in animals. — Wound Repair Re-gen. (1998), 6, PP. 167–177.
- [24] P.S. Negi, et al —Antibacterial activity of turmeric oil: a byproduct from curcumin manufacture. —(Oct 1999) ;47(10):PP. 4297-4300.
- [25] M. Nose, et al ., —Trypanocidal Effects of Curcumin in Vitro—, Biol. Pharm. Bull. Volume 21 (1998) Issue 6 PP. 643-645.
- [26] A. U.Saviour, M. S. Moses, M. E. Ubong, B. O. Ime, U .I. Aniekemeabasi, — Inhibition of mild steel corrosion in H_2SO_4 solution by coconut coir dust extract obtained from different sol-vent systems and synergistic effect of iodide ions: Ethanol and acetone extracts‖, Journal of En-vironmental Chemical Engineering ,vol 2 , No .2 , (2014)PP. 1048–1060.
- [27] C. Jeyaprabha, S. Sathiyarayanan, G. Venkatachari, —Influence of halide ions on the ad-sorption of diphenylamine on iron in 0.5 M H_2SO_4 solution‖, Electrochimica Acta, vol. 51 No. 19(2006) PP. 4080– 4088.
- [28] A. Ali Gu rten , K. Hülya, B. Emel , K . Fatma, — The effect of temperature and concentra-tion on the inhibition of acid corrosion of carbon steel by newly synthesized Schiff base‖, Jour-nal of Industrial and Engineering Chemistry ,vol. 27, (25 July 2015),PP. 68–78.
- [29] S. Ramazan, — Investigation of the in, hibition effect of 5-((E)-4-phenylbuta-1,3-dienylideneamino)-1,3,4-thiadiazole-2-thiol Schiff base on mild steel corrosion in hydrochloric acid‖ ,Corros. Sci, vol. 52 No. 10, (2010) PP.3321-3330.

- [30] N. Esmaeili, J. Neshati, I. Yavari, , —Corrosion inhibition of new thiocarbohydrazides on the carbon steel in hydrochloric acid solution, Journal of Industrial and Engineering Chemistry ,vol .22 , (2015) PP.159–163.
- [31] K.F. Khaled, and M.M. Al-qahtani, , The inhibitive effect of some tetrazole derivatives towards Al corrosion in acid theoretical studies, Materials Chemistry and Physics , vol. 113 No. 1, (2009), PP. 150–158.
- [32] Q. Qing, L. Lei, B. Wei, J. Shuan, D. Zhongtao, Sodium tungstate as a corrosion inhibitor of cold rolled steel in peracetic acid solution Cor. Sci. vol .51, N. 10, (2009),PP.2423–2428.
- [33] M. Yadav, S. Kumar, N. Tiwari, I. Bahadur, E.E. Ebenso, —Experimental and quantum chemical studies of synthesized triazine derivatives as an efficient corrosion inhibitor for N80 steel in acidic medium, Journal of Molecular Liquids ,vol. 212, (December (2015), PP. 151–167.
- [34] E. H. Naoual , F. Rabiaa, T. Mustapha, J. Charafeddine, B. Fouad, —Alkaloids extract of Retama monosperma (L.) Boiss. seeds used as noveleco-friendly inhibitor for carbon steel corrosion in 1 M HCl solution :Electrochemical and surface studies , Applied Surface Science ,vol .357, Part. A , (2015), PP.1294–1305.

Conclusion générale



Conclusion générale

Cette étude avait pour objectif d'explorer le potentiel de la plante *Cynara cardunculus* dans diverses applications environnementales et industrielles, en tirant parti de ses composants biologiques pour la synthèse verte de nanoparticules et en utilisant son extrait végétal comme inhibiteur naturel de la corrosion. Les travaux ont porté sur la préparation de nanoparticules Ag/CoO et l'évaluation de leur activité dans la photodégradation du pigment vert de malachite, ainsi que sur l'étude de la capacité de l'extrait de feuilles à protéger l'acier au carbone en milieu acide. Cette approche s'inscrit dans le cadre des efforts visant à développer des alternatives efficaces, durables et respectueuses de l'environnement aux produits chimiques traditionnels.

Les résultats obtenus au cours de cette étude ont mis en évidence les performances remarquables des nanoparticules Ag/CoO en tant que photocatalyseur pour la dégradation du vert de malachite et des extraits des feuilles de la plante *Cynara cardunculus* (CC) comme inhibiteur de corrosion de l'acier au carbone en milieu agressif.

L'étude de la photodégradation a montré que la quantité de catalyseur, la concentration initiale du colorant et la température sont des paramètres déterminants influençant le rendement du procédé. La masse optimale de catalyseur a été fixée à 0,2 g, permettant d'atteindre un rendement maximal de 96 % après 80 minutes d'irradiation pour une concentration initiale de 15 ppm. Les analyses UV-Visible ont confirmé une diminution progressive de l'absorbance du vert de malachite au cours du temps, traduisant la dégradation continue de la structure moléculaire du colorant. Par ailleurs, l'augmentation de la concentration initiale du colorant a entraîné une diminution de l'efficacité de dégradation, tandis qu'une température modérée de 30 °C s'est révélée optimale avec un rendement atteignant 98 %. Ces observations sont attribuées à une amélioration du transfert de matière, à une meilleure diffusion des molécules de colorant et à une génération plus efficace des espèces réactives responsables de l'oxydation du polluant.

L'étude de l'inhibition de la corrosion a montré que l'efficacité inhibitrice de l'extrait CC augmente avec sa concentration pour atteindre 87 % à 300 ppm. Les mesures de polarisation potentiodynamique ont révélé que l'extrait agit comme un inhibiteur mixte à prédominance cathodique, tandis que les mesures d'impédance électrochimique ont mis en évidence une augmentation de la résistance au transfert de charge (R_{ct}), traduisant la formation d'un film protecteur à la surface de l'acier. L'étude de l'isotherme d'adsorption a montré que les données expérimentales sont parfaitement décrites par le modèle de Langmuir ($R^2 = 0,9968$), indiquant une adsorption en monocouche sur des sites énergétiquement équivalents. La valeur de l'énergie

libre d'adsorption ($\Delta G_{ads} = -11,35 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) confirme que le processus d'adsorption est spontané et essentiellement de nature physique (physisorption).

Ces résultats ouvrent des perspectives d'avenir prometteuses pour le développement de nanomatériaux respectueux de l'environnement et d'inhibiteurs de corrosion naturels hautement efficaces, ce qui contribuera à réduire la pollution et à diminuer la dépendance vis-à-vis des produits chimiques traditionnels, ainsi qu'à élargir leur champ d'application dans les domaines du traitement de l'eau, de la protection des structures métalliques et des applications industrielles durables.

Résumé :

Dans cette étude, l'extrait de feuilles de *Cynara cardunculus* a été utilisé pour la synthèse verte de nanoparticules d'Ag/CoO, avec une évaluation de son efficacité dans la photodégradation du colorant vert de malachite et une étude de l'efficacité de l'extrait en tant qu'inhibiteur de la corrosion de l'acier au carbone. Les résultats ont montré un rendement de dégradation de 96 % avec 0,2 g de catalyseur et 15 ppm après 80 minutes d'irradiation, et ce rendement a atteint 98 % à 30 °C, avec une diminution progressive de l'absorbance du colorant selon les analyses UV-Visible. L'extrait a également atteint une efficacité d'inhibition de 87 % à 300 ppm, et les mesures électrochimiques ont montré qu'il agit comme un inhibiteur mixte à effet cathodique prédominant, l'adsorption étant conforme au modèle de Langmuir.

Mots clés : *Cynara cardunculus*, Vert de malachite, Ag/CoO, Photodégradation, Corrosion.

Abstract:

In this study, *Cynara cardunculus* leaf extract was used in the green synthesis of Ag/CoO nanoparticles, and its effectiveness in the photodegradation of malachite green dye was evaluated, while the extract's efficacy as a corrosion inhibitor for carbon steel was also investigated. The results showed a degradation efficiency of 96% at 0.2 g of catalyst and 15 ppm after 80 minutes of irradiation, rising to 98% at 30 °M, with a gradual decrease in the dye's absorbance as determined by UV-Visible spectroscopy. The extract also achieved an inhibition efficiency of 87% at 300 ppm, and electrochemical measurements showed that it acts as a mixed inhibitor with a predominantly cathodic effect, with adsorption consistent with the Langmuir model.

Keywords: *Cynara cardunculus*, malachite green, Ag/CoO, photodegradation, corrosion.

ملخص :

تم في هذه الدراسة استغلال مستخلص أوراق الخرشوف البري في التخليق الأخضر للجسيمات النانوية من الفضة وأكسيد الكوبالت، مع تقييم فعاليتها في التحلل الضوئي لصبغة الأخضر المالاكيت ودراسة كفاءة المستخلص كمثبط لتآكل الفولاذ الكربوني.

أظهرت النتائج كفاءة تحلل بلغت 96% عند استخدام 0.2 غ من الحفاز وعند تركيز ابتدائي للصبغة قدره 15 جزءاً في المليون بعد 80 دقيقة من التشعيع، وارتفعت إلى 98% عند درجة حرارة 30 °م، مع انخفاض تدريجي في امتصاصية الصبغة وفق تحاليل الأشعة فوق البنفسجية-المرئية. كما حقق المستخلص كفاءة تثبيط بلغت 87% عند تركيز 300 جزء في المليون، وأظهرت القياسات الكهروكيميائية أنه يعمل كمثبط مختلط ذي تأثير كاثودي غالب، مع توافق عملية الامتزاز مع نموذج لانغموير.

الكلمات المفتاحية : الخرشوف البري، مالكيث اخضر، الفضة، أكسيد الكوبالت ، تحلل ضوئي ، تآكل.