



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Sciences et de La Technologies

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Génie de procédés et petrochimie

Spécialité: Génie chimique

Réalisé par: ZEGHDI Dhia eddine , BEN ALI Younes , AROUA Taher

**Synthèse verte de caractérisation des nano-composites, et évaluation
de leur activité photo-catalytique pour la dégradation des polluants organiques**

Devant le jury composé de:

Mr. Rouahna Nor Eddine	Université Echahid Hamma Lakhdar	Président
Mr. Reghoua abdellah	Université Echahid Hamma Lakhdar	Examineur
Mr. BOUAFIA Abderrhmane	Université Echahid Hamma Lakhdar	Encadreur

2023-2024

Remerciements

*Nos remerciements vont premièrement à Dieu tout puissant
Pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné
durant toutes ces années d'étude.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre
promoteur Dr. BOUAFIA Abderrhmane pour leur entière
disposition, leurs judicieux conseils, leur patience, leur
rigueur persévérance tout au long de notre projet.*

*Nous remercions aussi tous les enseignants du département
d'hydraulique, qui tout au long des années d'études nous ont
transmis leur savoir sans réserve.*

*Nous remercions tous nos collègues et amis pour leur aide et
leur soutien, et tous ceux qui ont contribué de proche ou de
loin à la réalisation de ce travail.*

Dedicaces

*Un fidèle hommage à ceux qui ont écrit une
histoire de gloire et d'héroïsme*

*La paix soit sur l'âme du frère commandant et
Moatasem Billah*

Toujours Al-Fateh 🤝 ❤️

Zeghdi Dhia Eddine

Dedicaces

À ceux qui croient en vous quand tout le monde vous laisse tomber. A ma mère et à mon père, je dédie cette recherche, et je les remercie de toujours croire en mes capacités.

Aroua Taher

Dedicaces

*Mon parcours universitaire s'achève après beaucoup
de fatigue et d'épreuves.*

*Et voilà que je termine mes recherches de fin d'études
avec plein d'enthousiasme et d'énergie.*

*Je suis reconnaissant à tous ceux qui ont joué un rôle
déterminant dans ma carrière.*

Et aide-moi, ne serait-ce qu'un peu.

Parents, famille, amis et professeurs estimés.

Je vous présente mes recherches de fin d'études.

Ben Ali Younees

Résumer

La méthode de synthèse verte des nanoparticules est meilleure que les méthodes physiques et chimiques traditionnelles, Des nanocomposites $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ pour oxydes métalliques de zinc et de fer ont été préparés à partir d'un extrait végétal de feuilles de *laurus nobilis* En tant qu'agents de bioréduction des ions métalliques. Nous nous sommes appuyés sur l'étude de deux variables : l'extrait végétal et la concentration en chlorure de fer et en acétate de zinc, Afin d'étudier les propriétés des nanocomposites formés, nous avons utilisé les techniques d'analyse suivantes: Afin d'étudier les propriétés des nanocomposites formés, nous avons utilisé les techniques d'analyse suivantes : UV-Vis, FT-IR et DRX. Enfin, nous avons évalué l'activité photocatalytique des nanocomposites $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ formés par la méthode de synthèse verte.

Mots Clés : Nanocomposites ; *Laurus nobilis* ; L'activité photocatalytique

المخلص:

تعد طريقة التوليف الأخضر للجسيمات النانوية أفضل من الطرق الفيزيائية والكيميائية التقليدية. تم تحضير المركبات النانوية $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ لأكاسيد معدن الزنك والحديد من المستخلص النباتي لأوراق نبات الغار كعوامل اختزال حيوي للأيونات المعدنية. اعتمدنا على دراسة متغيرين: المستخلص النباتي وتركيز كلوريد الحديد وخلات الزنك لدراسة خواص المركبات النانوية المتكونة استخدمنا تقنيات التحليل التالية: لدراسة خواص المركبات النانوية. تم استخدام تقنيات التحليل التالية: UV-Vis و FT-IR و XRD. أخيراً، قمنا بتقييم نشاط التحفيز الضوئي للمركبات النانوية $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ المتكونة بطريقة التوليف الأخضر.

الكلمات المفتاحية: المركبات النانوية، نبات أوراق الغار، نشاط التحفيز الضوئي.

Abstract:

The green synthesis method of nanoparticles is better than traditional physical and chemical methods. $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ nanocomposites for zinc and iron metal oxides were prepared from plant extract of *laurus nobilis* leaves. as metal ion bioreduction agents. We relied on the study of two variables: the plant extract and the concentration of iron chloride and zinc acetate. In order to study the properties of the nanocomposites formed, we used the following analysis techniques: In order to To study the properties of the nanocomposites formed, we used the following analysis techniques: UV-Vis, FT-IR and XRD. Finally, we evaluated the photocatalytic activity of $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ nanocomposites formed by the green synthesis method.

Keywords: Nanocomposites ; *Laurus nobilis*, Photocatalytic activity.

Liste des Figures

Figure (I.1) : Photo de <i>Laurus nobilis</i>	7
Figure (I.2): Aspect morphologique de <i>laurus nobilis</i> (A) le feuilles,(B) les fleurs,(C) les fruits.	8
Figure (I.3) : Origine et distribution géographique de <i>Laurus nobilis</i> L.	9
Figure (II.1) : Gamme de tailles de nanoparticules par rapport aux principales structures chimiques et biologiques	16
Figure (II.2) : Diagramme signifiant les types et caractéristiques des nanocatalyseurs.....	17
Figure (II.3) : Pouvoir antimicrobien divergent des nanoparticules métalliques.	18
Figure (II.4) : Propriétés optiques des nanoparticules.....	19
Figure (II.5) : Mécanisme de photodégradation du colorant à l'aide de nanoparticules.....	20
Figure (II.6) : Types de nanoparticules.	20
Figure (II.8): Hematite crystal structure: (a) Rhombohedral unit cell with 10 atoms; (b) 2×2×2 repetition highlighting (0001) plane layering; (c) Hexagonal unit cell with 30 atoms. Silver/gold spheres represent Fe atoms with up/down spin, red spheres are O atoms. The c-axis is along the z direction.	22
Figure (II.9): Schéma de principe du traitement sol-gel.....	23
Figure (II.10) : Synthèse hydrothermale de nanoparticules.	24
Figure (II.11) : Synthèse verte pour les nanoparticules d'oxyde de fer.	25
Figure (II.12) : Classification des polyphénols	26
Figure (III.1) : Mécanisme de synthèse verte des nanocomposites d'oxydes métalliques.....	36
Figure (III.2) : Synthèse verte des nanocomposites α -Fe ₂ O ₃ /ZnO NC en utilisant extrait d d'extrait de feuille de <i>Laurus nobilis</i> L.	40
Figure (III.3) : Appareil Diffraction des rayons X (DRX).	41
Figure (III.4) : Schéma de principe du montage d'un diffractomètre DRX.....	42
Figure (III.6) : Représentation schématique du spectrophotomètre UV-Vis.....	44
Figure (III.7) : Appareil Spectroscopie infrarouge (FTIR).....	45
Figure (III.8) : Schéma du spectrophotomètre à transformée de Fourier (FTIR).....	46
Figure (III.9) : Changement de couleur lors de la phytoréduction de FeCl ₂ et Zn(CH ₃ CO ₂) ₂ en α -Fe ₂ O ₃ /ZnO NC : observation optique.	47
Figure (III.10) : Résumé graphique illustrant le mécanisme de synthétiser des α -Fe ₂ O ₃ /ZnO NC à partir de l'extrait des feuilles de <i>Laurus nobilis</i> L.	48
Figure (III.11) : Spectres UV-visible du nanocomposite α -Fe ₂ O ₃ /ZnO et de l'extrait de feuille de <i>Laurus nobilis</i> L.	49

Figure (III.12) : Spectre FT-IR de l'extrait des feuilles d' <i>Laurus nobilis</i> L.	51
Figure (III.13) : Spectre FT-IR de nanocomposite α -Fe ₂ O ₃ /ZnO synthétisées à avant le recuit.	51
Figure (III.14) : Spectre FT-IR de nanocomposite α -Fe ₂ O ₃ /ZnO synthétisées à après le recuit.	52
Figure (III.15) : Modèle XRD du nanocomposite α -Fe ₂ O ₃ /ZnO synthétisés en utilisant l'extrait de feuille de <i>Laurus nobilis</i> L.	53
Figure (IV.1) : Industries chargées de rejeter des effluents de colorant dans l'environnement [19].	64
Figure (IV.2) : Photo de rose bengale poudre	66
Figure (IV.3) : Nanocomposites α -Fe ₂ O ₃ /ZnO préparés.	68
Figure (IV.4): la photodégradation du RB Sous exposition au soleil.....	69
Figure (IV.5) : photodégradation du rose bengale (RB) utilisant des α - Fe ₂ O ₃ /ZnO NC.	70
Figures (IV.6): Dégradation photocatalytique de l'absorption des colorants (a) RB et (b) Absorbance (c) Dégradation en utilisant α - Fe ₂ O ₃ /ZnO NC à différents temps d'irradiation sous irradiation par la lumière solaire.	71

Liste des tableaux

Tableau (I.1): La position systématique de *Laurus nobilis* L [5]. 6

Tableau (I.2): Composition Phytochimique de l'Extrait Aqueux des Feuilles de *Laurus nobilis* L..... 10

Tableau (IV.1) : Les propriétés physico-chimiques du Rose Bengale 67

Liste des abréviations

NPs : Nanoparticules

α -Fe₂O₃ : Hématite

ZnO : Oxyde de zinc

UV-visible : Spectroscopie ultraviolette

FTIR : Spectroscopie infrarouge

DRX : Diffraction des rayons X

NC : Nanocomposites

RB : Rose Bengal

JCPDS : Comité mixte sur les normes de diffraction des poudres

Sommaire

Remercîments	I
Dedicaces	II
Résumer	V
Abstract:	V
Liste des Figures	VI
Liste des tableaux	VIII
Liste des abréviations	IX
Sommaire.....	X
Introduction générale.....	1
Referances	3

Chapitre I : Étude Ethnobotanique de *Laurus nobilis* L.

I. Monographies de plante médicinale :.....	5
I.1. <i>Laurus nobilis</i> L. :	5
I.1.1. Étymologie :	5
I.1.2. Position Systématique	5
I.1.3. Description botanique :	6
I.1.4. Origine et répartition géographique :	8
I.1.5. Composition phytochimique de <i>laurus nobilis</i> :.....	9
Références bibliographiques.....	11

Chapitr II: Etat de l'art sur le nanoparticules.

II.1. Généralité sur les nanomatériaux :.....	15
II.1.1. Les nanomatériaux :.....	15
II.1.1.1. Historique :	15
II.1.2. Les nanoparticules métalliques :	16
II.1.3. Propriétés des nanomatériaux :	17
II.2. Types et classification des nanomatériaux :.....	20
II.2.1. Nanomatériaux à base de carbone :	20
II.2.2. Nanomatériaux à base inorganique :.....	21
II.2.3. Nanomatériaux composites :.....	21
II.2. Les nanoparticules métalliques :.....	21
2.1. Structure d'oxyde de zinc (ZnO) :	21
II.2.2. Structure de l'hématite α -Fe ₂ O ₃ :.....	22
II.3. Méthodes de synthèse des nanoparticéules d'oxydes métalliques :	23

II.3.1. Synthèse des NPs par processus Sol-Gel :	23
II.3.2. Synthèse des NPs par processus hydrothermal :	23
II.3.3. Synthèse des NPs par chimie verte :	24
II.4. Présentation générale sur les polyphénols:	25
4.1. Définition :	25
II.4.2. Classification des polyphénols :	26
II.4.2.1. Acides phénoliques :	27
II.4.2.2. Les flavonoids :	27
II.4.2.3. Les tanins :	27
II.4.3. Propriétés physico-chimiques des polyphénols :	28
Références bibliographiques.....	29

Chapitr III : Synthèse verte et caractérisation

III.1. Synthèse verte à partir d'extraits des plantes :	34
III.1.1. Mécanisme de synthés vert des nanoparticules par les extraits des plantes:	35
III.1.2. Effet des métabolites secondaires dans la réaction de bioréduction :	36
III.2. Matériels et méthodes :	37
III.2.1. Matériels végétaux :	37
III.2.2.1. Préparation de l'extrait de plantes :	37
III.2.2.2. Synthèse verte des nanocomposites α -Fe ₂ O ₃ /ZnO :	38
III.2.3. Techniques de caractérisation:	40
III.2.3.1. Propriétés structurales et morphologiques:	40
III.2.3.2. Propriétés optiques:	42
III.3. Résultats et discussion :	46
III.3.1. Phytoréduction des ions et mécanisme impliqué :	46
III.3.2. Caractérisation des nanocomposite α -Fe ₂ O ₃ /ZnO:	48
III.3.2.1. Caractérisations optiques:	48
4. Conclusion:	54
Références bibliographiques.....	55

Chapitr IV: Etude de l'activité photocatalytique de Rose Bengale.

IV.1. Colorants organiques dans les eaux usées:	62
IV.1.1. Les colorants textiles et leur impact sur l'environnement :	63
IV.1.2. Types de colorants:	64
IV.1.3. Élimination du colorant par adsorption:	65
IV.1.4. Photocatalyse	65

IV.1.5. Rose Bengale :.....	66
IV.1.5.1. Définition :	66
IV.2. Evaluation de l'activité photocatalytique :.....	67
IV.2.1. Réactifs chimiques:	67
IV.2.2. Préparation des suspensions des nanocomposites α -Fe ₂ O ₃ /ZnO :	68
IV.2.3. Activité Photocatalytique :	68
IV.3. Résultats de l'Activité photocatalytique des α - Fe ₂ O ₃ /ZnO NC pour la dégradation des colorants (RB):	69
IV.4. Conclusion:.....	71
Conclusion	77

Introduction générale

La nanotechnologie est l'une des découvertes récentes les plus importantes des scientifiques, car des nanomatériaux aux applications multiples ont été développés [1].

La biotechnologie a émergé pour développer la nanotechnologie grâce à une synthèse plus verte de nanoparticules grâce à une méthode peu coûteuse et respectueuse de l'environnement. Il existe de nombreuses plantes médicinales réparties dans le monde qui contiennent des composés phytochimiques tels que des polyphénols et des alcaloïdes. Ces composés sont utilisés pour produire des nanoparticules à partir d'oxydes métalliques. Ces composés chimiques contenus dans les plantes sont classés comme récepteurs majeurs des ions métalliques [2].

La synthèse verte de nanoparticules fait l'objet d'une grande attention. Une méthode a été trouvée pour obtenir des nanoparticules à partir d'un extrait de plante, où les composés chimiques présents dans les plantes jouent un rôle d'agent réducteur pour les ions métalliques pendant le processus de synthèse [3].

En raison des propriétés structurales, catalytiques et électroniques des nanomatériaux préparés par synthèse verte d'oxydes métalliques tels que l'hématite Fe_2O_3 , qui est l'une des trois formes stables de l'oxyde de fer et possède une structure cristalline à symétrie hexagonale, ce qui lui confère un caractère physique distinctif. des propriétés telles que la double réfraction et une dureté élevée, en plus de l'oxyde de zinc ZnO . Il possède de multiples structures cristallines, mais la forme la plus stable et la plus répandue est la forme hexagonale [4].

L'objectif de ce travail est de synthétiser et de caractériser des nanocomposites $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ d'oxydes métalliques de zinc et de fer basés sur la chimie verte, à partir d'extrait de feuille de *laurus nobilis*, et de tester leur activité photocatalytique [5].

Referances

- [1] Roualdès, Stéphanie. "Les nanomatériaux pour l'environnement et l'énergie." *l'actualité chimique* 331 (2009): 19.
- [2] A. P. Nikalje, "Nanotechnology and its applications in medicine," *Med chem*, vol. 5, pp. 081-089, 2015
- [3] Adeyemi, D. K., et al. "Green synthesis of Ag, Zn and Cu nanoparticles from aqueous extract of Spondias mombin leaves and evaluation of their antibacterial activity." *African Journal of Clinical and Experimental Microbiology* 21.2 (2020): 106-113.
- [4] S. A. Jayanthi, D. M. G. T. Nathan, J. Jayashainy, and P. Sagayaraj, "A novel hydrothermal approach for synthesizing α -Fe₂O₃, γ -Fe₂O₃ and Fe₃O₄ mesoporous magnetic nanoparticles," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 162, pp. 316-325, 2015.
- [5] Jasso Salcedo, Alma Berenice. *Synthèse et mise en oeuvre de nanocomposites à base d'oxyde de zinc utilisés pour le traitement photocatalytique de l'eau contaminée par des disrupteurs endocriniens*. Diss. Université de Lorraine, 2014.

Chapitre I : Étude
Ethnobotanique de Laurus
nobilis L

I. Monographies de plante médicinale :

I.1. *Laurus nobilis* L. :

I.1.1. Étymologie :

Le nom "*Laurus*" trouve son origine dans le mot latin "*laureola*", qui signifie "couronne de laurier". Les Romains et les Grecs de l'Antiquité utilisaient le "*Laurus nobilis*" comme épice et remède [1]. Sacré dans la mythologie romaine, le laurier couronnait les poètes et les champions olympiques. Apollon, dieu de la prophétie, était associé à cette plante. Le laurier, ou laurier-sauce, est un arbre aromatique aux feuilles parfumées, utilisé en cuisine et en médecine. Son histoire remonte aux Jeux Pythiques, ancêtres des Jeux olympiques [2]. Les extraits de laurier traitent les maux digestifs et inflammatoires. "*Laurus nobilis*" porte ainsi un héritage culturel et médical, symbolisant la victoire et la gloire de l'Antiquité à nos jours. Les références à cette plante sont nombreuses dans la littérature et l'art, témoignant de son importance intemporelle [3].

Nom scientifique: *Laurus nobilis* L. (Lauraceae)

Noms vernaculaires français: Laurier noble, Laurier-sauce

Noms vernaculaires: er-rand, 'asâ mûsâ, a'sâ sîdnâ mûsâ, sajarat el-gâr, el-gâr (Arabe), laurier noble, laurier sauce, laurier d'apollon (Français local) [4].

I.1.2. Position Systématique

Le laurier noble (*Laurus nobilis* L.) appartient à la famille des Lauracées et est aussi appelé laurier-sauce ou d'Apollon. Les Lauracées font partie de l'ordre des Laurales selon la classification APG III, basée sur la phylogénie moléculaire. Cette classification moderne remplace progressivement celle de Cronquist, axée sur la morphologie. L'ordre des Laurales comprend d'autres familles tropicales, et les botanistes continuent d'affiner la classification avec des mises à jour comme APG IV en 2016.

Le **Tableau (I.1)** présente la classification de *Laurus nobilis* L. selon le système de positionnement des plantes.

Tableau (I.1): La position systématique de *Laurus nobilis* L [5].

Règne	Plantae
Sous règne	Tracheobionta
Embranchement	Magnoliophyta
Classe	Magnoliopsida
Sous-classe	Magnoliidae
Ordre	Laurales
Famille	Lauraceae
Genre	Laurus
Espèce	<i>Laurus nobilis</i> L.
Nom vernaculaire algérien : er-rand	Français : laurier sauce

I.1.3. Description botanique :

Le *Laurus nobilis*, plus communément appelé *Laurier-sauce*, est un petit arbre originaire des régions méditerranéennes, appartenant à la famille des Lauracées (**Figure (I.1)**). Ses feuilles persistantes ont un vert profond sur le dessus et un vert plus clair en dessous, et sont la partie la plus utilisée de la plante depuis l'Antiquité [6], [7].

Les feuilles de *Laurus nobilis* sont riches en composés phytochimiques, notamment en composés phénoliques tels que les acides phénoliques, les flavonoïdes et les alcaloïdes. Ces composés leur confèrent de puissantes propriétés antioxydantes, antibactériennes et stimulantes pour le système immunitaire. De ce fait, elles ont été traditionnellement utilisées dans la cuisine, mais aussi dans le traitement de problèmes digestifs tels que l'indigestion, la diarrhée, et même pour soulager les rhumatismes. De plus, les extraits de ses feuilles trouvent leur place dans l'industrie cosmétique pour leurs bienfaits [5], [8].

Cet arbre aromatique, avec ses branches dressées grisâtres, produit des fleurs blanches délicatement parfumées au printemps. Les feuilles sont de forme ovale et d'un vert plus foncé sur le dessus. Le *Laurus nobilis* peut être classé en plusieurs types, en fonction de la forme des feuilles et de la taille des fruits. Parmi les variétés, on trouve le Laurier-amande, le Laurier-benzoin, le Laurier-cerise, le Laurier des bois et le Laurier rose, pour n'en citer que quelques-uns [4], [9].

Le Laurier-sauce, avec son parfum caractéristique et ses propriétés médicinales, a joué un rôle important dans l'histoire, tant dans la cuisine que dans la médecine traditionnelle. De nos jours, il continue d'être apprécié pour sa valeur culinaire et ses bienfaits pour la santé [9], [10].



Figure (I.1) : Photo de *Laurus nobilis*.

L'arbre de *laurus nobilis* se compose de cinq éléments distinctifs :

- Les feuilles : De forme lancéolée, elles mesurent environ 10 cm de long pour 3 à 5 cm de large. Persistantes, elles ont une texture lisse et brillante, et dégagent une forte saveur aromatique [5].
- Les fleurs : À la fin du printemps, de petites fleurs discrètes font leur apparition. De couleur blanc crème à jaune pâle, elles sont disposées en forme d'étoile et exhalent un parfum délicat. Ces fleurs sont regroupées en petites grappes appelées ombelles [5].
- Les fruits : Les fleurs fécondées donnent naissance à de petites drupes ovales, semblables à des olives. Vertes dans un premier temps, elles virent au noir à mesure qu'elles mûrissent, généralement en septembre. Ces fruits contiennent une seule graine [5], [8].
- Les branches et les rameaux : Les branches du laurier-sauce s'élèvent obliquement, portant de jeunes pousses fines, glabres et d'une couleur brun rougeâtre distinctive. Les rameaux sont caractérisés par des bourgeons étroits et allongés, mesurant de 0,2 à 0,4 cm de long, et présentant une teinte vert rougeâtre [5].
- Les tiges et l'écorce : Les tiges des rameaux sont droites, grises à la base et vertes vers les extrémités. L'écorce du tronc, d'abord de couleur vert olive à noir, prend une teinte grise avec le temps. La formation d'une écorce véritable est un processus lent et peut prendre plusieurs années [5].

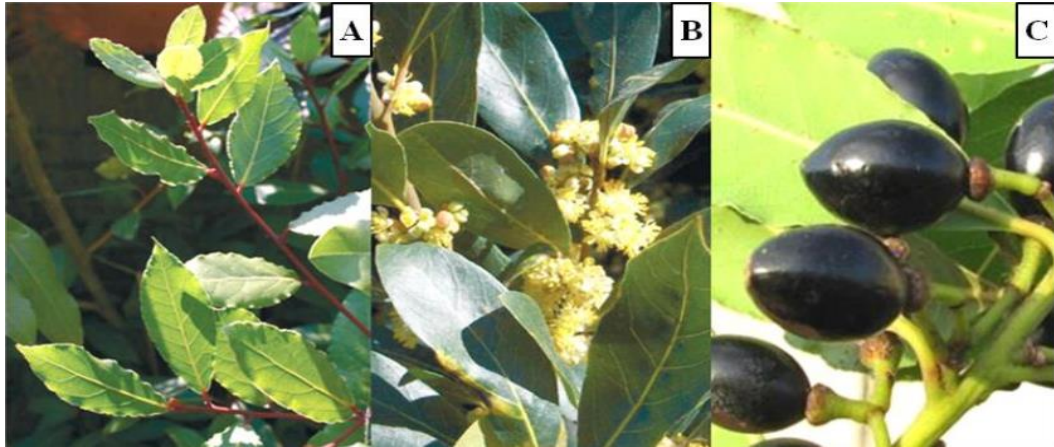


Figure (I.2): Aspect morphologique de *Laurus nobilis* (A) les feuilles, (B) les fleurs, (C) les fruits [11].

I.1.4. Origine et répartition géographique :

I.1.4.1. Dans le monde :

Le *Laurus nobilis*, plus communément appelé laurier-sauce ou laurier noble, est une espèce d'arbre originaire d'Asie mineure, plus précisément de la région de l'actuelle Turquie. Il a été introduit en Europe par les Grecs et les Romains, qui l'ont répandu dans tout le bassin méditerranéen, dont la France, où il pousse à l'état naturel sur les littoraux provençal, sud-ouest et corse. Le laurier s'est également naturalisé dans d'autres régions au climat méditerranéen, dont les pays du Moyen-Orient, la Russie, l'Amérique centrale, et la plupart des pays arabes (**Figure (I.3)**) [12].

Le laurier-sauce s'adapte à différentes conditions climatiques et types de sols, tolérant un pH allant de 4,5 à 8,2. On le trouve à l'état sauvage et cultivé, et il est parfois utilisé comme plante ornementale. En Europe centrale, où les hivers sont plus froids, il est souvent cultivé dans des bacs pour être rentré à l'intérieur [13].

Les principaux pays producteurs de laurier-sauce sont la Turquie, qui fournit les deux tiers de la production mondiale, avec un commerce générant 20 millions de dollars de recettes annuelles. L'Albanie, le Maroc, la Grèce et l'Italie sont également des producteurs notables.

La culture et l'utilisation du laurier-sauce s'étendent bien au-delà de ces régions, car il s'agit d'une plante aux multiples usages, tant culinaires que médicinaux, et son histoire remonte à des milliers d'années.

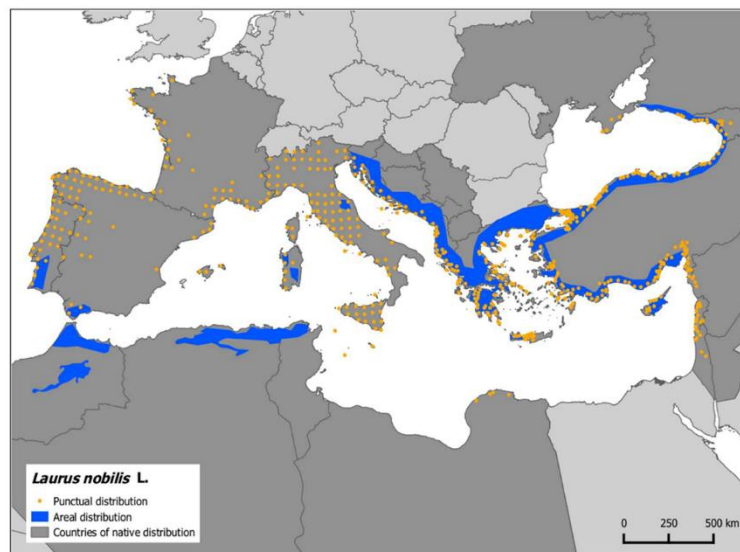


Figure (I.3) : Origine et distribution géographique de *Laurus nobilis* L.[14]

I.1.4.2. En Algérie :

En Algérie, les arbustes de laurier poussent dans les forêts d'aulnes des zones humides d'Annaba, d'El Kala et de Guerbère Senhadja. Bien que la phytothérapie soit une pratique ancienne, les propriétés biologiques de cette plante sont peu étudiées. Le laurier a des utilisations médicinales et culinaires, avec des composés antibactériens et anti-inflammatoires. Ces zones humides abritent une riche biodiversité, et le laurier y ajoute une valeur écologique et potentielle valeur médicinale. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour explorer pleinement les avantages pour la santé de cette plante [15].

I.1.5. Composition phytochimique de *laurus nobilis* :

De nombreuses études ont été menées sur la plante du *laurus nobilis* afin d'identifier la composition chimique de cette plante, et des études ont prouvé qu'il s'agit d'une plante riche en composés chimiques comme suit:

- Huile essentielle : L'huile essentielle de Laurier noble est composée de divers composés, notamment l'eucalyptol (1,8-cinéole), l'alpha-pinène, le beta-pinène, le terpinène-4-ol, le linalol, le géraniol, l'acétate de terpinyle et le méthyl chavicol. Ces composés donnent à la plante son arôme distinctif et sont responsables de nombreuses propriétés médicinales [16].
- Polyphénols : Les feuilles de Laurier noble contiennent une gamme de polyphénols, y compris des flavonoïdes tels que l'apigénine, la lutéoline, la quercétine et leurs dérivés glycosides. Ces polyphénols sont connus pour leurs propriétés antioxydantes et anti-inflammatoires [17], [18].

- Triterpènes : Le *laurus nobilis* contient également des triterpènes, tels que l'acide oléanolique, l'acide ursolique et leurs dérivés. Ces composés ont montré des effets biologiques significatifs, notamment des propriétés anti-microbiennes et anti-inflammatoires [19], [20].
- Alcaloïdes : Bien que présents en quantités plus faibles, des alcaloïdes tels que la laurine, la laurilitine et la méthylcavicoline ont été isolés à partir de la plante. Les alcaloïdes peuvent avoir divers effets pharmacologiques [21], [22].
- Saponines : Les feuilles et les baies de Laurier noble contiennent des saponines, qui sont connues pour leurs propriétés émulsifiantes et leur capacité à réduire le cholestérol [23].
- Tannins : Les feuilles contiennent également des tannins, qui contribuent aux propriétés astringentes de la plante et peuvent avoir des effets bénéfiques sur la santé digestive [24].
- Acides phénoliques : L'acide caféique, l'acide férulique et l'acide chlorogénique sont quelques-uns des acides phénoliques trouvés dans le Laurier noble, contribuant à ses propriétés antioxydantes [18], [19].

Voici un **Tableau (I.2)** résumant la composition phytochimique de l'extrait aqueux de feuilles de *Laurus nobilis* :

Tableau (I.2): Composition Phytochimique de l'Extrait Aqueux des Feuilles de *Laurus nobilis L*.

Phytochimiques	Composition
Huiles essentielles	Composé de divers composés, notamment l'eucalyptol (1,8-cinéole), l'alpha-pinène, le beta-pinène, le terpinène-4-ol, le linalol, le géraniol, l'acétate de terpinyle et le méthyl chavicol [19].
Polyphénols	Contient des flavonoïdes tels que l'apigénine, la lutéoline, la quercétine et leurs dérivés glycosides [25].
Triterpènes	Contient des composés comme l'acide oléanolique, l'acide ursolique et leurs dérivés [19].
Alcaloïdes	Contient des composés comme la laurine, la laurilitine et la méthylcavicoline [24].
Saponines	Présent dans les feuilles et les baies [19].
Tannins	Présent dans les feuilles [19].
Acides phénoliques	Contient de l'acide caféique, de l'acide férulique et de l'acide chlorogénique [19].

Références bibliographiques

- [1] A. Anzano, B. de Falco, L. Grauso, R. Motti, and V. Lanzotti, “Laurel, *Laurus nobilis* L.: a review of its botany, traditional uses, phytochemistry and pharmacology,” *Phytochem. Rev.*, vol. 21, no. 2, pp. 565–615, Apr. 2022, doi: 10.1007/s11101-021-09791-z.
- [2] I. A. Ross, “*Laurus nobilis*,” in *Medicinal Plants of the World*, Totowa, NJ: Humana Press, 2001, pp. 261–270.
- [3] C. L. Schoch *et al.*, “NCBI Taxonomy: a comprehensive update on curation, resources and tools,” *Database (Oxford)*, vol. 2020, Jan. 2020, doi: 10.1093/database/baaa062.
- [4] Bellakhder J, “La pharmacopée marocaine traditionnelle medecine, Médecine arabe ancienne et savoirs populaires. Casablanca: Le fenec. 764 p.,” *Le Fennec*, vol. 764, p. p1997, 1997.
- [5] S. Quezel, R., Santa, “Nouvelle flore de l’Algérie et des régions désertiques méridionales.,” p. 977, 1963.
- [6] N. Uchiyama *et al.*, “Trypanocidal terpenoids from *Laurus nobilis* L.,” *Chem. Pharm. Bull.*, vol. 50, no. 11, pp. 1514–1516, 2002, doi: 10.1248/cpb.50.1514.
- [7] S. De Marino, N. Borbone, F. Zollo, A. Ianaro, P. Di Meglio, and M. Iorizzi, “New sesquiterpene lactones from *Laurus nobilis* leaves as inhibitors of nitric oxide production,” *Planta Med.*, vol. 71, no. 8, pp. 706–710, 2005, doi: 10.1055/s-2005-864191.
- [8] A. Chawla, H. Kaur, P. Chawla, and U. S. Baghel, “a Review on Chemistry and Biological Activities of Thiazole,” *J. Glob. Trends Pharm. Sci.*, vol. 5, no. 2, pp. 1641–1648, 2014.
- [9] L. Caputo *et al.*, “*Laurus nobilis*: Composition of essential oil and its biological activities,” *Molecules*, vol. 22, no. 6, p. 930, 2017, doi: 10.3390/molecules22060930.
- [10] R. Patrakar, M. Mansuriya, and P. Patil, “Phytochemical and Pharmacological Review on *Laurus Nobilis*,” *Int. J. Pharm. Chem. Sci.*, vol. 1, no. 2, pp. 595–602, 2012, [Online]. Available: www.ijpcsonline.com.
- [11] H. Chaaben and Z. Ben Selma Mohamed, “Etude des Propriétés Physico-chimiques de l’Huile de Fruit de *Laurus nobilis* et Effet de la Macération par les Fruits et les Feuilles de *Laurus nobilis* sur les Propriétés Physico-Chimiques et la Stabilité Oxydative de l’Huile d’Olive,” *J. new Sci.*, vol. 8, no. 8, pp. 873–880, 2015.
- [12] P. R. Kemp, “Phenological Patterns of Chihuahuan Desert Plants in Relation to the Timing of Water Availability,” *J. Ecol.*, vol. 71, no. 2, p. 427, 1983, doi: 10.2307/2259725.

- [13] V. A. Parthasarathy, T. J. Zachariah, and B. Chempakam, “Bay leaf,” *Chem. Spices*, pp. 426–434, 2008, doi: 10.1097/nt.0000000000000493.
- [14] A. Paparella, B. Nawade, L. Shaltiel-Harpaz, and M. Ibdah, “A Review of the Botany, Volatile Composition, Biochemical and Molecular Aspects, and Traditional Uses of *Laurus nobilis*,” *Plants*, vol. 11, no. 9, p. 1209, Apr. 2022, doi: 10.3390/plants11091209.
- [15] R. Guedouari, “Étude comparative de la pharmacognosie des différentes parties du *Laurus nobilis* L.: essais de formulations thérapeutiques.” Université de Boumerdès-M’hamed Bougara, 2012.
- [16] L. Caputo *et al.*, “*Laurus nobilis*: Composition of Essential Oil and Its Biological Activities,” *Molecules*, vol. 22, no. 6, p. 930, Jun. 2017, doi: 10.3390/molecules22060930.
- [17] E. Dobroslavić, I. Elez Garofulić, and J. Z. Ilich, “Potential of Laurel (*Laurus nobilis* L.) Leaf Polyphenols for Modulation of Body Composition,” *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 4, p. 2275, Feb. 2023, doi: 10.3390/app13042275.
- [18] E. Dobroslavić, I. E. Garofulić, Z. Zorić, S. Pedisić, and V. Dragović-Uzelac, “Polyphenolic characterization and antioxidant capacity of *Laurus nobilis* L. Leaf extracts obtained by green and conventional extraction techniques,” *Processes*, vol. 9, no. 10, p. 1840, Oct. 2021, doi: 10.3390/pr9101840.
- [19] F. Awada *et al.*, “*Laurus nobilis* Leaves and Fruits: A Review of Metabolite Composition and Interest in Human Health,” *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 7, p. 4606, Apr. 2023, doi: 10.3390/app13074606.
- [20] M. Z. D. Moura, R. M. Dos Santos Isaias, and G. L. Gonçalves Soares, “Ontogenesis of internal secretory cells in leaves of *Lantana camara* (Verbenaceae),” *Bot. J. Linn. Soc.*, vol. 148, no. 4, pp. 427–431, Aug. 2005, doi: 10.1111/j.1095-8339.2005.00426.x.
- [21] A. Alejo-Armijo, J. Altarejos, and S. Salido, “Phytochemicals and biological activities of laurel tree (*Laurus nobilis*),” *Nat. Prod. Commun.*, vol. 12, no. 5, pp. 743–757, May 2017, doi: 10.1177/1934578x1701200519.
- [22] Y. K. Khodja, M. Bachir-bey, R. Ladjouzi, D. Katia, and B. Khettal, “In vitro antioxidant and antibacterial activities of phenolic and alkaloid extracts of *Laurus nobilis*,” *South Asian J. Exp. Biol.*, vol. 11, no. 3, pp. 345–354, May 2021, doi: 10.38150/sajeb.11(3).p345-354.
- [23] R. Guedouari and M. Nabiev, “Anti-inflammatory activity of different extracts from *Laurus nobilis* growing in Algeria,” *Alger. J. Environ. Sci. Technol. Mon. Ed.*, vol. 7, no. 4, pp. 2115–2120, 2021, [Online]. Available: www.aljest.org.

- [24] W. Dhifi, S. Bellili, S. Jazi, S. Ben Nasr, M. El Beyrouthy, and W. Mnif, “Phytochemical composition and antioxidant activity of Tunisian *Laurus nobilis*,” *Pak. J. Pharm. Sci.*, vol. 31, no. 6, pp. 2397–2402, 2018.
- [25] Y. KHALED KHODJA, M. BACHİR-BEY, M. BELMOUHOU, R. LADJOUZI, F. DAHMOUNE, and B. KHETTAL, “The botanical study, phytochemical composition, and biological activities of *Laurus nobilis* L. leaves: A review,” *Int. J. Second. Metab.*, vol. 10, no. 2, pp. 269–296, Jun. 2023, doi: 10.21448/ijsm.1171836.

*Chapitr II: Etat de l'art sur le
nanoparticules.*

La synthèse verte de nanoparticules (NP) est à la fois économique et respectueuse de l'environnement. Dans le monde, il existe environ 20 000 plantes médicinales réparties dans 91 pays, dont 12 abritent un large éventail d'espèces végétales. Ces plantes sont riches en polyphénols et alcaloïdes, qui leur confèrent des propriétés antioxydantes, antidiabétiques et anti-diarrhéiques. Ces composés jouent également un rôle déterminant dans la synthèse des métaux et des nanoparticules [1].

Les nanoparticules d'oxyde de fer et d'oxyde de zinc en sont des exemples notables. Les nanoparticules d'oxyde de fer sont composées de matériaux ferromagnétiques présentant un magnétisme supérieur. Les trois formes stables d'oxydes de fer sont la magnétite (Fe_3O_4), la maghémite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) et l'hématite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$). La structure cristalline de ces oxydes de fer est constituée de plans serrés d'anions oxygène avec des cations de fer occupant des sites interstitiels octaédriques ou tétraédriques. Alors que les structures cristallines de Fe_3O_4 et de $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ sont similaires, le $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ présente des particules d'oxygène disposées dans un plan hexagonal compact avec des ions Fe^{3+} dans des sites octaédriques [2].

De même, les nanoparticules d'oxyde de zinc, connues pour leur large gamme d'applications, sont synthétisées à l'aide de méthodes vertes exploitant des extraits de plantes. Ces nanoparticules possèdent des propriétés uniques, telles que des capacités de filtrage des UV et une activité antibactérienne, ce qui les rend précieuses dans les cosmétiques, les produits pharmaceutiques et les appareils électroniques. Le processus de synthèse bénéficie des mêmes principes écologiques qui régissent la production de nanoparticules d'oxyde de fer, en utilisant les agents réducteurs et stabilisants naturels présents dans les composés végétaux [3].

Ensemble, la synthèse verte de nanoparticules d'oxyde de fer et d'oxyde de zinc démontre une approche durable de la nanotechnologie, exploitant l'abondance naturelle et la diversité chimique des plantes médicinales. Cette méthode réduit non seulement l'impact environnemental, mais favorise également le développement de matériaux avancés ayant diverses applications industrielles et biomédicales [4].

II.1. Généralité sur les nanomatériaux :

II.1.1. Les nanomatériaux :

II.1.1.1. Historique :

L'histoire des nanomatériaux remonte à l'Antiquité, lorsque les artisans et les alchimistes utilisaient des nanoparticules sans le savoir pour créer des objets colorés et durables. Par exemple, les Romains utilisaient des nanoparticules d'or pour créer des verres colorés, et les artisans chinois utilisaient des nanoparticules d'argent pour créer des céramiques antibactériennes. Cependant, la compréhension scientifique des nanomatériaux n'a commencé

qu'au 20^e siècle. En 1959, le physicien Richard Feynman a donné une conférence célèbre dans laquelle il a suggéré la possibilité de manipuler la matière à l'échelle atomique. Cette conférence a inspiré de nombreux chercheurs à explorer le monde des nanomatériaux [5].

Dans les années 1980 et 1990, des avancées majeures ont été réalisées dans le domaine de la microscopie et de la nanofabrication, permettant aux scientifiques d'observer et de manipuler des nanomatériaux avec une précision sans précédent. Ces avancées ont ouvert la voie à une explosion de la recherche sur les nanomatériaux, conduisant au développement de nouvelles applications dans divers domaines, notamment la médecine, l'électronique, l'énergie et l'environnement. Aujourd'hui, le domaine des nanomatériaux est en constante évolution, avec de nouvelles découvertes et applications émergentes en permanence [6]. Les nanomatériaux sont considérés comme l'une des technologies les plus prometteuses du 21^e siècle, avec le potentiel de révolutionner de nombreux aspects de nos vies.

II.1.2. Les nanoparticules métalliques :

Les nanoparticules métalliques sont un type de nanomatériaux composés de métaux ou d'alliages métalliques à l'échelle nanométrique (*Figure (II.1)*). Elles présentent des propriétés uniques et prometteuses qui diffèrent de celles de leurs homologues en vrac, en raison de leur taille et de leurs effets quantiques. Ces propriétés comprennent une conductivité électrique et thermique améliorées, des propriétés optiques modifiées et une activité catalytique accrue [7].

La synthèse des nanoparticules métalliques peut être réalisée par diverses méthodes, notamment la réduction chimique, la décomposition thermique et la synthèse en phase vapeur et la synthèse verte. Ces méthodes permettent de contrôler la taille, la forme et la composition des nanoparticules, ce qui est essentiel pour leurs propriétés et leurs applications [8].

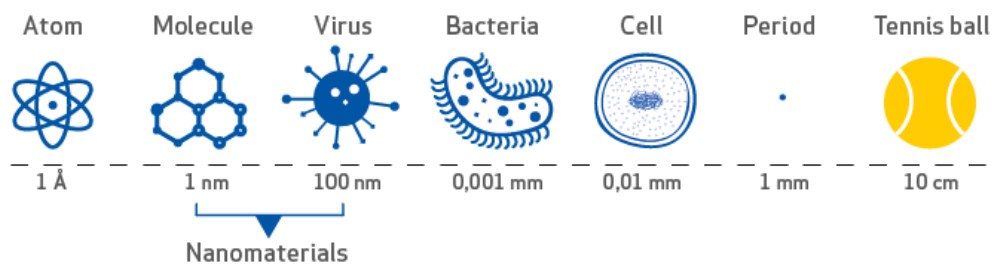


Figure (II.1) : Gamme de tailles de nanoparticules par rapport aux principales structures chimiques et biologiques

II.1.3. Propriétés des nanomatériaux :

II.1.3.1. Propriétés catalytiques :

La capacité d'un matériau à être un catalyseur dépend de ses propriétés physiques et de sa surface. Les scientifiques ont créé des nanoparticules avec une activité catalytique élevée et possèdent des propriétés physiques et une grande surface qui leur permettent d'être des catalyseurs efficaces [9].

Les nanoparticules se caractérisent par être des catalyseurs à haute activité catalytique (**Figure II.2**). La surface spécifique élevée qu'elles possèdent fournit des sites plus actifs pour les réactions chimiques. De plus, la taille et la forme des nanoparticules préparées peuvent être contrôlées et leurs propriétés catalytiques sont également caractérisées [10]. Propriétés électroniques et stabilité thermique et chimique, ce qui les rend stables pendant la réaction.

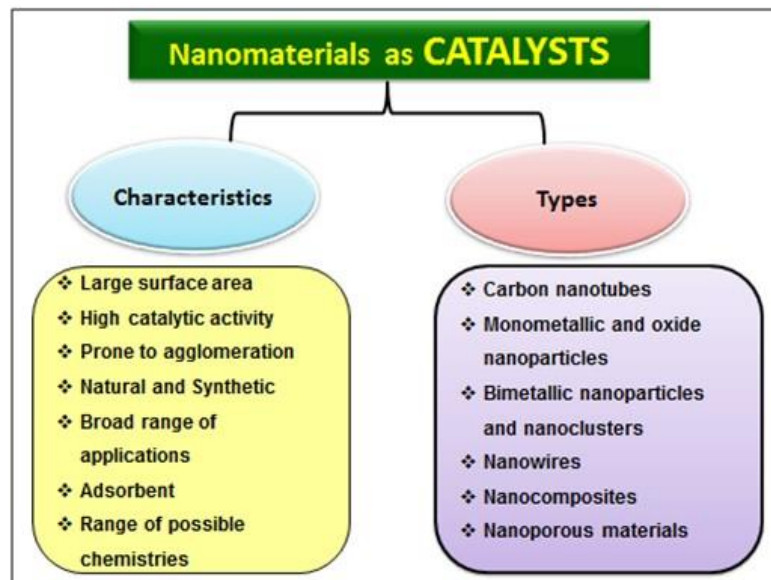


Figure II.2) : Diagramme signifiant les types et caractéristiques des nanocatalyseurs [11].

II.1.3.2. Propriétés antimicrobiennes :

Les nanoparticules, en raison de leur petite taille et de leurs propriétés physico-chimiques uniques, présentent un potentiel important dans la lutte contre les infections microbiennes (**Figure II.3**). Elles peuvent interagir avec les micro-organismes de diverses manières, entraînant des effets antimicrobiens, notamment des dommages à la membrane cellulaire, la production d'espèces réactives de l'oxygène, l'interférence avec les processus métaboliques et la libération d'ions métalliques [12]. Les nanoparticules d'argent, d'oxyde de zinc, de dioxyde de titane et de cuivre sont parmi les types de nanoparticules les plus étudiés pour leurs propriétés antimicrobiennes à large spectre [13]. Ces nanoparticules sont utilisées dans diverses applications, notamment la médecine, l'industrie alimentaire, l'agriculture et le

traitement de l'eau, pour le développement de nouveaux antibiotiques, de pansements antimicrobiens, d'implants médicaux, de revêtements antimicrobiens, de matériaux de pansement, de la conservation des aliments, de la protection des cultures et de la désinfection de l'eau [14]. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour optimiser l'efficacité et la sécurité des nanoparticules antimicrobiennes, ainsi que pour évaluer leur impact potentiel sur l'environnement et la santé humaine.

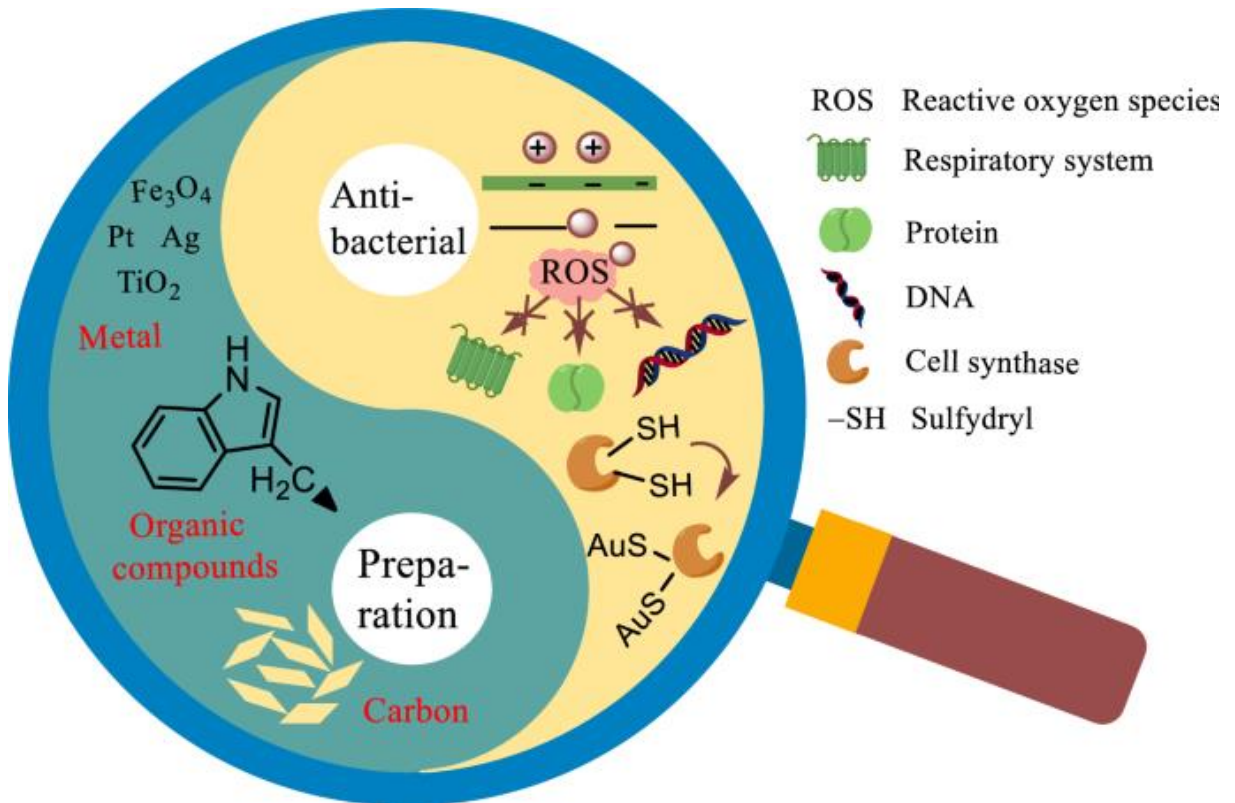


Figure (II.3) : Pouvoir antimicrobien divergent des nanoparticules métalliques [15].

II.1.3.3. Propriétés optiques

Les nanoparticules, en raison de leur petite taille et de leurs propriétés physico-chimiques uniques, présentent des propriétés optiques distinctes qui les différencient des matériaux en vrac (*Figure (II.4)*). Ces propriétés optiques sont influencées par divers facteurs, notamment la taille, la forme, la composition et l'environnement environnant des nanoparticules [16]. L'absorption et la diffusion de la lumière, la résonance plasmonique de surface, la fluorescence et la phosphorescence, et la diffusion Raman améliorée par la surface (SERS) sont quelques-uns des phénomènes optiques importants associés aux nanoparticules [17]. Ces propriétés ont de nombreuses applications potentielles, notamment le développement de nouveaux matériaux optiques, de biocapteurs et de diagnostics, d'imagerie biomédicale, de thérapie photodynamique, de cellules solaires et de DEL [18].

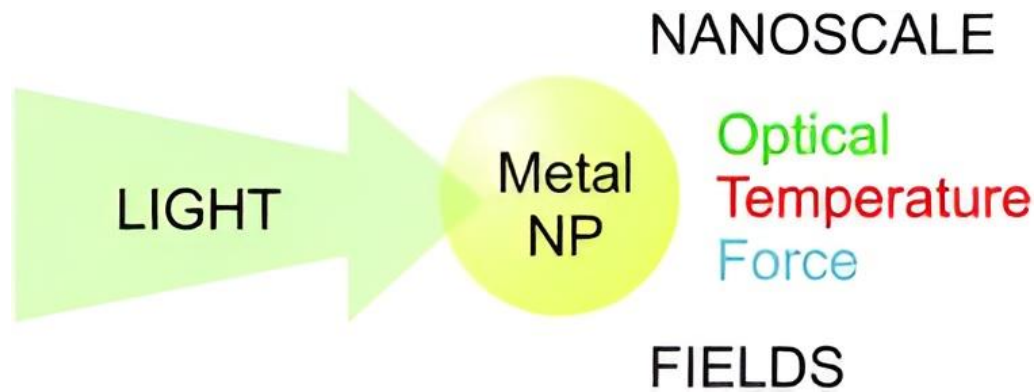


Figure (II.4) : Propriétés optiques des nanoparticules [19].

II.1.3.4. Propriétés photocatalytiques :

Les nanoparticules possèdent des propriétés photocatalytiques uniques qui les rendent intéressantes pour de nombreuses applications, notamment la purification de l'eau, la production d'énergie solaire et la synthèse de produits chimiques (**Figure (II.5)**). La photocatalyse est un processus qui utilise la lumière pour activer une réaction chimique. Dans le cas des nanoparticules, la lumière est absorbée par les particules, ce qui provoque l'excitation des électrons. Ces électrons excités peuvent alors participer à diverses réactions chimiques, telles que la réduction de l'eau en hydrogène ou l'oxydation des polluants organiques [20].

Les propriétés photocatalytiques des nanoparticules dépendent de plusieurs facteurs, notamment de leur taille, de leur forme et de leur composition. La taille et la forme des nanoparticules affectent leur surface et leur capacité à absorber la lumière. La composition des nanoparticules détermine leur bande interdite, qui est l'énergie nécessaire pour exciter un électron [21]. Les nanoparticules avec une bande interdite plus petite absorbent la lumière avec une plus grande longueur d'onde, ce qui les rend plus efficaces pour les applications utilisant la lumière visible.

Les nanoparticules ont été utilisées dans une variété d'applications photocatalytiques. Par exemple, elles ont été utilisées pour purifier l'eau contaminée par des polluants organiques, tels que les pesticides et les produits pharmaceutiques. Elles ont également été utilisées pour produire de l'hydrogène à partir de l'eau, ce qui est une source d'énergie propre et renouvelable. De plus, les nanoparticules ont été utilisées pour synthétiser des produits chimiques, tels que l'ammoniac et le méthanol [22].

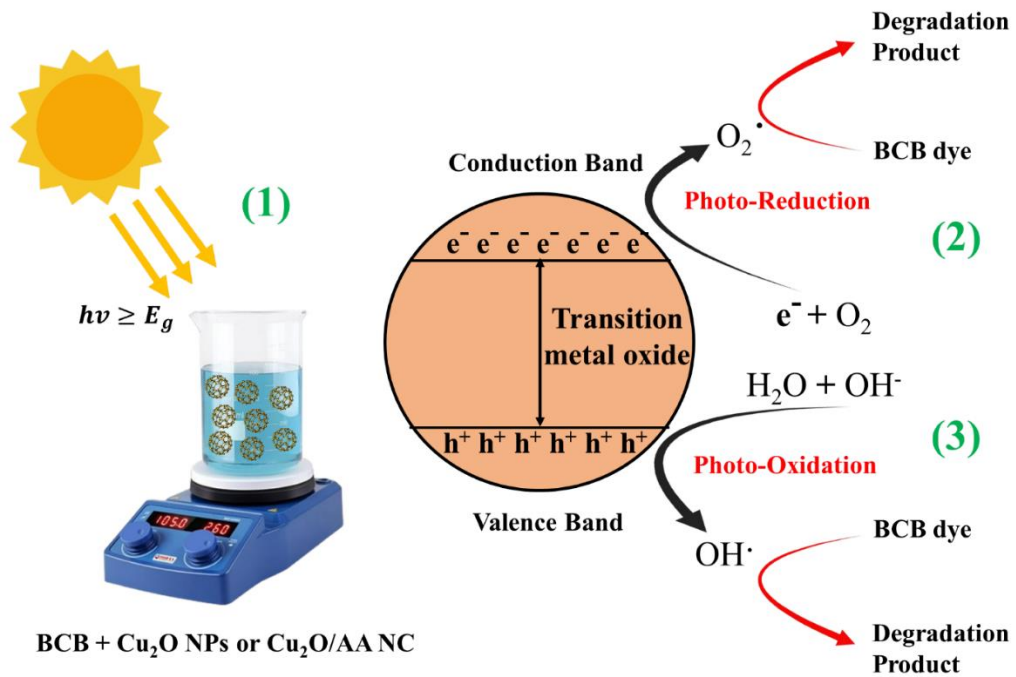


Figure (II.5) : Mécanisme de photodégradation du colorant à l'aide de nanoparticules [23].

II.2. Types et classification des nanomatériaux :

Les nanomatériaux peuvent être classés en quatre grandes catégories en fonction de leur composition et de leur structure (Figure (II.6)).

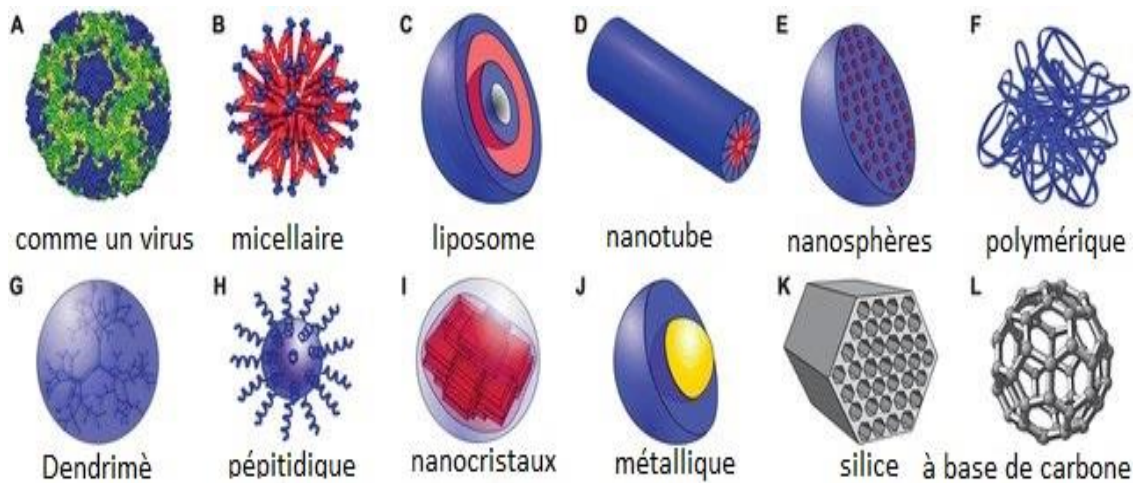


Figure (II.6) : Types de nanoparticules [24].

II.2.1. Nanomatériaux à base de carbone :

Les nanomatériaux à base de carbone sont une classe de matériaux fascinante qui a connu un intérêt croissant au cours des dernières décennies en raison de leurs propriétés uniques et de leurs applications potentielles dans divers domaines. Ces matériaux sont constitués

d'atomes de carbone liés entre eux par des liaisons covalentes, formant des structures de taille nanométrique [25].

II.2.2. Nanomatériaux à base inorganique :

Les nanomatériaux à base inorganique sont une classe de matériaux fascinante qui a connu un intérêt croissant au cours des dernières décennies en raison de leurs propriétés uniques et de leurs applications potentielles dans divers domaines. Ces matériaux sont constitués d'éléments inorganiques, tels que les métaux, les oxydes, les nitrures et les carbures, liés entre eux par des liaisons ioniques, covalentes ou métalliques, formant des structures de taille nanométrique [26].

II.2.3. Nanomatériaux composites :

Les matériaux nanocomposites sont une classe de matériaux qui combinent les propriétés de deux ou plusieurs matériaux différents à l'échelle nanométrique. Ces matériaux offrent des possibilités uniques pour concevoir des matériaux dotés de propriétés améliorées ou nouvelles, ouvrant la voie à des applications innovantes dans divers domaines [26].

II.2. Les nanoparticules métalliques :

2.1. Structure d'oxyde de zinc (ZnO) :

Les nanoparticules de ZnO sont des cristaux semi-conducteurs avec une structure wurtzite. Dans cette structure, chaque atome de zinc est entouré de quatre atomes d'oxygène disposés en forme de tétraèdre. Les atomes de zinc et d'oxygène sont liés par des liaisons covalentes. Les nanoparticules de ZnO peuvent avoir différentes formes, notamment sphériques, hexagonales et en forme de tige [27]. La forme des nanoparticules affecte leurs propriétés, telles que leur surface et leur bande interdite (**Figure (II.7)**).

La structure wurtzite des nanoparticules de ZnO leur confère des propriétés uniques qui les rendent intéressantes pour de nombreuses applications, notamment l'optoélectronique, la photocatalyse et les capteurs. Par exemple, la large bande interdite des nanoparticules de ZnO les rend adaptées à la fabrication de dispositifs optoélectroniques tels que les diodes électroluminescentes (DEL) et les cellules solaires. De plus, les propriétés photocatalytiques des nanoparticules de ZnO peuvent être utilisées pour décomposer les polluants organiques et produire de l'hydrogène à partir de l'eau [28].

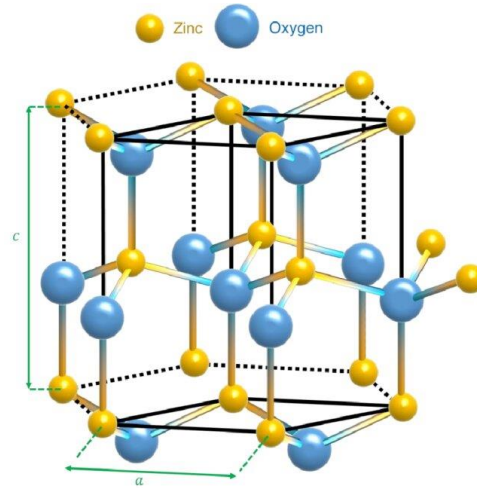


Figure (II.7) : illustration de la structure du ZnO. Les sphères jaunes et bleues indiquent respectivement les atomes de zinc et d'oxygène. Adapté de [29].

II.2.2. Structure de l'hématite α -Fe₂O₃ :

Les nanoparticules de fer hématite α -Fe₂O₃ sont des cristaux avec une structure corindon (**Figure (II.8)**). Dans cette structure, chaque atome de fer est entouré de six atomes d'oxygène disposés en forme d'octaèdre. Les atomes de fer et d'oxygène sont liés par des liaisons ioniques. Les nanoparticules de α -Fe₂O₃ peuvent avoir différentes formes, notamment sphériques, hexagonales et en forme de tige [30]. La forme des nanoparticules affecte leurs propriétés, telles que leur surface et leurs propriétés magnétiques.

La structure corindon des nanoparticules de α -Fe₂O₃ leur confère des propriétés uniques qui les rendent intéressantes pour de nombreuses applications, notamment le stockage d'énergie, la catalyse et les capteurs [31].

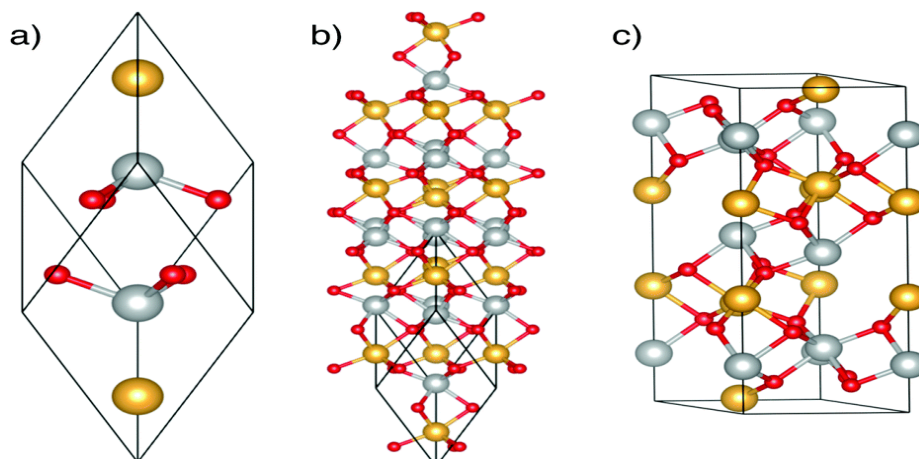


Figure (II.8): Hematite crystal structure: (a) Rhombohedral unit cell with 10 atoms; (b) $2 \times 2 \times 2$ repetition highlighting (0001) plane layering; (c) Hexagonal unit cell with 30 atoms. Silver/gold spheres represent Fe atoms with up/down spin, red spheres are O atoms. The c-axis is along the z direction [32].

II.3. Méthodes de synthèse des nanoparticules d'oxydes métalliques :

II.3.1. Synthèse des NPs par processus Sol-Gel :

La méthode sol-gel est une technique polyvalente utilisée pour synthétiser une variété de matériaux, y compris les nanoparticules. Le processus sol-gel implique la formation d'une solution colloïdale (sol) qui est ensuite transformée en un gel solide (**Figure (II.9)**). Le sol est généralement constitué de précurseurs métalliques dissous dans un solvant, tels que l'alcool ou l'eau. Le gel est formé par l'hydrolyse et la condensation des précurseurs métalliques, qui forment un réseau tridimensionnel de liaisons oxyde. Le gel peut ensuite être traité thermiquement pour former des nanoparticules [33].

La méthode sol-gel offre plusieurs avantages pour la synthèse des nanoparticules. Tout d'abord, la méthode est relativement simple et peu coûteuse. Deuxièmement, la méthode permet un contrôle précis de la taille et de la morphologie des nanoparticules. Troisièmement, la méthode peut être utilisée pour synthétiser des nanoparticules d'une variété de matériaux [34].

La méthode sol-gel a été utilisée pour synthétiser une variété de nanoparticules, y compris les oxydes métalliques, les nitrures métalliques, les carbures métalliques et les polymères. Les nanoparticules synthétisées par la méthode sol-gel ont été utilisées dans une variété d'applications, y compris la catalyse, l'optoélectronique et les dispositifs de stockage d'énergie [35].

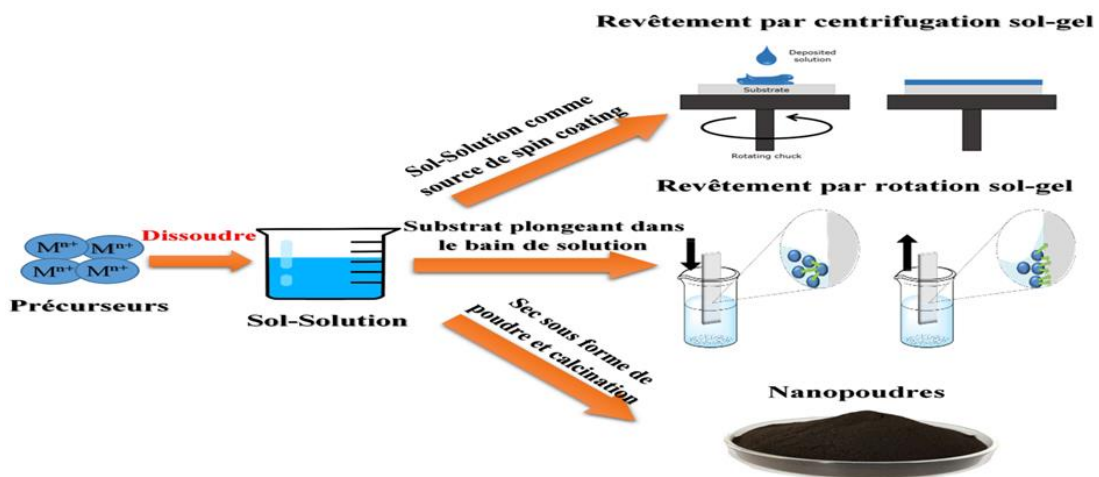


Figure (II.9): Schéma de principe du traitement sol-gel [36].

II.3.2. Synthèse des NPs par processus hydrothermal :

La synthèse hydrothermale est une méthode utilisée pour synthétiser des nanoparticules en utilisant un réacteur fermé chauffé et pressurisé. Le processus implique la dissolution de précurseurs dans un solvant aqueux, puis le chauffage du mélange à une température et une pression élevée. Les conditions hydrothermales favorisent la nucléation et la croissance des

nanoparticules (**Figure II.10**). La taille, la forme et les propriétés des nanoparticules peuvent être contrôlées en ajustant les paramètres de réaction, tels que la température, la pression, le temps de réaction et la concentration des précurseurs [8]. La synthèse hydrothermale offre plusieurs avantages pour la synthèse des nanoparticules. Tout d'abord, la méthode est un processus en phase unique, ce qui simplifie la procédure de synthèse. Deuxièmement, la méthode permet un contrôle précis de la taille et de la morphologie des nanoparticules [37]. Troisièmement, la méthode peut être utilisée pour synthétiser des nanoparticules d'une variété de matériaux.

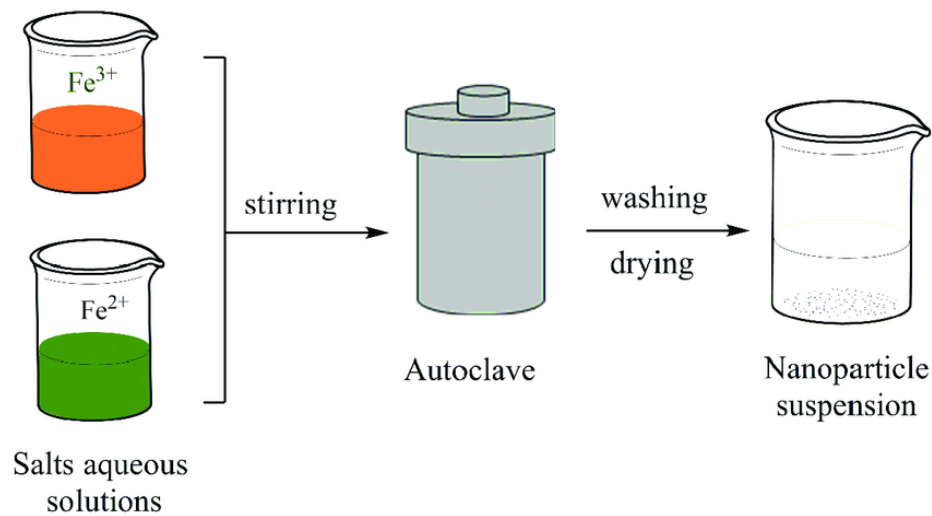


Figure II.10 : Synthèse hydrothermale de nanoparticules [38].

II.3.3. Synthèse des NPs par chimie verte :

La synthèse verte est une approche respectueuse de l'environnement pour la synthèse des nanoparticules qui utilise des extraits de plantes, des micro-organismes ou des enzymes comme agents réducteurs et stabilisants (**Figure II.11**). Cette méthode évite l'utilisation de produits chimiques toxiques et dangereux, ce qui la rend plus sûre et plus durable que les méthodes de synthèse traditionnelles [39]. La synthèse verte exploite les propriétés réductrices et stabilisantes des biomolécules présentes dans les extraits de plantes, les micro-organismes ou les enzymes. Ces biomolécules, telles que les polyphénols, les protéines et les polysaccharides, peuvent réduire les ions métalliques en nanoparticules et empêcher leur agrégation. Le processus de synthèse est généralement simple et respectueux de l'environnement, ne nécessitant que des conditions douces telles que la température ambiante et la pression atmosphérique [40].

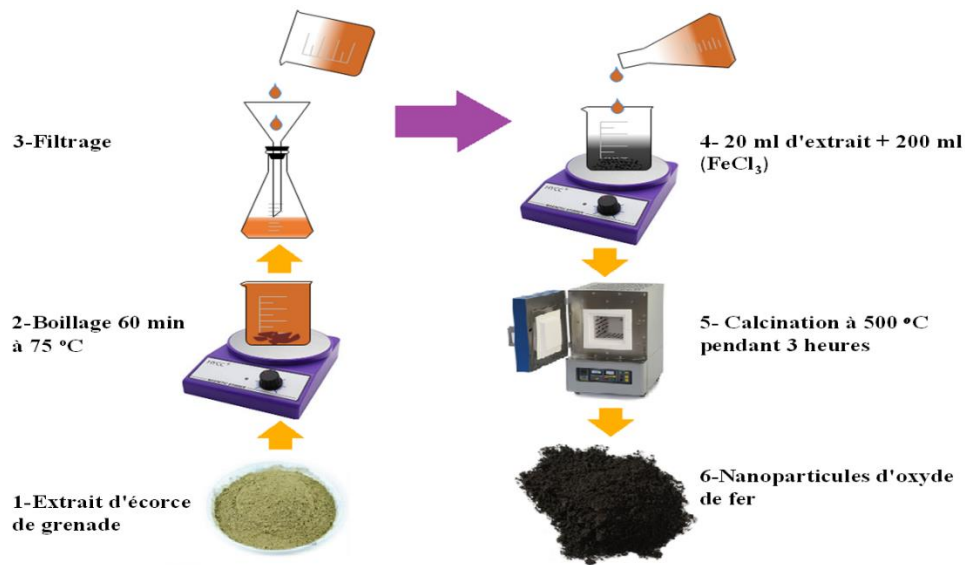


Figure (II.11) : Synthèse verte pour les nanoparticules d'oxyde de fer [26].

II.4. Présentation générale sur les polyphénols:

4.1. Définition :

Les composés phénoliques sont une classe de métabolites secondaires présents dans les plantes et certains micro-organismes. Ils sont caractérisés par la présence d'un ou plusieurs anneaux aromatiques avec un ou plusieurs groupes hydroxyle attachés. Les composés phénoliques sont une classe diversifiée, comprenant des milliers de composés différents, qui peuvent être classés en fonction du nombre d'anneaux aromatiques et du type de substituants présents [41].

Les composés phénoliques jouent un rôle important dans la croissance et le développement des plantes, offrant une protection contre les rayons UV, les herbivores et les agents pathogènes. Ils contribuent également aux couleurs vives des fruits et des fleurs, attirant les pollinisateurs et les agents de dispersion des graines. De plus, les composés phénoliques ont été associés à divers bienfaits pour la santé humaine, notamment des propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires et anticancéreuses [42].

Les composés phénoliques sont présents dans une variété de sources alimentaires, notamment les fruits, les légumes, le café, le thé et le vin. Ils peuvent également être trouvés dans les compléments alimentaires. En raison de leurs propriétés bénéfiques pour la santé, les composés phénoliques suscitent un intérêt croissant en tant qu'ingrédients nutraceutiques et fonctionnels [43].

II.4.2. Classification des polyphénols :

En 1980, Harbone a proposé une classification de ces substances [44], comme l'illustre la **Figure (II.12)**. Les polyphénols peuvent être classés en fonction du nombre d'atomes constitutifs et de leur structure squelettique de base. Il existe deux classes primaires :

- Acides phénoliques (y compris les acides hydroxybenzoïques et les acides hydroxycinnamiques)
- Flavonoïdes
- Tanins et lignines

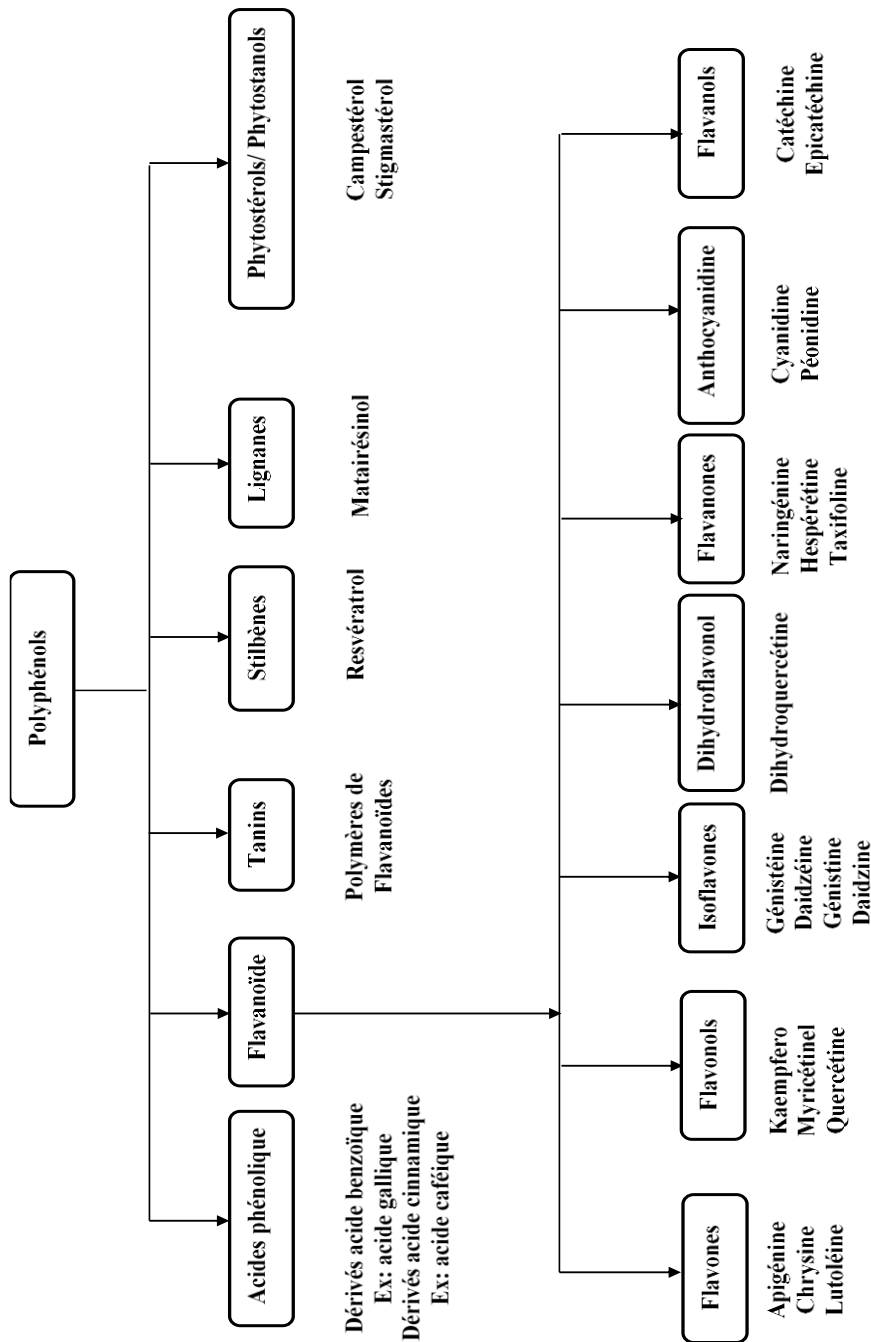


Figure (II.12) : Classification des polyphénols

II.4.2.1. Acides phénoliques :

Les acides phénoliques sont un type de composé phénolique caractérisé par la présence d'un ou plusieurs groupes carboxyle (-COOH) attachés à un anneau aromatique. Ils sont largement présents dans les plantes et contribuent à leur couleur, leur saveur et leurs propriétés antioxydantes. Les acides phénoliques peuvent être classés en fonction du nombre d'anneaux aromatiques et de la position des groupes carboxyle. Les acides phénoliques jouent un rôle important dans la croissance et le développement des plantes, offrant une protection contre les rayons UV, les herbivores et les agents pathogènes. Ils contribuent également aux couleurs vives des fruits et des fleurs, attirant les pollinisateurs et les agents de dispersion des graines [41]. De plus, les acides phénoliques ont été associés à divers bienfaits pour la santé humaine, notamment des propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires et anticancéreuses.

Les acides phénoliques sont présents dans une variété de sources alimentaires, notamment les fruits, les légumes, le café, le thé et le vin. Ils peuvent également être trouvés dans les compléments alimentaires. En raison de leurs propriétés bénéfiques pour la santé, les acides phénoliques suscitent un intérêt croissant en tant qu'ingrédients nutraceutiques et fonctionnels [42].

II.4.2.2. Les flavonoïdes :

Les flavonoïdes sont une classe importante de composés phénoliques présents dans les plantes et certains micro-organismes. Ils sont caractérisés par la présence d'un squelette de base de flavanone, composé de deux cycles aromatiques liés par un hétérocycle à trois atomes de carbone. Les flavonoïdes sont une classe diversifiée, comprenant des milliers de composés différents, qui peuvent être classés en fonction du niveau d'oxydation de l'hétérocycle à trois atomes de carbone et du motif de substitution des cycles aromatiques [45]. Les flavonoïdes jouent un rôle important dans la croissance et le développement des plantes, offrant une protection contre les rayons UV, les herbivores et les agents pathogènes. Ils contribuent également aux couleurs vives des fruits et des fleurs, attirant les pollinisateurs et les agents de dispersion des graines. De plus, les flavonoïdes ont été associés à divers bienfaits pour la santé humaine, notamment des propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires et anticancéreuses [42].

II.4.2.3. Les tanins :

Les tanins sont un type de polyphénol présent dans les plantes et certains micro-organismes. Ils sont caractérisés par leur capacité à se lier aux protéines et à d'autres macromolécules, ce qui leur confère des propriétés astringentes et amères. Les tanins peuvent être classés en deux principaux groupes : les tanins hydrolysables et les tanins condensés. Les tanins hydrolysables sont des esters d'acide gallique ou d'acide ellagique avec des sucres. Ils

sont généralement plus petits et plus solubles dans l'eau que les tanins condensés. Les tanins condensés sont des polymères de flavanols, qui sont des sous-types de flavonoïdes. Ils sont généralement plus gros et moins solubles dans l'eau que les tanins hydrolysables [46].

Les tanins jouent un rôle important dans la défense des plantes contre les herbivores et les agents pathogènes. Leur capacité à se lier aux protéines peut interférer avec la digestion des herbivores et empêcher la croissance des agents pathogènes. Les tanins contribuent également aux saveurs amères et astringentes de certains aliments et boissons, tels que le thé, le café et le vin rouge [41].

II.4.3. Propriétés physico-chimiques des polyphénols :

Les polyphénols sont une classe diversifiée de composés qui présentent une large gamme de propriétés physico-chimiques. Ces propriétés sont influencées par plusieurs facteurs, notamment la structure chimique, le degré de polymérisation et la présence de groupes fonctionnels. Une propriété importante des polyphénols est leur solubilité. Les polyphénols sont généralement peu solubles dans l'eau mais plus solubles dans les solvants organiques polaires tels que l'éthanol et le méthanol. La solubilité des polyphénols est influencée par le nombre et la position des groupes hydroxyle, ainsi que par le degré de polymérisation [47].

Les polyphénols sont également connus pour leur capacité à former des complexes avec des métaux. Cette capacité est due à la présence de groupes hydroxyle, qui peuvent se lier aux ions métalliques. La formation de complexes métalliques peut affecter la stabilité, la solubilité et l'activité biologique des polyphénols [48].

En plus de leur solubilité et de leur capacité à former des complexes métalliques, les polyphénols présentent également une variété d'autres propriétés physico-chimiques, notamment :

- **Point de fusion élevé** : Les polyphénols ont généralement des points de fusion élevés en raison des fortes forces intermoléculaires entre les molécules.
- **Activité antioxydante** : Les polyphénols sont de puissants antioxydants qui peuvent piéger les radicaux libres et protéger les cellules contre les dommages oxydatifs .
- **Activité antimicrobienne** : Les polyphénols ont été démontrés comme ayant une activité antimicrobienne contre une variété de bactéries et de champignons [49].

Les propriétés physico-chimiques des polyphénols sont importantes pour leurs applications potentielles dans divers domaines, notamment l'alimentation, la médecine et l'agriculture.

Références bibliographiques

- [1] S. Jadoun, R. Arif, N. K. Jangid, and R. K. Meena, "Green synthesis of nanoparticles using plant extracts: a review," *Environ. Chem. Lett.*, vol. 19, no. 1, pp. 355–374, Feb. 2021, doi: 10.1007/s10311-020-01074-x.
- [2] M. Patel, "Green Synthesis of Nanoparticles: A Solution to Environmental Pollution," in *Handbook of Solid Waste Management*, Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, pp. 1965–1993.
- [3] K. Parveen, V. Banse, and L. Ledwani, "Green synthesis of nanoparticles: Their advantages and disadvantages," 2016, p. 020048, doi: 10.1063/1.4945168.
- [4] N. S. Alsaiari *et al.*, "Plant and Microbial Approaches as Green Methods for the Synthesis of Nanomaterials: Synthesis, Applications, and Future Perspectives," *Molecules*, vol. 28, no. 1, p. 463, Jan. 2023, doi: 10.3390/molecules28010463.
- [5] R. Feynman, *There's plenty of room at the bottom.* Feynman and computation. CRC Press, 2018.
- [6] G. M. Whitesides, "The once and future nanomachine," *Sci. Am.*, vol. 285, no. 3, p. 70, 2001, doi: 10.1038/scientificamerican0901-78.
- [7] C. N. R. Rao, A. Müller, and A. K. Cheetham, "Nanomaterials chemistry: recent developments and new directions," 2007.
- [8] A. Gedanken, "Using sonochemistry for the fabrication of nanomaterials," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 11, no. 2, pp. 47–55, 2004, doi: 10.1016/j.ultsonch.2004.01.037.
- [9] R. O. Afolabi, "A comprehensive review of nanosystems' multifaceted applications in catalysis, energy, and the environment," *J. Mol. Liq.*, vol. 397, p. 124190, 2024, doi: 10.1016/j.molliq.2024.124190.
- [10] N. Baig, I. Kammakakam, W. Falath, and I. Kammakakam, "Nanomaterials: A review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges," *Mater. Adv.*, vol. 2, no. 6, pp. 1821–1871, 2021, doi: 10.1039/d0ma00807a.
- [11] A. Chaudhary, "Nano Catalysts: A Newfangled Gem in the Catalytic World," *Recent Adv. Petrochemical Sci.*, vol. 3, no. 5, Nov. 2017, doi: 10.19080/RAPSCI.2017.03.555625.
- [12] A. Nel, T. Xia, L. Mädler, and N. Li, "Toxic potential of materials at the nanolevel," *Science (80-.)*, vol. 311, no. 5761, pp. 622–627, 2006, doi: 10.1126/science.1114397.
- [13] N. Jones, B. Ray, K. T. Ranjit, and A. C. Manna, "Antibacterial activity of ZnO nanoparticle suspensions on a broad spectrum of microorganisms," *FEMS Microbiol. Lett.*, vol. 279, no. 1, pp. 71–76, 2008, doi: 10.1111/j.1574-6968.2007.01012.x.

-
- [14] A. Salleh *et al.*, “The Potential of Silver Nanoparticles for Antiviral and Antibacterial Applications: A Mechanism of Action,” *Nanomater.*, vol. 10, no. 8, 2020, doi: 10.3390/nano10081566.
- [15] X. Gu *et al.*, “Preparation and antibacterial properties of gold nanoparticles: a review,” *Environ. Chem. Lett.*, vol. 19, no. 1, pp. 167–187, Feb. 2021, doi: 10.1007/s10311-020-01071-0.
- [16] C. F. Bohren, *Absorption and scattering of light by small particles*. John Wiley & Sons, 1983.
- [17] S. Nie and S. R. Emory, “Probing single molecules and single nanoparticles by surface-enhanced Raman scattering,” *Science (80-.)*, vol. 275, no. 5303, pp. 1102–1106, 1997, doi: 10.1126/science.275.5303.1102.
- [18] S. Link, Z. L. Wang, and M. A. El-Sayed, “Alloy formation of gold-silver nanoparticles and the dependence of the plasmon absorption on their composition,” *J. Phys. Chem. B*, vol. 103, no. 18, pp. 3529–3533, 1999, doi: 10.1021/jp990387w.
- [19] E. A. Coronado, E. R. Encina, and F. D. Stefani, “Optical properties of metallic nanoparticles: manipulating light, heat and forces at the nanoscale,” *Nanoscale*, vol. 3, no. 10, p. 4042, 2011, doi: 10.1039/c1nr10788g.
- [20] N. Serpone and E. Pelizzetti, “Photocatalysis: fundamentals and applications,” no. Title..
- [21] A. Barhoum *et al.*, “Review on Natural, Incidental, Bioinspired, and Engineered Nanomaterials: History, Definitions, Classifications, Synthesis, Properties, Market, Toxicities, Risks, and Regulations,” *Nanomater. 2022, Vol. 12, Page 177*, vol. 12, no. 2, p. 177, Jan. 2022, doi: 10.3390/NANO12020177.
- [22] H. M. Solayman *et al.*, “Performance evaluation of dye wastewater treatment technologies: A review,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 11, no. 3, p. 109610, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109610>.
- [23] S. Zeghdi *et al.*, “Improved Synthesis of Cu₂O NPs and Ascorbic Acid-Modified Derivatives for Adsorption of Brilliant Cresyl Blue: Surface and Reusability Studies,” *Materials (Basel)*, vol. 17, no. 10, p. 2358, May 2024, doi: 10.3390/ma17102358.
- [24] X. Li, H. Xu, Z.-S. Chen, and G. Chen, “Biosynthesis of Nanoparticles by Microorganisms and Their Applications,” *J. Nanomater.*, vol. 2011, pp. 1–16, 2011, doi: 10.1155/2011/270974.
- [25] N. Kumar and S. Kumbhat, *Essentials in Nanoscience and Nanotechnology*. John Wiley & Sons, 2016.
- [26] A. Bouafia, “Optimisation de biosynthèse des nanoparticules d’oxyde de fer par

- l'utilisation de différents extraits des plantes et évaluation de leur activité biologique." Universty of Eloued جامعة الشهيد حمه لخضر, p. 99, 2022.
- [27] Ü. Özgür *et al.*, "A comprehensive review of ZnO materials and devices," *J. Appl. Phys.*, vol. 98, no. 4, pp. 1–103, 2005, doi: 10.1063/1.1992666.
- [28] Zhong Lin Wang, "Zinc oxide nanostructures: growth, properties and applications," *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 16, no. 25, p. R829, 2004, doi: 10.1088/0953-8984/16/25/R01.
- [29] J. Klingshirn, C.F., Waag, A., Hoffman, A., Geurts, "Zinc Oxide Zinc Oxide From Fundamental Properties Towards Novel Applications," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [30] E. Paterson, *The Iron Oxides. Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses*, vol. 34, no. 1. Wiley-VCH, 1999.
- [31] G. T. Burstein, *Iron oxides in the laboratory, preparation and characterization*, vol. 33, no. 7. John Wiley & Sons, 1992.
- [32] S. Piccinin, "The band structure and optical absorption of hematite (α -Fe₂O₃): a first-principles GW-BSE study," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 21, no. 6, pp. 2957–2967, 2019, doi: 10.1039/C8CP07132B.
- [33] C. J. Brinker and G. W. Scherer, *Sol-gel science: the physics and chemistry of sol-gel processing*. Academic press.
- [34] D. Bokov *et al.*, "Nanomaterial by Sol-Gel Method: Synthesis and Application," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2021, pp. 1–21, Dec. 2021, doi: 10.1155/2021/5102014.
- [35] X. Li, A. Sotto, J. Li, and B. Van der Bruggen, "Progress and perspectives for synthesis of sustainable antifouling composite membranes containing in situ generated nanoparticles," *J. Memb. Sci.*, vol. 524, pp. 502–528, 2017, doi: 10.1016/j.memsci.2016.11.040.
- [36] S. Thiagarajan, A. Sanmugam, and D. Vikraman, "Facile methodology of sol-gel synthesis for metal oxide nanostructures," *Recent Appl. sol-gel Synth.*, pp. 1–17, 2017.
- [37] Y. Yang *et al.*, "One-step synthesis of amino-functionalized fluorescent carbon nanoparticles by hydrothermal carbonization of chitosan," *Chem. Commun.*, vol. 48, no. 3, pp. 380–382, 2012, doi: 10.1039/c1cc15678k.
- [38] M. Bustamante-Torres, D. Romero-Fierro, J. Estrella-Nuñez, B. Arcentales-Vera, E. Chichande-Proañó, and E. Bucio, "Polymeric Composite of Magnetite Iron Oxide Nanoparticles and Their Application in Biomedicine: A Review," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 4, p. 752, Feb. 2022, doi: 10.3390/polym14040752.

- [39] Y. A. Selim, M. A. Azb, I. Ragab, and M. H. M. Abd El-Azim, "Green Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using Aqueous Extract of *Deverra tortuosa* and their Cytotoxic Activities," *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, p. 3445, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-60541-1.
- [40] A. Q. Malik *et al.*, "A review on the green synthesis of nanoparticles, their biological applications, and photocatalytic efficiency against environmental toxins," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, no. 27, pp. 69796–69823, May 2023, doi: 10.1007/s11356-023-27437-9.
- [41] V. Cheynier, "Phenolic compounds: From plants to foods," *Phytochem. Rev.*, vol. 11, no. 2–3, pp. 153–177, 2012, doi: 10.1007/s11101-012-9242-8.
- [42] R. Tsao, "Chemistry and biochemistry of dietary polyphenols," *Nutrients*, vol. 2, no. 12, pp. 1231–1246, 2010, doi: 10.3390/nu2121231.
- [43] C. Manach, G. Williamson, C. Morand, A. Scalbert, and C. Rémésy, "Bioavailability and bioefficacy of polyphenols in humans. I. Review of 97 bioavailability studies.," *Am. J. Clin. Nutr.*, vol. 81, no. 1 Suppl, pp. 230–242, 2005, doi: 10.1093/ajcn/81.1.230s.
- [44] J. Harborne, "Plant Phenolics. In: Bell EA and Charlwood BV (eds.) Encyclopedia of plant Physiology," *Secondary Plant Products*, vol. 8. Springer, Berlin, pp329-402, pp. 329–394, 1980.
- [45] S. Ramos, "Effects of dietary flavonoids on apoptotic pathways related to cancer chemoprevention," *J. Nutr. Biochem.*, vol. 18, no. 7, pp. 427–442, 2007, doi: 10.1016/j.jnutbio.2006.11.004.
- [46] A. K. Das, "Hardwood tannin: sources, utilizations, and prospects," *Tann. Prop. Biol. Prop. Curr. Knowledge. IntechOpen*.
- [47] F. Couic-Marinier and A. Lobstein, "Les huiles essentielles gagnent du terrain à l'officine," *Actual. Pharm.*, vol. 52, no. 525, pp. 18–21, 2013, doi: 10.1016/j.actpha.2013.02.005.
- [48] N. BEKHTI, "Caractérisation physico-chimiques des polyphénols et alcaloïdes utilisés en médecine." Diss.
- [49] O. Fadel, "Étude des propriétés interfaciales de polyphénols modèles: compréhension des mécanismes d'action au niveau membranaire," *Diss. Compiègne*.

***Chapitr III : Synthèse verte et
caractérisation***

La synthèse verte de nanoparticules d'oxydes métalliques attire de plus en plus l'attention, grâce au développement de méthodes simples utilisant des extraits de plantes. Les composés phénoliques, acides phénoliques et flavonoïdes présents dans les plantes jouent un rôle clé dans la réduction et l'encapsulation des ions métalliques. Ce chapitre se concentre sur la synthèse verte de nanocomposites d'oxyde de fer et d'oxyde de zinc (α -Fe₂O₃/ZnO NC) à l'aide d'extraits de feuilles de *Laurus nobilis* L [1], [2].

Les produits finaux, caractérisés par UV-Vis, FT-IR, DRX, MEB et EDX, confirment la nature des nanocomposites. Ces techniques ont permis d'analyser la stabilité, la structure cristalline, la morphologie et la composition des nanoparticules. Les résultats montrent que la synthèse verte produit des nanoparticules contrôlées et stables, avec des applications potentielles dans divers domaines [3], [4].

De plus, les extraits de plantes contribuent à la fonctionnalité et à la stabilité des nanoparticules. Cette approche durable offre un grand potentiel pour une synthèse respectueuse de l'environnement, soulignant le rôle crucial des composés végétaux. La synthèse verte de nanocomposites d'oxydes métalliques ouvre de nouvelles perspectives pour des applications innovantes, tout en réduisant l'impact environnemental associé aux méthodes de synthèse traditionnelles [5], [6].

III.1. Synthèse verte à partir d'extraits des plantes :

La synthèse verte de nanocomposites est une méthode avancée, prisée pour sa simplicité, son faible coût et son respect de l'environnement par rapport aux autres approches physiques et chimiques. Bien qu'elle soit relativement lente et présente des limitations en termes de taille et de forme des composés nanométriques formés, il s'agit néanmoins d'une option attrayante pour les chercheurs qui s'efforcent d'adopter des pratiques de chimie verte plus durables [7].

La méthode de synthèse verte se distingue comme étant le moyen le plus prometteur de produire des nanoparticules sans recourir à des produits chimiques toxiques, à des pressions ou à des températures élevées. Cela se traduit par une réduction de la consommation d'énergie et un risque moindre de pollution environnementale [8]. Cette approche est particulièrement pertinente dans le contexte actuel où l'on cherche de plus en plus à minimiser l'impact négatif des processus chimiques sur la nature [9].

La synthèse verte de nanocomposites a fait l'objet de nombreuses recherches en raison de son potentiel à produire des matériaux avancés tout en réduisant l'empreinte écologique du processus de fabrication. Cette méthode tire parti de réactifs biodégradables, de sources d'énergie renouvelables et de procédés respectueux de l'environnement, ce qui en fait une option

attrayante pour un large éventail d'applications, notamment dans les domaines de l'électronique, des matériaux avancés et des technologies médicales [10].

En résumé, la synthèse verte de nanocomposites représente une avancée significative dans le domaine, offrant un moyen plus durable et plus respectueux de l'environnement de produire des nanoparticules et des nanocomposites, tout en répondant aux exigences de la chimie verte moderne [11].

III.1.1. Mécanisme de synthés vert des nanoparticules par les extraits des plantes:

Les scientifiques ont déjà trouvé des méthodes physiques et chimiques pour préparer des nanocomposites, mais ces méthodes utilisaient des produits chimiques nocifs pour l'environnement et la santé humaine, Afin de réduire ces risques, les scientifiques ont mis au point la chimie verte [12].

La chimie verte dépend de méthodes efficaces, sûres et respectueuses de l'environnement. Récemment, la méthode de synthèse verte des nanocomposites a suscité un grand intérêt car il s'agit d'une méthode simple, peu coûteuse et respectueuse de l'environnement, meilleure que les méthodes de synthèse traditionnelles.

Le mécanisme de bioréduction des ions métalliques à l'aide d'extraits de plantes est divisé en trois étapes (**Figure III.1**):

a) **La phase d'activation:** La phase d'activation dans le mécanisme de synthèse verte des nanocomposites par les extraits de plantes se réfère à l'étape initiale où les composés phytochimiques présents dans les extraits de plantes sont activés, Ces composés agissent comme des agents réducteurs lorsqu'ils sont activés, ce qui signifie qu'ils sont capables de transférer des électrons aux ions métalliques présents dans la solution. Cette activation peut se produire en raison de divers facteurs, tels que l'interaction avec d'autres molécules dans la solution ou l'exposition à la lumière ou à la chaleur. Une fois activés, ces composés réduisent les ions métalliques pour former des nanocomposites métalliques [11].

b) **La phase de croissance:** La phase de croissance dans le mécanisme de synthèse verte des NC par les extraits de plantes est une étape où les NC métalliques formées initialement continuent à croître en taille. Pendant cette phase, les ions métalliques réduits par les composés phytochimiques se combinent pour former des agrégats de plus grande taille, conduisant ainsi à la croissance des NC. Les facteurs tels que la concentration des réactifs, le pH de la solution et la température peuvent influencer la vitesse et l'étendue de cette croissance. En utilisant des extraits de plantes spécifiques contenant des composés stabilisants, il est possible de contrôler la taille et la distribution des NC formées pendant cette phase [13].

c) **La phase de terminaison:** La phase de terminaison dans le mécanisme de synthèse verte des nanocomposites par les extraits de plantes est l'étape finale du processus. Pendant cette phase, la croissance des NC atteint son terme et les conditions dans le milieu réactionnel favorisent l'arrêt de la réaction de formation des NC, Cela peut être dû à une diminution de la disponibilité des réactifs, à l'atteinte d'un équilibre entre les processus de formation et de dissolution des NC, ou à d'autres facteurs environnementaux. Une fois cette phase atteinte, les NC formées sont stabilisées et peuvent être isolées pour une utilisation ultérieure [14].

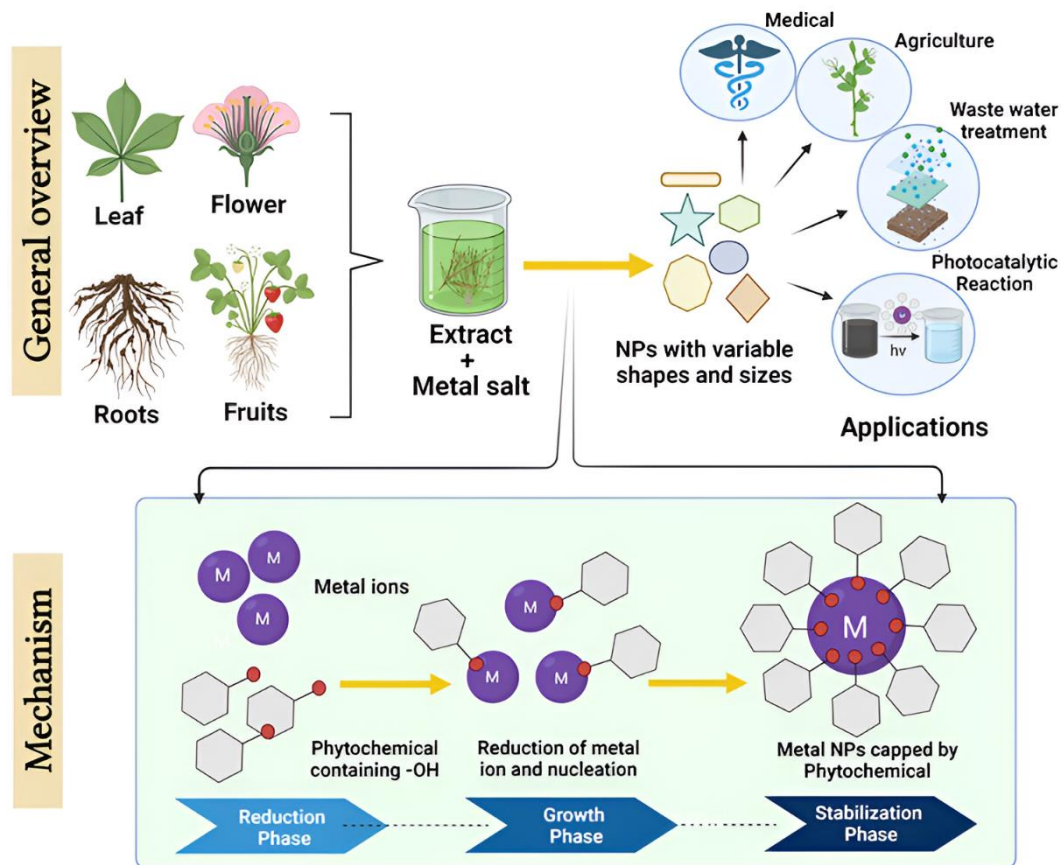


Figure (III.1) : Mécanisme de synthèse verte des nanocomposites d'oxydes métalliques [15].

III.1.2. Effet des métabolites secondaires dans la réaction de bioréduction :

Le mécanisme de réaction de la réduction implique principalement des biomolécules végétales (métabolites secondaires), telles que les composés phénoliques, les polyphénols, les flavonoïdes et d'autres composés organiques. La bioréaction joue un rôle crucial dans le mécanisme de synthèse des nanoparticules à partir d'extraits de plantes, car elle permet la conversion des ions métalliques en nanoparticules métalliques [16]. Les composés phytochimiques présents dans les extraits végétaux réagissent avec les ions métalliques présents dans la solution réactionnelle [17]. Les composés phytochimiques, tels que les polyphénols et les flavonoïdes, sont capables de transférer des électrons vers les ions métalliques, empêchant

ainsi leur désoxydation et favorisant la formation de nanoparticules métalliques. La réaction de bioréduction est catalysée par les enzymes présentes dans les extraits de plantes, facilitant ainsi la conversion des ions métalliques en nanoparticules [18], [19].

Les extraits de plantes contiennent diverses fonctions chimiques, telles que des alcènes (C = C), des amides (C = N), des amines (N-H) et des groupes carboxyles (COO-). Ces groupes fonctionnels, en plus des composés phénoliques, contribuent à la formation de nanoparticules [20]. Les composés phénoliques sont fréquemment utilisés en synthèse verte grâce à la présence d'un noyau benzénique avec un ou plusieurs substituants hydroxy. Ces substances et composés chimiques jouent un rôle essentiel dans la production de nanoparticules en agissant comme agents réducteurs et stabilisants [21].

III.2. Matériels et méthodes :

Ce travail a été fait au niveau de Laboratoire de biotechnologie biomatériau et matière condensée, Faculté de Technologie, Université d'El Oued. Ce travail est intitulé "Synthèse verte de caractérisation des nano-composites, et évaluation de leur activité photo-catalytique pour la dégradation des polluants organiques".

III.2.1. Matériels végétaux :

Pour la synthèse écologique de nanocomposites d'oxyde de fer et d'oxyde de zinc (α -Fe₂O₃/ZnO NC) en exploitant l'extrait des feuilles du laurier sauce (*Laurus nobilis L.*), la matière première a été récoltée dans la wilaya d'Alger en Algérie. Ce choix est étayé par des études antérieures menées sur cette plante aromatique au sein du laboratoire BBMC ainsi que dans plusieurs laboratoires internationaux de renom. L'ensemble de ces recherches a mis en évidence la richesse de cette espèce végétale en diverses molécules phytochimiques aux propriétés bio-réductrices ou phyto-réductrices. Parmi ces composés naturels figurent notamment les alcaloïdes, les polyphénols (flavonoïdes, tanins condensés) ainsi que les saponines triterpénoïdiques. Leur présence confère ainsi un potentiel avéré pour la synthèse verte de nanomatériaux hybrides inorganiques aux applications prometteuses.

III.2.2. Méthodologie :

III.2.2.1. Préparation de l'extrait de plantes :

Les feuilles de *Laurus nobilis L.* ont été récoltées en janvier 2024 dans des fermes locales de la région septentrionale de l'Algérie. Après avoir été soigneusement sélectionnées, les feuilles ont été lavées à l'eau pure pour éliminer toute impureté, puis délicatement étalées sur des claies pour un séchage naturel. Pendant 10 jours, elles ont été protégées des rayons directs du soleil et maintenues à température ambiante, préservant ainsi leur composition chimique. Une fois sèches, les feuilles ont été broyées pour obtenir une poudre fine, garantissant

une utilisation optimale pour diverses applications, telles que des infusions, des épices ou encore des remèdes naturels.

- **Extraction des composés phénoliques:**

Pour la séparation des composés phytochimiques de la matière végétale solide en utilisant des solvants organiques, on a recours à l'extraction solide-liquide. Le principe de cette méthode est que le solvant traverse la barrière d'interface solide-liquide, dissout le composant actif dans le solide et l'entraîne vers l'extérieur. Dans notre étude, nous avons choisi d'extraire les composés phytochimiques par macération dans l'eau, une technique qui consiste à immerger le solide dans un liquide pendant une durée plus ou moins longue. Cette méthode permet d'extraire efficacement les composés phytochimiques tout en préservant leur intégrité et leur activité biologique.

- **Mode opératoire:**

Pour obtenir un extrait riche en principes actifs des feuilles de laurier noble, une quantité précise de 50 grammes de poudre végétale parfaitement séchée et broyée a été soigneusement mélangée à 500 millilitres d'eau purifiée par distillation dans un bécher en verre borosilicaté d'une contenance d'un litre. Ce mélange a ensuite été soumis à une agitation régulière pendant 24 heures à température ambiante, permettant ainsi une extraction lente et optimale des molécules d'intérêt contenues dans la matière première.

Une fois le temps d'extraction écoulé, la solution a été filtrée à travers un papier filtre de haute qualité (Whatman N°42) afin de récupérer uniquement la phase liquide limpide chargée en composés précieux. Cet extrait brut a finalement été transvasé dans un récipient en verre hermétique et conservé à une température de 4°C, condition idéale pour préserver ses propriétés jusqu'à son utilisation ultérieure en toute sécurité.

III.2.2.2. Synthèse verte des nanocomposites α -Fe₂O₃/ZnO :

Les nanocomposites α -Fe₂O₃/ZnO ont été synthétisés par réduction des ions de fer et de zinc en solution de chlorure ferreux (FeCl₂) et d'acétate de zinc (Zn(CH₃CO₂)) par les composés phénoliques extraits des feuilles de *Laurus nobilis* L (Figure III.2)). La méthode de synthèse impliquait l'utilisation d'un ratio volumique (v/v%) (1:10) spécifique entre l'extrait de feuille et les solutions de sels métalliques, à savoir 1 volume d'extrait de feuille pour 10 volumes de solution saline.

Le processus de synthèse a été effectué en combinant 100 ml d'extrait de feuille de *Laurus nobilis* avec 900 mL d'une solution aqueuse contenant 0,1 M de FeCl₂ et de Zn(CH₃CO₂) dans un bécher en verre Erlenmeyer d'un litre recouvert de papier aluminium. Le mélange a été

agité continuellement à 150 tours par minute pendant 1 heure à une température contrôlée de 85 °C à l'abri de la lumière. Une petite quantité de la solution de nanoparticules d'oxyde de fer et de zinc $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ NC synthétisée a été prélevée pour des analyses ultérieures dans la région UV-visible du spectre électromagnétique [22], [23].

Le produit solide a été séparé de la solution par centrifugation à 3000 tours par minute pendant 15 minutes. Les nanoparticules ainsi obtenues ont été soigneusement lavées à l'eau distillée, puis séchées dans une étuve à 100 °C pendant 24 heures. La poudre sèche a ensuite subi un traitement thermique à 500 °C pendant 3 heures pour assurer une cristallisation complète des nanoparticules et éliminer tout composé organique résiduel provenant de l'extrait végétal. Enfin, les poudres de nanocomposites $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ ont été stockées dans des tubes en verre en attendant leur caractérisation par diverses techniques analytiques [24], [25].

- **Conditions de synthèse:**

Les propriétés caractéristiques des nanoparticules, notamment leurs dimensions et leur structure, sont régies par un ensemble complexe de paramètres. Ces derniers englobent la nature de l'espèce végétale utilisée comme source de biosynthèse, le volume de l'extrait végétal incorporé dans le milieu réactionnel, la concentration en ions métalliques précurseurs, ainsi que les conditions opératoires telles que la température et la durée du processus. L'optimisation judicieuse de ces différents facteurs permet d'exercer un contrôle précis sur la taille et la morphologie des nanoparticules produites, assurant ainsi leur adéquation avec les applications visées.

Dans ce travail, nous nous sommes concentrés sur l'étude de l'effet des paramètres

- a) L'espèce végétale: la plante de *laurus nobilis*.
- b) La concentration de sel métallique: Acétate de zinc et chlorure de fer à la même concentration (0.1 M).

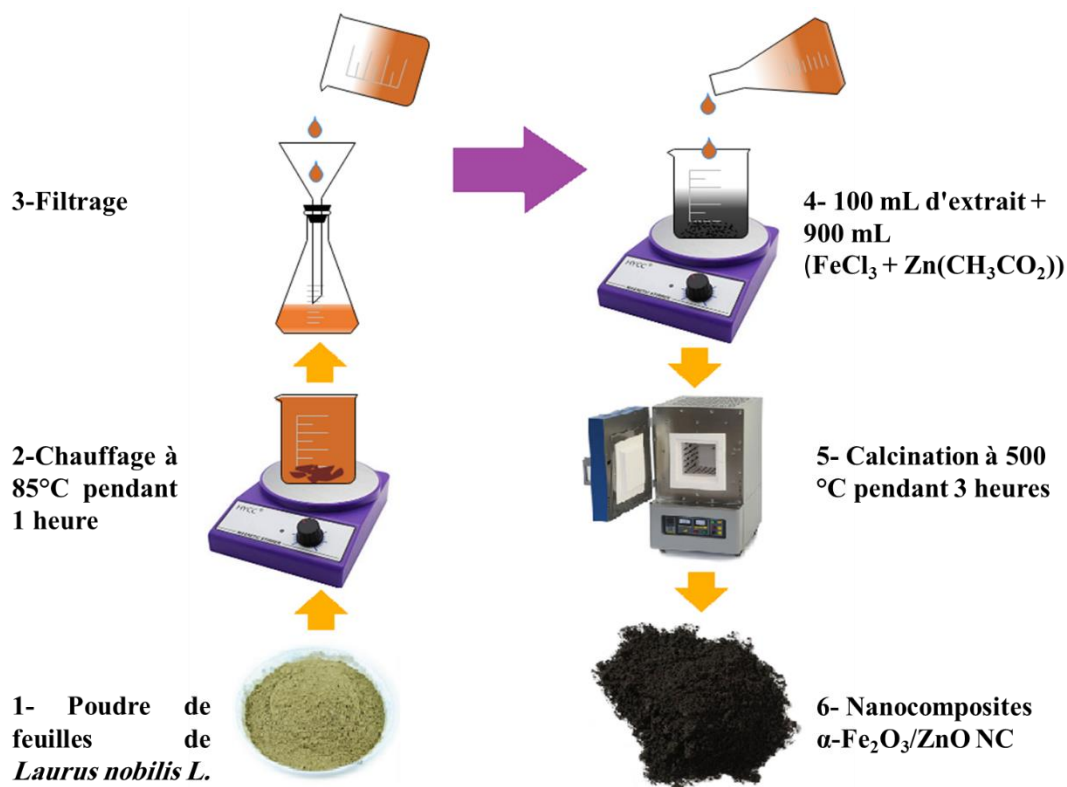


Figure (III.2) : Synthèse verte des nanocomposites $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ NC en utilisant extrait d'extrait de feuille de *Laurus nobilis* L.

III.2.3. Techniques de caractérisation:

Les techniques suivantes ont été utilisées pour la caractérisation des nanocomposites $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ NC : spectroscopie UV-visible, spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FT-IR) et diffraction des rayons X (DRX).

III.2.3.1. Propriétés structurales et morphologiques:

III.2.3.1.1. Diffraction des rayons X (DRX):

La diffraction des rayons X (DRX) est une technique utilisée pour étudier la structure des particules cristallines dans les matériaux solides. L'analyse aux rayons X est l'une des principales méthodes permettant de déterminer la structure cristalline des matériaux (**Figure (III.3)**).

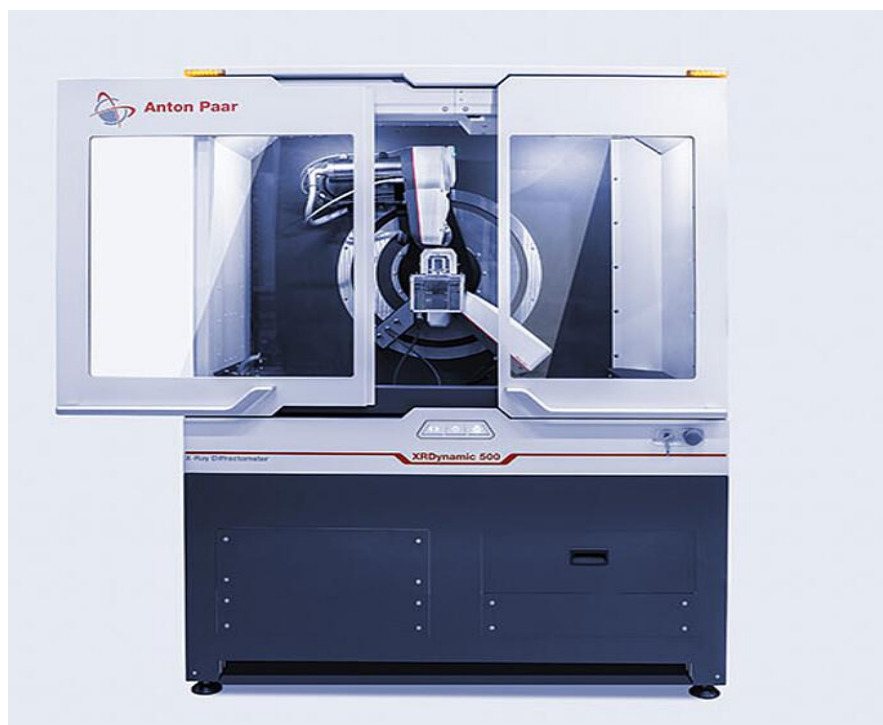


Figure (III.3) : Appareil Diffraction des rayons X (DRX).

- **Principe :**

L'une des techniques les plus importantes utilisées dans l'étude de la structure cristalline des matériaux solides (DRX). La technologie des rayons X implique l'interaction des rayons X avec les cristaux d'un solide et l'enregistrement de leur interaction sur un détecteur. Le principe de fonctionnement de cette technique repose sur le passage des rayons X à travers l'échantillon et leur changement de direction en fonction de la structure des cristaux de l'échantillon. Lorsque les rayons X traversent l'échantillon solide, ils interagissent avec les niveaux d'électrons des atomes qui composent le cristal. Les rayons X déplacent les électrons dans les niveaux internes des atomes, émettant des rayons X-ray secondaires. Ces rayons secondaires; sont ceux qui sont mesurés et enregistrés sur le détecteur [26] (*Figure (III.4)*).

Lorsqu'un rayon X secondaire est enregistré sur le détecteur, le motif de réflexion résultant est analysé. Ce modèle est analysé pour déterminer la composition des cristaux dans l'échantillon. L'analyse du modèle de réflexion est basée sur les lois de la réfraction et de la réflexion des rayons X sur les cristaux [27].

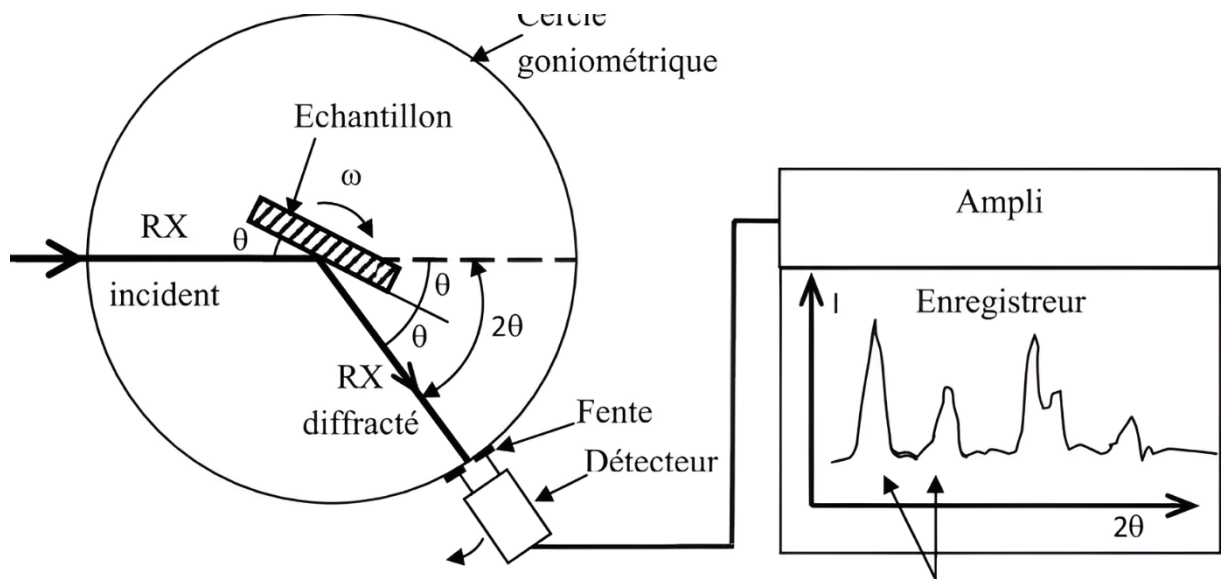


Figure (III.4) : Schéma de principe du montage d'un diffractomètre DRX.

➤ **Détermination de la taille des grains :**

La taille moyenne des cristallites a été estimée à l'aide de l'équation de Debye-Scherrer [28]:

$$D_{DRX} = \frac{0.9 \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (\text{III. 1})$$

Où : D_{DRX} est la taille des grains en nm.

λ est la longueur d'onde du faisceau de rayon X.

θ est l'angle de Bragg de diffraction.

β est la largeur à mi-hauteur exprimée en radian.

III.2.3.2. Propriétés optiques:

III.2.3.2.1. Spectroscopie d'absorption UV-visible:

L'une des utilisations de l'analyse spectrophotométrique ultraviolette et visible est de déterminer rapidement et précisément la concentration de produits chimiques dans les solutions. En détectant les substances qui absorbent ou émettent de la lumière, cela permet une analyse dans les plages ultraviolette et visible, Cela peut être utile pour déterminer les structures de molécules et de composés (Figure (III.5)).

L'absorption peut également être utilisée, La photométrie dans le temps, permettant de déterminer la vitesse de réaction et de vérifier la composition des produits [29].



Figure (III.5) : Appareil Spectroscopie ultraviolette (UV visible).

- **Principe :**

La technologie en question repose sur l'utilisation de substances capables d'absorber la lumière dans la région ultraviolette-visible du spectre. Lorsque le rayonnement incident est absorbé par l'échantillon, celui-ci acquiert de l'énergie, provoquant l'excitation des électrons de valence depuis un niveau d'énergie inférieur vers un niveau d'énergie supérieur. Ce phénomène se produit dans la gamme de longueurs d'onde ultraviolette comprise entre 200 et 300 nm, souvent associée à des transitions électroniques importantes [30].

Le principe du spectrophotomètre UV obéit à la loi de Beer-Lambert, qui énonce que lorsqu'un faisceau de lumière monochromatique traverse une solution contenant une substance absorbante, la diminution de l'intensité du rayonnement est directement proportionnelle à l'épaisseur de la solution, à la concentration de la substance et à l'intensité du rayonnement incident. En d'autres termes, plus la solution est concentrée et épaisse, et plus le rayonnement incident est intense, plus la lumière monochromatique sera absorbée et moins elle ressortira avec intensité. Cette loi permet ainsi de déterminer la concentration d'une solution en mesurant l'absorption de la lumière UV (**Figure (III.6)**).

Cette loi s'exprime à travers cette équation **Eq (III. 2)**:

$$A = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) = \epsilon cl \quad \text{(III. 2)}$$

Où I_0 : Intensité de la lumière incidente.

I : Intensité de la lumière transmise par la solution d'échantillon.

c : Représente la concentration du soluté.

l : Représente la longueur de la cellule d'échantillon.

ϵ : Représente le coefficient d'absorption molaire.

Le rapport (I/I_0) est connu sous le nom de transmittance (T) et le logarithme du rapport inverse (I_0/I) est connu comme l'absorbance (A). Par conséquent

$$A = -\log\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\log T = \varepsilon cl$$

Ou $A = -\log T$

Donc $A = \log\left(\frac{1}{T}\right)$ (III.3)

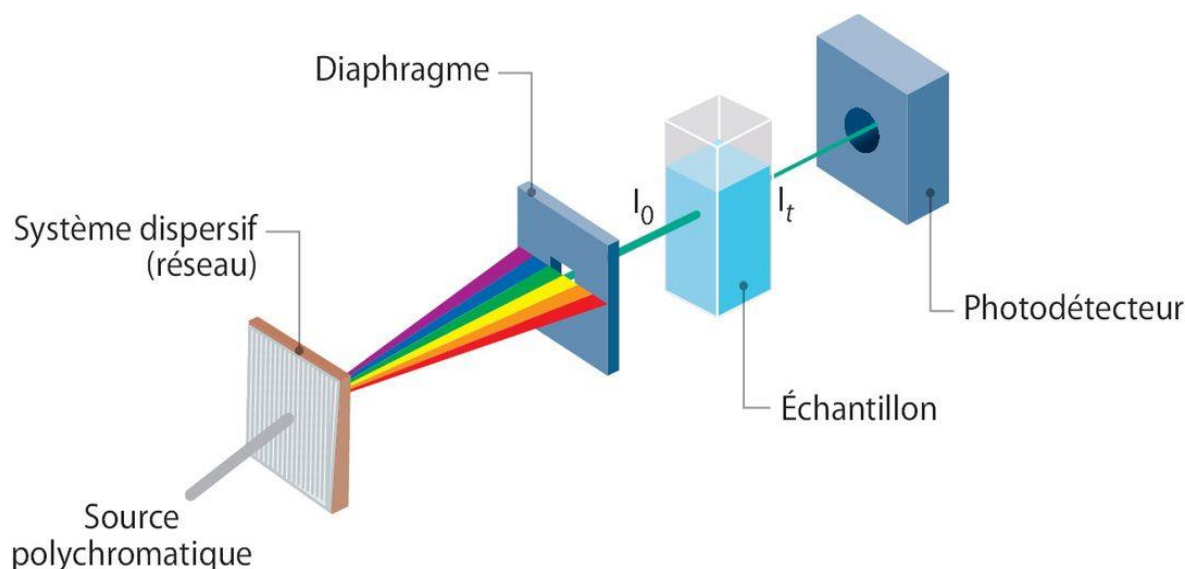


Figure (III.6) : Représentation schématique du spectrophotomètre UV-Vis.

III.2.3.2.2. Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR):

La technologie de spectroscopie infrarouge FTIR utilise la spectroscopie infrarouge à transformation instantanée pour analyser les structures des composés chimiques et analyser la structure moléculaire des substances organiques et inorganiques. La spectroscopie mesure l'effet de l'absorption optique d'un échantillon sur le spectre du rayonnement infrarouge. Qui a une longueur d'onde plus courte que la lumière visible et se caractérise par sa capacité à interagir distinctement avec les liaisons chimiques des composés. Lorsqu'un rayonnement infrarouge est projeté sur un échantillon, une partie de cette énergie lumineuse est absorbée par les liaisons chimiques présentes dans l'échantillon, entraînant une modification de la fréquence et de l'intensité des rayons réfléchis (Figure (III.7)).



Figure (III.7) : Appareil Spectroscopie infrarouge (FTIR).

- **Principe :**

Nous traitons ici de la gamme de longueurs d'onde de 2 500 à 16 000 nm, avec une gamme de fréquences $1,9 * 10^{13}$ à $1,2 * 10^{14}$ Hz.

L'énergie du photon dans ce champ n'est pas assez grande pour exciter les électrons. Mais il contribue à stimuler l'excitation vibratoire des atomes, La mesure que nous obtenons est un graphique de l'intensité infrarouge mesurée en fonction de la longueur d'onde de la lumière, et nous pouvons identifier les groupes fonctionnels en nous appuyant sur la spectroscopie infrarouge des vibrations de l'atome (**Figure (III.8)**) [31].

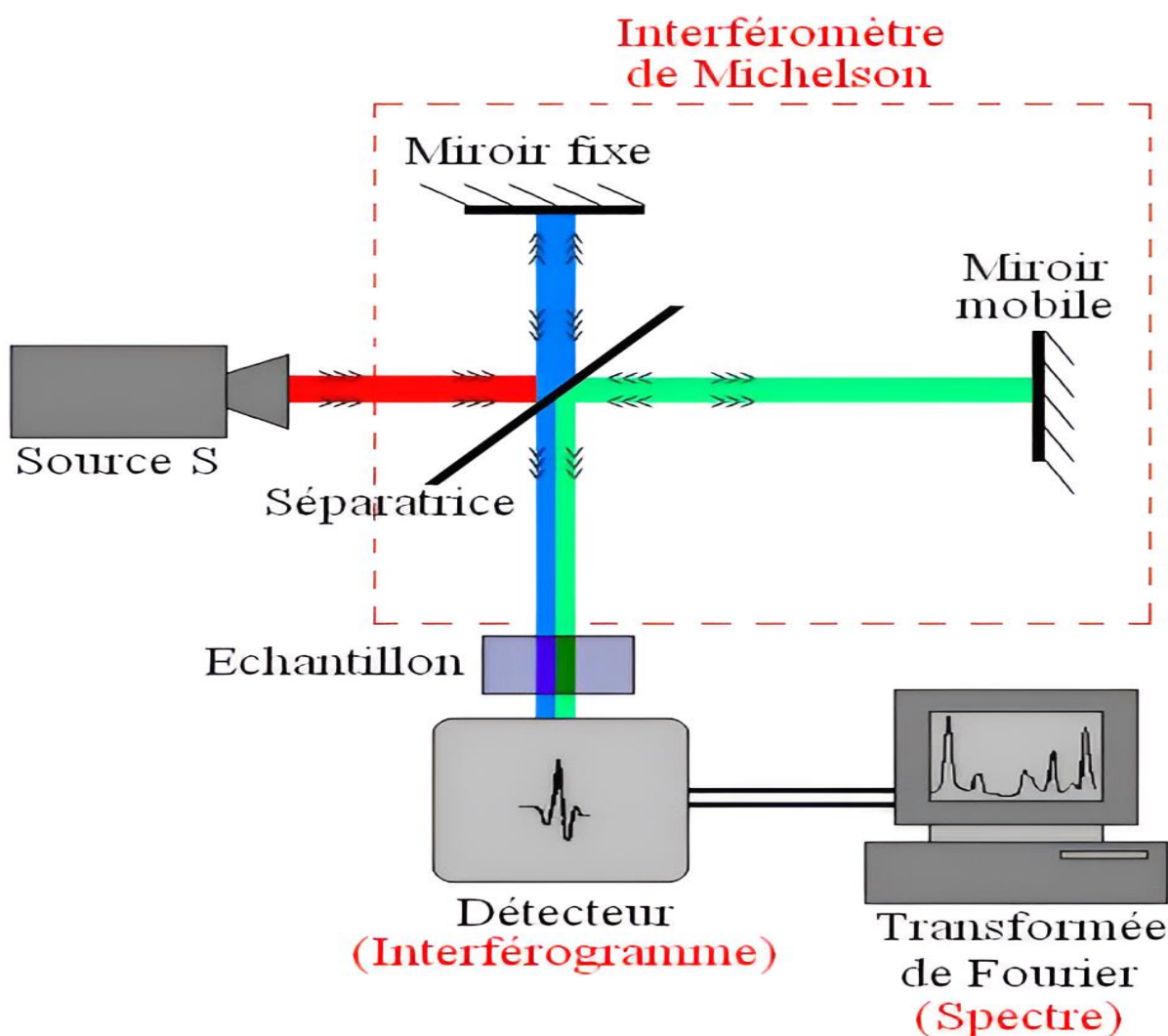


Figure (III.8) : Schéma du spectrophotomètre à transformée de Fourier (FTIR)

III.3. Résultats et discussion :

III.3.1. Phytoréduction des ions et mécanisme impliqué :

Dans le cadre d'une étude récente, nous avons exploré la synthèse verte de nanocomposites $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ en utilisant l'extrait de *Laurus nobilis L.* comme agent réducteur végétal unique pour les ions fer et zinc. La synthèse a été initiée en ajoutant du chlorure de fer et de l'acétate de zinc à l'extrait de *Laurus nobilis*, ce qui a provoqué un changement de couleur immédiat et frappant, passant du vert foncé au noir. Ce changement de couleur est une indication visuelle claire de la réduction des ions métalliques et de la formation de nanocomposites $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ (**Figure (III.9)**).

La capacité de l'extrait de *Laurus nobilis* à agir comme un agent réducteur efficace pour les deux ions métalliques est fascinante. Nous pensons que les composés phénoliques et les flavonoïdes présents dans l'extrait jouent un rôle crucial dans ce processus de bioréduction. Ces

composés ont la capacité de donner des électrons, facilitant ainsi la réduction des ions fer et zinc et la formation subséquente des nanostructures souhaitées.

De plus, l'utilisation d'un agent réducteur végétal unique dans ce processus de synthèse offre plusieurs avantages. Non seulement cela simplifie le processus de synthèse, mais il est également plus respectueux de l'environnement et économiquement rentable. Cette approche respectueuse de l'environnement élimine le besoin de produits chimiques dangereux et de processus complexes souvent associés à la synthèse de nanoparticules, ouvrant ainsi la voie à des applications plus sûres et plus durables dans diverses industries [32], [33].

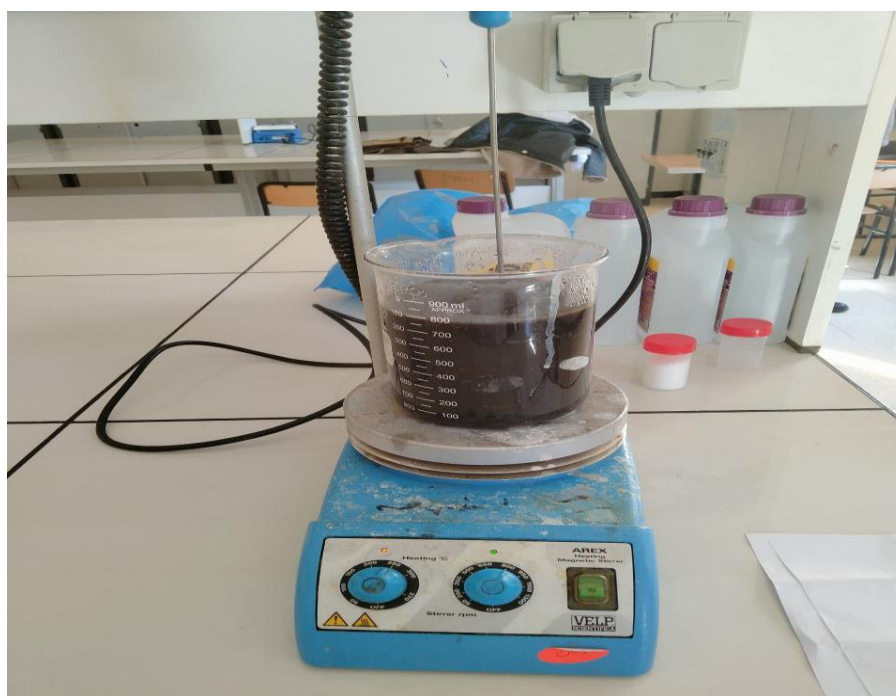


Figure (III.9) : Changement de couleur lors de la phytoréduction de FeCl_2 et $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2$ en $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ NC : observation optique.

III.3.1.1. Mécanisme :

Le mécanisme de formation des nanoparticules, tel que décrit dans la littérature, est fascinant. L'extrait de plante, regorgeant de composés phytochimiques tels que les phénols, les alcaloïdes, les flavonoïdes, les tanins condensés et les flavanols, joue un rôle crucial en tant qu'agents de synthèse verte, également connus sous le nom de bioréducteurs ou phytoréducteurs [34]–[36].

Les analyses phytochimiques préliminaires ont révélé que l'extrait de feuilles de *Laurus nobilis* L. est particulièrement riche en métabolites secondaires, y compris les polyphénols, les saponines, les flavonoïdes et les tanins condensés. Ces composés sont les acteurs clés responsables de la réduction des ions fer et zinc en nanocomposites $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$.

La **Figure (III.10)** illustre un mécanisme potentiel pour la formation de ces nanocomposites d'oxydes de fer (II) et de zinc (II). Ce processus, connu sous le nom de phytoréduction, implique l'utilisation d'extraits de feuilles de *Laurus nobilis L.* pour réduire les ions métalliques en nanoparticules, formant ainsi les nanocomposites α -Fe₂O₃/ZnO NC. Ce mécanisme intrigant ouvre des perspectives fascinantes pour l'utilisation de ressources naturelles dans la synthèse de nanocomposites [1], [2], [24].

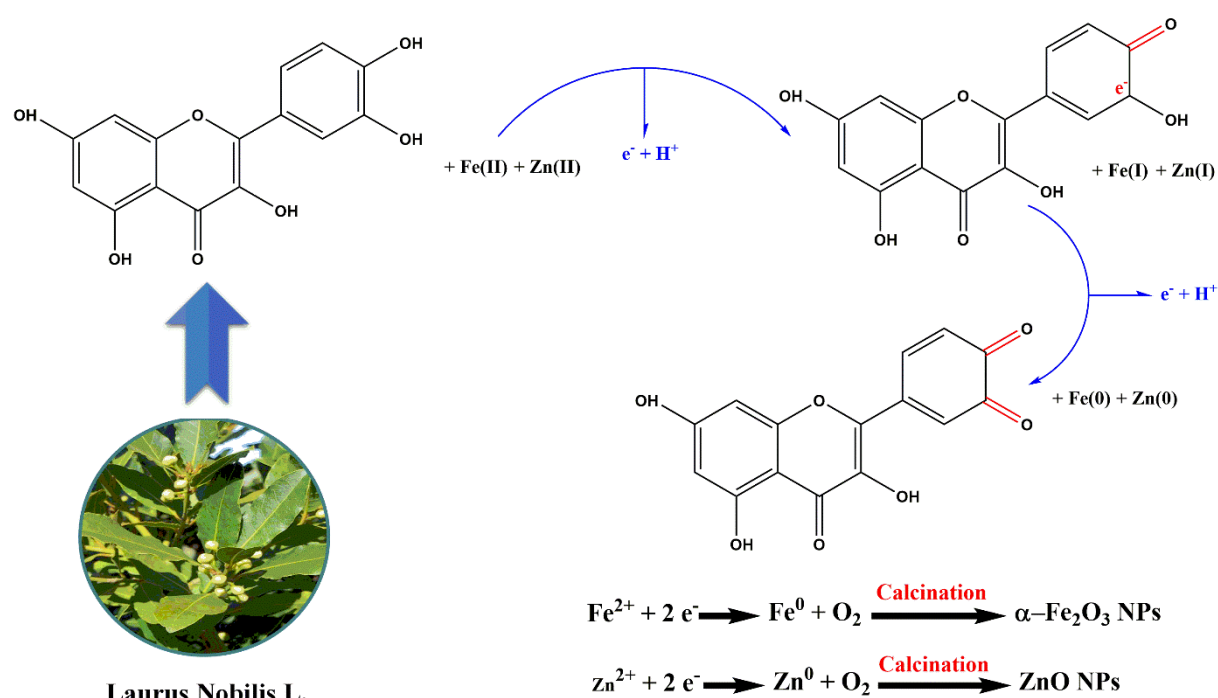


Figure (III.10) : Résumé graphique illustrant le mécanisme de synthétiser des α -Fe₂O₃/ZnO NC à partir de l'extrait des feuilles de *Laurus nobilis L.* [12].

III.3.2. Caractérisation des nanocomposite α -Fe₂O₃/ZnO:

III.3.2.1. Caractérisations optiques:

III.3.2.1.1. Spectromètre d'absorption UV-visible:

Un spectromètre UV-visible a été employé pour l'analyse, couvrant une gamme de longueurs d'onde de 200 à 900 nm. Une cellule de quartz de 1 cm et de l'eau distillée comme solvant ont été utilisées. Les résultats, présentés sur la **Figure (III.11)**, montrent les spectres UV-visible de nanocomposite α -Fe₂O₃/ZnO à base d'oxyde de fer (α -Fe₂O₃) et d'oxyde de zinc (ZnO), ainsi que l'extrait des feuilles de *Laurus nobilis L.* dans la région ultraviolet-visible. L'absorbance, mesurée sur l'échelle verticale, indique la quantité de lumière absorbée par les échantillons à des longueurs d'onde spécifiques.

Un pic distinct a été observé sur le graphique pour les nanocomposite à 280 nm, confirmant la formation réussie des nanocomposite α -Fe₂O₃/ZnO, ce qui est en accord avec les

résultats rapportés dans la littérature [37]. De plus, le spectre de l'extrait de feuilles de *Laurus nobilis* L. a révélé deux pics bien définis à 237 et 280 nm, suggérant fortement la présence de composés phénoliques [38], [39]. Ces composés phénoliques pourraient avoir joué un rôle crucial dans le processus de synthèse des nanoparticules, agissant comme agents réducteurs ou stabilisants, ou encore influencés leurs propriétés finales.

De plus, nos résultats sont cohérents avec les études antérieures de spectroscopie ultraviolette sur les oxydes métalliques de zinc et de fer [40], [41]. Qui ont montré des spectres similaires. Cette cohérence confirme à nouveau le succès de la synthèse verte des nanocomposite. La comparaison avec la littérature existante renforce la validité de nos résultats et suggère que la méthode de synthèse écologique employée a été efficace pour produire des nanocomposite stables et fonctionnels.

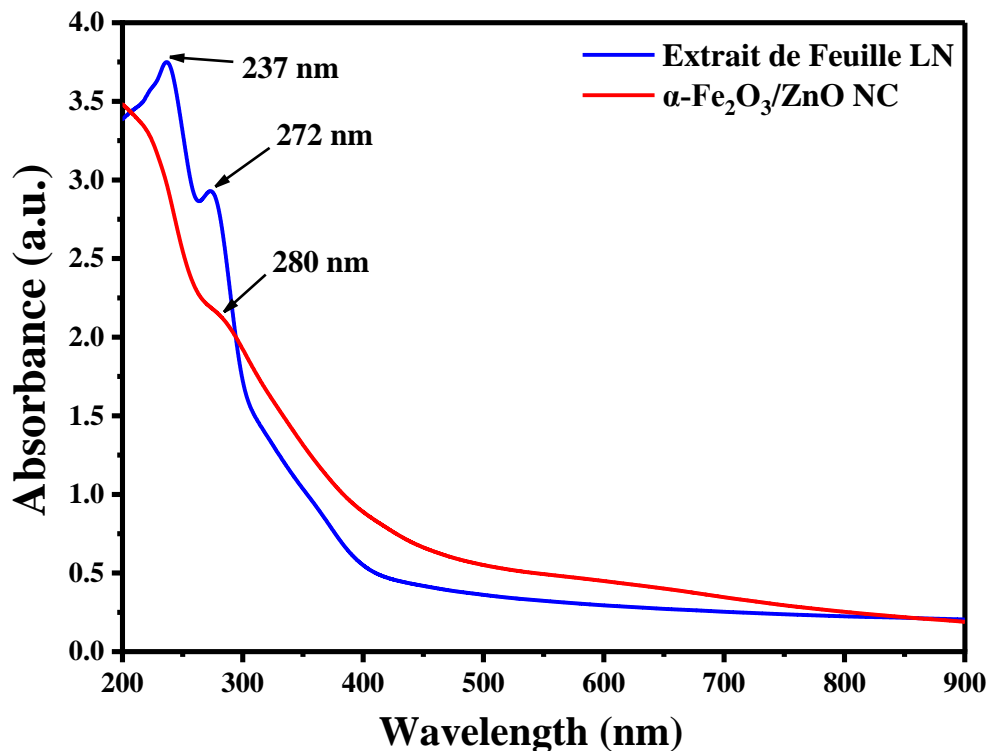


Figure (III.11) : Spectres UV-visible du nanocomposite $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ et de l'extrait de feuille de *Laurus nobilis* L.

III.3.2.1.2. Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier :

Une étude approfondie par spectroscopie FTIR a été effectuée sur des échantillons de nanocomposites à base d'oxyde de fer ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) et d'oxyde de zinc (ZnO) en poudre, avant et après recuit. De plus, un échantillon de la poudre extraite de *Laurus nobilis*, responsable de la formation des nanocomposites $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$, a été analysé. Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un spectrophotomètre dans une gamme de 400 à 4000 cm^{-1} .

Les résultats, illustrés sur la **Figure (III.12)**, révèlent plusieurs pics caractéristiques à 3307, 2913, 2845, 1735, 1645, 1560, 1464, 1036 et 635 cm^{-1} dans le spectre FTIR de l'extrait de *Laurus nobilis*. Un pic large à 3307 cm^{-1} indique la présence de groupes hydroxyle (-OH) et suggère une vibration d'élongation [42]. Des pics intenses à 2913 et 2845 cm^{-1} confirment l'existence de groupes méthyle (-CH₃) [43]. De plus, les pics à 1735 et 1645 cm^{-1} correspondent aux vibrations d'étirement de liaisons C-O, C-C et C=C dans des cycles aromatiques. Un pic à 1560 cm^{-1} suggère la présence de vibrations de déformation N-O d'un groupe nitro aromatique. Le pic à 1464 cm^{-1} indique des vibrations de déformation éther C-O [44]. Un pic moins intense à 1036 cm^{-1} indique la présence de liaisons C-O et C-H caractéristiques d'acides carboxyliques et d'alcools [45]. Enfin, les pics d'absorption à 635 cm^{-1} sont attribués à des vibrations d'élongation de liaisons C-H aromatiques [46].

La **Figure (III.13)** et **Figure (III.14)** présentent les spectres FT-IR de nanocomposites à base d'oxyde de fer ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) et d'oxyde de zinc (ZnO), avant et après un traitement thermique (recuit). Dans la **Figure (III.13)** (avant recuit), on observe plusieurs bandes d'absorption caractéristiques, notamment la bande intense autour de 550 cm^{-1} attribuable aux vibrations des liaisons Fe-O dans $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, les pics entre 1300 et 1600 cm^{-1} correspondant potentiellement aux modes d'élongation des liaisons C=C provenant de résidus organiques ou de contamination, et la large bande autour de 3400 cm^{-1} typique des vibrations d'élongation des liaisons O-H, suggérant la présence de groupes hydroxyles à la surface. Après le recuit, comme le montre la **Figure (III.14)**, le spectre est simplifié avec une réduction significative des bandes d'absorption secondaires. La bande intense à 550 cm^{-1} associée à $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ reste présente, indiquant que la phase cristalline d'oxyde de fer est conservée. L'absence des pics entre 1300 et 1600 cm^{-1} suggère l'élimination des résidus organiques, et la bande large autour de 3400 cm^{-1} attribuée aux groupes hydroxyles est également fortement réduite, indiquant une surface plus "propre" après le recuit. En résumé, le recuit semble avoir permis d'éliminer les impuretés et résidus organiques présents initialement dans les nanocomposites, tout en conservant la structure cristalline des oxydes de fer et de zinc [47], [48].

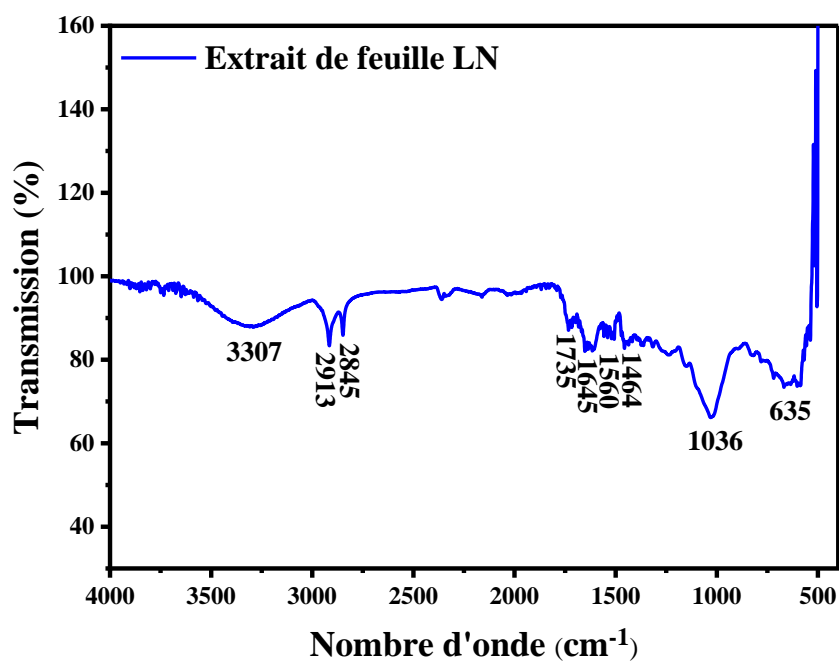


Figure (III.12) : Spectre FT-IR de l'extrait des feuilles d'*Laurus nobilis* L.

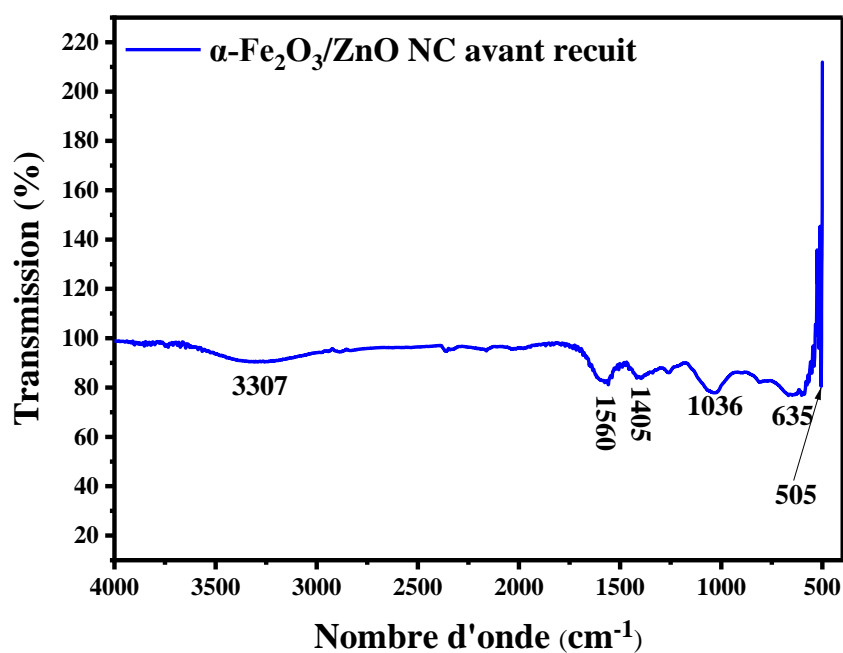


Figure (III.13) : Spectre FT-IR de nanocomposite α -Fe₂O₃/ZnO synthétisées à avant le recuit.

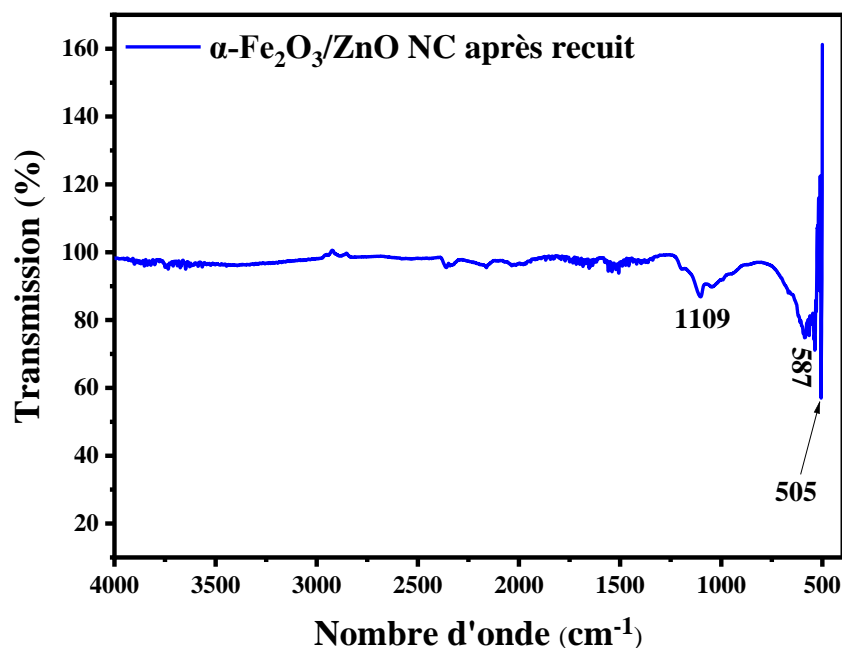


Figure (III.14) : Spectre FT-IR de nanocomposite $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ synthétisées à après le recuit.

III.3.2.2.1. Diffraction des rayons X (DRX):

Les diagrammes de diffraction des rayons X (DRX) présentés à la **Figure (III.15)** montrent les résultats du nanocomposite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ NC) à base d'oxyde de fer ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) et d'oxyde de zinc (ZnO) calciné à 500 °C. Les spectres XRD révèlent la présence de phases cristallines distinctes de nanoparticules d'hématite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) et d'oxyde de zinc (ZnO). La synthèse verte de ces nanoparticules a été réalisée avec succès à l'aide de l'extrait des feuilles de *Laurus nobilis* L. Les diagrammes DRX présentent des pics bien définis, indiquant la cristallisation du nanocomposite.

Des pics intenses sont observés à $2\theta = 24,13^\circ, 33,15^\circ, 35,45^\circ, 40,70^\circ, 49,47^\circ, 54,04^\circ, 62,90^\circ$ et $63,98^\circ$, correspondant aux plans cristallins de la structure rhomboédrique de l' $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Ces pics sont attribués respectivement aux plans cristallographiques (012), (104), (110), (113), (024), (116), (214) et (300), confirmant la structure de surface déterminée (groupe d'espace : R-3c). Les positions de ces pics correspondent étroitement au modèle attendu, tel que référencé dans la carte JCPDS N° 01-079-0007 [49].

De plus, les diagrammes XRD de la **Figure (III.15)** révèlent également la présence de pics caractéristiques de ZnO. L'échantillon a présenté des pics distincts situés à $2\theta = 31,8^\circ, 34,46^\circ, 47,59^\circ, 56,65^\circ, 62,93^\circ, 66,45^\circ, 68,02^\circ$ et $69,14^\circ$. Ces pics correspondent respectivement aux plans cristallins 100, 002, 112, 110, 013, 200, 112 et 201, indiquant une structure cristalline hexagonale pour les nanoparticules de ZnO (groupe d'espace : P 63 mc, paramètres de réseau :

$a = 3,24940 \text{ \AA}$, $c = 5,20380 \text{ \AA}$). Ces résultats sont en accord avec la carte JCDPS N° 96-900-4179 [50].

La taille des cristallites a été déterminée à l'aide de l'équation de Debye-Scherrer [Eq \(III.1\)](#), une méthode fiable pour estimer la taille des grains dans les matériaux nanométriques. Les résultats indiquent que la taille moyenne des nanoparticules de composite $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ synthétisées à l'aide de l'extrait de feuilles de *Laurus nobilis L.* est de 22,58 nm. De plus, la taille des cristallites d'oxyde de fer et d'oxyde de zinc au sein du composite a été estimée respectivement à 21,36 nm et 23,8 nm. Ces valeurs suggèrent une distribution relativement uniforme des tailles de nanoparticules, ce qui est un facteur crucial dans la détermination des propriétés du matériau.

La courbe XRD, à partir de laquelle ces estimations de taille ont été calculées, fournit un aperçu de la structure cristalline et de la taille des cristallites du nanocomposite. L'analyse minutieuse de la courbe a permis de confirmer la présence d'oxyde de fer et d'oxyde de zinc, ainsi que de leur taille de nanoparticules respective. Ces résultats mettent en évidence le potentiel de l'extrait de feuilles de *Laurus nobilis L.* comme agent de synthèse efficace pour la production de nanocomposites à base d'oxyde de fer et d'oxyde de zinc [33], [51].

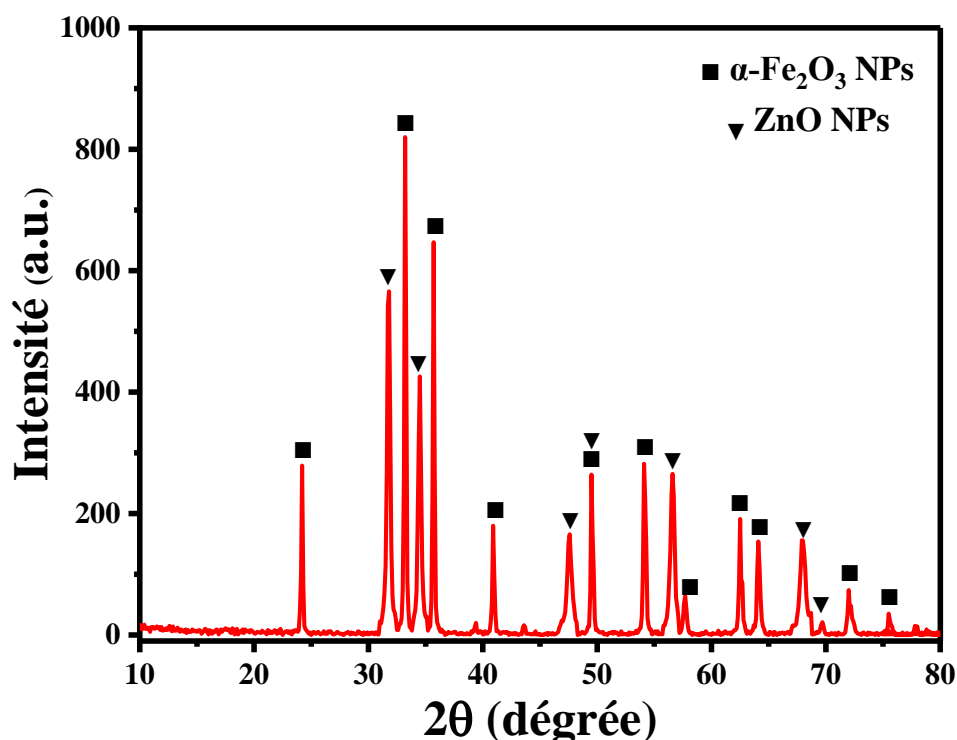


Figure (III.15) : Modèle XRD du nanocomposite $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ synthétisés en utilisant l'extrait de feuille de *Laurus nobilis L.*

4. Conclusion:

Ce chapitre explore la synthèse écologique des nanocomposites $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ en utilisant l'extrait de feuilles de *Laurus nobilis* (laurier). En employant des techniques de caractérisation avancées telles que la spectroscopie UV-Vis, la FTIR et la DRX, l'étude confirme la présence de phytoconstitués bioactifs dans l'extrait de feuilles. Ces phytoconstitués, en particulier les composés phénoliques, jouent un rôle crucial dans la réduction des ions fer et zinc, facilitant ainsi la formation des nanocomposites $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$. Le processus de synthèse exploite les propriétés naturelles réductrices et stabilisatrices de l'extrait de *Laurus nobilis*, mettant en avant une approche durable de la production de nanomatériaux.

Les techniques de spectroscopie optique fournissent des informations supplémentaires sur les aspects structuraux et compositionnels des nanocomposites synthétisés, révélant les liaisons chimiques spécifiques formées. L'analyse démontre comment les composés bioactifs de l'extrait de feuilles contribuent à la stabilité et à l'uniformité des nanocomposites.

Le chapitre aborde également le rôle crucial des concentrations de précurseurs, spécifiquement $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ et FeCl_2 , dans la détermination de la morphologie et de la taille des nanocomposites. En faisant varier les concentrations de ces précurseurs, l'étude identifie les conditions optimales pour produire des nanocomposites aux propriétés souhaitées. Cette approche dépendante de la concentration souligne l'importance d'un contrôle précis dans le processus de synthèse pour obtenir des nanomatériaux de haute qualité.

Dans l'ensemble, cette recherche met en lumière le potentiel de l'extrait de feuilles de *Laurus nobilis* dans la synthèse écologique des nanocomposites $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$, offrant une alternative durable aux méthodes chimiques conventionnelles. Les résultats contribuent au domaine plus large de la chimie verte, en mettant l'accent sur l'utilisation des ressources naturelles pour la synthèse de matériaux avancés.

Références bibliographiques

- [1] A. Bouafia, S. E. Laouini, M. L. Tedjani, G. A. M. Ali, and A. Barhoum, “Green biosynthesis and physicochemical characterization of Fe₃O₄ nanoparticles using Punica granatum L. fruit peel extract for optoelectronic applications,” *Text. Res. J.*, vol. 92, no. 15–16, pp. 2685–2696, Apr. 2022, doi: 10.1177/00405175211006671.
- [2] A. Bouafia, S. E. Laouini, A. Khelef, M. L. Tedjani, and F. Guemari, “Effect of Ferric Chloride Concentration on the Type of Magnetite (Fe₃O₄) Nanoparticles Biosynthesized by Aqueous Leaves Extract of Artemisia and Assessment of Their Antioxidant Activities,” *J. Clust. Sci.*, vol. 32, no. 4, pp. 1033–1041, Jul. 2021, doi: 10.1007/s10876-020-01868-7.
- [3] M. L. Ben Amor, S. Zeghdi, S. E. Laouini, A. Bouafia, and S. Meneceur, “pH reaction effect on biosynthesis of CuO/Cu₂O nanoparticles by Moringa oleifera leaves extracts for antioxidant activities,” *Inorg. Nano-Metal Chem.*, vol. 53, no. 4, pp. 437–447, Apr. 2023, doi: 10.1080/24701556.2022.2077376.
- [4] A. Bouafia, S. E. Laouini, A. Khelef, M. L. Tedjani, and F. Guemari, “Effect of Ferric Chloride Concentration on the Type of Magnetite (Fe₃O₄) Nanoparticles Biosynthesized by Aqueous Leaves Extract of Artemisia and Assessment of Their Antioxidant Activities,” *J. Clust. Sci.*, vol. 32, no. 4, pp. 1033–1041, 2021, doi: 10.1007/s10876-020-01868-7.
- [5] N. Allag *et al.*, “Effect of precursors on structural, optical and surface properties of ZnO thin film prepared by spray pyrolysis method: efficient removal of Cu (II) from wastewater,” *Transit. Met. Chem.*, Oct. 2023, doi: 10.1007/s11243-023-00560-9.
- [6] A. Bouafia and S. E. Laouini, “Plant-Mediated Synthesis of Iron Oxide Nanoparticles and Evaluation of the Antimicrobial Activity: A Review,” *Mini. Rev. Org. Chem.*, vol. 18, no. 6, pp. 725–734, Sep. 2020, doi: 10.2174/1570193x17999200908091139.
- [7] D. Thangadurai *et al.*, “Sustainable Synthesis of Greener Nanomaterials: Principles, Processes, and Products,” in *Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications*, Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 1–23.
- [8] S. Mallakpour, F. Sirous, and C. M. Hussain, “Green synthesis of nano-Al₂O₃, recent functionalization, and fabrication of synthetic or natural polymer nanocomposites: various technological applications,” *New J. Chem.*, vol. 45, no. 11, pp. 4885–4920, 2021, doi: 10.1039/D0NJ05578F.

- [9] F. Avalos Belmontes, F. J. González, and M. Á. López-Manchado, Eds., *Green-Based Nanocomposite Materials and Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2023.
- [10] Y. Zhang *et al.*, “One-pot green synthesis of Ag nanoparticles-graphene nanocomposites and their applications in SERS, H₂O₂, and glucose sensing,” *RSC Adv.*, vol. 2, no. 2, pp. 538–545, 2012, doi: 10.1039/c1ra00641j.
- [11] S. Mallakpour, F. Sirous, and C. M. Hussain, “Green synthesis of nano-Al₂O₃, recent functionalization, and fabrication of synthetic or natural polymer nanocomposites: various technological applications,” *New J. Chem.*, vol. 45, no. 11, pp. 4885–4920, 2021, doi: 10.1039/d0nj05578f.
- [12] A. Bouafia, “Optimisation de biosynthèse des nanoparticules d’oxyde de fer par l’utilisation de différents extraits des plantes et évaluation de leur activité biologique.” Universty of Eloued *جامعة الشهيد حمه لخضر*, p. 99, 2022.
- [13] M. D. Patil, S. D. Dhas, and A. V. Moholkar, “Green Synthesis of Nanocomposites,” 2021, pp. 77–100.
- [14] Y. Zhang *et al.*, “One-pot green synthesis of Ag nanoparticles-graphene nanocomposites and their applications in SERS, H₂O₂, and glucose sensing,” *RSC Adv.*, vol. 2, no. 2, pp. 538–545, 2012, doi: 10.1039/c1ra00641j.
- [15] H. Singh *et al.*, “Revisiting the Green Synthesis of Nanoparticles: Uncovering Influences of Plant Extracts as Reducing Agents for Enhanced Synthesis Efficiency and Its Biomedical Applications,” *Int. J. Nanomedicine*, vol. Volume 18, pp. 4727–4750, Aug. 2023, doi: 10.2147/IJN.S419369.
- [16] F. Khan, M. Shariq, M. Asif, M. A. Siddiqui, P. Malan, and F. Ahmad, “Green Nanotechnology: Plant-Mediated Nanoparticle Synthesis and Application,” *Nanomaterials*, vol. 12, no. 4, p. 673, Feb. 2022, doi: 10.3390/nano12040673.
- [17] B. A. Miu and A. Dinischiotu, “New Green Approaches in Nanoparticles Synthesis: An Overview,” *Molecules*, vol. 27, no. 19, 2022, doi: 10.3390/molecules27196472.
- [18] M. S. Jameel, A. A. Aziz, and M. A. Dheyab, “Green synthesis: Proposed mechanism and factors influencing the synthesis of platinum nanoparticles,” *Green Process. Synth.*, vol. 9, no. 1, pp. 386–398, Jul. 2020, doi: 10.1515/gps-2020-0041.
- [19] G. Villaverde-Cantizano, M. Laurenti, J. Rubio-Retama, and R. Contreras-Cáceres, “Reducing Agents in Colloidal Nanoparticle Synthesis – an Introduction,” in *Reducing Agents in Colloidal Nanoparticle Synthesis*, The Royal Society of Chemistry, 2021, pp. 1–27.

- [20] L. M. Alnaddaf, A. K. Almuhammady, K. F. M. Salem, M. T. Alloosh, M. M. Saleh, and J. M. Al-Khayri, “Green Synthesis of Nanoparticles Using Different Plant Extracts and Their Characterizations,” in *Nanobiotechnology*, Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 165–199.
- [21] P. Salgado, K. Márquez, O. Rubilar, D. Contreras, and G. Vidal, “The effect of phenolic compounds on the green synthesis of iron nanoparticles (FexOy-NPs) with photocatalytic activity,” *Appl. Nanosci.*, vol. 9, no. 3, pp. 371–385, Apr. 2019, doi: 10.1007/s13204-018-0931-5.
- [22] H. Terea, D. Selloum, A. Rebiai, A. Bouafia, and O. Ben Mya, “Preparation and characterization of cellulose/ZnO nanoparticles extracted from peanut shells: effects on antibacterial and antifungal activities,” *Biomass Convers. Biorefinery*, 2023, doi: 10.1007/s13399-023-03959-7.
- [23] M. Azzi *et al.*, “Plant extract-mediated synthesis of Ag/Ag₂O nanoparticles using *Olea europaea* leaf extract: assessing antioxidant, antibacterial, and toxicological properties,” *Biomass Convers. Biorefinery*, Nov. 2023, doi: 10.1007/s13399-023-05093-w.
- [24] S. Chihi, A. Bouafia, S. Meneceur, S. E. Laouini, and R. Z. Ahmed, “Effect of precursor concentration on the bandgap energy and particles size for green synthesis of hematite α -Fe₂O₃ nanoparticles by the aqueous extract of *Moltkia ciliata* and evaluation of the antibacterial activity,” *Biomass Convers. Biorefinery*, Aug. 2023, doi: 10.1007/s13399-023-04739-z.
- [25] A. Bouafia and S. E. Laouini, “Plant-Mediated Synthesis of Iron Oxide Nanoparticles and Evaluation of the Antimicrobial Activity: A Review,” *Mini. Rev. Org. Chem.*, vol. 18, no. 6, pp. 725–734, 2020, doi: 10.2174/1570193x17999200908091139.
- [26] J. Peng, “Détermination des contraintes résiduelles dans les revêtements par diffraction des rayons X en faible incidence.” Paris, ENSAM, p. 161, 2006, [Online]. Available: http://hal.archives-ouvertes.fr/index.php?halsid=59thg5hdrkxk65vk8bku6263b5&view_this_doc=pastel-00001946&version=1.
- [27] F. Serna, J. Lagneau, and J.-M. Carpentier, “La diffraction des rayons X : une technique puissante pour résoudre certains problèmes industriels et technologiques, Diffraction des rayons X et Catalyse,” *Chim. Nouv.*, vol. 116, pp. 2–11, 2014.
- [28] P. Scherrer, “Göttinger Nachrichten Math,” *Phys*, vol. 2, pp. 98–100, 1918.
- [29] J. Luis Aleixandre-Tudo and W. du Toit, “The Role of UV-Visible Spectroscopy for Phenolic Compounds Quantification in Winemaking,” *Front. New Trends Sci.*

- Fermented Food Beverages*, pp. 200–204, 2019, doi: 10.5772/intechopen.79550.
- [30] A. A. Ezhilarasi, J. J. Vijaya, K. Kaviyarasu, X. Zhang, and L. J. Kennedy, “Green synthesis of nickel oxide nanoparticles using *Solanum trilobatum* extract for cytotoxicity, antibacterial and photocatalytic studies,” *Surfaces and Interfaces*, vol. 20, p. 100553, 2020, doi: 10.1016/j.surfin.2020.100553.
- [31] T. Bonnal, E. Prud’homme, G. Foray, and S. Tadier, “La cartographie issue de la spectroscopie infrarouge, un nouvel outil de suivi pour la durabilité des matériaux cimentaires,” *Acad. J. Civ. Eng.*, vol. 34, no. 1, pp. 967–974, 2016.
- [32] B. Djamila, L. S. Eddine, B. Abderrhmane, A. Nassiba, and A. Barhoum, “In vitro antioxidant activities of copper mixed oxide (CuO/Cu₂O) nanoparticles produced from the leaves of *Phoenix dactylifera* L.,” *Biomass Convers. Biorefinery*, 2022, doi: 10.1007/s13399-022-02743-3.
- [33] R. Zohra, S. Meneceur, L. S. Eddine, A. Bouafia, H. A. Mohammed, and G. G. Hasan, “Biosynthesis and characterization of MnO₂ and Zn/Mn₂O₄ NPs using *Ziziphus spina-Christi* aqueous leaves extract: Effect of decoration on photodegradation activity against various organic dyes,” *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 156, p. 111304, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.inoche.2023.111304.
- [34] S. Meneceur *et al.*, “Photocatalytic activity of iron oxide nanoparticles synthesized by different plant extracts for the degradation of diazo dyes Evans blue and Congo red,” *Biomass Convers. Biorefinery*, 2022, doi: 10.1007/s13399-022-02734-4.
- [35] S. Meneceur *et al.*, “Photocatalytic activity of iron oxide nanoparticles synthesized by different plant extracts for the degradation of diazo dyes Evans blue and Congo red,” *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 14, no. 4, pp. 5357–5372, Feb. 2024, doi: 10.1007/s13399-022-02734-4.
- [36] S. Meneceur *et al.*, “Removal Efficiency of Heavy Metals, Oily in Water, Total Suspended Solids, and Chemical Oxygen Demand from Industrial Petroleum Wastewater by Modern Green Nanocomposite Methods,” *J. Environ. Chem. Eng.*, p. 111209, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111209>.
- [37] N. DOUAOURI, “Contribution à une étude phytothérapeutique, anti-inflammatoire et antioxydante du grenadier (*Punica granatum* L.) – Etude in vivo.” Thèse de Doctorat en biologique Option: Plantes Médicinales et Phytothérapie ..., pp. 158-undefined, 2018, [Online]. Available: <http://e-biblio.univ-mosta.dz/handle/123456789/646>.
- [38] J. Dai and R. J. Mumper, “Plant phenolics: Extraction, analysis and their antioxidant and anticancer properties,” *Molecules*, vol. 15, no. 10, pp. 7313–7352, Oct. 2010, doi:

- 10.3390/molecules15107313.
- [39] J. Luis Aleixandre-Tudo and W. du Toit, “The Role of UV-Visible Spectroscopy for Phenolic Compounds Quantification in Winemaking,” in *Frontiers and New Trends in the Science of Fermented Food and Beverages*, IntechOpen, 2019.
- [40] H. R. Ghorbani, F. P. Mehr, H. Pazoki, and B. M. Rahmani, “Synthesis of ZnO nanoparticles by precipitation method,” *Orient. J. Chem.*, vol. 31, no. 2, pp. 1219–1221, Jun. 2015, doi: 10.13005/ojc/310281.
- [41] M. Zhang, W. Luo, Z. Li, T. Yu, and Z. Zou, “Improved photoelectrochemical responses of Si and Ti codoped α -Fe₂O₃ photoanode films,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, no. 4, Jul. 2010, doi: 10.1063/1.3470109.
- [42] S. A. Ordoudi, M. Papapostolou, S. Kokkini, and M. Z. Tsimidou, “Diagnostic Potential of FT-IR Fingerprinting in Botanical Origin Evaluation of *Laurus nobilis* L. Essential oil is supported by GC-FID-MS data,” *Molecules*, vol. 25, no. 3, p. 583, Jan. 2020, doi: 10.3390/molecules25030583.
- [43] S. Khan *et al.*, “Biosynthesis and characterization of iron oxide nanoparticles from *Mentha spicata* and screening its combating potential against *Phytophthora infestans*,” *Front. Plant Sci.*, vol. 13, Sep. 2022, doi: 10.3389/fpls.2022.1001499.
- [44] H. El Ghandoor, H. M. Zidan, M. M. H. Khalil, and M. I. M. Ismail, “Synthesis and some physical properties of magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles,” *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 7, no. 6, pp. 5734–5745, 2012, doi: 10.1016/s1452-3981(23)19655-6.
- [45] F. A. Al-Bayati, “Isolation and identification of antimicrobial compound from *Mentha longifolia* L. leaves grown wild in Iraq,” *Ann. Clin. Microbiol. Antimicrob.*, vol. 8, p. 20, 2009, doi: 10.1186/1476-0711-8-20.
- [46] M. Ismail, M. I. Khan, K. Akhtar, M. A. Khan, A. M. Asiri, and S. B. Khan, “Biosynthesis of silver nanoparticles: A colorimetric optical sensor for detection of hexavalent chromium and ammonia in aqueous solution,” *Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures*, vol. 103, pp. 367–376, 2018, doi: 10.1016/j.physe.2018.06.015.
- [47] A. Bouafia *et al.*, “The Recent Progress on Silver Nanoparticles: Synthesis and Electronic Applications,” *Nanomaterials*, vol. 11, no. 9, p. 2318, Sep. 2021, doi: 10.3390/nano11092318.
- [48] A. Bouafia *et al.*, “Removal of hydrocarbons and heavy metals from petroleum water by modern green nanotechnology methods,” *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, p. 5637, Apr. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-32938-1.
- [49] A. Bouafia and S. E. Laouini, “Green synthesis of iron oxide nanoparticles by aqueous

-
- leaves extract of *Mentha Pulegium* L.: Effect of ferric chloride concentration on the type of product,” *Mater. Lett.*, vol. 265, p. 127364, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.matlet.2020.127364.
- [50] B. Gherbi *et al.*, “Effect of pH Value on the Bandgap Energy and Particles Size for Biosynthesis of ZnO Nanoparticles: Efficiency for Photocatalytic Adsorption of Methyl Orange,” *Sustain.*, vol. 14, no. 18, p. 11300, Sep. 2022, doi: 10.3390/su141811300.
- [51] R. Zohra *et al.*, “Enhanced photocatalytic degradation of dyes and antibiotics with biosynthesized FeMn₂O₄ nanocomposite under sunlight irradiation: isotherm and kinetic study,” *Biomass Convers. Biorefinery*, Jun. 2023, doi: 10.1007/s13399-023-04497-y.

***Chapitr IV: Etude de l'activité
photocatalytique de Rose
Bengale.***

Les colorants azoïques sont très prisés dans diverses industries, notamment celles du cuir artificiel, du papier et de l'alimentation, en raison de leur stabilité exceptionnelle. Cependant, leur présence dans les déchets liquides qui s'infiltrent dans les eaux de surface et souterraines entraîne une pollution importante et des problèmes environnementaux majeurs [1]. La contamination par les colorants est devenue un enjeu environnemental si répandu que la recherche sur le traitement des colorants a pris une ampleur considérable, dans le but de réduire les risques de contamination [2]. Bien que les techniques traditionnelles soient efficaces pour éliminer les polluants organiques, elles ne parviennent pas à éliminer complètement les particules de colorants. De plus, leur utilisation dans ce contexte est souvent jugée coûteuse et d'une efficacité limitée [3], [4].

C'est pourquoi, grâce à des recherches scientifiques poussées, de nouvelles méthodes de destruction des molécules complexes présentes dans l'eau polluée ont été développées, telles que les processus d'oxydation avancée (AOP) via photocatalyse [5]. L'objectif de ces méthodes est la minéralisation complète des colorants organiques en H_2O et CO_2 , permettant ainsi une décomposition des polluants par photolyse sans générer de pollution secondaire [6], [7].

Une stratégie innovante, présentée dans une étude récente, implique la synthèse écologique d'un nanocomposite à base d'oxyde de fer ($\alpha-Fe_2O_3$) et d'oxyde de zinc (ZnO) à partir d'extraits de feuilles de *Laurus nobilis L.* Ce nanocomposite, nommé $\alpha-Fe_2O_3/ZnO$, a démontré une activité photocatalytique remarquable dans la dégradation du colorant rose bengale (RB) [8]. Cette étude met en lumière le potentiel de l' $\alpha-Fe_2O_3/ZnO$ en tant que solution efficace et respectueuse de l'environnement pour traiter les problèmes de pollution par les colorants.

IV.1. Colorants organiques dans les eaux usées:

La présence de colorants organiques dans les eaux usées est un problème environnemental préoccupant, en particulier concernant les effluents industriels provenant de secteurs tels que l'électronique, la transformation des aliments, les cosmétiques et la fabrication de détergents [9]. Ces colorants, souvent utilisés dans les processus de production, peuvent avoir des effets significatifs sur les écosystèmes et la santé humaine en raison de leur toxicité potentielle et de leur persistance dans l'environnement [10]. Les problèmes qu'ils causent incluent la coloration des plans d'eau naturels, affectant la vie aquatique et la qualité de l'eau, ainsi que l'infiltration des sources d'eau potable [11]. Par conséquent, l'une des étapes cruciales de la gestion efficace des eaux usées est l'élimination de ces colorants organiques, qui peut être réalisée grâce à une variété de traitements physiques, chimiques et biologiques [12].

Par exemple, les traitements physiques peuvent impliquer la filtration et l'absorption, tandis que les traitements chimiques pourraient inclure l'oxydation, la coagulation ou la floculation pour dégrader ou éliminer les colorants [13]. Les méthodes biologiques utilisent des micro-organismes pour métaboliser et éliminer les molécules de colorant organique. Parmi les exemples spécifiques de procédures couramment utilisées, citons la coagulation et la floculation, où des coagulants tels que des sels de fer ou d'aluminium provoquent la formation de floes de colorant qui peuvent être facilement éliminés [10]. L'oxydation à l'ozone utilise l'ozone comme agent oxydant puissant, tandis que l'adsorption sur charbon actif exploite la structure poreuse du charbon pour capturer les molécules de colorant [14]. Le traitement biologique se concentre sur la biodégradation, et la filtration membranaire sépare physiquement les colorants en utilisant des membranes semi-perméables [15].

IV.1.1. Les colorants textiles et leur impact sur l'environnement :

La contamination de l'eau est un problème urgent avec des conséquences écologiques de grande portée. Notre environnement est vulnérable à une variété de contaminants, y compris les pesticides, les métaux lourds, les composés organiques et les produits chimiques synthétiques. Les polluants les plus préoccupants sont les polluants organiques persistants (POP), qui comprennent de nombreux pesticides et produits chimiques synthétiques. Ces toxines persistent dans l'environnement pendant de longues périodes, résistant aux processus naturels de dégradation. Même à de faibles concentrations, les POP peuvent s'accumuler dans la chaîne alimentaire, posant ainsi un risque important pour la santé humaine et écologique [16].

L'utilisation incorrecte et l'élimination des colorants, en particulier dans l'industrie textile, contribuent de manière significative à la contamination de l'eau. Ces colorants contiennent souvent des structures aromatiques complexes qui sont résistantes à la biodégradation, ce qui en fait des polluants persistants. Même à de très faibles concentrations, ces colorants peuvent avoir des effets néfastes sur l'environnement. Les colorants peuvent avoir des impacts esthétiques, en décolorant les plans d'eau, et plus critique, ils peuvent perturber les écosystèmes aquatiques, affectant la santé et le comportement de la vie aquatique [17].

Il est important de comprendre les différents types de colorants utilisés dans diverses industries (*Figure (IV.1)*). Une classification catégorise les colorants comme cationiques, anioniques ou non ioniques, selon leur charge ionique. Une autre catégorisation est basée sur les groupes fonctionnels, résultant en des catégories telles que les colorants azoïques, anthraquinone, phtalocyanine et indigo, chacun ayant des structures et des propriétés chimiques uniques [18]. De plus, les colorants peuvent être classés selon leur application, tels que les colorants de base, acides, de cuve, réactifs ou de dispersion, couramment utilisés dans l'industrie textile, chacun présentant des compositions chimiques distinctes et des défis en termes d'impact environnemental et de processus de traitement.

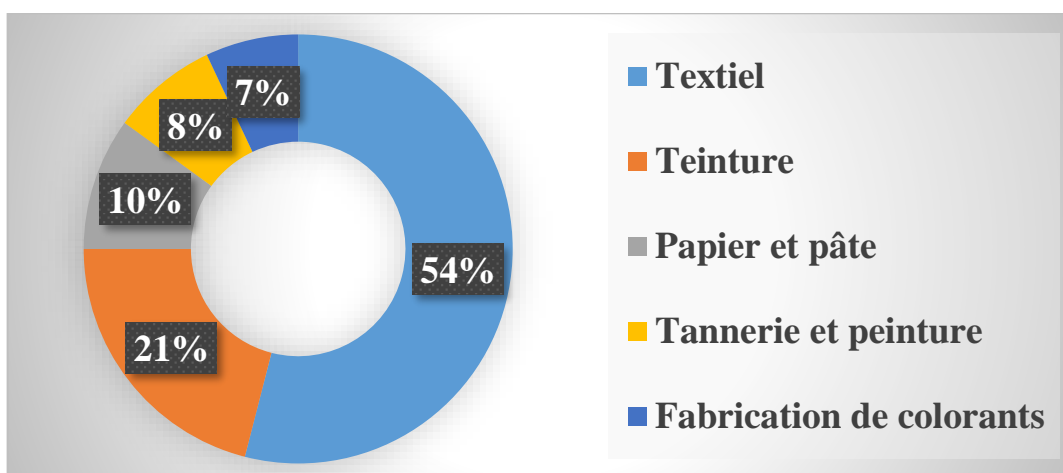


Figure (IV.1) : Industries chargées de rejeter des effluents de colorant dans l'environnement [19].

IV.1.2. Types de colorants:

Le monde diversifié des colorants synthétiques peut être classé en fonction de leur structure chimique, de leur utilisation et de leur solubilité. Ces colorants présentent une image complexe en matière de classification. Les colorants solubles, par exemple, englobent les colorants acides, basiques, directs, mordants et réactifs, offrant ainsi une gamme d'options pour les processus de teinture [20]. D'un autre côté, les colorants insolubles, tels que les colorants azoïques, dispersés, soufrés et en cuve, présentent des défis et des applications uniques. Les colorants azoïques dominent le marché, avec un taux de production de 70 % à l'échelle mondiale, ce qui en fait le type le plus répandu [21]. Cependant, cela souligne également une préoccupation commune à tous les colorants synthétiques : leur danger potentiel pour l'environnement. La nature toxique de ces colorants exige la plus grande prudence pour

empêcher leur rejet incontrôlé dans les sources d'eau et l'environnement [22]. Les environmentalistes et ceux qui dépendent des sources d'eau expriment particulièrement clairement ces préoccupations, exhortant au développement de techniques et de technologies d'élimination efficaces pour résoudre ce problème [23].

IV.1.3. Élimination du colorant par adsorption:

Les propriétés uniques des nanoparticules, en particulier leur surface spécifique élevée et leur réactivité, se prêtent à diverses applications, notamment l'élimination de la couleur des solutions aqueuses [24]. Ce processus, appelé « adsorption », implique la fixation et la rétention de molécules colorantes à la surface des nanoparticules. Une gamme de nanoparticules, notamment celles composées de dioxyde de titane (TiO_2) [25], d'oxyde de zinc (ZnO) [26] et d'oxyde de cérium (CeO_2) [27], ont été explorées pour leur capacité à adsorber et dégrader efficacement les molécules de colorants organiques. Ce processus élimine non seulement la couleur, mais contribue également à éliminer les polluants organiques nocifs, jouant ainsi un rôle crucial dans le traitement des eaux usées et l'assainissement de l'environnement. La surface élevée des nanoparticules offre une abondance de sites d'adsorption, permettant la capture et la dégradation efficaces des molécules de colorant, rendant la solution incolore et contribuant à atténuer l'impact environnemental de ces contaminants [28].

IV.1.4. Photocatalyse

La photocatalyse est une technologie prometteuse pour la dégradation des polluants organiques dans l'eau et l'air [29]. Ce processus implique l'utilisation de nanoparticules, généralement à base de semi-conducteurs, pour accélérer la dégradation des composés organiques lorsqu'ils sont exposés à la lumière [30]. Les nanoparticules agissent comme des photocatalyseurs, absorbant les photons et générant des paires électron-trou [31]. Ces porteurs chargés migrent ensuite vers la surface de la nanoparticule, où ils peuvent réagir avec les molécules d'eau ou d'oxygène adsorbées pour former des espèces hautement réactives, telles que les radicaux hydroxyles (OH^\bullet) [32]. Ces radicaux sont de puissants agents oxydants qui peuvent minéraliser les polluants organiques en dioxyde de carbone et en eau, sans laisser de sous-produits nocifs [33]. L'efficacité de la photocatalyse dépend des propriétés des nanoparticules, telles que leur taille, leur forme et leur composition, ainsi que de la présence de lumière d'une longueur d'onde appropriée pour exciter le matériau semi-conducteur [34].

IV.1.5. Rose Bengale :

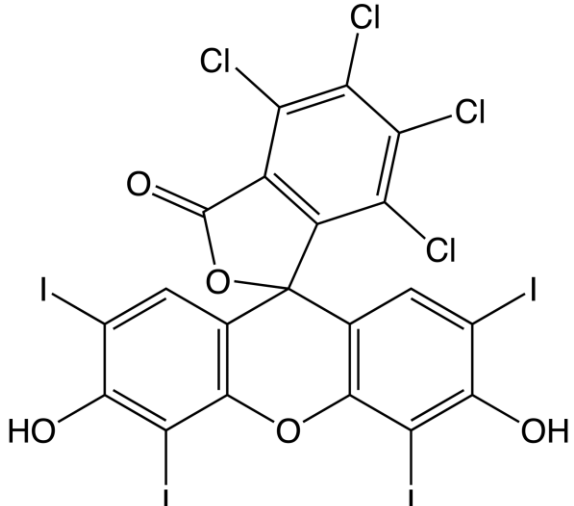
IV.1.5.1. Définition :

Bengale Rose, un colorant artificiel exquis, se distingue en tant que membre du groupe des xanthènes au sein de la famille des colorants organiques azoïques (**Figure (IV.2)**). Sa teinte rose vif attire l'attention immédiate [35]. Au-delà de son attrait esthétique, la Rose de Bengale trouve son importance dans le domaine médical, notamment en ophtalmologie et en analyse microscopique [36]. Il constitue un outil essentiel pour la coloration des cellules et des tissus, facilitant ainsi le diagnostic de diverses maladies cellulaires [36]. La capacité unique du colorant à interagir avec les protéines le distingue dans le domaine de la biochimie, où il aide les chercheurs à dévoiler les fonctions et propriétés complexes de ces molécules vitales [37]. Ce colorant polyvalent est un outil indispensable dans la recherche et le diagnostic médicaux, offrant une fenêtre vivante sur le monde microscopique [38] (**Tableau (IV.1)**).



Figure (IV.2) : Photo de rose bengale poudre

Tableau (IV.1) : Les propriétés physico-chimiques du Rose Bengale

Propriétés	Rose Bengale (RB)
Apparence	Poudre rouge-brun
Formule brute	$C_{20}H_4Cl_4I_4O_5$
Masse molaire ($g \cdot mol^{-1}$)	$973,673 \pm 0,026$ g/mol
Solubilité dans l'eau à 20 °C	8,7 g/L
Point de fusion °C	190-195 °C
Structure chimique	

IV.2. Evaluation de l'activité photocatalytique :

Dans cette étude, les nanocomposites (NC) α -Fe₂O₃/ZnO ont été choisis en raison de leur potentiel dans les applications catalytiques. Le colorant Rose Bengale a été sélectionné car il est l'un des colorants les plus utilisés et les plus répandus. Les colorants azoïques, tels que le Rose Bengale, constituent une menace pour l'environnement et la santé humaine en raison de leur toxicité et de leur difficulté de décomposition. Il est donc essentiel de trouver une méthode efficace pour éliminer ces colorants organiques qui polluent l'eau. Cette étude vise à évaluer la capacité des nanocomposites à dégrader la teinture de Rose Bengale dans l'eau afin de développer des systèmes catalytiques efficaces et respectueux de l'environnement.

IV.2.1. Réactifs chimiques:

Dans cette étude, plusieurs réactifs ont été utilisés pour les procédures expérimentales. L'acétate de zinc, un composé chimique de formule moléculaire $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ et d'une pureté de 98 %, a été acquis auprès de Sigma-Aldrich, un fournisseur bien connu de produits chimiques de laboratoire basé en Allemagne. Le chlorure de fer(II) (FeCl₂), avec un niveau de pureté de 99 %, a également été obtenu auprès du même fournisseur. L'eau distillée, un solvant

couramment utilisé dans les expériences de laboratoire, a été employée dans toutes les procédures expérimentales. Le colorant Rose Bengale, un composant essentiel des expériences, a été fourni par un fournisseur basé en Inde.

IV.2.2. Préparation des suspensions des nanocomposites α -Fe₂O₃/ZnO :

Pour garantir une qualité élevée, de l'eau ultrapure est utilisée pour la préparation initiale des suspensions de nanocorps. Lors de la préparation, les nanocomposites forment généralement des amas au fond, mais ces amas doivent être décomposés et dispersés pour que les nanocomposites soient utilisables dans diverses applications. Une dispersion efficace est obtenue par sonication, une technique qui utilise des ondes ultrasonores. Spécifiquement pour les nanocomposites α -Fe₂O₃/ZnO (Figure IV.3), qui ont tendance à former des agrégats ou des agglomérats, il est crucial de décomposer ces structures au niveau des particules pour une dispersion optimale lors de l'évaluation de l'activité photocatalytique. Pour les tests, nous préparons 5 mg de nanocomposites dans un millilitre d'eau distillée.



Figure (IV.3) : Nanocomposites α -Fe₂O₃/ZnO préparés.

IV.2.3. Activité Photocatalytique :

- **Principe** : Cette recherche avait pour objectif d'évaluer l'efficacité de la photocatalyse dans la dégradation du rose Bengale (RB) en utilisant des nanocomposites α -Fe₂O₃/ZnO synthétisés par des méthodes écologiques.
- **Mode opératoire** : Des nanocomposites α -Fe₂O₃/ZnO ont été synthétisés de manière écologique pour étudier la photodégradation du Rose Bengale (RB). Les expérimentations ont eu lieu le 4 mars 2024, sous un ciel ensoleillé à l'Université d'El Oued, en Algérie.

Pour préparer la solution, 5 mg des nanocomposites α -Fe₂O₃/ZnO ont été ajoutés à 10 ml d'eau distillée contenant du Rose Bengale à une concentration de 5×10^{-5} M. Six échantillons avec les mêmes concentrations ont été préparés et exposés à la lumière solaire pendant des périodes variables (5, 15, 30, 45, 60, 90 et 120 minutes) (**Figure (IV.4)**). La température ambiante était d'environ 34 °C. L'absorbance des solutions a été mesurée à $\lambda_{\text{max}} = 543$ nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-visible [39]–[41].

L'efficacité de la dégradation a été calculée à l'aide de l'équation **Eq (IV. 1)** ci-dessous :

$$\% \text{ dégradation} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad (\text{IV. 1})$$

Où C_t est la concentration résiduelle en solution à un instant donné (t), et C_0 est la concentration de départ (t).



Figure (IV.4): la photodégradation du RB Sous exposition au soleil.

IV.3. Résultats de l'Activité photocatalytique des α - Fe₂O₃/ZnO NC pour la dégradation des colorants (RB):

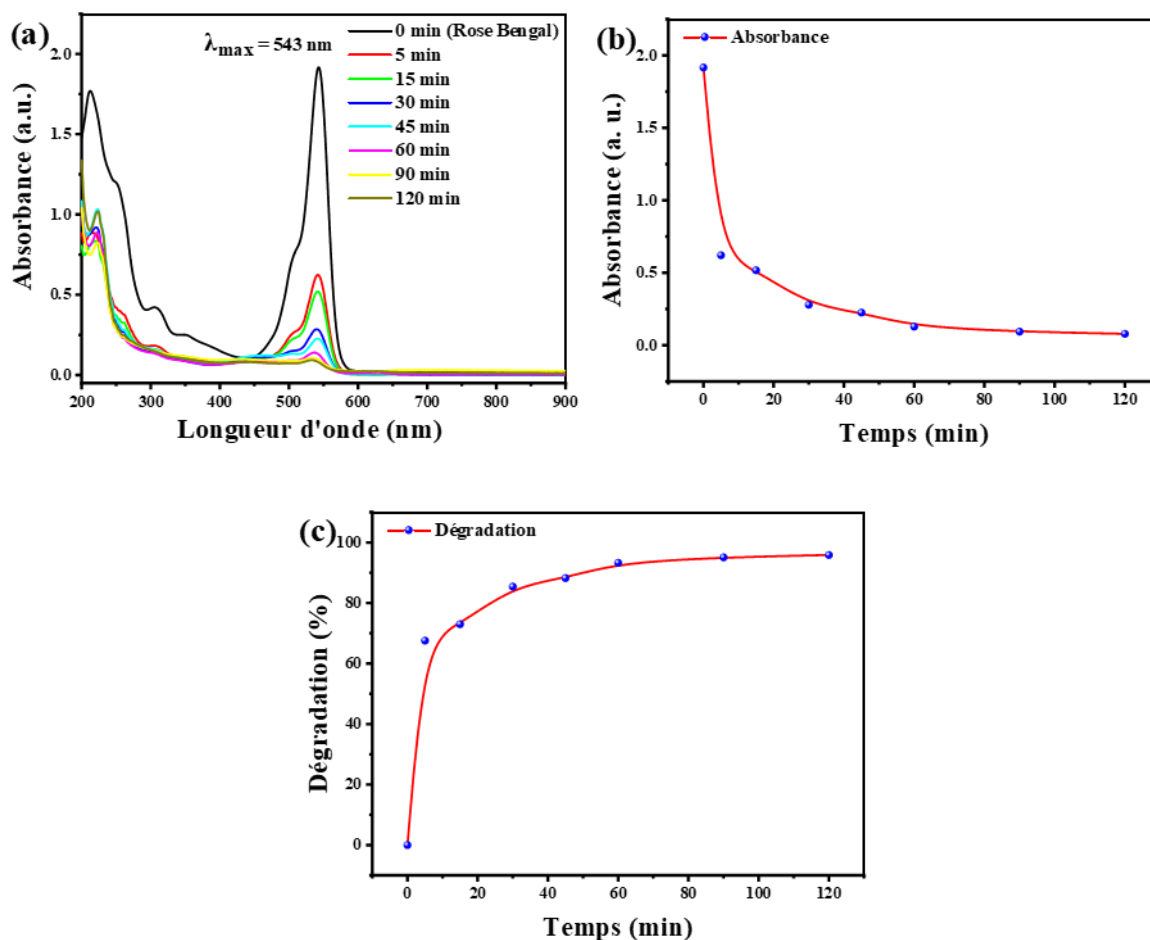
Puisque l'objectif principal de l'expérience est d'étudier la photodégradation du RB sous l'influence de α - Fe₂O₃/ZnO NC, Les résultats ont révélé que la majorité du colorant rose du Bengale a disparu avant 120 minutes (**Figure (IV.5)**).



Figure (IV.5) : photodégradation du rose bengale (RB) utilisant des α - $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ NC.

Cette recherche visait à examiner la dégradation photocatalytique du colorant Rose Bengale (RB) sous irradiation solaire en utilisant des nanocomposites α - $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$. Les résultats ont montré qu'une partie significative du colorant Rose Bengale était dégradée en moins de 120 minutes d'exposition au soleil (voir *Figures (IV.6) a, b, c*). Ces observations éclairent le mécanisme de dégradation photocatalytique du RB et soulignent l'efficacité des nanocomposites α - $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ en tant que photocatalyseur potentiel pour la dépollution environnementale [42], [43].

L'étude a également exploré l'application environnementale des nanocomposites α - $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ biosynthétisés, en utilisant une solution aqueuse d'extraits de feuilles de *Laurus nobilis* combinée avec le colorant Rose Bengale (RB). Les données expérimentales sont illustrées dans les Figures IV.3 a, c, e et g. Dans la phase initiale de l'expérience, les échantillons ont été maintenus dans l'obscurité pendant 30 minutes pour étudier l'élimination des polluants par adsorption. Les résultats ont indiqué que la dégradation photocatalytique du colorant RB par les nanocomposites α - $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ se déroulait en deux phases distinctes. Initialement, le processus de dégradation était rapide mais a ensuite ralenti. Le ralentissement dans la seconde phase est probablement dû à l'accumulation d'intermédiaires issus de la première phase, ce qui a entravé le taux de la réaction photocatalytique oxydative [44].



Figures (IV.6): Dégradation photocatalytique de l'absorption des colorants (a) RB et (b) Absorbance (c) Dégradation en utilisant α -Fe₂O₃/ZnO NC à différents temps d'irradiation sous irradiation par la lumière solaire.

IV.4. Conclusion:

Les progrès récents en chimie verte ont démontré que l'utilisation d'extraits de plantes pour la synthèse de nanocomposites (NC) offre une méthode simple, économique et respectueuse de l'environnement pour obtenir des matériaux aux propriétés physiques distinctes. Notre étude a exploré la synthèse verte de nanocomposites α -Fe₂O₃/ZnO à partir d'extraits de feuilles de *Laurus nobilis L.*, montrant ainsi que ces NC présentent une activité catalytique élevée dans la décomposition des pigments tels que le rose Bengale. Ces résultats soulignent le potentiel des nanocomposites pour le traitement de l'eau, en particulier dans l'élimination des colorants. Cette approche offre une alternative écologique prometteuse pour la conception de matériaux catalytiques efficaces et durables dans diverses applications environnementales.

Références bibliographiques

- [1] U. Ramzan *et al.*, “Biodegradation and Decolorization of Textile Azo Dyes by *Paramecium caudatum* Isolated from Industrial Wastewater,” *Water*, vol. 14, no. 21, p. 3553, Nov. 2022, doi: 10.3390/w14213553.
- [2] A. M. Tama, S. Das, S. Dutta, M. D. I. Bhuyan, M. N. Islam, and M. A. Basith, “MoS₂ nanosheet incorporated α -Fe₂O₃/ZnO nanocomposite with enhanced photocatalytic dye degradation and hydrogen production ability,” *RSC Adv.*, vol. 9, no. 69, pp. 40357–40367, 2019, doi: 10.1039/C9RA07526G.
- [3] S. H. Khan and V. K. Yadav, “Advanced Oxidation Processes for Wastewater Remediation: An Overview,” in *Removal of Emerging Contaminants Through Microbial Processes*, Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 71–93.
- [4] M. Sharma, A. Yadav, M. K. Mandal, and K. K. Dubey, “TiO₂ based photocatalysis: a valuable approach for the removal of pharmaceuticals from aquatic environment,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 4, pp. 4569–4584, Apr. 2023, doi: 10.1007/s13762-021-03894-y.
- [5] A. G. Rana, M. Tasbihi, M. Schwarze, and M. Minceva, “Efficient Advanced Oxidation Process (AOP) for Photocatalytic Contaminant Degradation Using Exfoliated Metal-Free Graphitic Carbon Nitride and Visible Light-Emitting Diodes,” *Catalysts*, vol. 11, no. 6, p. 662, May 2021, doi: 10.3390/catal11060662.
- [6] S. Sridharan, S. V. Perumalsamy, J. Kulandaivel, G. Nammalwar, H. Parangusan, and D. Ponnamma, “ α -Fe₂O₃/ZnO nanocomposite as an efficient photocatalyst for wastewater treatment and flexible electronic device applications,” *Ionics (Kiel)*, vol. 30, no. 2, pp. 1137–1150, Feb. 2024, doi: 10.1007/s11581-023-05316-0.
- [7] M. I. Rahmah, R. S. Sabry, and W. J. Aziz, “Preparation and photocatalytic property of Fe₂O₃/ZnO composites with superhydrophobicity,” *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, vol. 28, no. 6, pp. 1072–1079, Jun. 2021, doi: 10.1007/s12613-020-2096-y.
- [8] R. Suresh *et al.*, “Solid-state synthesis and characterization of α -Fe₂O₃@ZnO nanocomposites with enhanced visible light driven photocatalytic activity,” *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 29, no. 23, pp. 20347–20355, Dec. 2018, doi: 10.1007/s10854-018-0170-2.
- [9] K. Maheshwari, M. Agrawal, and A. B. Gupta, “Dye Pollution in Water and Wastewater,” 2021, pp. 1–25.
- [10] S. Dutta, B. Gupta, S. K. Srivastava, and A. K. Gupta, “Recent advances on the removal

- of dyes from wastewater using various adsorbents: a critical review,” *Mater. Adv.*, vol. 2, no. 14, pp. 4497–4531, 2021, doi: 10.1039/D1MA00354B.
- [11] R. Gamal, M. Bassyouni, M. M. H. ElZahar, and M. Y. Saleh, “A Review of Wastewater Treatment Using Biodegradable Polymers for Dyes Removal,” 2024, pp. 123–139.
- [12] D. A. Yaseen and M. Scholz, “Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 2, pp. 1193–1226, Feb. 2019, doi: 10.1007/s13762-018-2130-z.
- [13] R. S. Ashraf *et al.*, “Methods for the Treatment of Wastewaters Containing Dyes and Pigments,” pp. 597–661, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-52395-4_17.
- [14] K. Piaskowski, R. Świdorska-Dąbrowska, and P. K. Zarzycki, “Dye Removal from Water and Wastewater Using Various Physical, Chemical, and Biological Processes,” *J. AOAC Int.*, vol. 101, no. 5, pp. 1371–1384, Sep. 2018, doi: 10.5740/jaoacint.18-0051.
- [15] R. C. Uduma, K. L. Oguzie, C. F. Chijioke, T. E. Ogbulie, and E. E. Oguzie, “Bioelectrochemical technologies for simultaneous treatment of dye wastewater and electricity generation: a review,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 9, pp. 10415–10434, Sep. 2023, doi: 10.1007/s13762-022-04753-0.
- [16] A. B. T. Akhtar, S. Naseem, A. Yasar, and Z. Naseem, “Persistent Organic Pollutants (POPs): Sources, Types, Impacts, and Their Remediation,” pp. 213–246, 2021, doi: 10.1007/978-981-15-5499-5_8.
- [17] T. Sarwar and S. Khan, “Textile Industry: Pollution Health Risks and Toxicity,” 2022, pp. 1–28.
- [18] S. El Harfi and A. El Harfi, “Classifications, properties and applications of textile dyes: A review,” *Appl. J. Environ. Eng. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 0–3, 2017.
- [19] V. Katheresan, J. Kansedo, and S. Y. Lau, “Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 4676–4697, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.060>.
- [20] M. A. Rauf and S. Salman Ashraf, “Survey of recent trends in biochemically assisted degradation of dyes,” *Chem. Eng. J.*, vol. 209, pp. 520–530, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.08.015>.
- [21] S. Cotillas *et al.*, “Removal of Procion Red MX-5B dye from wastewater by conductive-diamond electrochemical oxidation,” *Electrochim. Acta*, vol. 263, pp. 1–7, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.01.052>.
- [22] S. Montoya-Suarez, F. Colpas-Castillo, E. Meza-Fuentes, J. Rodríguez-Ruiz, and R. Fernandez-Maestre, “Activated carbons from waste of oil-palm kernel shells, sawdust

- and tannery leather scraps and application to chromium(VI), phenol, and methylene blue dye adsorption,” *Water Sci. Technol.*, vol. 73, no. 1, pp. 21–27, Sep. 2015, doi: 10.2166/wst.2015.293.
- [23] Z. Wang, M. Xue, K. Huang, and Z. Liu, “Textile dyeing wastewater treatment,” *Adv. Treat. Text. Effl.*, vol. 5, pp. 91–116, 2011.
- [24] R. Rakhshae and N. Ertegha, “Multifold increase in dye adsorption by nanoparticles of a nanobiocomposite through its controlled simultaneous synthesis with simultaneous adsorption and photodegradation,” *Appl. Water Sci.*, vol. 14, no. 4, p. 63, Apr. 2024, doi: 10.1007/s13201-024-02109-2.
- [25] E. Rojas-García, D. C. García-Martínez, R. López-Medina, F. Rubio-Marcos, A. A. Castañeda-Ramírez, and A. M. Maubert-Franco, “Photocatalytic Degradation of Dyes Using Titania Nanoparticles Supported in Metal-Organic Materials Based on Iron,” *Molecules*, vol. 27, no. 20, p. 7078, Oct. 2022, doi: 10.3390/molecules27207078.
- [26] L. M. Mahlaule-Glory and N. C. Hintsho-Mbita, “Green Derived Zinc Oxide (ZnO) for the Degradation of Dyes from Wastewater and Their Antimicrobial Activity: A Review,” *Catalysts*, vol. 12, no. 8, p. 833, Jul. 2022, doi: 10.3390/catal12080833.
- [27] S. Pansambal *et al.*, “Bioengineered cerium oxide (CeO₂) nanoparticles and their diverse applications: a review,” *Appl. Nanosci.*, vol. 13, no. 9, pp. 6067–6092, Sep. 2023, doi: 10.1007/s13204-022-02574-8.
- [28] S. Chahal *et al.*, “Enhanced photocatalytic degradation of organic dye by CeO₂/CNT/GO hybrid nanocomposites under UV light for wastewater treatment,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, no. 60, pp. 124964–124975, 2023, doi: 10.1007/s11356-023-26184-1.
- [29] W. S. Koe, J. W. Lee, W. C. Chong, Y. L. Pang, and L. C. Sim, “An overview of photocatalytic degradation: photocatalysts, mechanisms, and development of photocatalytic membrane,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 27, no. 3, pp. 2522–2565, Jan. 2020, doi: 10.1007/s11356-019-07193-5.
- [30] M. Umar and H. Abdul, “Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants in Water,” in *Organic Pollutants - Monitoring, Risk and Treatment*, InTech, 2013.
- [31] M. A. Hassaan, M. A. El-Nemr, M. R. Elkatory, S. Ragab, V.-C. Niculescu, and A. El Nemr, “Principles of Photocatalysts and Their Different Applications: A Review,” *Top. Curr. Chem.*, vol. 381, no. 6, p. 31, Dec. 2023, doi: 10.1007/s41061-023-00444-7.
- [32] X. Li, H. Wei, T. Song, H. Lu, and X. Wang, “A review of the photocatalytic degradation of organic pollutants in water by modified TiO₂,” *Water Sci. Technol.*, vol. 88, no. 6, pp. 1495–1507, Sep. 2023, doi: 10.2166/wst.2023.288.

- [33] C. Xu, P. Ravi Anusuyadevi, C. Aymonier, R. Luque, and S. Marre, "Nanostructured materials for photocatalysis," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 48, no. 14, pp. 3868–3902, 2019, doi: 10.1039/C9CS00102F.
- [34] D. Beydoun, R. Amal, G. Low, and S. McEvoy, "Role of nanoparticles in photocatalysis," *J. Nanoparticle Res.*, vol. 1, no. 4, pp. 439–458, 1999, doi: 10.1023/A:1010044830871.
- [35] S. Sharma and A. Sharma, "Recent advances in photocatalytic manipulations of Rose Bengal in organic synthesis," *Org. Biomol. Chem.*, vol. 17, no. 18, pp. 4384–4405, 2019, doi: 10.1039/C9OB00092E.
- [36] A. Johnson *et al.*, "Efficacy of a Rose Bengal-Embedded Antimicrobial Packaging Film in Inactivating Escherichia coli under Visible Light Irradiation," *ACS Food Sci. Technol.*, vol. 4, no. 3, pp. 561–566, Mar. 2024, doi: 10.1021/acsfoodscitech.4c00040.
- [37] A. Srivastava, P. K. Singh, A. Ali, P. P. Singh, and V. Srivastava, "Recent applications of Rose Bengal catalysis in N-heterocycles: a short review," *RSC Adv.*, vol. 10, no. 65, pp. 39495–39508, 2020, doi: 10.1039/D0RA07400D.
- [38] M. A. George, M. B. Abelson, K. Schaefer, M. Mooshian, and D. Weintraub, "A Precise Method of Using Rose Bengal in the Evaluation of Dry Eye and the Detection of Changes in its Severity," 1994, pp. 549–552.
- [39] A. Aouadi *et al.*, "Synergistic chitin-zinc nanocomposites from shrimp shell waste: characterization, antioxidant, and antibacterial properties," *Biomass Convers. Biorefinery*, pp. 1–17, 2023.
- [40] Y. Zidane *et al.*, "Green synthesis of multifunctional MgO@AgO/Ag₂O nanocomposite for photocatalytic degradation of methylene blue and toluidine blue," *Front. Chem.*, vol. 10, 2022, doi: 10.3389/fchem.2022.1083596.
- [41] B. Gherbi *et al.*, "Effect of pH Value on the Bandgap Energy and Particles Size for Biosynthesis of ZnO Nanoparticles: Efficiency for Photocatalytic Adsorption of Methyl Orange," *Sustain.*, vol. 14, no. 18, p. 11300, Sep. 2022, doi: 10.3390/su141811300.
- [42] P. Basnet, T. Inakhunbi Chanu, D. Samanta, and S. Chatterjee, "A review on bio-synthesized zinc oxide nanoparticles using plant extracts as reductants and stabilizing agents," *J. Photochem. Photobiol. B Biol.*, vol. 183, pp. 201–221, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2018.04.036>.
- [43] N. Balázs *et al.*, "The effect of particle shape on the activity of nanocrystalline TiO₂ photocatalysts in phenol decomposition," *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 84, no. 3, pp. 356–362, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2008.04.018>.

- [44] V. N. Blaskov *et al.*, “The photo-degradation of Methylene Blue and Methyl Orange dyes and their mixture by ZnO obtained by hydrothermally activated precipitates,” *Bulg. Chem. Commun.*, vol. 49, pp. 183–187, 2017.

Conclusion

Les conditions opératoires, les propriétés de surface et catalytiques des nanocomposites formés ont été étudiées, ce qui dépend de la réduction de leur taille à l'échelle nanométrique et du contrôle de leurs propriétés et caractéristiques, ce qui ouvre de nouveaux horizons pour les nanoapplications dans divers domaines.

Un extrait aqueux de plante de *laurus nobilis* a été utilisé pour préparer des nanocomposites $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$.

La caractérisation des nanoparticules d'oxyde de nickel a été réalisée dans ce mémoire par des différentes techniques comme la spectroscopie UV-visible, la spectroscopie infrarouge FTIR, le diffractomètre à rayons DRX et le microscope électronique à balayage. Toutes ces techniques de caractérisation nous ont permis d'analyser aussi bien la qualité ainsi que les propriétés optiques et structurelles des nanoapplications.

La synthèse verte de nanomatériaux est une méthode efficace et respectueuse de l'environnement, car des nanomatériaux de formes et de propriétés différentes peuvent être fabriqués pour être utilisés dans de nombreuses applications dans différents domaines.

