

N° d'Ordre :

N° de série :

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

N° d'enregistrement

/...../...../...../.....

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم هندسة الطرائق

Département de Génie des procédés

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie chimique

Thème

Synthèse et caractérisation des nanoparticules d'oxyde de zinc et leur application sur la photodégradation d'oxalate vert de malachite

Présenté par :

MIMOUNI Abdelmalek

KELLOU Kacem

Soutenue publiquement le 04/06/2024

Devant le jury composé de :

MANSOURI Khaled	MCA	Univ. Ghardaïa	Président
BOURAS Hadj Daoud	MCA	Univ. Ghardaïa	Examinateur
FENNICHE Fares	MAB	Univ. Ghardaïa	Examinateur
AOUF Mohammed	MAB	Univ. Ghardaïa	Encadreur
KHANE Yasmina	MCA	Univ. Ghardaïa	Co-Encadreur

Année universitaire 2023/2024

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions à **Allah** de nous avoir aidés et donne la patience, et le courage et la volonté de poursuivre nos études.

Au terme de ce travail, nous souhaitons exprimer nos sincères remerciements et notre reconnaissance au **Dr. AOUF Mohammed** pour son encadrement exceptionnel et son soutien indéfectible. Nous aimerions aussi adresser nos remerciements spéciaux au **Dr. KHANE Yasmina** Co-encadrant de ce mémoire, pour son suivi attentif de notre travail et sa disponibilité, ses conseils précieux et son expérience ont été d'une grande aide pour l'aboutissement de ce projet.

Nous souhaitons exprimer nos sincères remerciements à la présidente de jury **Dr. MANSOURI Khaled** à l'université de Ghardaïa pour avoir accepté de présider ce jury, nous sommes honorés par sa présence et son soutien. Nos remerciements vont également à **Dr. BOURAS Hadj Daoud** et **Dr. FENNICHE Fares** à l'université de Ghardaïa pour avoir accepté d'examiner ce travail, nous sommes reconnaissants pour leur temps et leur effort dans l'évaluation de notre travail.

Un sincère remerciement est également adressé à **Dr. AOUF Djaber** l'ingénieur de laboratoires pour sa patience, sa disponibilité et ses précieux conseils. Nous exprimons notre gratitude envers tous les membres du laboratoire, chercheurs, techniciens, qui ont contribué à notre plaisir de travailler dans ce cadre.

Nous souhaitons remercier tous mes enseignants du département Génie des procédés à l'université de Ghardaïa pour leurs efforts et la qualité de la formation qui nous est dispensée et pour leur contribution durant mon cursus. Nous tenons également à remercier tous nos amis et collègues de la promotion de génie chimique 2023/2024.

Nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à tous.



Dédicaces

Au terme de ce mémoire nous tenons à remercier tout d'abord et en premier lieu **ALLAH** tout puissant qui nous a donné la force, le courage et la patience de bien mener ce travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude pour mes efforts et ma fatigue tout au long de cette intégration scolaire, et je suis extrêmement fier du niveau que j'ai atteint. Je souhaite exprimer ma gratitude envers mes chers parents qui m'ont donné tout, de leur amour et de leurs sacrifices éternels pour que je puisse poursuivre mes études dans des conditions optimales. Ils ne cessent de m'encourager et de veiller à mon bien-être, sans leur soutien, ce travail n'aurait jamais vu le jour.

À mes sœurs, vous êtes mes amis, mes confidents et mes plus grands soutiens. Votre soutien inconditionnel, vos conseils avisés et votre présence réconfortante m'ont donné la motivation de persévérer et de persévérer. Enfin, je tiens à remercier toute ma chère famille, mes cousins, mes proches et mes amis sans exception pour votre amitié précieuse, votre soutien constant et vos encouragements qui ont joué un rôle clé dans mon parcours.

À toutes ces personnes et à celles que j'ai peut-être oubliées j'adresse mes sentiments les plus chaleureux.



MIMOUNI ABDELMALEK



Dédicaces

Au terme de ce mémoire nous tenons à remercier tout d'abord et en premier lieu **ALLAH** tout puissant qui nous a donné la force, le courage et la patience de bien mener ce travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude pour mes efforts et ma fatigue tout au long de cette intégration scolaire, et je suis extrêmement fier du niveau que j'ai atteint. Je souhaite exprimer ma gratitude envers mes chers parents qui m'ont donné tout, de leur amour et de leurs sacrifices éternels pour que je puisse poursuivre mes études dans des conditions optimales. Ils ne cessent de m'encourager et de veiller à mon bien-être, sans leur soutien, ce travail n'aurait jamais vu le jour.

À mes sœurs, vous êtes mes amis, mes confidents et mes plus grands soutiens. Votre soutien inconditionnel, vos conseils avisés et votre présence réconfortante m'ont donné la motivation de persévérer et de persévérer. Enfin, je tiens à remercier toute ma chère famille, mes cousins, mes proches et mes amis sans exception pour votre amitié précieuse, votre soutien constant et vos encouragements qui ont joué un rôle clé dans mon parcours.

À toutes ces personnes et à celles que j'ai peut-être oubliées j'adresse mes sentiments les plus chaleureux.



KELLOU KACEM

Résumé

Cette étude présente une méthode qui respectueuse de l'environnement pour le traitement des eaux contaminées par des colorants textiles, qui représentent un défi environnemental et sanitaire majeur en raison des effets nocifs de ces substances sur l'environnement et la santé publique. L'étude met en avant l'utilisation de NPs-ZnO synthétisées de manière durable, Le processus implique la synthèse verte des NPs-ZnO en utilisant un extrait de *La Coriandres sativum L*, Des billes ZnO/Alg sont également formées, La formation des NPs-ZnO est confirmée par les résultats de diffraction des rayons X (DRX) et les résultats de microscopie électronique à balayage (MEB) confirment la forme sphérique des NPs-ZnO et bille ZnO/Alg, L'effet photocatalytique des NPs-ZnO et bille ZnO/Alg a été testé par la photodégradation du colorant « Oxalate Vert de Malachite », sous irradiation UV. L'évolution de la photodégradation, suivie par un spectrophotomètre UV, montre une décomposition allant jusqu'à 90% pour les NPs-ZnO et 83% pour les bille ZnO/Alg après 90 minute de traitement, Cette méthode permet non seulement de résoudre le problème de la pollution de l'eau, mais elle le fait d'une manière qui réduit les impacts négatifs sur l'environnement. En outre, cette étude ouvre la voie à des recherches futures axées sur l'amélioration de l'efficacité des nanoparticules et l'élargissement de leur utilisation pour le traitement d'autres types de polluants environnementaux.

Les mots clés : NPs-ZnO, Billes ZnO/Alg, Bille d'alginate, Photodégradation, Oxalate Vert de Malachite, Traitement.

Abstract

This study presents an environmentally friendly method for treating water contaminated by textile dyes, which represent a major environmental and health challenge due to the harmful effects of these substances on the environment and public health. The study highlights the use of sustainably synthesized NPs-ZnO. The process involves the green synthesis of NPs-ZnO using an extract of *Coriandrum sativum L.* ZnO/Alg beads are also formed. The formation of NPs-ZnO is confirmed by X-ray diffraction (XRD) results, and scanning electron microscopy (SEM) results confirm the spherical shape of NPs-ZnO and ZnO/Alg beads. The photocatalytic effect of NPs-ZnO and ZnO/Alg beads was tested by the photodegradation of the dye " Oxalate Green of Malachite " under UV irradiation. The evolution of photodegradation, monitored by a UV spectrophotometer, shows a decomposition of up to 90% for NPs-ZnO and 83% for ZnO/Alg beads after 90 minutes of treatment. This method not only solves the problem of water pollution but does so in a way that reduces negative impacts on the environment. Furthermore, this study paves the way for future research focused on improving the efficiency of nanoparticles and expanding their use for treating other types of environmental pollutants.

Keywords: NPs-ZnO, ZnO/Alg beads, Alginate bead, Photodegradation, Oxalate Green of Malachite, Treatment.

المخلص

تقدم هذه الدراسة طريقة محترمة للبيئة لمعالجة المياه الملوثة بأصباغ النسيج، التي تمثل تحديًا بيئيًا وصحياً رئيسياً بسبب التأثيرات الضارة لهذه المواد على البيئة والصحة العامة. تسلط الدراسة الضوء على استخدام NPs-ZnO المركبة بطريقة مستدامة. يشمل العملية تخليق NPs-ZnO بشكل أخضر باستخدام مستخلص من نبات الكزبرة. كما يتم تكوين كريات ZnO/Alg. يتم تأكيد تكوين NPs-ZnO من خلال نتائج تفريق الأشعة السينية (DRX) ونتائج المجهر الإلكتروني الماسح (MEB) التي تؤكد الشكل الكروي لـ NPs-ZnO وكرية ZnO/Alg. تم اختبار التأثير الفوتوكاتاليتي لـ NPs-ZnO وكرية ZnO/Alg عن طريق تحلل الصبغة " أوكسالات اللون الأخضر للمالاكيت " تحت التشعيع بالأشعة فوق البنفسجية. تظهر تطور عملية التحلل الضوئي، التي تتبعها جهاز قياس الامتصاص الضوئي بالأشعة فوق البنفسجية، تحللاً يصل إلى 90% لـ NPs-ZnO و83% لـ كرية ZnO/Alg بعد 90 دقيقة من المعالجة. تسمح هذه الطريقة ليس فقط بحل مشكلة تلوث المياه، ولكنها تفعل ذلك بطريقة تقلل من التأثيرات السلبية على البيئة. بالإضافة إلى ذلك، تفتح هذه الدراسة الباب أمام الأبحاث المستقبلية التي تركز على تحسين كفاءة الجسيمات النانوية وتوسيع استخدامها لمعالجة أنواع أخرى من الملوثات البيئية.

الكلمات الرئيسية: NPs-ZnO، كريات ZnO/Alg، كريات ألجينات، تحلل ضوئي، أوكسالات اللون الأخضر للمالاكيت، معالجة.

Liste de tableau

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau I.1 : Les propriétés physico-chimiques de verte malachite	10
Tableau I.2 : Position systématique de <i>la Coriandres sativum L</i>	23
Tableau I.3 : les avantage et l'inconvénient de la photocatalyse hétérogène.....	31

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODE

Tableau II.1 : Les produits chimiques utilisent.....	40
--	----

CHAPITRE III : RESULTA ET DISCUSSIONS

Tableau III.1 : Les données de la courbe d'étalonnage, concentration / absorbance.....	60
Tableau III.2 : Résultat de l'effet de masse de NPs-ZnO.....	62

Liste de figure

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I.1 : Les pigments utilisés dans certaines grottes avec des peintures rupestres réalisées pendant le Mésolithique	5
Figure I.2 : Ressources de colorants naturels, notamment plantes, animaux, micro-organismes et minéraux.....	6
Figure I.3 : La part des colorants des catégories organiques et inorganiques.....	7
Figure I.4 : Diverses catégories de colorants et leurs possibles applications industrielles ...	8
Figure I.5 : a) Vert de malachite, b) Structure chimique de vert de malachite	9
Figure I.6 : Le schéma des techniques de traitement	12
Figure I.7 : L'échelle de tailles des nanoparticules.....	13
Figure I.8 : Les fullerènes, (A) Sphériques et (B) Hexagonaux.....	15
Figure I.9 : L'oxyde de zinc : (a, b) sous forme naturelle et (c) sous forme artificielle	18
Figure I.10 : Synthèse de nanoparticules à travers des approches biologiques et physico-chimique.....	19
Figure I.11 : Mécanisme de synthèse verte des nanoparticules d'oxydes métalliques.....	21
Figure I.12 : Différents aspects de croissance, de développement et de fonctionnement de <i>la Coriandres sativum L</i>	22
Figure I.13 : les compositions chimiques de <i>la Coriandres sativum L</i>	24
Figure I.14 : Représentation de structures wurtzite et zinc blende de l'oxyde de zinc.....	25
Figure I.15 : Schéma de la structure d'une cellule solaire	28
Figure I.16 : Représentation synoptique du processus de photocatalyse sur un semi-conducteur.....	29
Figure I.17 : Classification des nanocomposites polymères selon le type de la nanocharge renforçante.....	32
Figure I.18 : La chaîne structure de polymère	33

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODE

Figure II.1 : L'organigramme descriptif de la méthodologie de travail.....	39
Figure II.2 : Répartition géographique de plante de <i>la Coriandres sativum L</i>	41
Figure II.3 : Les étapes de la préparation d'extrait des feuilles de <i>la Coriandres sativum L</i>	42
Figure II.4 : Schéma descriptif de biosynthèse des nanoparticules NPs-ZnO	44
Figure II.5 : Schéma descriptif de préparation des billes composites.....	46
Figure II.6 : Illustration de la loi de Bragg.....	47
Figure II.7 : Appareille de diffractomètre DRX.....	48
Figure II.8 : Microscopie électronique à balayage, l'interaction entre les électrons et l'échantillon.....	50
Figure II. 9 : Appareille de MEB couplé à l'EDX.....	51
Figure II.10 : Appareille de UV-visible	52
Figure II.11 : Solution mère et les solutions fille de Coloré OVM.....	53
Figure II.12 : Schéma descriptif de l'application de NPs-ZnO.....	55
Figure II.13 : Schéma descriptif de l'application des billes de ZnO/Alg.....	56

CHAPITRE III : RESULTA ET DISCUSSIONS

Figure III.1 : Diffraction des rayons X des NPs-ZnO.....	58
Figure III.2 : La morphologie de NPs-ZnO	59
Figure III.3 : La morphologie des Billes de ZnO/Alg.....	60
Figure III.4 : Courbe d'étalonnage concentration / absorbance du OVM.....	61
Figure III.5 : L'effet de masse de NPs-ZnO sur la photodégradation.....	62
Figure III.6 : L'évolution de l'activité photodégradation de OVM par NPs-ZnO en fonction du temps	63
Figure III.7 : L'évolution de l'activité photodégradation de OVM par ZnO/Alg en fonction du temps	65
Figure III.8 : La différence entre : (A) la solution colorée (OVM) avant et (B) après le processus de photodégradation	67

Liste des abréviations

<i>La Coriandres sativum L</i>	Plante
OVM	Oxalate vert de malachite
ZnO	Oxyde de zinc
NPs-ZnO	Nanoparticule d'oxyde de zinc
ZnO/Alg	Nanocomposite d'oxyde de zinc avec l'alginate
TCO	Oxydes transparents et conducteurs
FLG	Le graphène à quelques couches
GO	L'oxyde de graphène
RGO	L'oxyde de graphène réduit
GNS	Les nanofeuilles de graphène
LNPs	Les nanoparticules lipidiques
COV	Composés organiques volatils
UV	Rayonnement ultraviolet
E_c	La bande de Conduction
E_v	La bande de valence
h⁺	Trous
CVD	Le dépôt chimique en phase vapeur
PVD	Le dépôt physique en phase vapeur
Ca²⁺	L'ions de calcium
CaCl₂	Chlorure de calcium
C	Concentration (mg/L)
g	Gramme
ml	Millilitre
Tr	Tour
°C	Degré Celsius
ISO	L'organisation internationale de normalisation
ASTM	American Standards of Technical Material
EDTA	Ethylène diamine tétra acétique
XRD	La diffraction des rayons X
MEB	La microscopie électronique à balayage
Abs	Absorbance
Q	Capacité de la photodégradation

SOMMAIRE

Résumé.....	IV
Liste de tableau	VII
Liste de figure	VIII
Liste des abreviations.....	X
SOMMAIRE	XI
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	2
I.1. Generalites sur les colorants	3
I.1.1. Définition de colorants.....	3
I.1.2. Origine des colorants.....	4
I.1.3. Types des colorants	5
I.1.3.1. Les colorants naturels.....	5
I.1.3.2. Les colorants synthétiques	6
I.1.4. Application des colorants (industrielle, alimentaire)	7
I.1.5. Toxicité des colorants	8
I.1.6. Le vert de malachite	9
I.1.6.1. Définition et origine	9
I.1.6.2. Propriétés physico-chimiques de colorant verte de malachite	9
I.1.6.3. Application et toxicité de colorant vert de malachite.....	10
I.1.7. Contamination des eaux par les colorants	11
I.1.8. Traitement l'eau contamination par les colorants	12
I.2. Generalites sur les nanoparticules	13
I.2.1. Définition de nanoparticules	13
I.2.2. Origine de nanoparticules	13
I.2.3. Classification des nanoparticules	14
I.2.3.1. Les nanoparticules à base de carbone	14
I.2.3.2. Les nanoparticules à base inorganique.....	16
I.2.3.3. Les nanoparticules à base organique.....	17
I.2.4. Les nanoparticules d'oxyde de zinc	18
I.2.5. Méthodes de synthèse des nanoparticules.....	18
I.2.5.1. Procédés par voie physique.....	19
I.2.5.2. Procédés par voie chimique	19

SOMMAIRE

I.2.5.3. La biosynthèse verte.....	20
I.2.6. <i>La coriandres sativum L</i>	21
I.2.7. Les propriété des nanoparticules d'oxyde de zinc	24
I.2.7.1. Propriétés cristallographiques	25
I.2.7.2. Propriétés optiques	25
I.2.7.3. Propriétés électriques	26
I.2.7.4. Propriétés thermiques.....	26
I.2.7.5. Propriétés mécaniques.....	26
I.2.8. Application des nanoparticules d'oxyde de zinc	27
I.3. Generalites sur la photocatalyse heterogene	28
I.3.1. Principe et mécanisme de la photocatalyse hétérogène	29
I.3.2. Avantage et inconvénient de la photocatalyse hétérogène.....	30
I.4. Nanocomposites	31
I.4.1. Nanocomposites à matrice céramique.....	32
I.4.2. Nanocomposites à matrice polymère	32
I.4.3. Nanocomposites à matrice métallique	32
I.5. Polymere	33
I.5.1. Définition	33
I.5.2. Propriétés	33
I.6. Alginate de sodium	34
I.6.1. Propriété physico-chimique	34
I.6.2. Application d'alginate de sodium.....	35
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODE.....	37
II.1. L'étape du travail	38
II.3. Repartition géographique de <i>la coriandres sativum L</i>	40
II.4. Preparation de l'extrait des feuilles de <i>la coriandres sativum L</i>	41
II.5. Biosynthese des nanoparticules.....	42
II.5.1. Process de synthèse de NPs-ZnO.....	43
II.6. Preparation des billes d'alginate et des billes composites	45
II.7. Techniques de caractérisation	46
II.7.1. Diffraction des rayons X (DRX).....	46
II.7.2. Microscope électronique à balayage MEB	48
II.7.3. Spectroscopie UV-visible.....	51
II.8. Traitement l'eau contamaine avec le colorant	52

SOMMAIRE

II.8.1.	Choix de colorant.....	52
II.8.2.	Préparation de la solution coloré OVM	52
II.8.3.	Effet de masse de NPs-ZnO	53
II.8.4.	Protocole de la photodégradation du OVM	53
CHAPITRE III : RESULTAT ET DISCUSSIONS		57
III.1.	Resultats des caracterisations de NPs-ZnO et des billes ZnO/Alg	58
III.1.1.	Résultat de diffraction des rayons X (DRX) de NPs-ZnO.....	58
III.1.2.	Résultat de microscope électronique à balayage (MEB) de NPs-ZnO	59
III.1.3.	Résultat de microscope électronique à balayage (MEB) des billes ZnO/Alg	59
III.2.	Resultat de photodegradation de OVM.....	60
III.2.1.	La courbe d'etalonnage	60
III.2.2.	L'effet de masse de NPs-ZnO	62
III.2.3.	Evolution de photodegradation avec le temps	63
III.3.	Capacite de la photodegradation	67
CONCLUSION GENERALE		69
REFERENCE BIBLIOGRAPHIE		70
ANNEXE		76

INTRODUCTION GENERALE

Les déchets industriels contenant des colorants représentent une menace considérable pour l'environnement, notamment en raison de l'émission importante de couleurs résultant de l'évolution des processus d'impression industrielle[1]. Environ 7.10^7 tonnes de colorants synthétiques sont produites annuellement dans l'industrie textile mondiale, avec près de 10% des matières premières rejetées dans l'environnement sous forme d'effluents après les opérations de teinture et de traitement[2]. Les méthodes traditionnelles d'élimination des colorants incluent la chloration, l'électrolyse, la flottation, l'oxydation chimique, la filtration, l'échange d'ions, l'ozone, la séparation par membrane, ainsi que la décomposition microbienne aérobie et anaérobie. [3]

Récemment, l'intérêt s'est porté sur la technique de photocatalyse à base de nanomatériaux semi-conducteurs pour traiter l'eau contaminée par des colorants. Cette méthode s'est révélée très efficace pour décomposer les molécules de colorant en composés inoffensifs. Dans le cadre de notre mémoire de fin d'études, on a synthétisé des NPs-ZnO de manière respectueuse de l'environnement pour traiter les eaux contaminées par des colorants.

Ce mémoire se compose de trois chapitres. Le premier chapitre propose une revue de littérature portant sur les colorants en général, les concepts généraux des nanoparticules, ainsi qu'une présentation des plantes utilisées dans la biosynthèse et des notions relatives à la technique de photodégradation.

Le deuxième chapitre est dédié à la présentation des produits, des méthodes et des techniques employés lors de la synthèse verte des NPs-ZnO et des billes ZnO/Alg, ainsi que lors de la photodégradation et du traitement des eaux contaminées par les colorants.

Le troisième chapitre expose les résultats des caractérisations et des expérimentations réalisées, accompagnés d'interprétations pertinentes et d'explications des observations et des résultats obtenus.

Enfin, une conclusion générale clôture ce travail en proposant des recommandations pour de futures recherches.

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans ce chapitre, nous allons explorer l'aspect théorique de notre travail en abordant des concepts généraux sur les colorants, la toxicité, les classifications, ainsi que des notions générales sur les techniques des nanoparticules, tout en présentant brièvement le colorant sur lequel nous allons nous pencher dans notre étude.

I.1. Généralités sur les colorants

I.1.1. Définition de colorants

Les humains utilisent des couleurs dans leur vie depuis la préhistoire de la peinture des murs des grottes à la teinture des vêtements et à la décoration des objets, une grande partie de l'industrie chimique aujourd'hui est consacrée aux colorants, qui sont utilisés pour teindre les textiles, le papier, le cuir, le plastique, les aliments et les produits médicaux, à cet égard, nous présentons trois concepts.[4]

❖ Les pigments

Sont des substances colorées qui embellissent notre monde. Ils se présentent sous forme de poudres solides, organiques ou inorganiques, transparentes ou lumineuses. Ces substances apportent de la couleur à d'autres matériaux en absorbant la lumière de manière sélective et/ou en la dispersant. Ils ne se dissolvent ni dans l'eau, ni dans les huiles, ni dans d'autres substances [5]

❖ Les colorants (Teintures)

Des substances solubles qui modifient temporairement la structure cristalline pendant l'application et se fixent dans la matière par adsorption, dissolution, rétention mécanique ou liaisons ioniques ou covalent.[5]

❖ Teintures textiles

Les colorants naturels et synthétiques sont les deux principaux types de colorants utilisés pour teindre les textiles. Depuis la Préhistoire, les colorants naturels sont utilisés pour la coloration des aliments, du cuir et des tissus tels que le coton, la soie, la laine. Avec une conscience environnementale croissante, l'usage de couleurs naturelles sur des tissus non allergènes, non toxiques et respectueux de l'environnement devient de plus en plus pour

éviter les colorants synthétiques dangereux. Aujourd'hui, des substances synthétiques carcinogènes et non biodégradables sont employées pour teindre les textiles, engendrant des problèmes de gestion des déchets et de pollution de l'eau. Les colorants naturels offrent une solution à ces défis. Les minerais colorés naturels, ainsi que les racines, tiges, feuilles, fleurs, fruits et animaux, constituent les principales sources de colorants naturels, parfois désignés sous le nom de pigments naturels.[6]

I.1.2. Origine des colorants

Depuis les temps préhistoriques, les humains ont utilisé les couleurs pour communiquer et s'exprimer artistiquement. Tout a commencé avec des mélanges simples de terre et de matières naturelles pour créer des colorants comme le rouge, le jaune et le noir. Ces colorants étaient utilisés pour décorer les grottes et les abris rocheux, témoignant de leur lien avec la pensée symbolique primitive.

Avec l'évolution des civilisations, les techniques de fabrication des couleurs ont également évolué. Les anciens Égyptiens ont inventé le célèbre bleu égyptien, tandis que les Phéniciens étaient connus pour le rare pourpre fabriqué à partir d'un certain coquillage.

Le XIXe siècle a connu une véritable révolution dans le monde des couleurs, les scientifiques étant capables de produire pour la première fois des colorants synthétiques en grandes quantités. Cela a entraîné une baisse des prix des couleurs et le remplacement de nombreux colorants naturels par des colorants synthétiques

Aujourd'hui, il existe plus de 100 000 couleurs synthétiques disponibles, nous offrant une plus grande liberté pour nous exprimer à travers les couleurs que nous choisissons.[7]

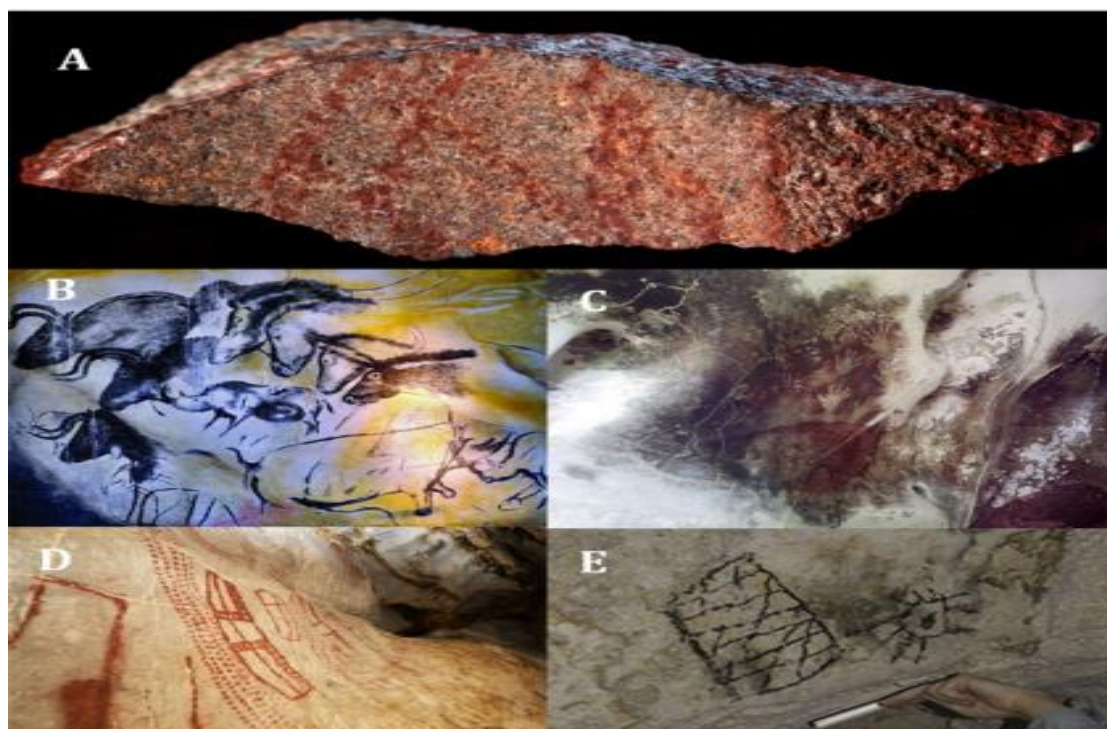


Figure I.1 : Les pigments utilisés dans certaines grottes avec des peintures rupestres réalisées pendant le Mésolithique.[7]

I.1.3. Types des colorants

Dans ce titre, nous pouvons distinguer deux titres principaux :

I.1.3.1. Les colorants naturels

Les colorants naturels sont définis comme "les colorants et pigments naturels" comprenant toutes les couleurs obtenues à partir de matières animales et végétales, avec peu ou pas de traitements chimiques. Ce sont principalement des colorants à mordant, mais ils comprennent également des cuves, quelques colorants dispersés/solvates, des pigments de couleur, quelques colorants directs, basiques et acides provenant de plantes, animaux et minéraux, c'est-à-dire de ressources naturelles. Les colorants naturels, à quelques exceptions près, ne sont pas substantifs, mais doivent être utilisés avec des mordants. Un mordant, généralement un sel métallique, a une affinité pour le colorant et la fibre, et en se combinant avec le colorant dans la fibre, il forme un précipité insoluble ou un laque. En termes d'application, les colorants naturels comprennent des cuves, quelques colorants solvants, des pigments et quelques colorants directs et acides. Seul un colorant basique naturel est connu, mais les colorants naturels de soufre, dispersés, azoïques ou d'inclusion ne sont pas encore disponibles.[8]

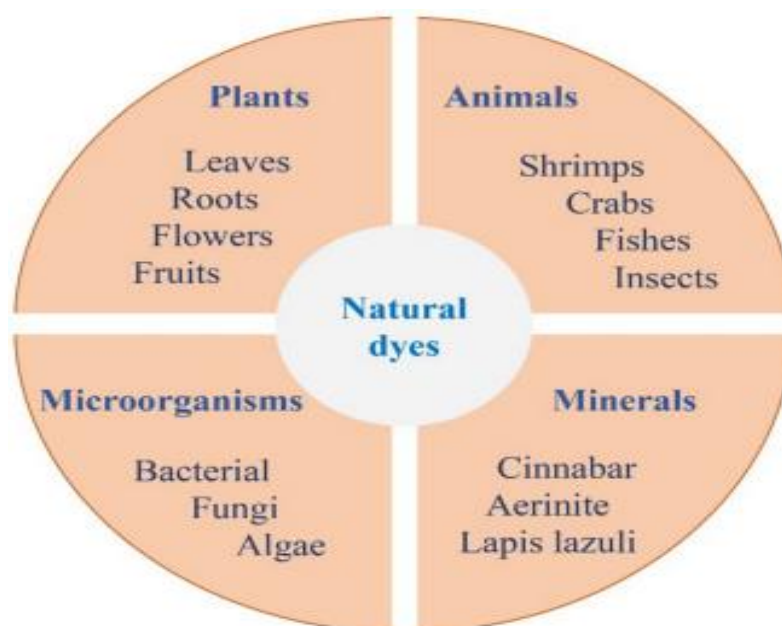


Figure I.2 : Ressources de colorants naturels, notamment plantes, animaux, micro-organismes et minéraux.[9]

I.1.3.2. Les colorants synthétiques

Les substances récalcitrantes connues sous le nom de colorants synthétiques constituent la majorité des résidus trouvés dans les déchets issus de la teinture textile. Ce sont des composés aromatiques complexes créés par synthèse chimique et se déclinent en une variété de couleurs. Les colorants synthétiques sont classés en cationiques, non ioniques et anioniques. Les colorants anioniques protègent les acides hydrosolubles les plus exigeants et les couleurs réactives, En revanche, les colorants dispersés qui ne sont pas ionisés dans un milieu aqueux sont appelés colorants non ioniques. En raison de leur structure d'anneau aromatique connecté, les colorants à base d'antraquinone sont les plus résistants à la dégradation parmi tous les autres.[10]

Tout comme le son, la couleur possède des caractéristiques fondamentales

- Les groupes chromophores : ces groupes d'atomes contenant au moins une double liaison absorbent la lumière et définissent la couleur du pigment.
- Les groupes auxochromes : constitués d'atomes capables de se lier, ils influent sur la fréquence d'absorption du chromophore et aident à fixer la couleur sur la matière.
- Les structures aromatiques conjuguées : jouent un rôle dans l'absorption de la lumière dans la plage du spectre visible (380-750 nanomètres).[11]

En plus de cette classification qualitative, ils peuvent être classés comme organiques ou inorganiques, mais ils sont généralement d'origine organique comme illustré dans la Figure I.3.[5]

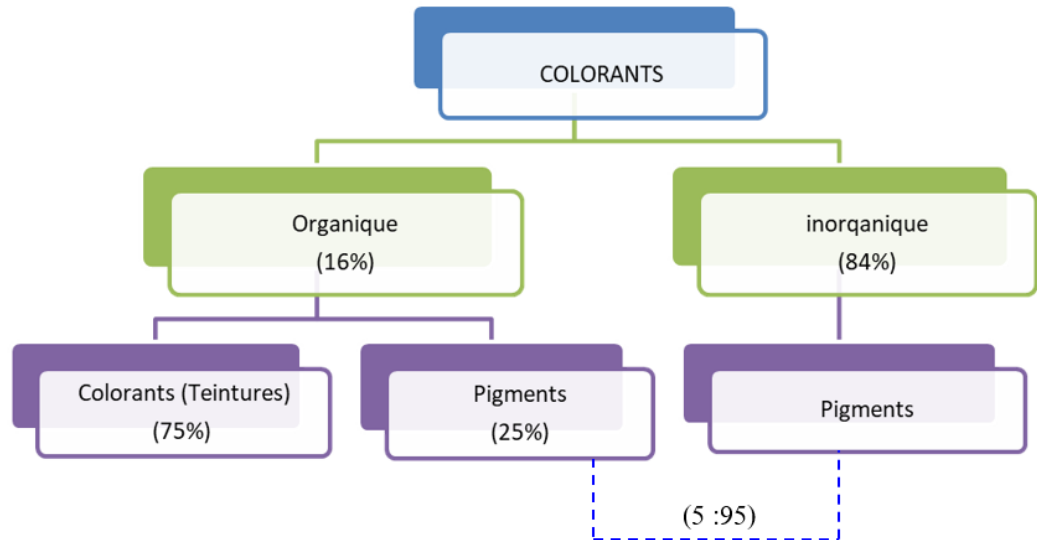


Figure I.3 : La part des colorants des catégories organiques et inorganiques.[5]

I.1.4. Application des colorants (industrielle, alimentaire)

Les domaines d'utilisation des colorants sont extrêmement diversifiés dans ce monde, et chaque domaine possède son propre type ou ses propres types en fonction des caractéristiques requises par la forme dans la figure I.4 montre quelques exemples d'utilisation de colorant.

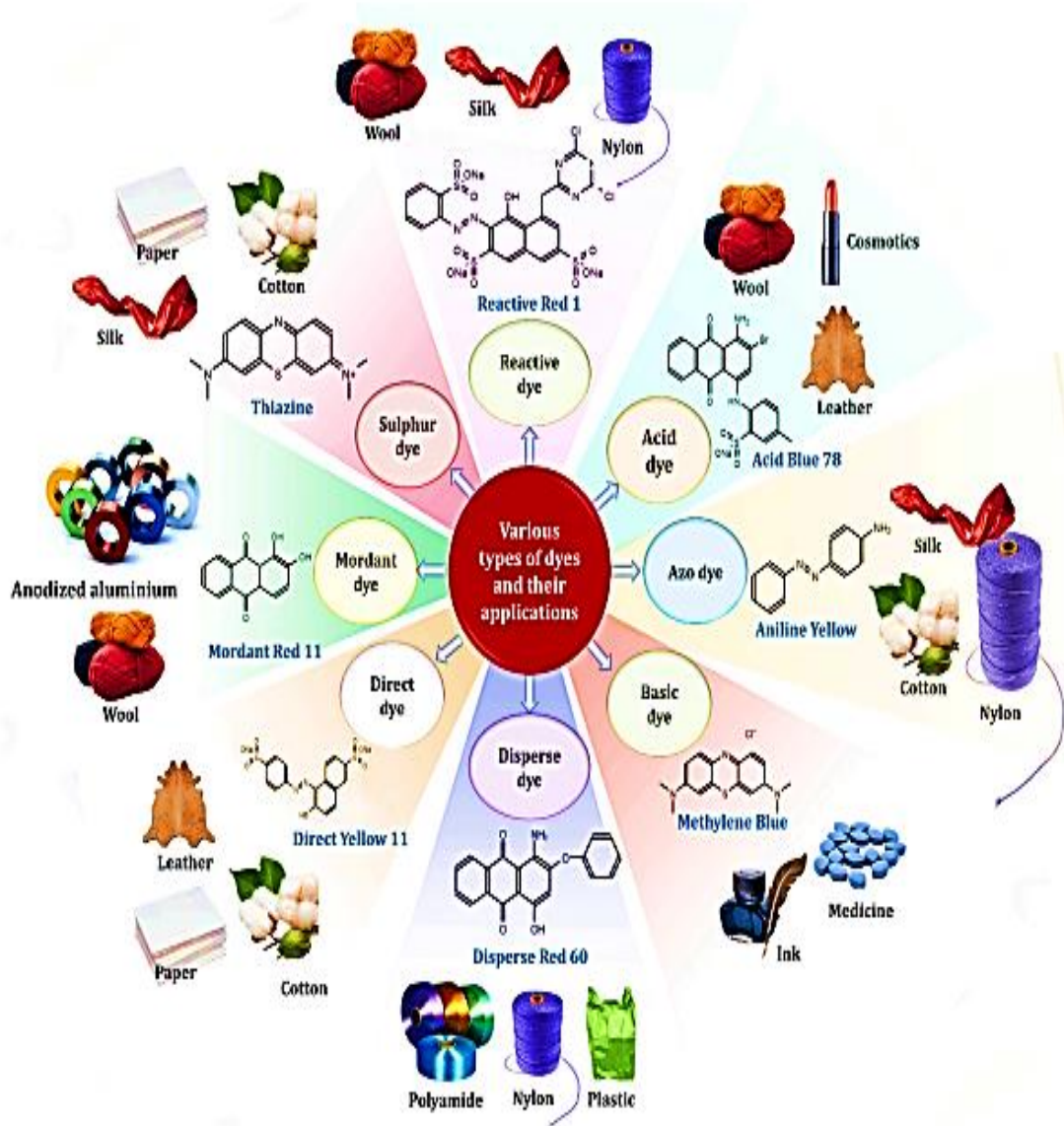


Figure I.4 : Diverses catégories de colorants et leurs possibles applications industrielles.[12]

I.1.5. Toxicité des colorants

Divers polluants organiques sont présents dans les eaux usées de l'industrie textile, dont les colorants textiles sont les plus courants. Les colorants azoïques sont la catégorie la plus importante (plus de 60%) parmi les divers types de colorants textiles et sont les plus couramment employés dans cette industrie. Dans certaines usines textiles, les eaux usées sont traitées afin de décomposer les colorants azoïques libres avant de les renvoyer dans l'environnement. Cependant, d'autres usines déversent directement leurs déchets industriels non traités dans l'eau, ce qui représente une menace environnementale grave et des effets toxiques sur les organismes biologiques. Dans les pays en développement, les agriculteurs

ont utilisé des eaux usées provenant de déchets industriels non traités pour irriguer leurs terres, ce qui a entraîné un impact négatif.[7]

D'après plusieurs recherches, on a prouvé que les colorants azoïques ont des conséquences cancérigènes sur les êtres humains. La production d'amines aromatiques est principalement causée par la rupture des liaisons azoïques, que ce soit par une réaction chimique ou enzymatique. Ces composés aromatiques ont la capacité de pénétrer la peau, d'être inhalés sous forme de poussière et, dans certaines situations, d'être consommés. En raison de leur grande solubilité dans les graisses, il existe un risque accru d'absorption de ces composés.[11]

I.1.6. Le vert de Malachite

I.1.6.1. Définition et Origine

Le vert de malachite est un colorant vert largement utilisé dans les industries de la pêche et des colorants. Avec une histoire remontant à 1933, il a été initialement introduit pour traiter les infections protozoaires et fongiques dans les milieux aquatiques. Ce colorant est appliqué localement par bain ou lavage, mais il peut également être absorbé de manière systémique, entraînant des effets internes.[13]

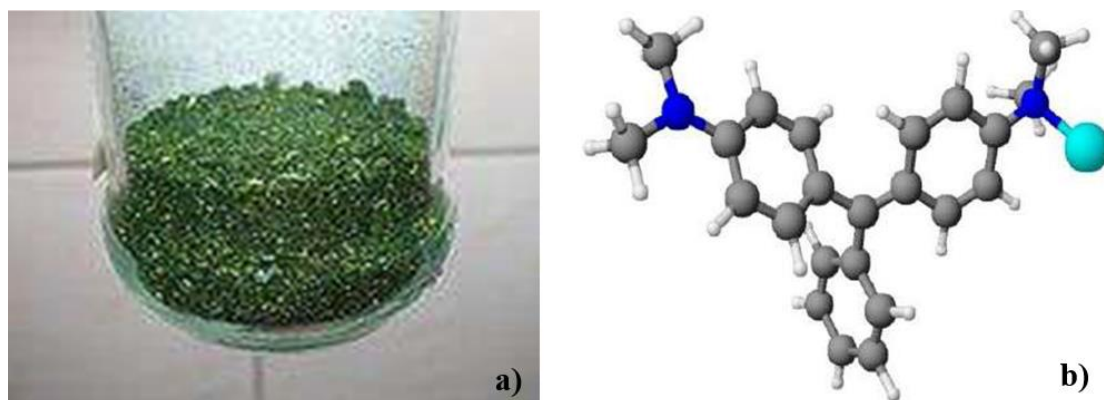


Figure I.5 : a) Vert de malachite. b) Structure chimique de vert de malachite.[14]

I.1.6.2. Propriétés physico-chimiques de colorant verte de malachite

Il existe deux types de vert de malachite : le chlorure vert de malachite et l'oxalate verte de malachite.

Vous trouverez les Propriétés de chaque type représenté dans le tableau I.1.

Tableau I.1 : Les propriétés physico-chimiques de verte malachite.[15-17]

	Chlorure vert de malachite	Oxalate vert de malachite
Formule moléculaire	$C_{23}H_{25}ClN_2$	$C_{52}H_{54}N_4O_{12}$
Poids moléculaire	364.911 g/mol	927.01 g/mol
Indice de couleur	420000	/
Longueur d'onde Maximale	618nm	616.9nm
Classification Tinctoriale	Non ionique	Cationique
Structure chimique		

I.1.6.3. Application et toxicité de colorant vert de Malachite

Les fibres de poly acrylonitrile, le jute, la laine, le coton, le papier, la soie et les articles en cuir sont tous teints avec de la malachite. Depuis 1930, elle est largement utilisée comme biocide dans les environnements aquacoles pour l'élevage de poissons. En médecine vétérinaire, la malachite verte est employée comme antiseptique et pour traiter les infections bactériennes dans l'élevage de poissons, ainsi que les infections fongiques et parasitaires. On l'utilise également comme indicateur de pH, pour la coloration dans les laboratoires de biologie, et en médecine légale pour détecter du sang latent.

Ce colorant MG peut entraîner des dommages au cerveau, au foie et au système nerveux, ainsi que des brûlures oculaires, une respiration rapide, une transpiration excessive et divers types de cancers dans le corps, nuisant à une variété d'organismes aquatiques et terrestres.[16]

Il diminue l'apport alimentaire, la croissance et la fertilité, tout en causant des dommages aux reins, au cœur, à la rate et au foie. Il provoque également des lésions pulmonaires, oculaires, cutanées et osseuses, ainsi que des effets déformants, étant toxique pour les cellules des mammifères et agissant comme une enzyme respiratoire toxique. Une diminution du nombre de globules rouges, d'hémoglobine et du taux d'hématocrite est observée, ainsi qu'une augmentation du nombre de globules blancs et un retard de la coagulation sanguine. Sa présence dans l'hydrosphère a un impact négatif sur la vie aquatique et réduit le processus de photosynthèse en empêchant la pénétration de la lumière.[16]

I.1.7. Contamination des eaux par les colorants

L'une des principales préoccupations liées à la pollution de l'eau est la contamination par les colorants dans les rivières, les eaux industrielles et les sources d'eau. C'est une menace mondiale pour les réserves d'eau potable. Un certain nombre de tactiques ont été développées et testées dans le but de remédier à cette situation préoccupante.[18]

Les études ont révélé que de 10 à 20 millions de tonnes de colorants sont utilisées dans l'industrie, dont 15 à 20 pour cent se retrouvent dans les eaux usées. De plus, cette industrie consomme une grande quantité d'eau dans ses processus, ce qui entraîne la production d'eaux usées industrielles toxiques et colorées nuisibles à l'environnement et à la santé humaine. Il est donc essentiel de se débarrasser de ces composés nocifs avant de les rejeter dans l'environnement naturel. La technique de biodégradation est apparue comme une alternative pour traiter les déchets de l'industrie textile.[19]

I.1.8. Traitement l'eau contamination par les colorants

Les méthodes de décontamination (Techniques traitement) les plus couramment utilisées dans l'industrie textile sont (Regardez le schéma).[20]

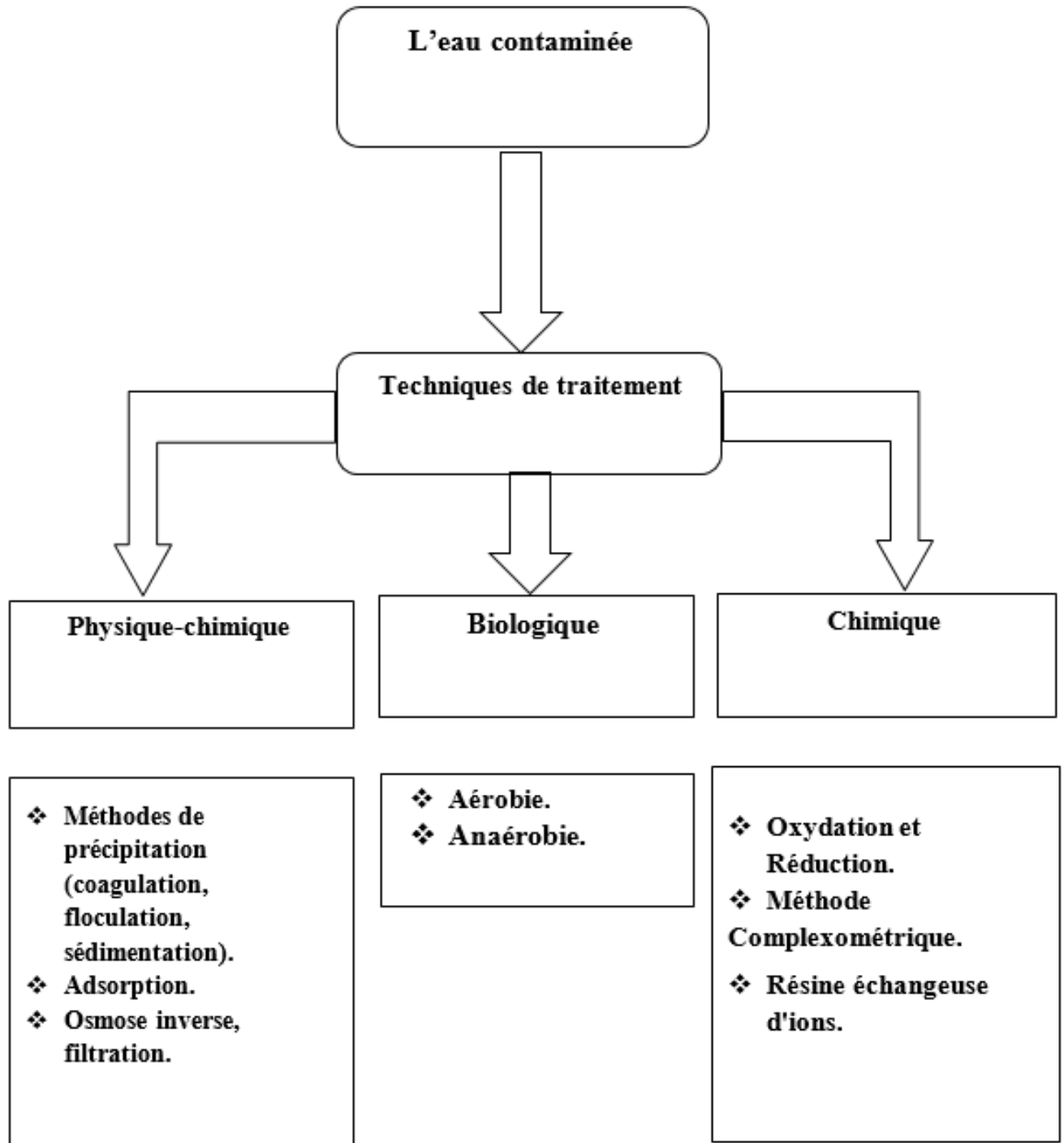


Figure I.6 : Le schéma des techniques de traitement.

I.2. Généralités sur les nanoparticules

I.2.1. Définition de nanoparticules

Les nanotechnologies englobent l'ensemble des recherches et applications liées à la conception, la production et l'utilisation de structures à l'échelle nanométrique. Le préfixe "nano", dérivé du grec "nano" signifiant "nain", représente un milliardième (10^{-9}) d'une unité de base dans le système international. [21, 22]

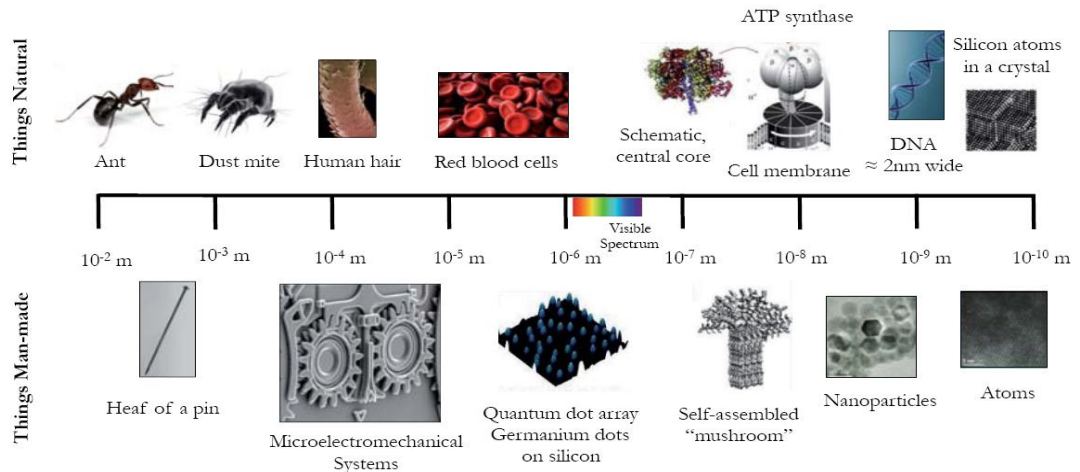


Figure I.7 : L'échelle de tailles des nanoparticules.[21]

Les nanoparticules sont des particules de taille nanométrique comprise entre 1 et 100 nanomètres et constituées de métal, de carbone, d'oxydes métalliques ou de matière organique, selon les normes ISO et ASTM. Avec une ou plusieurs dimensions différentes. On regroupe généralement ces nanoparticules en trois catégories : organiques, inorganiques et carboniques, à l'échelle nanométrique, et elles ont des propriétés supérieures par rapport aux matériaux de tailles plus grandes.[23]

I.2.2. Origine de nanoparticules

On peut classer les sources de nanoparticules en trois catégories principales en fonction de leur origine : Les nanoparticules naturelles, on les trouve dans le corps des organismes, des insectes, des plantes, des animaux et des humains. Ou les nanoparticules non intentionnelles Ils sont produits de manière fortuite comme des sous-produits de processus industriels, tels que les nanoparticules issues des gaz d'échappement des moteurs de véhicules, des fumées de soudage, des processus de combustion et même de certains processus naturels comme les incendies de forêt. Ou encore les nanoparticules manufacturés, ils sont fabriqués par l'homme pour présenter des propriétés spécifiques en vue des applications souhaitées, Ils

peuvent consister en un seul élément comme C ou Si, ou un mélange d'éléments différents.[24]

En effet, les propriétés inédites et prometteuses de ces matériaux nanométriques ont conduit à un essor fulgurant de l'industrie nanométrique à l'échelle internationale. Cet essor se traduit par des investissements croissants de la part d'un nombre toujours plus grand de pays.[25]

I.2.3. Classification des nanoparticules

Les NPs Peut-être classées en différents types selon la taille, la morphologie, et des propriétés physiques et chimiques Parmi lesquels :

Les nanoparticules à base de carbone peuvent être divisées en trois catégories.

I.2.3.1. Les nanoparticules à base de carbone

❖ Nanoparticules de graphène

La nanoparticule de graphène est une fine couche plate composée de feuilles bidimensionnelles d'un atome d'épaisseur, disposées en hexagones formant une structure semblable à un nid d'abeille. Ses dérivés incluent le graphène monocouche, le graphène à quelques couches (FLG), l'oxyde de graphène (GO), l'oxyde de graphène réduit (RGO), les nanofeuilles de graphène (GNS) et les nanorubans de graphène. L'oxyde de graphène (GO) est particulièrement important parmi ces dérivés en raison de ses applications biomédicales potentielles qui suscitent un intérêt croissant.

Les matériaux à base de graphène ont généralement des dimensions comprises entre plusieurs et plusieurs centaines de nanomètres, avec une épaisseur de 1 à 10 nm, ce qui les qualifie également de nanoparticules ou de nanomatériaux. Ces matériaux sont largement utilisés dans divers domaines, y compris les applications biomédicales telles que les agents antibactériens.[26]

❖ Fullerènes

Les fullerènes sont des molécules de carbone (C₆₀) disposées sous la forme d'un ballon de football, leur découverte a eu lieu en 1985. Les fullerènes sont une grande famille de composés carbonés qui ont suscité une attention significative dans divers domaines scientifiques depuis leur découverte.

Les molécules de fullerène sont composées d'atomes de carbone et ont une forme sphérique, les fullerènes sphériques sont parfois appelés " Bucky balls". Ce sont des amas de carbone, avec une surface composée de 12 pentagones et d'un nombre quelconque d'hexagones, comme on peut le voir sur la figure I.8. [27]

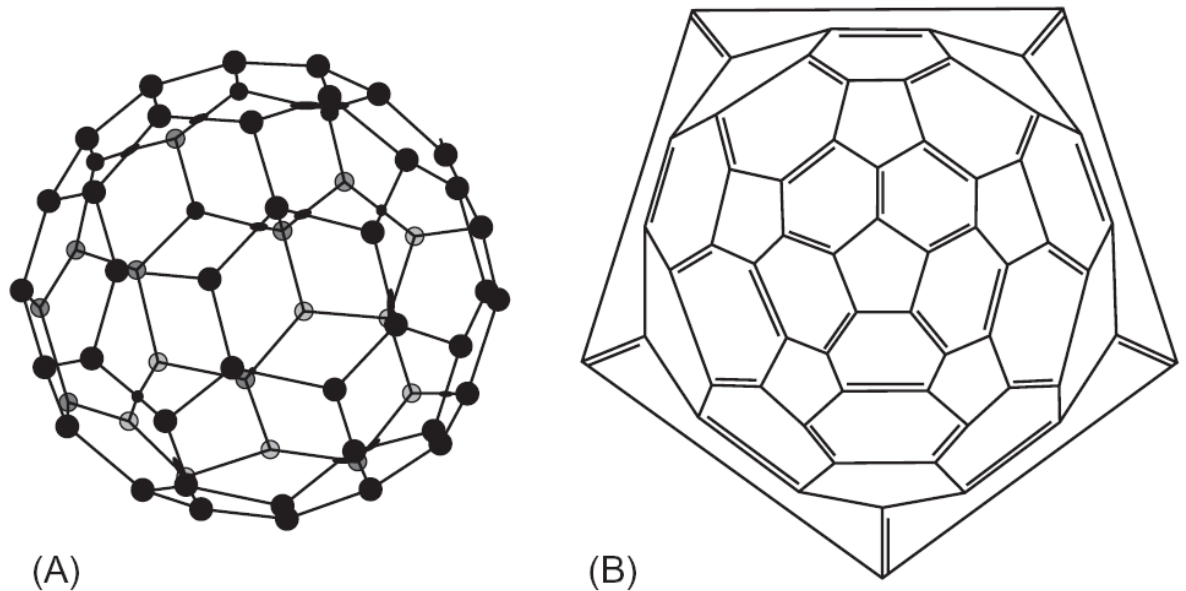


Figure I.8 : Les fullerènes, (A) Sphériques et (B) Hexagonaux.[27]

❖ Les nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone sont des molécules de carbone tubulaires de quelques dizaines de nanomètres de diamètre et de plusieurs microns de longueur. Ces structures de carbone tubulaires ultrafines présentent des propriétés mécaniques, électroniques et thermiques supérieures et ont des applications potentielles en nanotechnologie et en nanotechnologie. Il existe deux types de nanotubes de carbone classés selon le nombre de couches de carbone présentes en eux.[28]

Les nanotubes de carbone à paroi unique sont constitués d'une seule couche de graphène avec un diamètre variant entre 0,4 et 2 nm et se présentent généralement sous forme de faisceaux hexagonaux. Les nanotubes de carbone à parois multiples comprennent deux ou plusieurs cylindres, chacun constitué de feuilles de graphène.[29]

I.2.3.2. Les nanoparticules à base inorganique

❖ Les nanoparticules de céramique

L'essentiel des nanoparticules céramiques est constitué d'oxydes, de carbures, de phosphates et de carbonates de métaux et de métalloïdes tels que le calcium, le titane et le silicium. Elles se caractérisent généralement par une faible conductivité électrique et thermique.

Ces particules offrent une protection complète aux molécules piégées telles que les protéines, les enzymes et les médicaments contre les effets de dénaturation du pH et de la température externe. Les nanoparticules céramiques présentent plusieurs propriétés favorables, notamment une haute résistance à la chaleur et une inertie chimique, qui leur confèrent un large éventail d'applications dans divers domaines. [30]

L'un des domaines les plus explorés pour l'utilisation des nanoparticules céramiques est le domaine biomédical. En général, elles sont connues pour leur faible potentiel électrique et thermique. On les considère comme de très bons vecteurs pour l'administration de médicaments, de gènes, de protéines et d'agents d'imagerie. Ils ont été montrés efficaces dans le traitement de différentes affections, telles que les infections bactériennes, le glaucome et, plus généralement, le cancer.[31]

❖ Les nanoparticules métalliques

Les propriétés optoélectriques des nanoparticules métalliques sont caractérisées par les phénomènes de résonance plasmonique. Leurs caractéristiques de forme, de facette et de taille influencent leur synthèse, ce qui permet la formation de nanoparticules de différents métaux. L'aluminium, l'or, le fer, le plomb, l'argent, le cobalt, le zinc, le cadmium et le cuivre sont les plus connues. Leur petite taille (10 à 100 nm) et leurs propriétés de surface telles que le rapport surface/volume, la charge de surface, la taille des pores, la densité de charge de surface, la structure (cristalline et amorphe), les formes (sphérique, en bâtonnet, hexagonale, tétraédrique, cylindrique et irrégulière), la couleur et les influences environnementales telles que la lumière du soleil sont des caractéristiques distinctives de ces nanoparticules.[32]

❖ Les nanoparticules de semi-conducteur

Les nanoparticules semi-conductrices NPs se distinguent par une faible énergie de bande interdite inférieure à 4 eV. Parmi les exemples connus de semi-conducteurs, on trouve le

silicium, le germanium, l'arséniure de gallium et des éléments proches de « l'escalier métalloïde » du tableau périodique. Ces nanoparticules sont composées de différents composés appartenant à divers groupes, tels que II-VI (ZnO), IV (SiO₂) et III-V (GaAs).

On peut classer les nanoparticules semi-conductrices en deux catégories principales :

Semi-conducteurs intrinsèques, composés de composés ou d'éléments purs sans dopage qui sont présents à partir d'autres métaux dans la structure.

semi-conducteurs extrinsèques, qui sont un type de matériau ajouté à d'autres métaux par dopage dans sa structure, visant à augmenter leur conductivité, par exemple, les semi-conducteurs de type-n et de type-p. [33]

I.2.3.3. Les nanoparticules à base organique

❖ Les nanoparticules de lipide

Parmi les NP, les nanoparticules lipidiques (LNPs) sont de véritables particules d'environ 100 nm de dimension, En raison des propriétés lipidiques telles que le fort potentiel de solubilisation, la flexibilité et la biodégradabilité, les médicaments peu solubles dans l'eau peuvent être chargés dans les LNPs, augmentant ainsi leur biodisponibilité. Elles sont donc considérées comme des techniques pour le développement de nouvelles approches thérapeutiques et diagnostiques, notamment dans le domaine du cancer.[34]

❖ Nanoparticules à base de polymères

Les nanoparticules polymères (NPs) sont des structures sphériques formées par l'assemblage de plusieurs chaînes de polymères. Ces propriétés varient en fonction des matériaux utilisés et de leur méthode d'assemblage.[35] Les nanoparticules à base de polymères sont précieuses dans le traitement et la prévention des maladies infectieuses. Grâce à leur petite taille, elles permettent de franchir les barrières biologiques après injection, optimisant l'absorption par les cellules. De plus, elles offrent une libération prolongée des médicaments et renforcent leur stabilité face à la dégradation enzymatique dans l'organisme. Leur potentiel dans le domaine de la vaccination est particulièrement prometteur. En effet, une multitude de nanoparticules issues de polymères naturels et synthétiques biodégradables peuvent être utilisées pour renforcer l'efficacité des vaccins. Les nanoparticules à base de polymères constituent une avancée majeure dans la lutte contre les maladies infectieuses. Elles

améliorent l'efficacité des vaccins existants et ouvrent la voie au développement de nouveaux nano-vaccins révolutionnaires.[36]

I.2.4. Les nanoparticules d'oxyde de zinc

L'oxyde de zinc, de formule chimique ZnO , est une substance inodore et blanche, généralement trouvée sous forme de poudre connue sous le nom de "zinc blanc" ou "blanc de zinc", il est insoluble dans l'eau.

À l'état naturel, le ZnO se trouve sous forme de zincite, un minéral souvent associé manganèse, ce qui lui confère une teinte jaune à au rouge, ZnO est un semi-conducteur du groupe II-VI .[37]



Figure I.9 : L'oxyde de zinc : (a, b) sous forme naturelle et (c) sous forme artificielle.[38]

I.2.5. Méthodes de synthèse des nanoparticules

La production de nanoparticule peut être réalisée selon deux approches distinctes

l'approche descendante qui repose sur les méthodes physique, et l'approche ascendante qui utilise des méthodes chimique et biologique.[39]

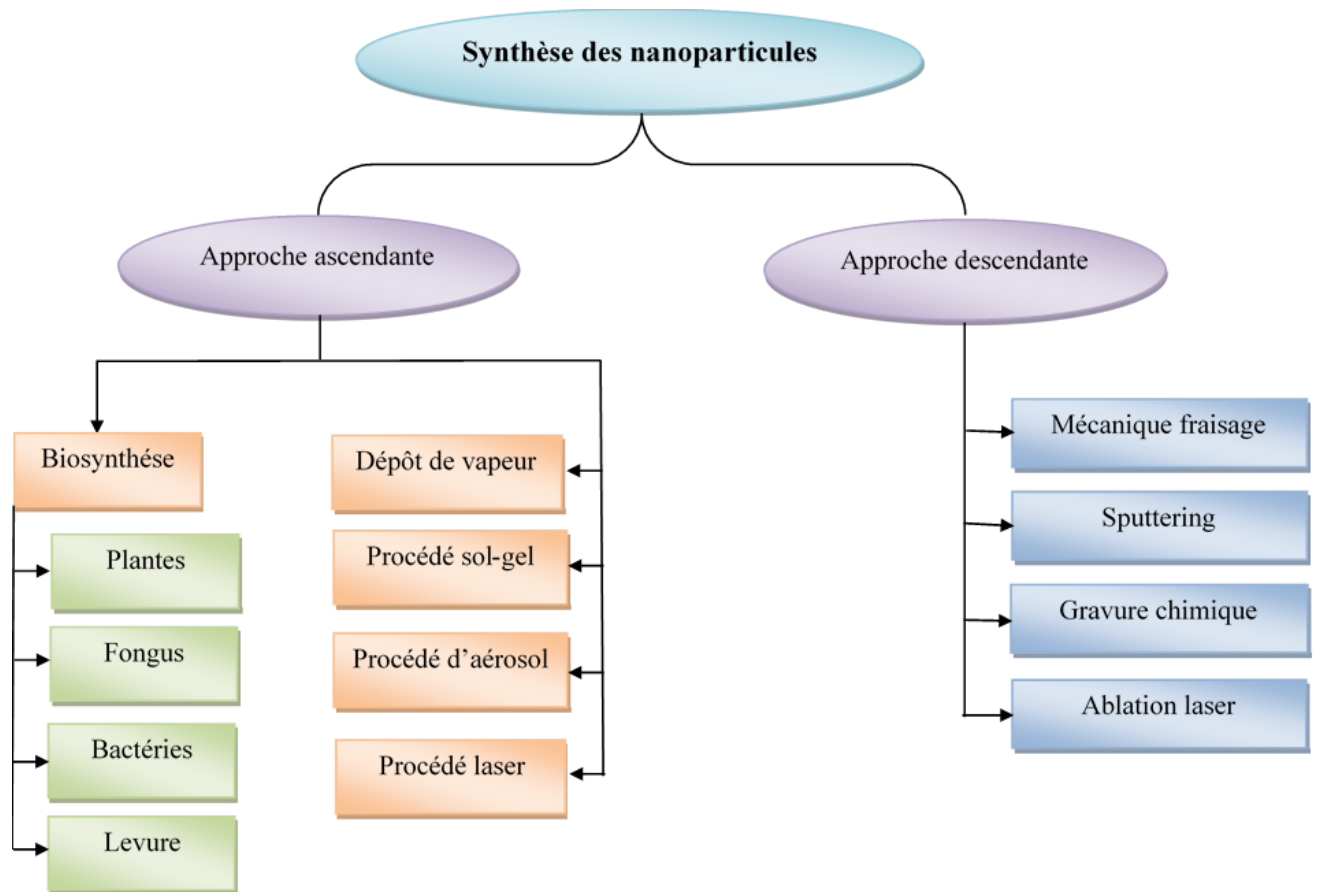


Figure I.10 : Synthèse de nanoparticules à travers des approches biologiques et physico-chimique.[40]

I.2.5.1. Procédés par voie physique

Il s'agit d'une méthode destructrice qui commence par une molécule plus grande, qui est ensuite décomposée en unités plus petites. Par la suite, ces unités sont transformées en nanoparticules adaptées. Cette méthode permet de fabriquer des nanoparticules à base de coquille de noix de coco (CS) en utilisant des techniques comme le broyage/moulage, le dépôt chimique en phase vapeur (CVD), le dépôt physique en phase vapeur (PVD) et d'autres méthodes de décomposition.[41]

I.2.5.2. Procédés par voie chimique

Les techniques chimiques, aussi appelées ascendantes, utilisent des atomes et des molécules afin de créer des nanoparticules. La microémulsion, le sol-gel, la précipitation, l'hydrothermale, le solvothermale et le dépôt chimique en phase vapeur sont parmi ces techniques. La méthode la plus fréquemment utilisée pour fabriquer des nanoparticules est

la synthèse chimique humide, qui se base sur les états physiques des phases solide et liquide.[42]

I.2.5.3.La biosynthèse verte

La biosynthèse, aussi appelée synthèse verte, consiste à extraire des ions métalliques à partir de précurseurs de sels métalliques en utilisant des plantes comme réducteurs ou capteurs, qui aboutissent à la formation de nanoparticules. [43]

La préparation de nanoparticules d'oxyde de métal à partir d'extraits de plantes peut utiliser des extraits de plantes à la fois comme des agents stabilisateurs et réducteurs tout au long du processus de synthèse des nanoparticules.

En général, il existe trois phases principales : phase d'activation, phase de croissance et phase de terminaison.

❖ Phase d'activation

Les métabolites végétaux, des biomolécules qui ont des capacités de réduction, permettent de récupérer les ions métalliques de leurs précurseurs de sel. Ces composés métaboliques entraînent une diminution des ions métalliques de leurs états d'oxydation mono ou divalents à des états de valence négative. Et les petites particules métalliques se combinent pour créer des nanoparticules.

❖ Phase de croissance

Les particules plus grandes sont formées naturellement par les petites nanoparticules voisines, ce qui facilite la création directe de nanoparticules par nucléation et croissance hétérogène, ainsi qu'une réduction supplémentaire des ions métalliques. Ce processus, appelé « maturation d'Ostwald », suit la croissance et renforce la stabilité thermodynamique des nanoparticules.

❖ Phase de terminaison

Les métabolites végétaux agissent sur les précurseurs de sel des ions métalliques, agissant comme des biomolécules capables de réduire ces ions. Ces métabolites diminuent les ions métalliques de leur état d'oxydation initial, qu'il soit monovalent ou divalent, à un état de

valence nulle. Les atomes métalliques ainsi réduits se regroupent pour former des nanoparticules.[44]

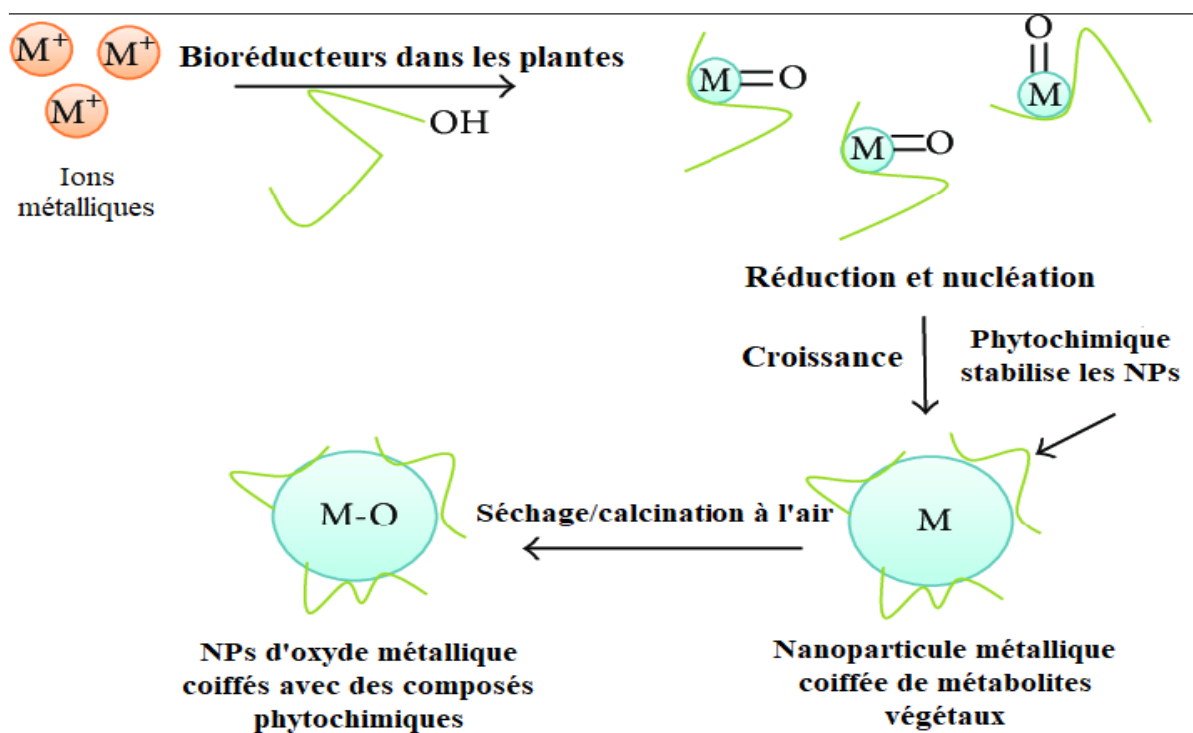


Figure I. 11: Mécanisme de synthèse verte des nanoparticules d'oxydes métalliques.[44]

La taille et la forme des nanoparticules dépendent de facteurs chimiques et physiques. Parmi ces facteurs, la concentration optimale en ions métalliques, la température et le pH du milieu réactionnel jouent un rôle crucial.[45]

I.2.6. *La Coriandres sativum L*

La Coriandres sativum L est une épice annuelle, une plante herbacée et médicinale appartenant à la famille des Ombellifères. Il est utilisé dans le monde entier depuis l'Antiquité à diverses fins en raison de ses photochimiques exceptionnels qui ne sont pas courants chez d'autres plantes. Les huiles essentielles et les acides gras obtenus à partir de ses fruits séchés peuvent être appliqués commercialement dans les industries pharmaceutiques, alimentaires, des boissons, plastiques, cosmétiques, des parfums et des détergents.[46]

Les différentes parties de cette plante renferment des mono terpènes, de l' α -pinène, du limonène, du γ -terpinène, du p-cymène, du bornéol, du citronellol, du camphre, du géraniol, de la coriandrine, de la dihydrocoriandrine, des craindrons A-E, des flavonoïdes et des huiles

essentielles. Les graines, les feuilles, les fleurs et les fruits de cette plante possèdent des propriétés diurétiques, antioxydants, antidiabétiques, anticonvulsives, sédatives hypnotiques, antimicrobiennes, antimutagènes et anthelminthiques. Diverses évaluations phytopharmacologiques ont été rapportées dans la littérature concernant le potentiel important du *Coriandre sativum L.*[47]



Figure I.12 : Différents aspects de croissance, de développement et de fonctionnement de *la Coriandres sativum L.* [46]

❖ Position systématique de cette plante

La coriandre sativum l (Apiaceae), plus connu sous le nom de Dhanyaka, est une plante aromatique largement cultivée.[48]

Tableau I.2 : Position systématique de *la Coriandres sativum L.*[48]

Royaume	Plantae
Embranchement	Eudicotylédones
Sous-Embranchement	Angiospermes
Classe	Astériidées
Ordre	Apiales
Famille	Apiacées
Genre	Coriandre
Espèce	cultivée

❖ Description botanique de la plante

La Coriandres sativum L est une plante herbacée annuelle, originaire du bassin méditerranéen et du Moyen-Orient. Elle atteint généralement entre 25 et 60 cm de hauteur. Dotée de racines fines en forme de filaments, de tiges droites, de feuilles alternes, et de petites fleurs blanches et roses, elle fleurit de juin à juillet pour donner naissance à des fruits ronds à double enveloppe. Cultivée pour ses feuilles et ses graines parfumées, la coriandre se décline en deux variétés principales : vulgare Alef. Et microcarpum DC. Ces variétés se distinguent par la taille de leurs fruits et leur rendement en huile essentielle : les fruits de vulgare mesurent entre 3 et 5 mm de diamètre et produisent entre 0,1 et 0,35% d'huile essentielle, tandis que ceux de microcarpum ont un diamètre de 1,5 à 3 mm et offrent un rendement entre 0,8 et 1,8% en huile essentielle. Pour obtenir une huile essentielle de qualité optimale, il est crucial de récolter les fruits à pleine maturité, lorsque leur couleur vire au rouge rouille, puis de les sécher dans des tours de séchage. Les graines moulues sont utilisées comme épices, particulièrement en Europe de l'Est, et l'huile essentielle extraite des graines est également employée comme épice. Les feuilles sont abondamment utilisées dans la cuisine orientale. [49]

❖ Culture

La Coriandres sativum L est une plante d'origine tropicale, Elle peut pousser dans un sol limoneux ou noir, mais il faut éviter les sols alcalins. En général, elle est semée en octobre-novembre en utilisant la méthode de semis direct. L'arrosage de *la Coriandres sativum L* dépend du climat, du type de sol et de l'humidité. La récolte se fait après 100 jours de

croissance, lorsque la moitié des graines vire au jaune. Pour bien pousser, elle nécessite une température optimale de 20 à 26°C. L'Inde produit 70 % de la coriandre consommée dans le monde. Les graines sont de forme sub-globuleuse, couronnées par les restes des sépales et des styles, avec 10 arêtes principales, 8 arêtes secondaires ondulées et légèrement visibles, droites et plus marquées.

❖ Composition chimique de *La Coriandres sativum L*

La Coriandres sativum L contient de l'huile volatile (0,3 à 1 %) et des protéines (20 %). Les composants volatils de la *Coriandres sativum L* comprennent principalement du D-linalol (68 %), du géraniol (10 %) et du pinène (10,5 %). Il renferme également de l'acétate de coriandryle, du L-bornéol et une huile fixe (13 %). Il est particulièrement riche en vitamine A. Les fruits produisent entre 5 et 7 % de cendres. [50]

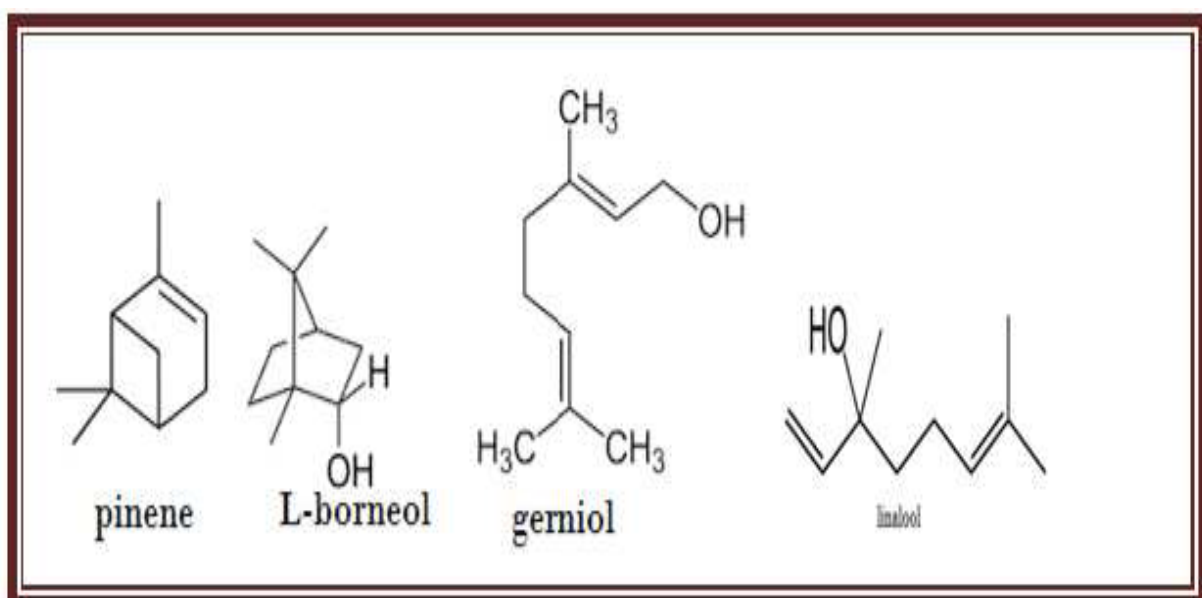


Figure I.13 : les compositions chimiques de *la Coriandres sativum L*. [50]

I.2.7. Les Propriété des nanoparticules d'oxyde de zinc

Le ZnO est reconnu comme l'un des matériaux les plus prometteurs parmi les oxydes transparents et conducteurs (TCO), présente des propriétés piézoélectriques remarquables, avec les coefficients piézoélectriques il le plus élevé, ainsi qu'une conductivité naturelle de type n, de plus il est non toxique pour l'environnement et largement disponible dans la nature, qui en fait un matériau économique ce. [51]

I.2.7.1. Propriétés cristallographiques

Naturellement, l'oxyde de zinc se forme en cristaux massifs qui peuvent cristalliser selon trois structures : la structure hexagonale de Wurtzite, la structure cubique de Zinc Blende et la structure cubique de Rocksalt (comme celle du chlorure de sodium, NaCl). La forme de Wurtzite est la plus stable thermiquement parmi ces structures dans des conditions normales.[52]

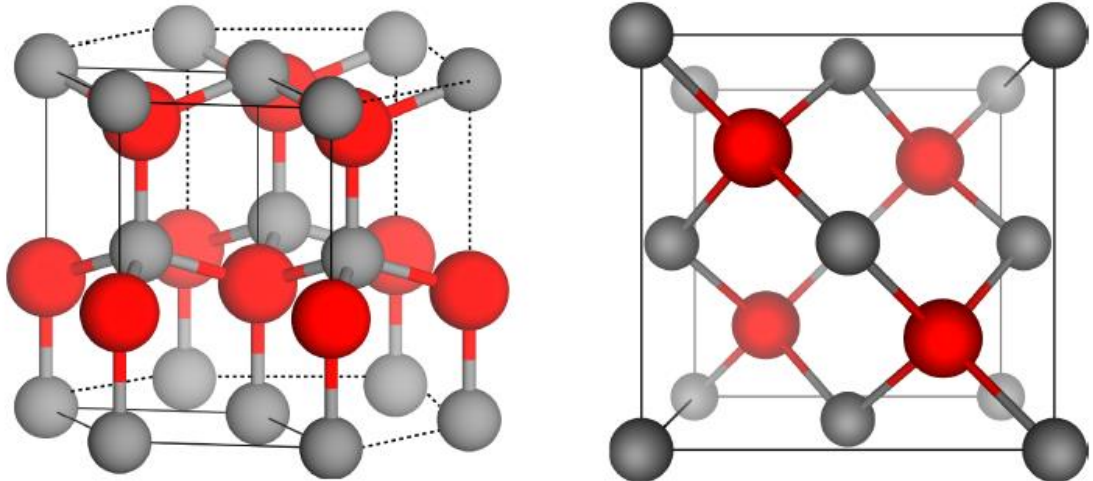


Figure I.14 : Représentation de structures wurtzite et zinc blende de l'oxyde de zinc.[53]

I.2.7.2. Propriétés optiques

Actuellement, l'oxyde de zinc est largement utilisé comme un oxyde transparent, en structure cristalline, il peut transmettre jusqu'à 80 % de la lumière visible.

Les propriétés optiques du ZnO peuvent être étudiées par différentes techniques :

- **Absorption optique** : Mesure la quantité de lumière absorbée par le matériau.
- **Transmission** : Mesure la quantité de lumière transmise à travers le matériau.
- **Réflexion** : Mesure la quantité de lumière réfléchiée par la surface du matériau.
- **Photoluminescence (PL)** : Mesure l'émission de lumière par le matériau après l'absorption d'un photon. [54]

I.2.7.3. Propriétés électriques

Le ZnO est un semi-conducteur à bande interdite directe inhabituelle ($eV \sim 3,4$) avec une grande énergie de liaison excitonique de 60 MeV, ce qui en fait un matériau très performant pour nombreuses application en dispositifs optoélectroniques, L'énergie de d'ionisation élevée de l'oxygène joue un rôle crucial dans les propriétés distinctives du ZnO.

En comparaison avec les autres éléments du groupe VI_A l'oxygène présente une affinité électronique plus prononcée et une tendance accrue à attirer les électrons.[55]

I.2.7.4. Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques du ZnO sont principalement affectées par :

- Température : La température influence la plupart des propriétés thermiques, comme la dilatation et la conductivité.
- Stœchiométrie : La composition chimique du matériau, en particulier le rapport entre le zinc et l'oxygène, affecte ses propriétés thermiques.
- Défauts en profondeur : La présence de défauts dans la structure cristalline peut perturber le transport de la chaleur.
- Concentration en porteurs libres : Le nombre d'électrons et de trous libres dans le matériau peut également influencer ses propriétés thermiques.[56]

I.2.7.5. Propriétés mécaniques

Le ZnO est un matériau relativement tendre, avec une dureté d'environ 5 GPa et une profondeur de pénétration plastique de 300 nm.

Des études ont montré que le principal mécanisme de déformation du ZnO est le glissement, qui se produit le long de plans cristallographiques spécifiques. Deux types de plans de glissement ont été identifiés :

- Plans basaux : Plans parallèles à la surface du cristal.
- Plans pyramidaux : Plans inclinés par rapport à la surface du cristal.

La dureté du ZnO dépend de l'orientation des plans cristallographiques par rapport à la direction de la force appliquée. Les plans perpendiculaires à l'axe c sont plus sensibles au

glissement que les plans parallèles à l'axe c. Cela signifie que le ZnO orienté suivant l'axe c'est plus dur que le ZnO orienté suivant l'axe a.[57]

I.2.8. Application des nanoparticules d'oxyde de zinc

Le ZnO se distingue par sa large gamme de propriétés, qui lui confèrent un large éventail d'applications potentielles dans divers domaines optique, en électronique, en chimie ou en mécanique.

Dans cette partie, nous rappellerons certaines applications de ce matériau :

❖ Traitement de l'eau

Le ZnO est utilisé dans le traitement des eaux, notamment grâce aux propriétés uniques de ses matériaux. L'utilisation de matériaux comme adsorbants ou bien un photocatalyse attire une attention croissante pour l'élimination des polluants organique présents dans l'eau, comme les pesticides et les produits chimiques industriels.[58]

❖ Les cellules solaires

Une fine couche de ZnO est appliquée sur la surface supérieure, agissant comme une électrode transparente connue sous le nom de "front contacte", Cette couche remplit un double rôle crucial en permettant le passage du courant électrique à travers le composant tout en laissant passer la lumière, la structure de base d'une telle cellule est illustrée dans la figure I.15.

Des recherches ont démontré que l'intégration du ZnO comme semi-conducteur de type n dans les cellules solaires peut en augmenter le rendement. En effet, ses propriétés électroniques et optiques font de lui un matériau pertinent pour cette application, Afin d'amplifier la surface effective d'interaction avec la lumière, des études ont exploré l'utilisation du ZnO en surface de la cellule.[59]

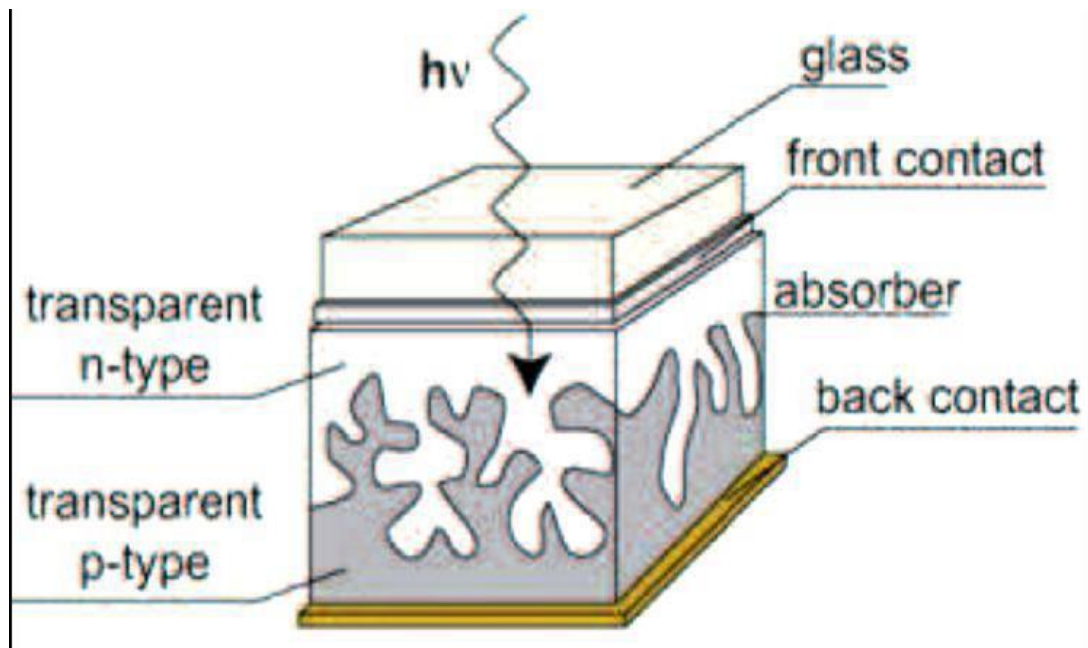


Figure I.15 : Schéma de la structure d'une cellule solaire.[59]

I.3. Généralités sur la photocatalyse hétérogène

Ces dernières années, le processus de dégradation photocatalytique suscite un intérêt grandissant dans le domaine de la purification de l'eau. Il a démontré son efficacité dans la suppression de différents micropolluants organiques tels que les solvants, les pesticides et les herbicides. Il s'est également avéré que cette technologie était prometteuse pour purifier l'air, en éliminant les odeurs et les composés organiques volatils (COV).

Photocatalyse est un mot qui est formé de photo (lumière) et de catalyse (accélération d'une réaction chimique). La photocatalyse, contrairement à ce que son nom pourrait indiquer, n'est pas une action catalytique de la lumière elle-même. Elle consiste en effet à accélérer une réaction chimique provoquée par la lumière en présence d'un catalyseur.[60]

La photocatalyse est une méthode utilisant la lumière et un catalyseur pour accélérer une réaction chimique. Pour la photocatalyse hétérogène, on utilise un semi-conducteur comme catalyseur. La conductivité électrique d'un photocatalyseur est comprise entre celle des isolants et celle des métaux. Contrairement à un métal conducteur à toute température, un semi-conducteur ferait office d'isolant à zéro kelvin (zéro absolu). Différents photocatalyseurs ont été étudiés pour la dégradation photochimique des composés chimiques organiques, tels que le TiO_2 , le ZnO , le CuO , le Bi_2O_3 , le CeO_2 , le BaTiO_3 , le CdS , le ZnS , etc.[61]

I.3.1. Principe et Mécanisme de la photocatalyse hétérogène

En général, la photocatalyse hétérogène fonctionne en utilisant l'excitation photoélectrique d'un semi-conducteur à l'aide d'un rayonnement ultraviolet (UV) généré naturellement par la lumière solaire ou artificiellement à l'aide d'une lampe ultraviolette. En absorbant des photons par le semi-conducteur, il est nécessaire que leur énergie soit égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite du matériau semi-conducteur. Les électrons sont transférés de la bande de valence (E_v) à la bande de conduction (E_c) grâce à cette absorption, ce qui entraîne la formation de lacunes électroniques, connues sous le nom de trous (h^+), dans la bande de valence. Les trous (h^+) peuvent être utilisés comme des sites d'oxydation, tandis que les électrons (e^-) peuvent être transférés vers des accepteurs d'électrons tels que les atomes d'oxygène (O_2), ce qui crée des radicaux superoxydes ($O_2^{\cdot-}$) et ensuite du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2). Il est possible de combler les trous en utilisant des donneurs d'électrons.[62]

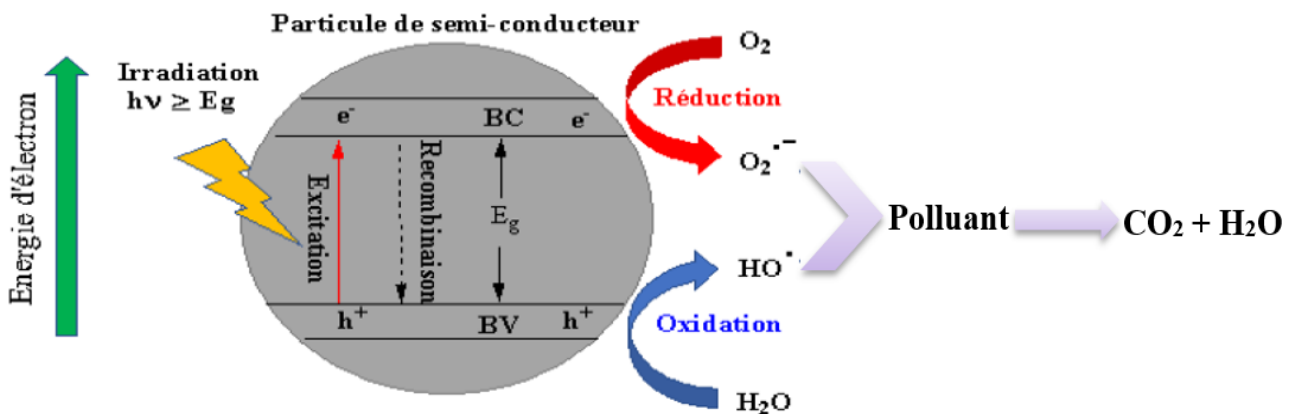


Figure I.16 : Représentation synoptique du processus de photocatalyse sur un semi-conducteur.[63]

Sous l'action de la lumière, les charges électriques e^-/h^+ du semi-conducteur migrent vers sa surface. Là, elles créent des sites redox capables de décomposer les polluants qui s'y sont fixés. La figure I.16 montre comment ce processus génère des espèces oxydantes à partir de l'eau et comment ces espèces attaquent ensuite les polluants.

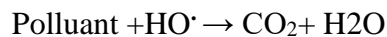
Les principales réactions du processus photo catalytique sont les suivantes :



Les trous (h^+) créés sur les sites valence du semi-conducteur réagissent ensuite avec l'eau et les polluants organiques adsorbés à sa surface selon les réactions suivantes :



Les radicaux hydroxyles (OH) générés par l'oxydation de l'eau jouent également un rôle important dans la dégradation des polluants



L'excitation du semi-conducteur peut être provoquée par différentes manières telles que les processus photochimiques, Par des moyens électriques, Dans le cas de l'excitation photochimique, La longueur d'onde de l'irradiation incidente doit être égale ou plus élevée que la bande interdite du semi-conducteur lors de l'excitation photochimique. L'énergie de la bande interdite est la différence entre la bande de valence et la bande de conduction du matériau.[64]

I.3.2. Avantage et inconvénient de la photocatalyse hétérogène

Les avantages ainsi que les inconvénients de la photocatalyse hétérogène sont résumés dans le Tableau I.3. [65-68]

Tableau I.3 : les avantages et l'inconvénient de la photocatalyse hétérogène

Avantage	Inconvénient
<ul style="list-style-type: none">- Installation simple et économique.- Minéralisation complète possible en CO₂ et H₂O- Dégradation efficace des polluants organiques présents dans l'eau.- Fonctionne à température et pression ambiantes (douces)- Utilise la lumière du soleil comme source d'énergie renouvelable et faible coût d'opération.- Le TiO₂, le semi-conducteur le plus utilisé, est stable et résistant à la dégradation.- Fonctionnement à basse concentration de contaminants- N'utilise pas de produits chimiques nocifs- Réduit la production de déchets toxiques	<ul style="list-style-type: none">- Le coût initial du catalyseur peut être élevé- Le catalyseur peut se dégrader et perdre son efficacité au fil du temps, ce qui nécessite son remplacement régulier.- L'activation de la photocatalyseur nécessite une irradiation UV, ce qui restreint son efficacité dans le spectre visible et pour les applications intérieures.- Recombination des charges photogénérées.- Diminue l'efficacité du processus.

I.4. Nanocomposites

Les nanocomposites sont des matériaux caractérisés par au moins une dimension nanométrique. Ils offrent des performances exceptionnelles et les combinaisons de composites permettent d'obtenir des propriétés inhabituelles, ainsi qu'une grande diversité dans les possibilités de conception. Composés de deux composites ou plus aux propriétés physiques et chimiques différentes, ils possèdent généralement plusieurs phases distinctes séparées par une interface. Cela confère aux nanocomposites des propriétés uniques, non atteignables par les constituants individuels. Le composant majoritaire est appelé matrice. Les nanocomposites constituent une alternative pour surmonter les limitations de la

stœchiométrie et du contrôle de la composition élémentaire des composites micro et monolithiques.[69]

I.4.1. Nanocomposites à matrice céramique

La fragilité des matériaux céramiques et des composites à matrice céramique est bien connue, ils sont obtenus grâce à la fusion d'oxydes et de divers matériaux inorganiques, un processus qui nécessite le "compactage" de ces éléments sous haute pression et parfois à des températures.[70]

I.4.2. Nanocomposites à matrice polymère

Les matrices polymères sont la deuxième grande famille de nanocomposites, les quatre sous-familles principales peuvent être classées en fonction du type de nanocharge présente dans la matrice et de leur importance scientifique (figure I.17), on sait que les nanocomposites composés de nanocharges carboniques et d'argiles sont les plus étudiés et les plus utilisés dans le secteur industriel.[70]

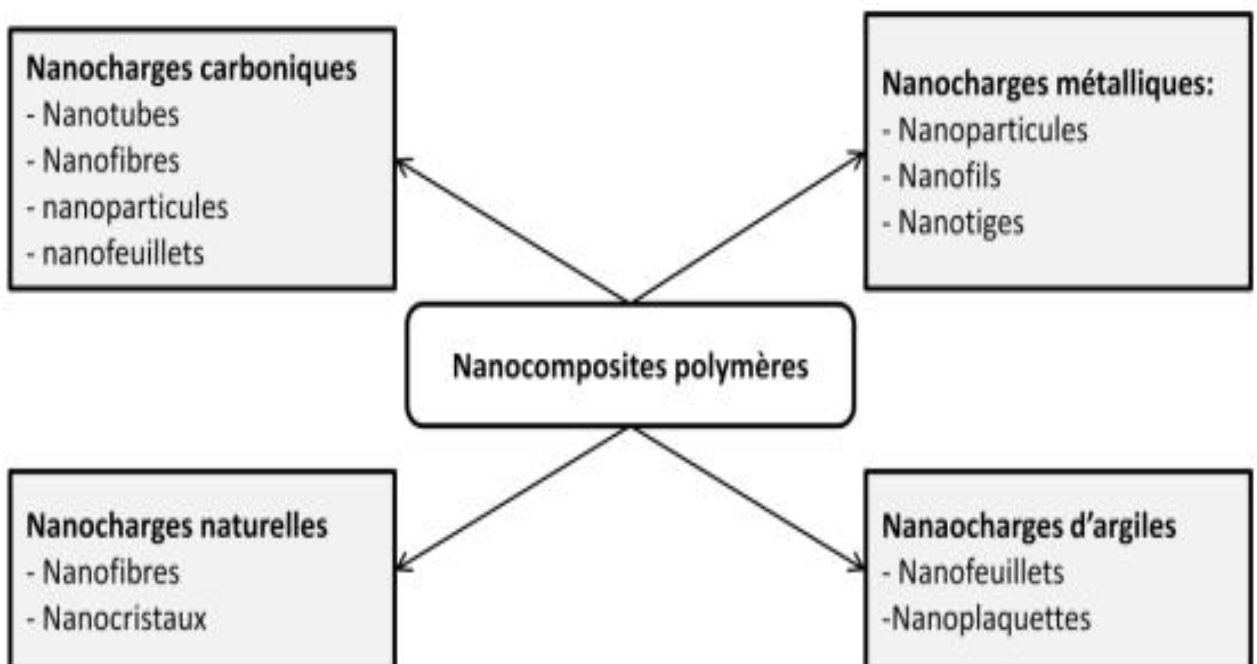


Figure I.17 : Classification des nanocomposites polymères selon le type de la nanocharge renforçante.[70]

Les matrices métalliques sont des matériaux avancés fabriqués en intégrant des nanoparticules dans une matrice métallique ou un alliage métallique. Ces composites combinent une matrice métallique avec des nanoparticules pour améliorer les propriétés mécaniques, thermiques et électriques du matériau de base.[69]

I.5. Polymère

I.5.1. Définition

Un polymère se définit comme une macromolécule formée par la répétition d'une unité élémentaire, appelée unité de répétition ou monomère. Cette unité monomère est constituée d'un groupe d'atomes et les monomères se lient entre eux par des liaisons covalentes.

La structure d'un polymère peut être schématisée par un enchaînement covalent d'unités monomères, formant ainsi une chaîne macromoléculaire, comme présente la figure I.18 Où -A- représente l'unité constitutive.[71]

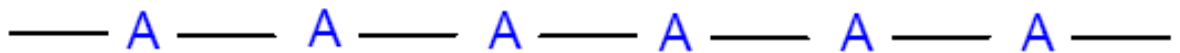


Figure I.18 : La chaîne structure de polymère. [71]

I.5.2. Propriétés

Les matériaux polymères sont davantage vulnérables aux changements de leur milieu, leur comportement est fortement influencé par différents facteurs tels que la température, la dureté, l'intensité de la contrainte appliquée, les radiations UV et les agents chimiques, les polymères ont des modules d'élasticité plus faibles que les métaux, cela implique qu'ils se déforment plus facilement sous l'influence d'une contrainte.

Les polymères peuvent présenter des caractéristiques de résistance qui peuvent différer d'un ordre de grandeur en fonction de divers facteurs :

- **Paramètres spécifiques au matériau :** masse molaire, taux de ramification, mobilité des chaînes, taux de réticulation, etc.
- **Conditions extérieures :** humidité, agents chimiques, température, vitesse de sollicitation, type et intensité des contraintes appliquées.

Comprendre l'impact de ces facteurs est crucial pour choisir le polymère adéquat à une application donnée.[72]

I.6. Alginate de sodium

L'alginate de sodium est un polysaccharide de structure linéaire, extrait des algues brunes,[73] a été découvert en 1881 par E. C. Sanford, un pharmacien britannique, dans l'algue brune *Laminaria digitata*, Il est l'un des principaux constituants de la paroi cellulaire et des structures intracellulaires des algues brunes, sous forme d'acide alginique.[74]

L'alginate aujourd'hui est connu comme un des polymères les plus polyvalents pour l'exploitation industrielle, Ce polysaccharide trouve de nombreuses applications dans les domaines agroalimentaire et pharmaceutique en raison de ses nombreuses propriétés intéressantes épaississant, stabilisant et gélifiant.[75]

I.6.1. Propriété physico-chimique

❖ Comportement en solution

Les alginates se distinguent par leur solubilité à froid, permettant d'obtenir facilement des solutions visqueuses. Parmi les différents types d'alginates, c'est l'alginate de sodium qui est le plus utilisé en raison de sa solubilité dans l'eau, bien qu'il soit insoluble dans l'éthanol et les solvants organiques comme les cétones, la solubilité de l'alginate dans l'eau dépend de trois paramètres clés :

- Un pH trop acide ou trop basique peut limiter la solubilité.
- Une augmentation de la force ionique peut également réduire la solubilité.
- La présence de certains cations, comme le calcium, peut favoriser la formation de gels et influencer la solubilité.

La solubilité des alginates est également influencée par la viscosité, car elle est associée à la structure des chaînes du polymère. Elle fluctue considérablement selon la longueur moyenne des chaînes (masse molaire) et les conditions d'opération (solvant, température, force ionique). La conformation et la flexibilité des chaînes sont influencées par ces paramètres, ce qui a un impact sur leur interaction avec le solvant et les autres molécules en solution.[76]

❖ Gélification de l'alginate

L'alginate est un polymère naturel capable de former un gel aqueux en présence d'ions calcium (Ca^{2+}). Cette gélification est due à la création de ponts électrostatiques entre les chaînes d'alginate et les ions calcium.

Deux méthodes principales permettent d'obtenir un gel d'alginate homogène :

▪ Gélification par dialyse

Une solution d'alginate est placée dans une poche de dialyse, la poche est immergée dans une solution de chlorure de calcium et les ions calcium diffusent lentement à travers la membrane semi-perméable et se lient à l'alginate, provoquant la formation d'un gel, cette méthode est lente mais permet d'obtenir un gel homogène.

▪ Gélification interne

Les ions calcium sont complexés avec des agents chélatants comme l'EDTA, est ajouté à une solution d'alginate.

Ensuite diminué le PH lentement, ce qui libère les ions calcium et permet la formation d'un gel, Cette méthode est plus rapide que la dialyse et permet d'obtenir un gel homogène. [77]

I.6.2. Application d'alginate de sodium

L'alginate est une substance non toxique, inerte et non immunogène qui est utilisé dans nombreuses applications :

❖ Les applications de l'alginate dans l'industrie textile

Les sels d'alginate sont des composés naturels largement employés dans l'industrie textile, où ils sont indispensables pour fixer les couleurs sur les tissus. Leur rôle est crucial pour assurer la vivacité et la durabilité des teintures.

Par exemple, lors de la création de motifs sur les textiles, il est nécessaire que la viscosité du colorant soit adaptée afin que la couleur suive précisément le contour du motif souhaité sans déborder. Pour cela, le colorant doit avoir une viscosité similaire à celle d'une pâte.

❖ Les applications des alginates dans le domaine médical

L'utilisation de l'alginate pour les empreintes dentaires associé à du phosphate de calcium et un acide faible, il se présente sous forme de pâte souple que le patient mord. En quelques minutes, la pâte durcit et épouse parfaitement la forme de la dentition. Ce procédé, réalisé à froid, est confortable pour le patient et permet une grande précision.

L'acide alginique est également un atout majeur dans les couches culottes. Son incroyable pouvoir absorbant, capable de retenir jusqu'à 140 fois son volume d'eau, garantit une protection efficace contre l'humidité. Placé juste sous le voile doux qui touche la peau, il offre un confort optimal et une sensation de fraîcheur durable.

❖ Les applications des alginates dans le domaine pharmaceutique

L'acide alginique a la particularité de gonfler au contact de l'eau. Cette propriété est exploitée dans la fabrication de comprimés et de gélules. En effet, l'acide alginique se désagrège rapidement dans l'estomac, favorisant la libération et la diffusion des principes actifs du médicament. Cette action permet une meilleure absorption et une efficacité accrue.

L'acide alginique entre également dans la composition de compresses stériles, comme l'Allostérie®. Sa capacité à absorber les exsudats et à créer un environnement humide favorise la cicatrisation des plaies et protège les tissus fragilisés.[78]

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODE

Il s'agira dans ce chapitre de présenter les matériaux, les équipements et les méthodes expérimentales utilisés lors de cette recherche. On présentera également une description approfondie des différentes étapes de la synthèse des nanoparticules ainsi que des protocoles utilisés pour la photodégradation. Cette partie expérimentale a été réalisée au laboratoire pédagogique de la faculté des Sciences et Technologies de l'Université de Ghardaïa.

II.1. L'étape du travail

Nous détaillerons le plan de notre étude comme suit :

- Collecte de la plante de *la Coriandrum sativum L.*
- Extraction des extraits de la plante de *la Coriandrum sativum L.*
- Utilisation de l'extrait de plante comme agent réducteur pour la biosynthèse des NPs-ZnO.
- Formation des billes d'alginate chargées avec les nanoparticules.
- Caractérisation des NPs-ZnO avec différentes techniques d'analyse (DRX, MEB).
- Application des NPs-ZnO et leurs billes pour le traitement des colorants textiles (photodégradation).

L'organigramme dans la figure II.1 présente les étapes générales de notre travail.

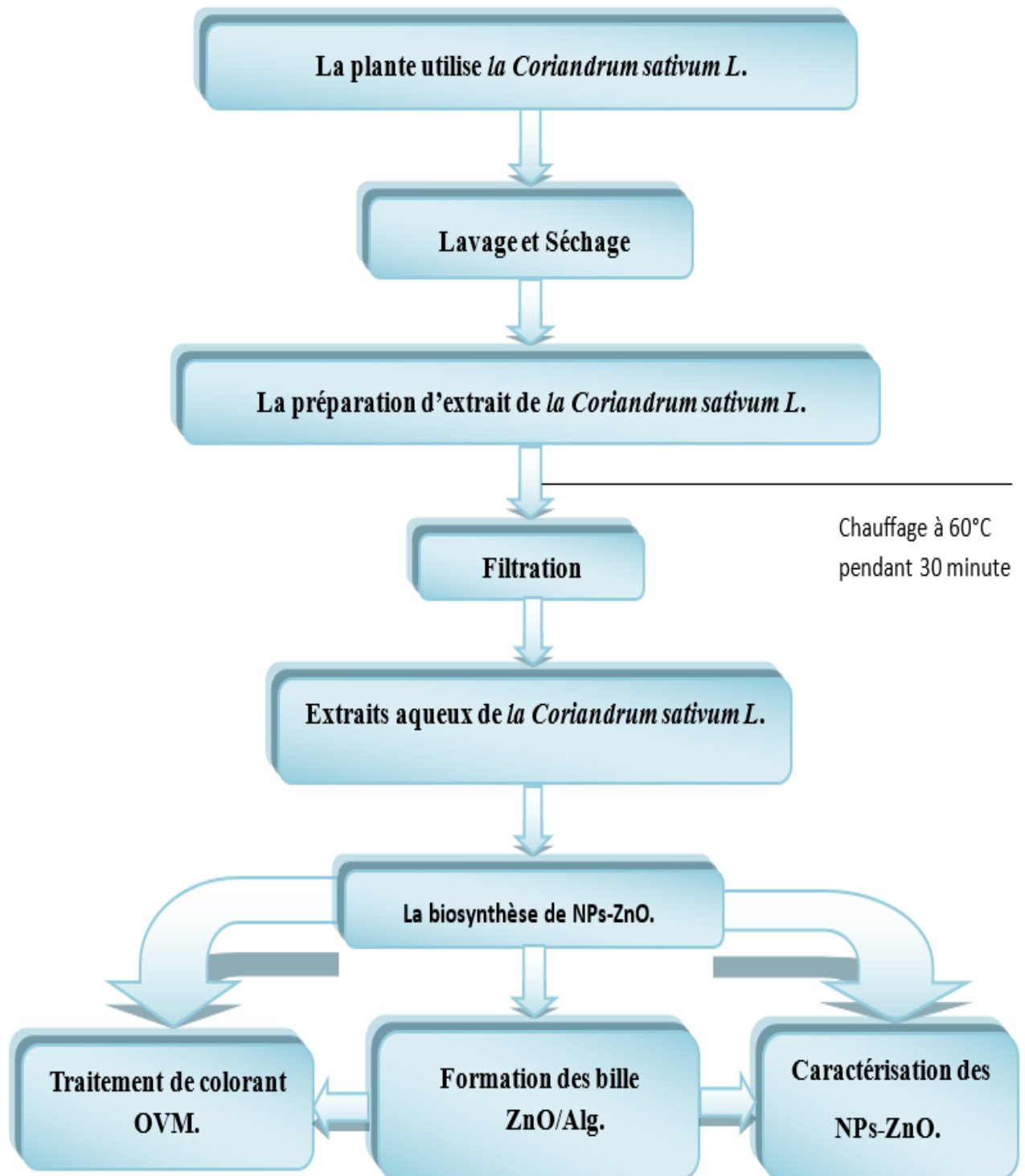


Figure II.1 : L'organigramme descriptif de la méthodologie de travail.

II.2. Les produits chimiques

Le tableau suivant regroupe tous les produits chimiques utilisés dans notre étude.

Tableau II.1 : les produits chimiques utilisés.

Produits chimiques	Structure chimique	Masse molaire (g/mol)	Fournisseur
Eau	H ₂ O	18	/
Ethanol	C ₂ H ₆ O	46,08	Honeywell
Zinc Acétate dihydrate	Zn(CH ₃ COO) * 2 H ₂ O	219.49	PROLABO. "CHEMICALS"
Hydroxyde de Sodium	NaOH	40	PROLABO. "CHEMICALS"
Alginate de sodium	(C ₆ H ₇ NaO ₆) _n	198.1	Sigma-Aldrich
Chlorure de calcium	CaCl ₂ .2H ₂ O	147.02	PROLABO. "CHEMICALS"

II.3. Répartition géographique de *la Coriandres sativum L*

La Coriandres sativum L a été récoltée facilement et sans aucun obstacle, grâce à sa disponibilité et de sa large distribution dans diverses parties de la ville de Ghardaïa, située dans le sud-est de l'Algérie. Un échantillon de cette plante a été prélevé dans la région de N'tissa Beni Isguen.

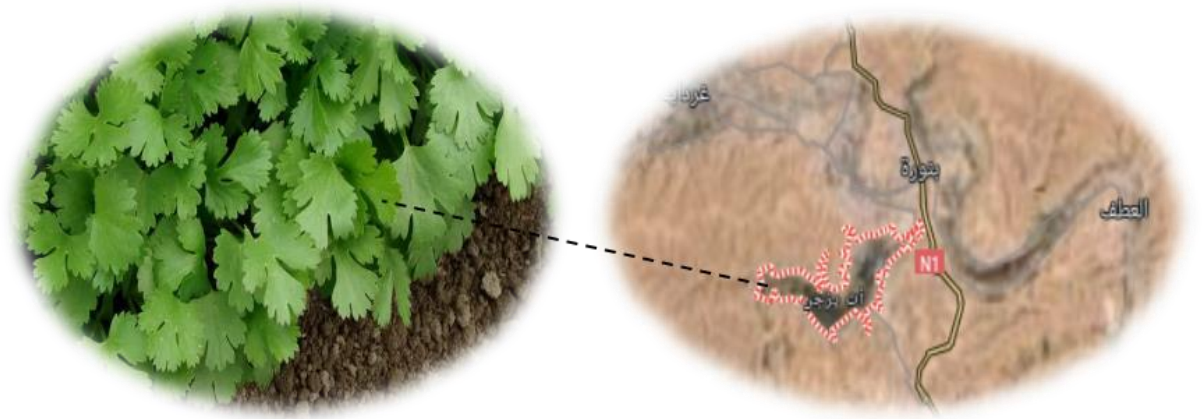


Figure II.2 : Répartition géographique de plante de *la Coriandres sativum L*

II.4. Préparation de l'extrait des feuilles de *la Coriandres sativum L*

Pour préparer l'extrait de coriandre, celui-ci doit passer par quelques étapes essentielles, comme suit :

Lavage : Nous avons lavé les feuilles de coriandre avec de l'eau distillée pour éliminer les impuretés et la poussière afin de garantir la pureté de l'extrait.

Séchage : Après le lavage, nous avons séché les feuilles de coriandre dans l'étuve à 60°C pendant 2 heures.

Découpe : Nous avons coupé les feuilles de la plante en petits morceaux pour faciliter le processus d'extraction.

Extraction : Nous avons pris 20 g de feuilles de coriandre et les avons placées dans un bécher contenant 200 ml d'eau distillée. Après avoir bien mélangé le tout, nous avons chauffé le mélange à 60°C tout en le remuant avec un agitateur magnétique pendant 30 minute. Ensuite, nous avons filtré l'extrait de *la Coriandres sativum L* à l'aide d'un filtre en papier, l'avons conservé dans une bouteille hermétique propre et bien fermée, puis l'avons stocké à une température de 4°C pour une utilisation ultérieure. La figure II.3 présente les différentes étapes d'extraction.

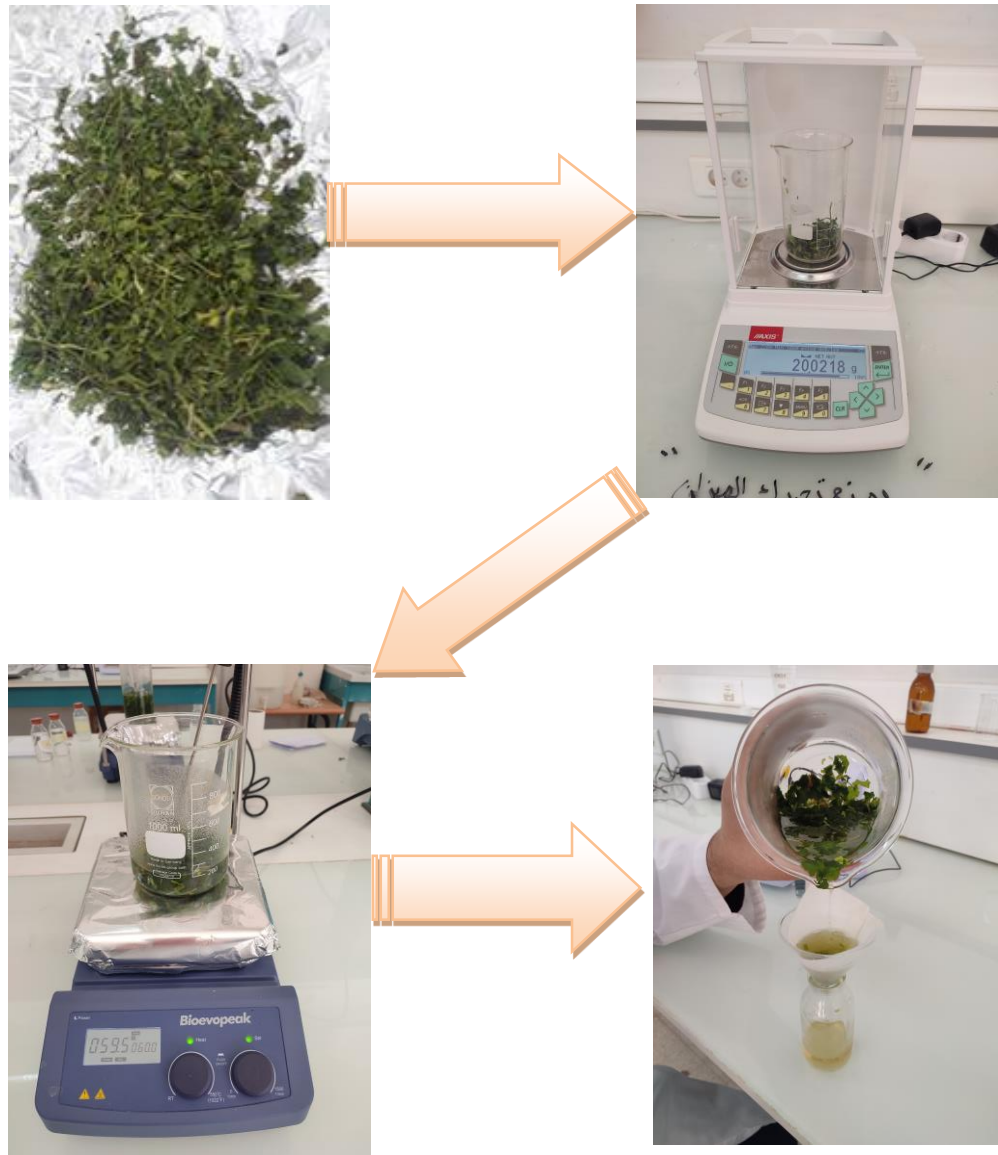


Figure II.3 : Les étapes de préparation de l'extrait des feuilles de *la Coriandres sativum L.*

II.5. Biosynthèse des nanoparticules

Pour synthétiser les NPs-ZnO, nous avons opté pour une approche chimique (verte) et respectueuse de l'environnement en utilisant un extrait végétal de feuilles de *la Coriandres sativum L.*

II.5.1. Process de synthèse de NPs-ZnO

En utilisant la méthode Muthuvel et al,[79] avec quelques modifications, nous avons synthétisé des NPs-ZnO selon les étapes suivantes :

En agitation douce, on a préparé une solution aqueuse zinc acétate dihydrate de en dissolvant 4,38 g dans 100 ml d'eau distillée à température ambiante. On a préparé une solution d'hydroxyde de sodium avec de l'eau distillée afin de maintenir le pH stable. Par la suite, les deux solutions ont été méticuleusement mélangées en agitation. Par la suite, on a ajouté goutte à goutte 20 ml d'extrait de feuilles de *la Coriandres sativum L* à la solution en agitation continue. Le mélange a été mis au chaud à une température de 60°C pendant 2 heures en agitation continue. Un changement de couleur de la solution vers un jaune brunâtre a été observé lors de la formation des NPs-ZnO.

La solution a été laissée reposer pendant un certain temps avec une agitation douce. Ensuite, une grande quantité d'eau a été éliminée en utilisant une centrifugeuse, suivie de rinçages à l'eau distillée puis à l'éthanol. Le précipité obtenu a été séché à 400°C (carbonisation) pendant 1 heures, produisant ainsi la poudre de NPs-ZnO.

Le protocole de synthèse des NPs-ZnO est résumé par les photos de la procédure dans la figure II.4.

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODE

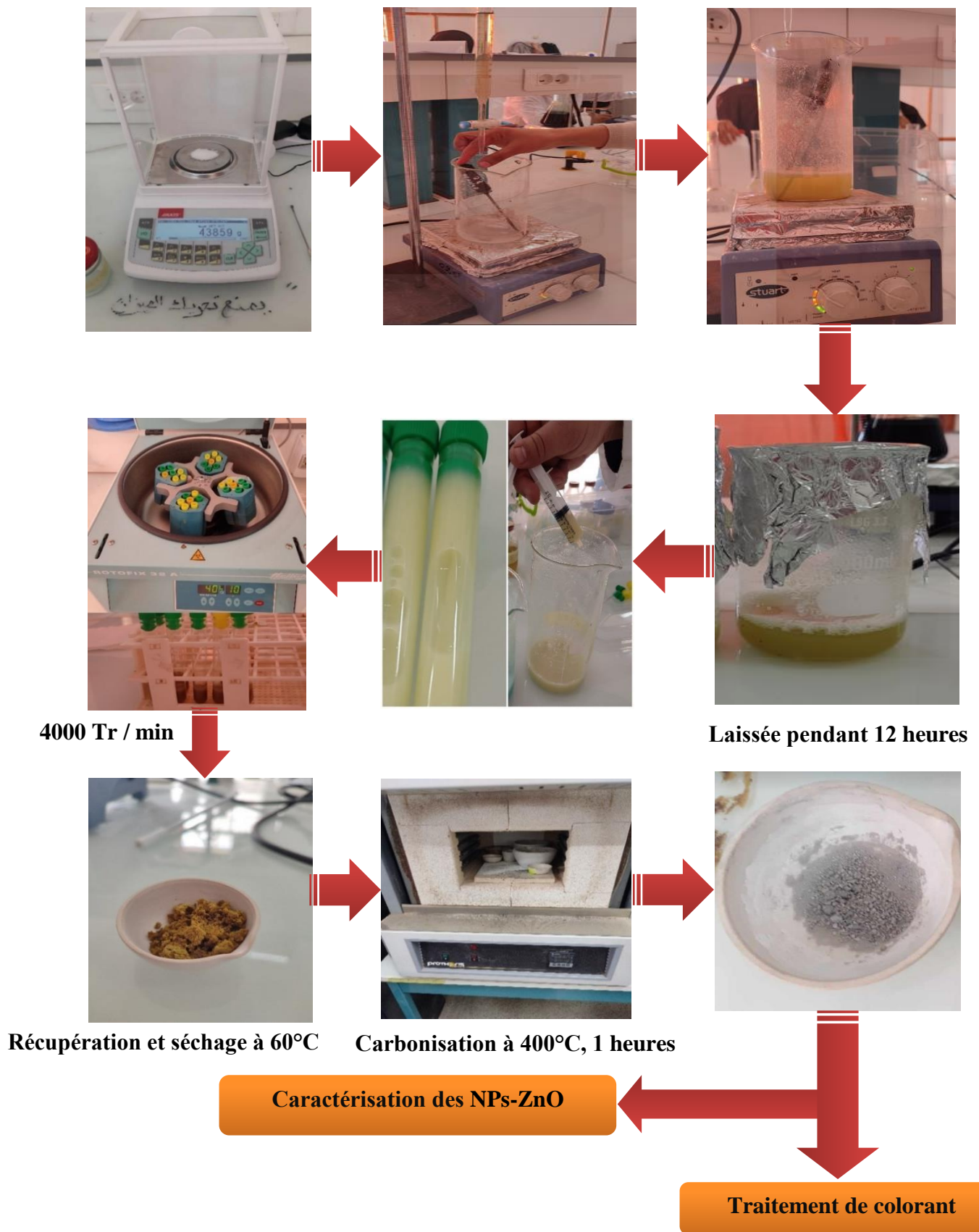


Figure II.4 : Schéma descriptif de biosynthèse des nanoparticules NPs-ZnO.

II.6. Préparation des Billes d'alginate et des billes composites

2 g d'alginate de sodium ont été dissous dans 100 ml d'eau distillée, et le mélange a été agité jusqu'à la dissolution totale de l'alginate. Ensuite, la solution a été divisée en deux parties égales. Par ailleurs, une solution de chlorure de calcium a été préparée en dissolvant 2 g de CaCl_2 dans 100 ml d'eau distillée.

Pour la formation des billes d'alginate de sodium, une partie de la solution mère d'alginate a été ajoutée goutte à goutte à 100 ml de la solution de chlorure de calcium sous agitation manuelle à l'aide d'une seringue médicale. Les billes ainsi formées ont été filtrées et séchées dans une étuve à 60°C pendant 30 minute.

Pour la préparation des billes mixtes alginate-nano, 0,05 g de NPs-ZnO ont été ajoutés lentement à la deuxième solution d'alginate de sodium sous agitation pour assurer une bonne dispersion des nanoparticules dans la suspension. Cette suspension a ensuite été ajoutée goutte à goutte à la solution de chlorure de calcium à l'aide d'une seringue. Les billes ont été préparées à température ambiante. Ce protocole est illustré par les images dans la figure II.5.

S. CaCl₂ + des gouttes
de S. d'alginate



S. Bille d'alginate



Après on a filtré la solution et séché dans une
étuve à 60°C pendant 30 minute



S. CaCl₂ + des gouttes
de S. d'alginate avec
NPs-ZnO



S. d'alginate + NPs-ZnO



Après on a filtré la solution et séché dans une
étuve à 60°C pendant 30 minute



Figure II.5 : Schéma descriptif de préparation des billes composites.

II.7. Techniques de caractérisation

II.7.1. Diffraction des rayons X (DRX)

Le DRX est une méthode d'analyse qui permet d'analyser des échantillons solides cristallisés comme les nanoparticules. D'une part, cette méthode est un outil indispensable pour analyser la structure cristalline des nanoparticules, et d'autre part, pour identifier les paramètres et la géométrie de la maille, l'orientation des monocristaux et l'identification des phases inconnues

dans le matériau, le DRX a l'avantage d'être non destructive et de ne pas nécessiter de préparation particulière pour l'échantillon.[80]

❖ Principe

Le principe de cette méthode repose sur la loi de Bragg. Ce procédé est constitué d'un générateur qui sert à alimenter le tube des rayons X. Le tube ne transforme que 1% de l'énergie en rayons X, tandis que le reste (99%) est converti en chaleur. Dans cette situation, lorsque l'échantillon se déplace d'un angle θ , le détecteur se déplace à son tour pour un angle 2θ . Seuls les rayons diffractés par les plans cristallins (hkl) sont enregistrés par le détecteur, ce qui confirme la loi de Bragg.[81]

$$n\lambda = 2d \cdot \sin \theta$$

Avec :

n : (nombre entier) représentant l'ordre de diffraction.

λ : la longueur d'onde monochromatique de l'anticathode utilisée.

d : la distance entre les plans (hkl).

θ : l'angle incident entre le faisceau incident et les plans diffractants du matériau.

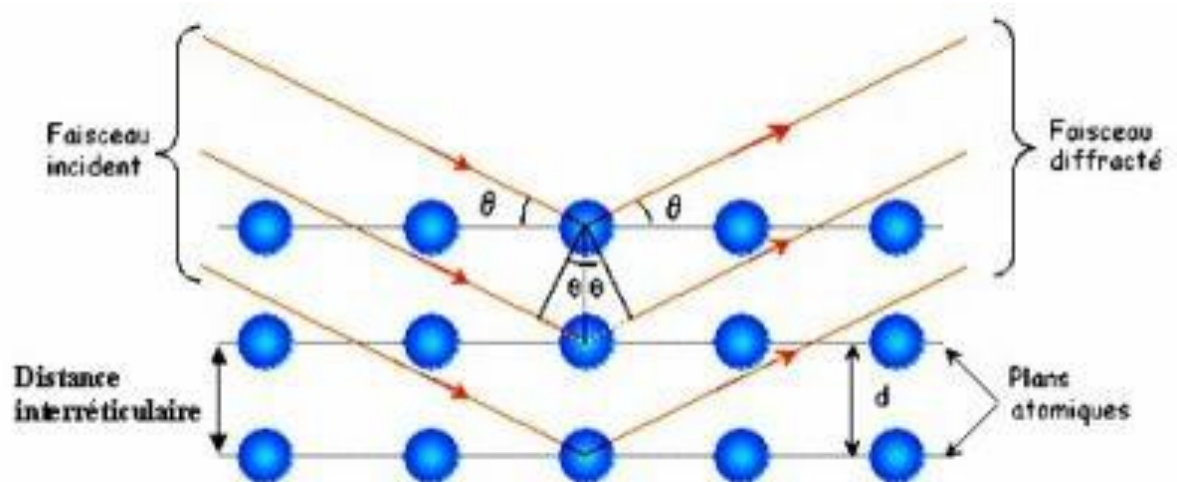


Figure II.6 : Illustration de la loi de Bragg.[81]

❖ Appareillage

Nous avons utilisé un diffractomètre pour l'analyse des échantillons et la marque est "PANalytical EMPYREAN " (Figure II.7). L'instrument équipé du détecteur à scintillation LYNXEYE et d'un rayonnement Cu K α ($\lambda = 1,54184 \text{ \AA}$) à une tension de 30 KV et un courant de 10 mA. Les échantillons ont été placés dans un porte-échantillon et scannés sur une plage de 25 à 40°C.



Figure II.7 : Appareille de diffractomètre DRX.

II.7.2. Microscope électronique à balayage MEB

La microscopie électronique à balayage (MEB en français et SEM pour Scanning Electron Microscopy en anglais) est une méthode très utilisée dans de nombreuses disciplines (physique, chimie, biologie, médecine...) essentiellement pour l'observation de la morphologie d'échantillonnages. Elle n'en est pas moins utilisée, car cette méthode permet aussi de fournir des données sur la composition des couches.[82]

❖ Principe

Le microscope électronique à balayage fonctionne en émettant un faisceau d'électrons par une cathode, aussi appelé faisceau incident. Les électrons interagissent avec l'échantillon et

forment des électrons secondaires de moins grande énergie. On les amplifie, puis on les détecte et on les transforme en un signal électrique. Pour plus d'informations :

Le faisceau est convergent vers l'échantillon grâce à un système de bobines qui agissent comme des lentilles pour les ondes électroniques. Le point de convergence s'écarte de façon à atteindre la surface de l'échantillon. Les électrons incidents interagissent avec l'échantillon sur une profondeur qui augmente en fonction de leur énergie et diminue en fonction du numéro atomique moyen de celui-ci. Les électrons incidents peuvent interagir avec l'échantillon de différentes façons (Figure II.8). Par ces interactions, de nouveaux faisceaux d'électrons ou de photons sont émis, chaque faisceau ayant sa propre énergie, sa propre position dans l'espace et fournissant des informations spécifiques sur l'échantillon.

La plupart des microscopes électroniques à balayage détectent les trois faisceaux les plus importants, à savoir les électrons secondaires, les électrons rétrodiffusés et les rayons X. Afin d'être observé, chaque faisceau requiert l'emploi d'un détecteur particulier.

À chaque point, le nombre de particules collectées est mesuré par les détecteurs d'électrons secondaires et rétrodiffusés, qui sont ensuite cartographiés. Une cartographie affiche traditionnellement sur un écran la quantité de particules détectées en chaque point, représentée par un pixel affiché en niveau de gris (ou une couleur spécifique) différent selon la quantité de particules détectées. Les dispositifs de détection des rayons X enregistrent le nombre de photons collectés ainsi que leur énergie/longueur d'onde sur toute la surface balayée.[83]

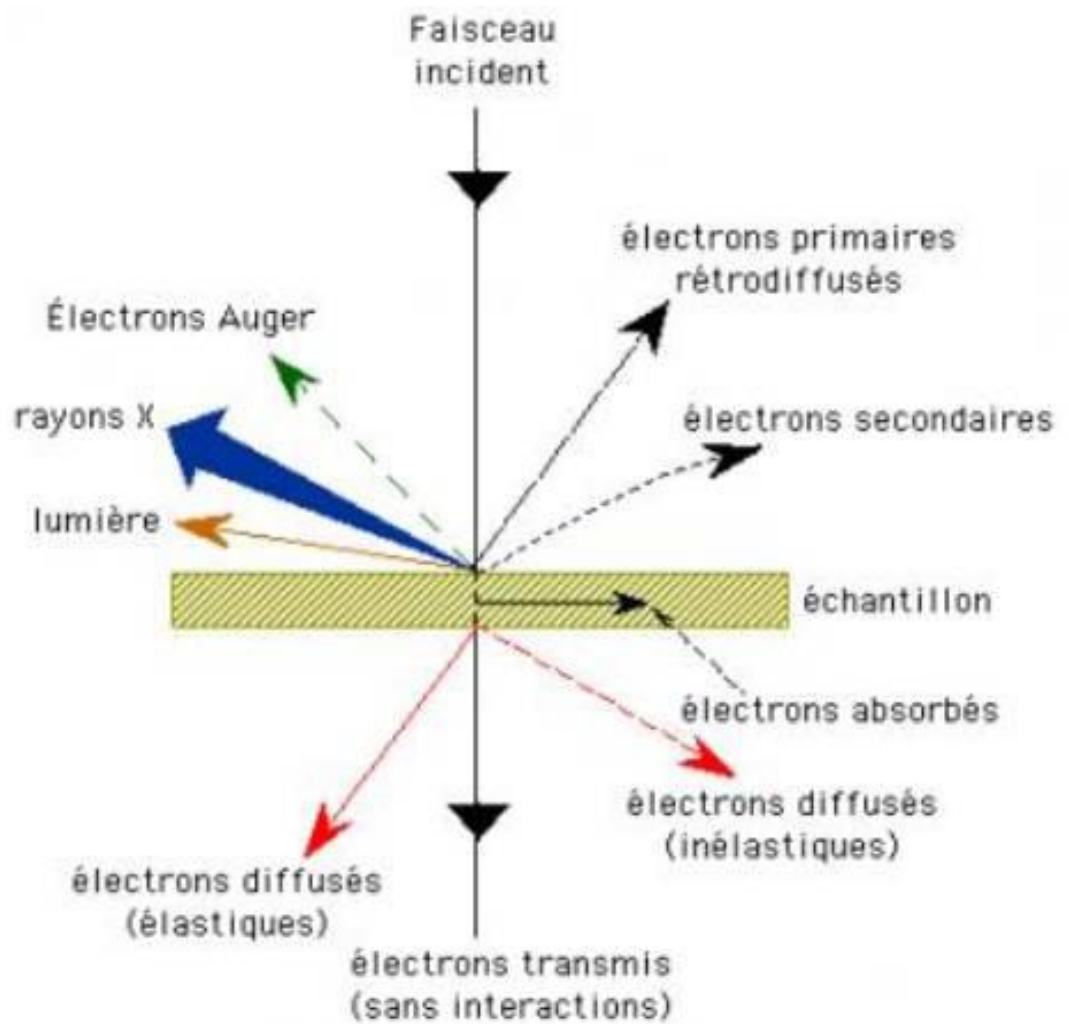


Figure II.8 : Microscopie électronique à balayage, l'interaction entre les électrons et l'échantillon.[83]

❖ **Appareillage**

Nous avons utilisé le microscope électronique à balayage en champ proche (MEB) avec une tension d'accélération de 30 kV. (Figure II.9) pour analyser nos échantillons, ce qui permet de déterminer la morphologie et la taille des nanoparticules obtenues.



Figure II.9 : Appareille de MEB couplé à l'EDX.

II.7.3. Spectroscopie UV-visible

L'analyse UV-Vis a été réalisée à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Vis de type Thermo Fisher Scientific (UviLine 9400C) couvrant la plage de longueurs d'onde de 200 à 800 nm.

❖ Principe

Dans l'ultraviolet visible, la spectroscopie électronique se concentre sur l'absorption de photons lors des transitions de l'état fondamental vers des états excités. Son principe repose sur la quantification de la diminution d'un rayonnement lumineux incident d'intensité (I_0) en fonction de la longueur d'onde lorsqu'il traverse un milieu homogène contenant une espèce absorbante. Il est possible de repérer et de mesurer l'intensité de la radiation dont la longueur d'onde s'étend de 200 à 1400 nm grâce à cette technique. L'échantillon a la capacité d'absorption, de transmission ou de réflexion des photons émis.[84]

L'absorbance est régie par la loi de B er-Lambert :

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon \cdot l \cdot C$$

Avec

- A est absorbance de la solution (sans unité).
- I_0 et I représentent respectivement les intensités de la lumière incidente et transmise.
- l correspond au parcours optique (c'est à dire l'épaisseur de l'échantillon) (cm).
- C désigne la concentration de l'espèce absorbante en solution (mol.L⁻¹).
- ϵ est le coefficient d'extinction molaire (L. mol⁻¹. cm⁻¹).



Figure II.10 : Appareille de UV-visible.

II.8. Traitement l'eau contaminé avec le colorant

II.8.1. Choix de colorant

Pour évaluer l'efficacité de notre travail pratique, nous avons sélectionné un colorant spécifique, Oxalate vert de malachite couramment utilisé dans l'industrie textile, sur lequel nous avons effectué un traitement.

II.8.2. Préparation de la solution coloré OVM

Afin de tracer la courbe d'étalonnage, nous avons dissous une quantité de 2 mg de colorant OVM dans 100 ml d'eau distillée. Ensuite, nous avons préparé quatre concentrations différentes à partir de cette solution mère (figure II.11), et l'absorbance de chaque concentration a été mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre UviLine®SERIE by SECOMAM.

Pour obtenir les concentrations des quatre solutions préparées, nous avons utilisé l'équation de dilution suivante :

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

C_1 : Concentration de la solution mère (mg/L).

V_1 : Volume de la solution mère à prélever (L).

C_2 : Concentration de la solution fille (mg/L).

V_2 : Volume de la solution mère fille (L).

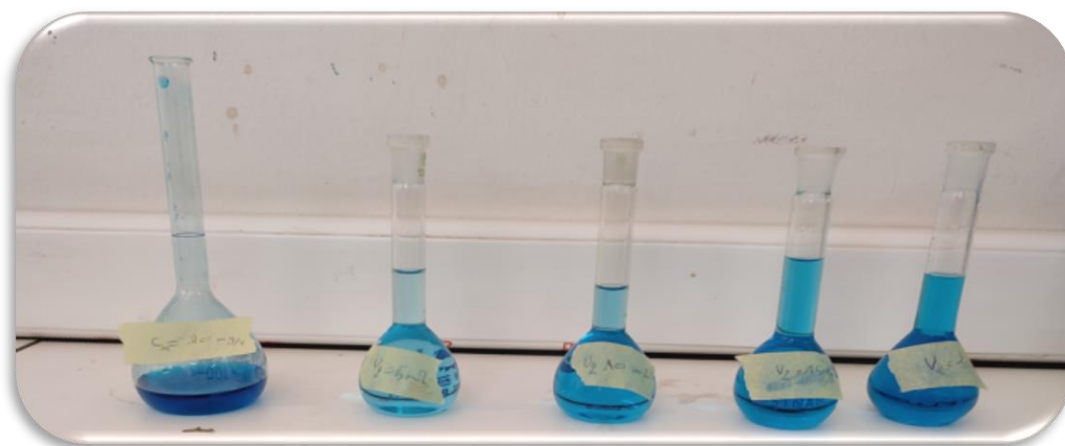


Figure II.11 : Solution mère et les solutions fille de Coloré OVM

II.8.3. Effet de masse de NPs-ZnO

Pour tester l'effet de la masse de NPs-ZnO sur la dégradation des OVM, nous avons réalisé des expériences en variant la quantité de NPs-ZnO utilisée (0,05 mg, 0,1 mg et 0,15 mg) tout en maintenant la concentration de colorant à 6 mg/l. Grâce à ces expériences, nous avons pu déterminer la quantité optimale de NPs-ZnO à utiliser pour la photodégradation.

II.8.4. Protocole de la photodégradation du OVM

L'étude de la photodégradation a été réalisée en effectuant des tests à différents temps de contact, dans un intervalle allant de 1 à 90 minute. Pour cela, 0,1 mg de NPs-ZnO a été ajouté à 20 ml d'une solution de colorants (OVM) à une concentration de 9 mg/L, tandis que 10 ml de la même solution a été utilisé comme témoin. Les deux béchers ont été placés dans une

chambre noire pendant 30 minute avec agitation continue afin d'assurer l'équilibre adsorption-désorption. Ensuite, les béchers ont été exposés à une irradiation UV pendant 60 minute supplémentaire.

Toutes les 10 minute, un échantillon a été prélevé de chaque bécher pour mesurer l'évolution de la dégradation. Les échantillons prélevés ont été centrifugés à 4000 tr/min pendant 5 minute, et la dégradation a été suivie en mesurant l'absorbance de chaque échantillon l'aide d'un spectrophotomètre UV. Ce protocole est illustré par des images de chaque étape dans la figure II.12.

Pour suivre l'évolution de la dégradation au cours du temps sous l'effet des billes de ZnO/Alg, le même protocole a été appliqué. La même quantité de billes de ZnO/Alg a été ajoutée à une solution de colorant de même concentration, avec un témoin constitué de billes d'alginate seules, comme illustré dans la figure II.13.

Le rendement d'élimination (R%) est déterminé par la relation suivante :

$$R\% = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

Avec

R : Le taux élimination (%)

C₀ : Concentration initiale en colorant à t = 0 en (mg/L).

C_t : Concentration du soluté à l'instant à t = t en (mg/L).

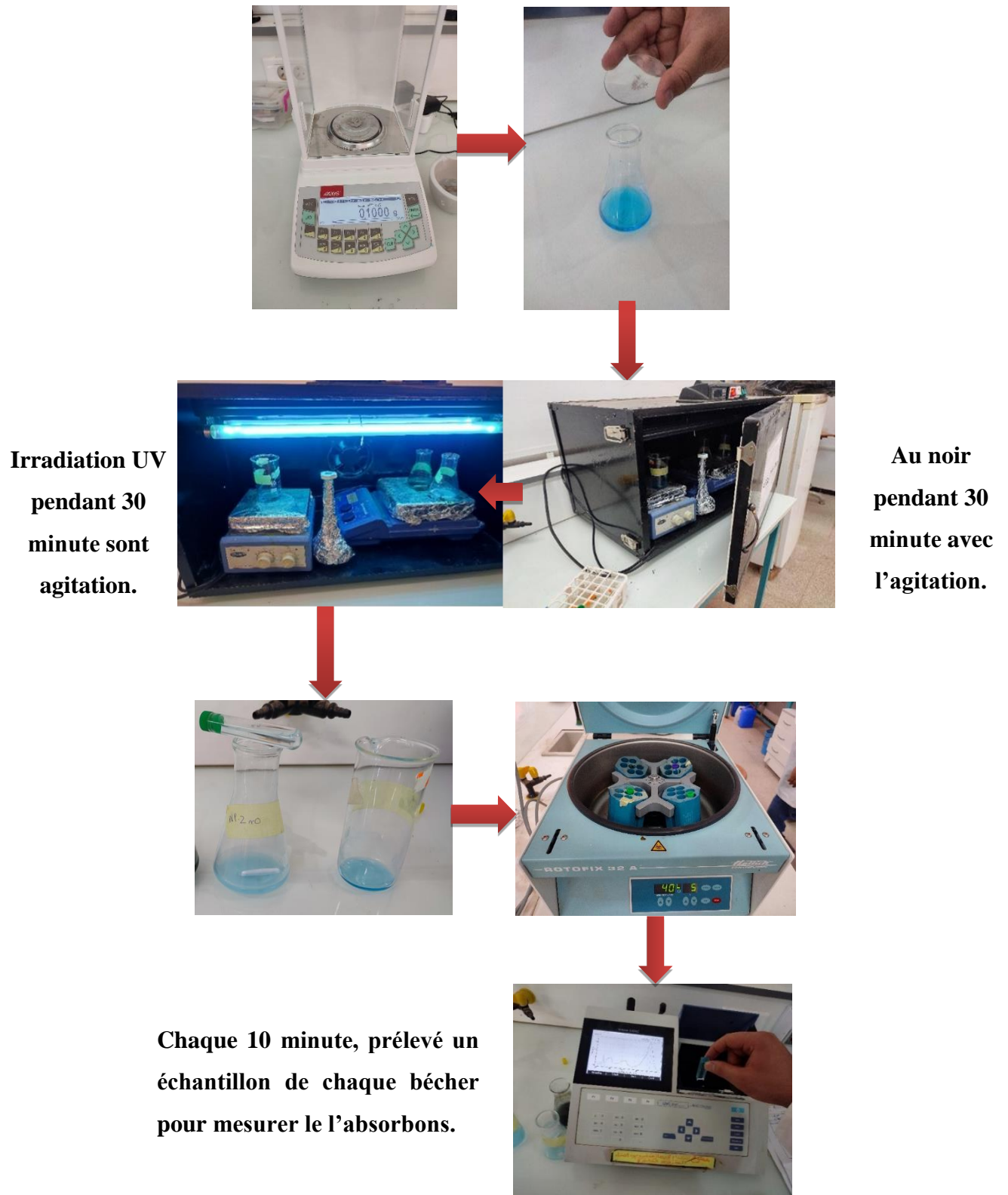


Figure II.12 : Schéma descriptif de l'application de NPs-ZnO.

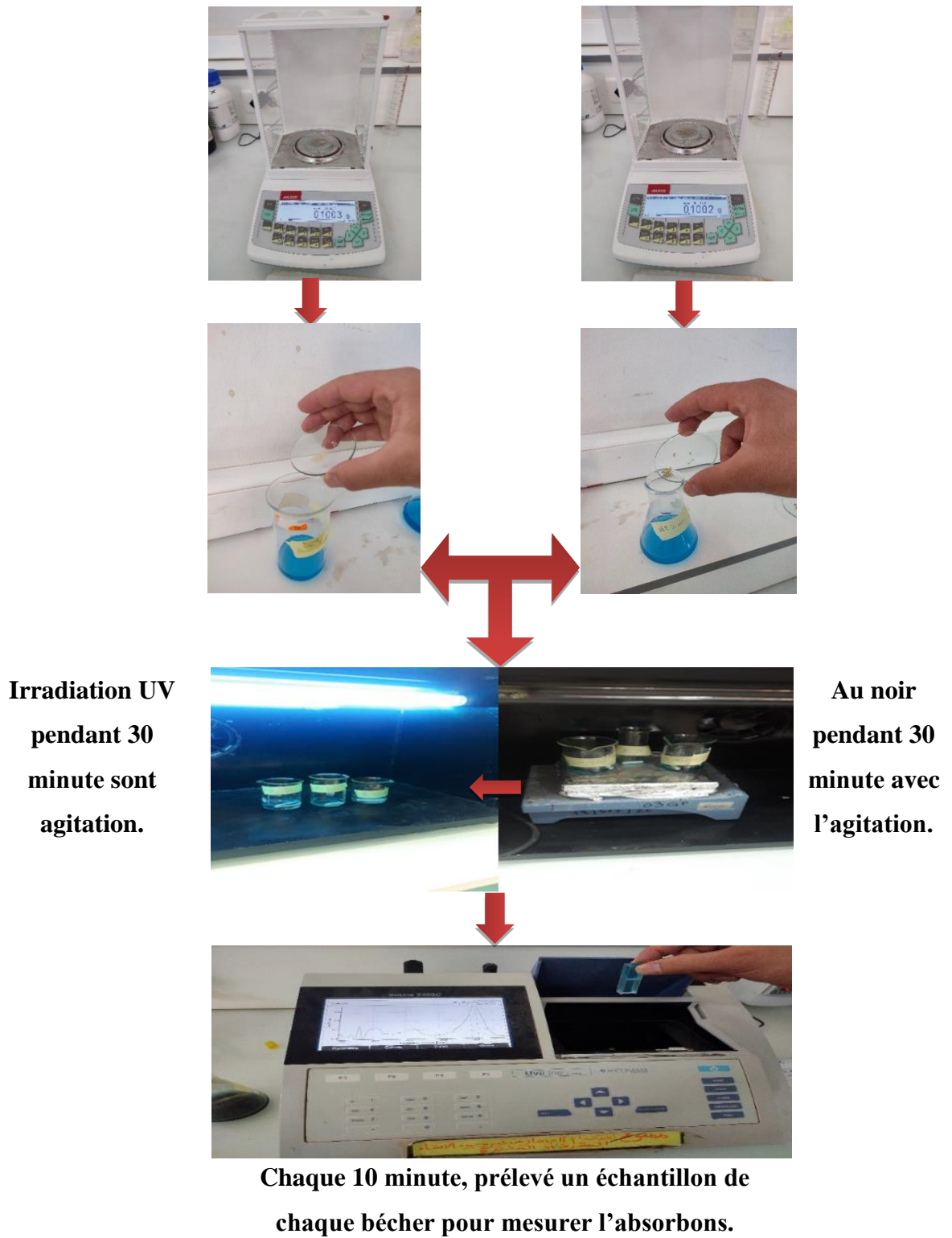


Figure II.13 : Schéma descriptif de l'application des billes de ZnO/Alg.

CHAPITRE III : RESULTAT ET DISCUSSIONS

Ce chapitre est dédié à la présentation détaillée des résultats des analyses de caractérisation effectuées sur les NPs-ZnO et les Billes ZnO/Alg, ainsi que de leur application pour la photodégradation du colorant OVM.

III.1. Résultats des caractérisations de NPs-ZnO et des Billes ZnO/Alg

III.1.1. Résultat de diffraction des Rayons X (DRX) de NPs-ZnO

La diffraction des rayons X pour analyser la structure des NPs-ZnO. Les modèles de diffraction des rayons X ont montré leur structure cristalline élevée. Comme illustré dans la figure III.1, les nanoparticules fabriquées ont présenté sept pics distincts correspondant aux degrés 2θ : $31,2^\circ$, $34,2^\circ$, 36° , 48° , $56,48^\circ$, $62,90^\circ$, $66,13^\circ$, $68,37^\circ$, $69,59^\circ$, qui sont attribués respectivement aux plans cristallins suivants : (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201). Les modèles de diffraction des rayons X correspondent aux plans du ZnO dans une structure hexagonale de type wurtzite (JCPDS 36-1451). Tous les pics étaient intenses, nets et fins, affirmant la bonne cristallinité des nanostructures élaborées.[85]

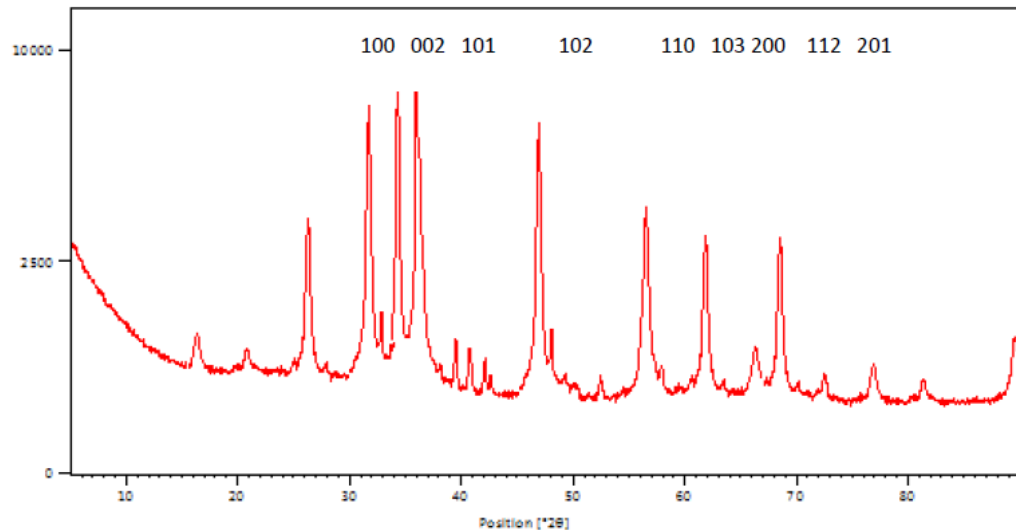


Figure III.1 : Diffraction des rayons X des NPs-ZnO.

III.1.2. Résultat de microscope électronique à balayage (MEB) de NPs-ZnO

La figure III.2 montre la caractérisation et la morphologique par microscopie électronique à balayage (MEB) de NPs-ZnO. Les nanoparticules sont presque sphériques et ont un diamètre d'environ 50 à 100 nanomètres. Elles sont réparties uniformément sur le substrat et semblent légèrement agglomérées dans certaines zones. L'agglomération des nanoparticules est probablement due aux forces de van der Waals.[86]

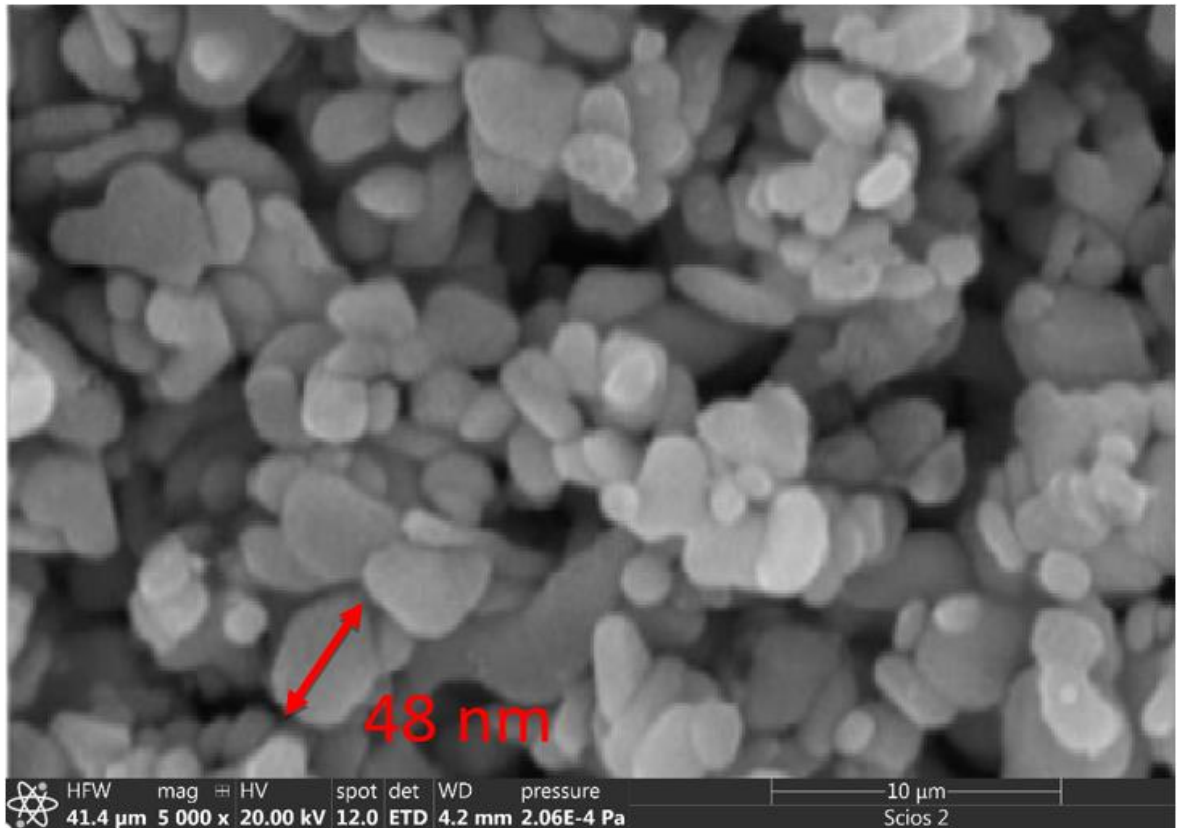


Figure III.2 : La morphologie de NPs-ZnO.

III.1.3. Résultat de microscope électronique à balayage (MEB) des Billes ZnO/Alg

La Figure III.3 présente les images de MEB de la surface des perles de Bille NPs-ZnO, La morphologie sphérique des perles avec une structure poreuse est visible sur les images.[86]

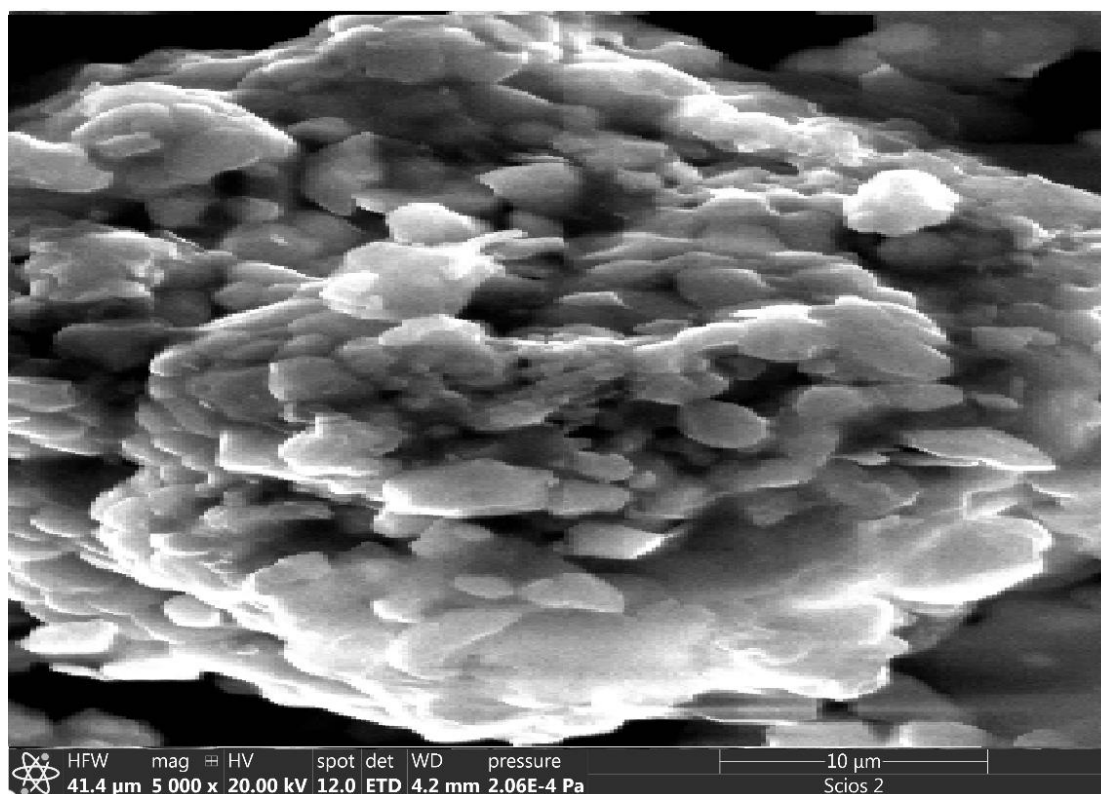


Figure III.3 : La morphologie des Billes de ZnO/Alg.

III.2. Résultat de photodégradation de OVM

III.2.1. La courbe d'étalonnage

Les concentrations préparées précédemment sont présentées ci-dessous dans le tableau III.1 pour la solution colorante (OVM) avec l'absorbance spectrale pour chaque concentration déterminée. Pour chaque concentration, il est essentiel de déterminer la longueur d'onde dans laquelle la mesure est réalisée avant de mesurer l'absorbance spectrale. On a calculé la longueur d'onde maximale de la solution colorante (OVM) à 619 nm.

Tableau III.1 : les données de la courbe d'étalonnage, concentration / absorbance.

	C1	C2	C3	C4	C5
C (mg/l)	2	4	6	8	20
Abs	0.182	0.421	0.709	0.929	2.386

CHAPITRE III : RESULTA ET DISCUSSIONS

La figure III.4 présente la courbe d'étalonnage. L'axe des abscisses (X) indique la concentration en milligrammes par litre (mg/L) du colorant OVM dans la solution, tandis que l'axe des ordonnées (Y) représente l'absorption. La courbe suit une équation linéaire de la forme $y = 0.1208 x$

Le graphique montre une relation linéaire directe entre la concentration du colorant OVM dans la solution et l'absorption de la lumière, avec un coefficient de détermination (R^2) de 0,9991. Cette valeur élevée indique que les données sont très bien ajustées à la droite tracée. Cela démontre que notre travail expérimental a été réalisé de manière satisfaisante.

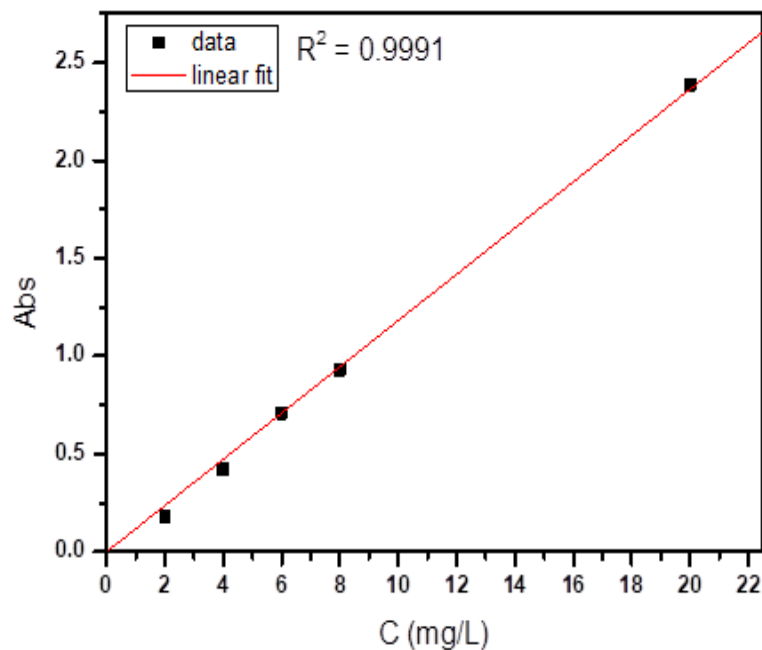


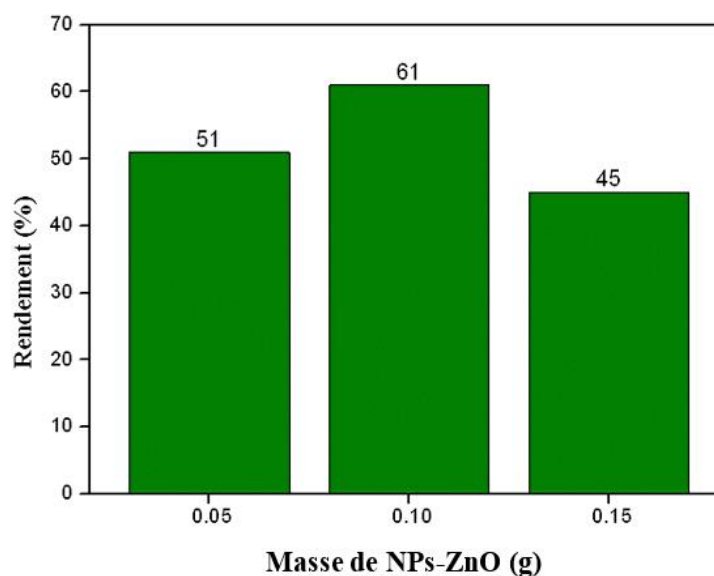
Figure III.4 : Courbe d'étalonnage concentration / absorbance du OVM.

La courbe d'étalonnage sera utilisée pour calculer les concentrations de la solution du colorant OVM avant et après un processus de photodégradation en mesurant son absorption de lumière.

III.2.2. L'effet de masse de NPs-ZnO**Tableau III.2 :** Résultat de l'effet de masse de NPs-ZnO.

Masse de NPs-ZnO (g)	Rendement %
0.05	51 %
0.1	61 %
0.15	45 %

On a évalué l'impact de la quantité de NPs-ZnO sur la photodégradation en établissant la concentration de colorant à 6 mg/L et en ajustant la quantité de NPs-ZnO. Après avoir été stabilisé pendant 30 minute dans une chambre noire, le mélange a été exposé aux radiations UV pendant une heure sous agitation. Après le traitement, les absorbances des solutions ont été analysées à la longueur d'onde $\lambda_{\text{max}} = 619$ nm. Les résultats sont présentés dans le tableau III.2.

**Figure III.5 :** L'effet de masse de NPs-ZnO sur la photodégradation.

La figure.III.5 montre le rendement de cette dégradation. Il est clair que la quantité de NPs-ZnO joue un rôle important dans l'amélioration de l'efficacité du processus de dégradation du colorant OVM par la lumière UV-visible. L'augmentation de la surface des catalyseurs

en augmentant la quantité de NPs-ZnO pour améliorer l'efficacité du processus de dégradation. Cependant, une augmentation excessive peut entraîner une baisse d'efficacité en raison de collisions entre les particules activées et les catalyseurs dans leur état de base, les rendre inactifs en raison du blocage de plusieurs sites actifs.[87] Il est donc essentiel de déterminer expérimentalement la quantité optimale pour garantir les meilleurs résultats. Nous avons pris en compte la moyenne des valeurs, qui est de 0,1 g, comme quantité appropriée pour le processus.

III.2.3. Evolution de photodégradation avec le temps

L'effet du temps d'exposition aux radiations UV a été suivi pour NPs-ZnO et les bille ZnO/Alg synthétisés :

❖ Cas des NPs-ZnO

Pour les NPs-ZnO une solution de 9 mg/L de concentration d'OVM a été préparée, et 0,1 g de NPs-ZnO a été ajouté à cette solution. Le mélange a été placé dans une chambre noire pendant 30 minute, suivi d'une heure d'exposition aux radiations UV. Pendant ces deux étapes, la concentration d'OVM a été suivie toutes les 10 minute en mesurant l'absorbance à la longueur d'onde $\lambda_{\max} = 619 \text{ nm}$.

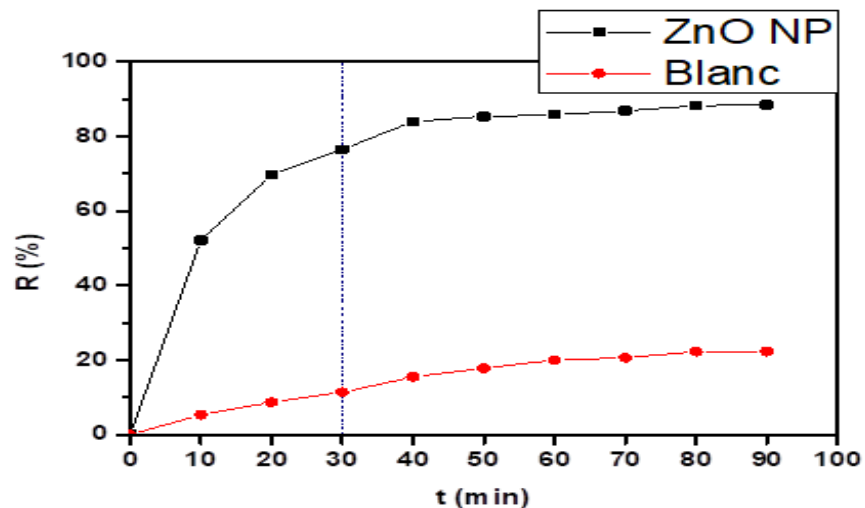


Figure III.6 : L'évolution de l'activité photodégradation de OVM par NPs-ZnO en fonction du temps.

La figure III.6 illustre l'évolution de la photodégradation des OVM en présence de NPs-ZnO au fil du temps d'exposition à la lumière ultraviolette. Afin d'analyser l'impact de la lumière

ultraviolette sur le processus photocatalytique, une solution de colorant contenant des NPs-ZnO est maintenue à l'abri de la lumière pour servir de témoin blanc (indiquée en rouge), permettant ainsi de quantifier le taux de dégradation en pourcentage (R %) sur une période de 90 minute. Durant la première demi-heure, la solution blanche est maintenue dans l'obscurité, ce qui entraîne une augmentation du rendement. Ce phénomène peut être expliqué par l'adsorption et la présence initiale de nombreux sites vacants dans les NPs-ZnO, favorisant ainsi l'adsorption d'une quantité de la solution colorée. En conséquence, l'échantillon blanc atteint un taux d'environ 20 %. Au cours des 30 minutes premières minutes d'irradiation par la lumière UV, il est observé que le taux de dégradation des OVM en présence de NPs-ZnO dépasse 70 %, avec une cinétique très rapide. Sur une durée totale d'une heure d'exposition à la lumière ultraviolette, les NPs-ZnO continuent de favoriser la dégradation, mais à une vitesse moindre entre la 30e et la 90e minute, atteignant 89 % et laissant une concentration résiduelle d'environ 1 mg/L d'OVM dans la solution. En revanche, la solution témoin atteint un plateau à environ 22 % après 90 minute, ce qui suggère une différence attribuable à la photodégradation induite par l'exposition à la lumière UV.

On observe une amélioration significative de l'efficacité au cours des dix premières minutes d'exposition aux rayons ultraviolets, en raison de l'absorption rapide des photons lumineux par les NPs-ZnO ou les molécules de colorant. Cette absorption provoque l'excitation des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, générant ainsi des paires électron-trou. Initialement, la densité de ces paires est élevée, ce qui se traduit par une augmentation rapide de l'efficacité de la dégradation. Le diagramme révèle que les NPs-ZnO sont hautement performantes dans la dégradation du colorant OVM. Cette efficacité accrue peut être attribuée à la surface plus importante des particules à l'échelle nanométrique, ce qui augmente leur réactivité envers les composés à décomposer. De plus, la solution colorée présente une faible cinétique de décomposition et une stabilité relative dans le temps, probablement en raison de l'absence de catalyseurs en quantité suffisante pour favoriser la réaction de décomposition des NPs-ZnO.

La solution contenant du OVM et des NPs-ZnO est soumise à une exposition aux rayons ultraviolets (UV) pendant une période déterminée. Les photons UV, caractérisés par une longueur d'onde spécifique et une énergie suffisante, induisent l'excitation des électrons de la bande de valence à la bande de conduction. Cette excitation des électrons de la bande de valence à la bande de conduction, provoquée par l'interaction des NPs-ZnO avec la lumière,

favorise la formation de molécules hautement réactives telles que les radicaux libres, conférant ainsi aux NPs-ZnO des propriétés de catalyseur efficaces [88]. En raison de leur grande surface, les NPs-ZnO présentent une capacité accrue à absorber les composés organiques ciblés, favorisant ainsi le contact avec les sites actifs à leur surface. Cette interaction favorise la génération de paires électron-trou, où les électrons de la bande de conduction réagissent avec les molécules d'oxygène (O_2) pour former des radicaux libres d'oxygène ($\bullet O^{2-}$), tandis que les trous (H^+) réagissent avec les molécules d'eau pour produire des radicaux hydroxyles ($\bullet OH$). Ces derniers, en tant qu'agents oxydants puissants, attaquent les molécules de OVM, rompant ainsi leurs liaisons chimiques pour les transformer en composés plus simples et moins toxiques [89].

❖ Cas des billes ZnO/Alg

La même procédure d'application du NPs-ZnO, avec les mêmes paramètres et concentrations, a été suivie pour le billes de ZnO/Alg.

La Figure III.7 présente une comparaison entre les billes de ZnO/Alg et l'alginate pur en termes de pourcentage de dégradation (R%) sur une période de 90 minute.

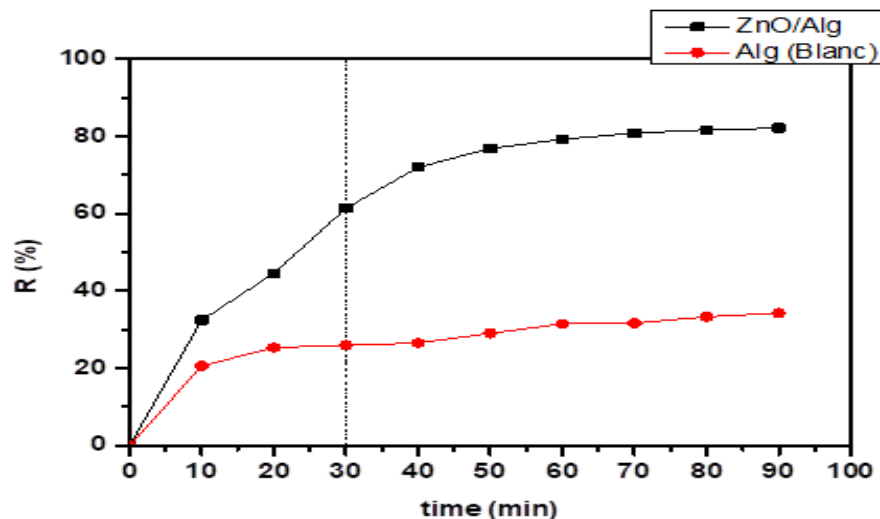


Figure III.7 : L'évolution de l'activité photodégradation de OVM par ZnO/Alg en fonction du temps.

Ce graphe (Figure III.7) montre que les billes de ZnO/Alg atteignent un pourcentage de dégradation beaucoup plus élevé par rapport à l'alginate seul, ce qui confirme la présence de la photodégradation en plus d'encapsulation. Le pourcentage de dégradation commence à augmenter rapidement pendant les dix premières minutes et continue de monter jusqu'à environ 30 minute d'exposition à la lumière UV. Après 30 minute, la photodégradation

commence effectivement ; le pourcentage de dégradation continue d'augmenter, mais avec une cinétique plus lente, pour atteindre environ 82% après 90 minute, avec une concentration de colorant d'environ 1.5 mg/l restant dans la solution. Même avec l'observation visuelle dans la figure III.7 on voit que la solution traitée est transparente, sans colorant.

La courbe de l'alginate seul commence également par une augmentation du pourcentage de dégradation pendant les dix premières minutes, mais cette augmentation est beaucoup moins prononcée par rapport aux billes ZnO/Alg. Cela peut être attribué au phénomène d'encapsulation créé par l'alginate. Après 30 minute, le pourcentage d'encapsulation atteint l'équilibre autour de 20-25% et reste presque constant pour le reste de la période.

L'efficacité élevée des billes ZnO/Alg peut être attribuée à l'effet combiné des NPs-ZnO et des alginates, où les alginates jouent un rôle dans l'amélioration de la diffusion des composés organiques vers les sites actifs à la surface des billes. En revanche, les alginates purs (Alg) peuvent être limités par leur capacité propre à encapsuler les composés organiques, ce qui conduit à un taux de rendement globalement inférieur.

Les billes ZnO/Alg contribuent à augmenter la surface active disponible, où la composition même du matériau joue un rôle important. De plus, les alginates fournissent un moyen efficace de diffusion des composés organiques, ce qui améliore la réponse globale même avec des particules plus grandes [86].

En conclusion, la légère différence d'efficacité des billes ZnO/Alg comparées aux NPs-ZnO dans la dégradation des composés organiques au fil du temps peut être due à leur taille plus grande, ce qui limite la surface active et l'accès aux sites actifs des composés organiques. Cependant, les billes de ZnO/Alg peuvent être utilisées dans certaines applications de dégradation pour leur facilité de séparation et de récupération, bien qu'elles puissent entraîner une efficacité de dégradation.

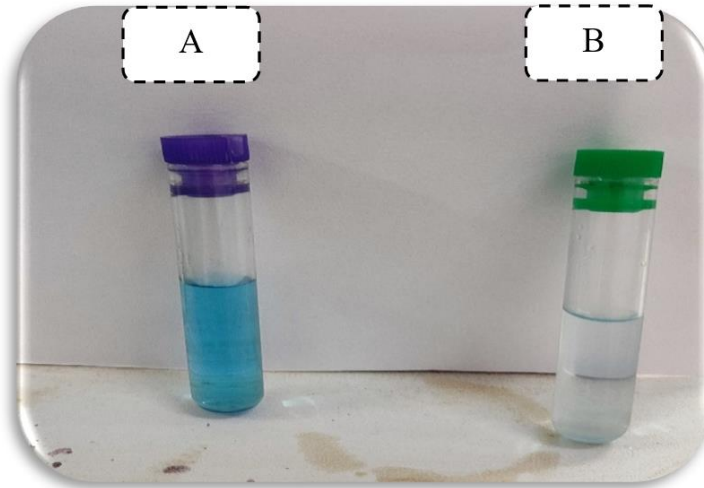


Figure III.8 : La différence entre : (A) la solution colorée (OVM) avant et (B) après le processus de photodégradation.

III.3. Capacité de la photodégradation

La dégradation du colorant (en masse ou en volume) par unité de poids de nanoparticule à une température spécifique est représentée. Il est essentiel de prendre en considération plusieurs paramètres, tant pour le contaminant (taille des molécules, solubilité dans l'eau, etc.) pour les NPs (surface spécifique, structure et type de particules, constituant, etc.).

$$Q = \frac{(C_0 - C_t) V}{m}$$

Sachant que

Q : Capacité de photodégradation du support (mg/g).

C₀ : Concentration initiale du colorie (mg/L).

C_t : Concentration à l'instant du colorie (mg/L).

V : Volume de la solution (L).

m : Masse du support (NPs) (g).

- Capacité de la photodégradation des NPs-ZnO

$$Q = \frac{(9 - 1.05)0.02}{0.1}$$

$$Q = 1.59 \text{ mg/g}$$

- Capacité de la photodégradation des Bille ZnO/Alg

$$Q = 1.474 \text{ mg/g}$$

Capacité de la photodégradation des NPs-ZnO montre une capacité de la photodégradation plus élevée ($Q=1.59 \text{ mg/g}$) par rapport aux billes ZnO/Alg ($Q=1.474 \text{ mg/g}$).

La valeur plus élevée de Q pour les NPs-ZnO suggère que les NPs-ZnO sont plus efficaces pour dégradé la substance cible de la solution OVM par rapport aux billes ZnO/Alg. Cela pourrait être attribué à la plus grande surface spécifique et à la réactivité des nanoparticules par rapport aux billes.

En fonction des exigences spécifiques et des contraintes d'application (par exemple, coût, disponibilité, facilité de manipulation), l'utilisation des NPs-ZnO est préférer pour une efficacité de dégradation plus élevée. Cependant, s'il y a des considérations telles que la facilité de séparation et de récupération de la solution, les billes ZnO/Alg pourraient encore être une option viable malgré la capacité de la photodégradation légèrement inférieure.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Cette étude représente une nouvelle aube dans le traitement de la pollution de l'eau, en adoptant une approche écologique basée sur la fabrication de NPs-ZnO à partir d'un extrait aqueux de feuilles de coriandre. Les feuilles de coriandre ont été spécialement choisies pour leur contenu en composants biologiquement actifs pouvant agir comme agents stabilisants et réducteurs, les rendant idéales pour cette application.

Des matrices nanocomposites d'alginate ont été utilisées pour porter les NPs-ZnO. Ces membranes agissent comme des supports qui stabilisent les nanoparticules et facilitent leur application. Les expériences réalisées ont montré que les NPs-ZnO et les bille ZnO/Alg sont extrêmement efficaces pour catalyser la dégradation du colorant OVM sous lumière ultraviolette. Ce colorant industriel, connu pour sa difficulté à se dégrader et son impact environnemental nocif, a été efficacement décomposé à l'aide de cette technique, démontrant la puissance et l'efficacité de ces NPs-ZnO dans le traitement des polluants organiques complexes.

Cette étude a montré un potentiel immense pour la technologie de la photocatalyse utilisant des NPs-ZnO fabriquées à partir d'extrait de feuilles de *La Coriandres sativum L* dans le traitement des polluants organiques, atteignant un rendement de dégradation 82% pour le colorant OVM, réduisant sa concentration de 9 mg/L à 1,5 mg/L. Nous recommandons donc d'adopter et de développer cette technologie et de l'appliquer à grande échelle comme un outil puissant pour lutter contre la pollution de l'eau. Nous soulignons l'importance de tirer parti des ressources naturelles et d'appliquer des technologies respectueuses de l'environnement pour la protéger et réaliser la durabilité.

Enfin, cette étude représente un exemple marquant de la manière dont les technologies vertes et les innovations scientifiques peuvent offrir des solutions efficaces aux problèmes environnementaux urgents, renforçant les efforts mondiaux vers la durabilité environnementale.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. Talhi and C. Boukhalfa-Djebbar, "Elimination d'un colorant industriel par des méthodes physico-chimiques cas du Noir Acide 210," Université Frères Mentouri-Constantine 1, 2021.
- [2] S. Benkhaya, S. M'rabet, and A. El Harfi, "A review on classifications, recent synthesis and applications of textile dyes," *Inorganic Chemistry Communications*, vol. 115, p. 107891, 2020.
- [3] E. Bulut, M. Özacar, and İ. A. Şengil, "Adsorption of malachite green onto bentonite: equilibrium and kinetic studies and process design," *Microporous and mesoporous materials*, vol. 115, pp. 234-246, 2008.
- [4] H. B. Mansour, O. Boughzala, d. Dridi, D. Barillier, L. Chekir-Ghedira, and R. Mosrati, "Les colorants textiles sources de contamination de l'eau: CRIBLAGE de la toxicité et des méthodes de traitement," *Revue des sciences de l'eau*, vol. 24, pp. 209-238, 2011.
- [5] M. A. K. Ahmet Gürses, Güneş, M. Sadi Gürses, *Dyes and Pigments* 2016.
- [6] A. Tamilarasi and M. Banuchitra, "Classification and types of natural dyes: a brief review," *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*, vol. 9, pp. 527-532, 2021.
- [7] L. D. Ardila-Leal, R. A. Poutou-Piñales, A. M. Pedroza-Rodríguez, and B. E. Quevedo-Hidalgo, "A brief history of colour, the environmental impact of synthetic dyes and removal by using laccases," *Molecules*, vol. 26, p. 3813, 2021.
- [8] P. Samanta, D. Singhee, and A. K. Samanta, "Fundamentals of natural dyeing of textiles: pros and cons," *Curr. Trends Fashion Technol. Textile Eng.*, vol. 2, 2018.
- [9] N. Li, Q. Wang, J. Zhou, S. Li, J. Liu, and H. Chen, "Insight into the progress on natural dyes: sources, structural features, health effects, challenges, and potential," *Molecules*, vol. 27, p. 3291, 2022.
- [10] A. Ayele, D. Getachew, M. Kamaraj, and A. Suresh, "Phycoremediation of synthetic dyes: an effective and eco-friendly algal technology for the dye abatement," *Journal of Chemistry*, vol. 2021, pp. 1-14, 2021.
- [11] Y. Bentahar, "Caractérisation physico-chimique des argiles marocaines: application à l'adsorption de l'arsenic et des colorants cationiques en solution aqueuse," Université Côte d'Azur (ComUE), 2016.
- [12] R. Al-Tohamy, S. S. Ali, F. Li, K. M. Okasha, Y. A.-G. Mahmoud, T. Elsamahy, H. Jiao, Y. Fu, and J. Sun, "A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety," *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 231, p. 113160, 2022.
- [13] Z. Bekçi, C. Özveri, Y. Seki, and K. Yurdakoç, "Sorption of malachite green on chitosan bead," *Journal of hazardous materials*, vol. 154, pp. 254-261, 2008.
- [14] D. AOUF, "Elaboration et caractérisation des couches minces ZnS/PbS: Application antibactérienne et photocatalytique," Université Kasdi Merbah Ouargla, 2023.
- [15] J. Sharma, S. Sharma, and V. Soni, "Toxicity of malachite green on plants and its phytoremediation: a review," *Regional studies in marine science*, vol. 62, p. 102911, 2023.
- [16] N. Raval, P. Shah, and N. Shah, "Malachite green "a cationic dye" and its removal from aqueous solution by adsorption. *Appl Water Sci* 7: 3407–3445," ed, 2017.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIE

- [17] Y. Zhang, C. Hui, R. Wei, Y. Jiang, L. Xu, Y. Zhao, L. Du, and H. Jiang, "Study on anionic and cationic dye adsorption behavior and mechanism of biofilm produced by *Bacillus amyloliquefaciens* DT," *Applied Surface Science*, vol. 573, p. 151627, 2022.
- [18] A. G. Pereira, F. H. Rodrigues, A. T. Paulino, A. F. Martins, and A. R. Fajardo, "Recent advances on composite hydrogels designed for the remediation of dye-contaminated water and wastewater: A review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 284, p. 124703, 2021.
- [19] J. D. Sosa-Martínez, N. Balagurusamy, J. Montañez, R. A. Peralta, R. d. F. P. M. Moreira, A. Bracht, R. M. Peralta, and L. Morales-Oyervides, "Synthetic dyes biodegradation by fungal ligninolytic enzymes: Process optimization, metabolites evaluation and toxicity assessment," *Journal of hazardous materials*, vol. 400, p. 123254, 2020.
- [20] S. Haou and E. K. Guechi, "Etude et Modélisation de la sorption des colorants contenu dans les effluents industriels," Université Badji Mokhtar – Annaba 2023
- [21] A. Garzón Manjón, *Synthesis of metal oxide nanoparticles for superconducting nanocomposites and other applications*: Universitat Autònoma de Barcelona, 2016.
- [22] Q. Le Trequesser, "Synthèse de nanoparticules de dioxyde de titane de morphologies contrôlées: localisation, quantification et aspects toxicologiques de la cellule à l'organisme pluricellulaire," Université de Bordeaux, 2014.
- [23] S. A. M. Ealia and M. P. Saravanakumar, "A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application," in *IOP conference series: materials science and engineering*, 2017, p. 032019.
- [24] J. Jeevanandam, A. Barhoum, Y. S. Chan, A. Dufresne, and M. K. Danquah, "Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations," *Beilstein journal of nanotechnology*, vol. 9, pp. 1050-1074, 2018.
- [25] S. Lanone and J. Boczkowski, "Les sources de nanoparticules," *Revue française d'allergologie*, vol. 50, pp. 211-213, 2010.
- [26] L. Ou, B. Song, H. Liang, J. Liu, X. Feng, B. Deng, T. Sun, and L. Shao, "Toxicity of graphene-family nanoparticles: a general review of the origins and mechanisms," *Particle and fibre toxicology*, vol. 13, pp. 1-24, 2016.
- [27] R. Mishra and J. Militky, *Nanotechnology in textiles: theory and application*: Woodhead Publishing, 2018.
- [28] A. Timesli, B. Braikat, M. Jamal, and N. Damil, "Prediction of the critical buckling load of multi-walled carbon nanotubes under axial compression," *Comptes Rendus Mécanique*, vol. 345, pp. 158-168, 2017.
- [29] N. Anzar, R. Hasan, M. Tyagi, N. Yadav, and J. Narang, "Carbon nanotube-A review on Synthesis, Properties and plethora of applications in the field of biomedical science," *Sensors International*, vol. 1, p. 100003, 2020.
- [30] D. Singh, S. Singh, J. Sahu, S. Srivastava, and M. R. Singh, "Ceramic nanoparticles: Recompense, cellular uptake and toxicity concerns," *Artificial cells, nanomedicine, and biotechnology*, vol. 44, pp. 401-409, 2016.
- [31] S. C Thomas, P. Kumar Mishra, and S. Talegaonkar, "Ceramic nanoparticles: fabrication methods and applications in drug delivery," *Current pharmaceutical design*, vol. 21, pp. 6165-6188, 2015.
- [32] I. Ijaz, E. Gilani, A. Nazir, and A. Bukhari, "Detail review on chemical, physical and green synthesis, classification, characterizations and applications of nanoparticles," *Green Chemistry Letters and Reviews*, vol. 13, pp. 223-245, 2020.
- [33] T. A. Saleh, "Nanomaterials: Classification, properties, and environmental toxicities," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 20, p. 101067, 2020.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIE

- [34] P. Graván, A. Aguilera-Garrido, J. A. Marchal, S. A. Navarro-Marchal, and F. Galisteo-González, "Lipid-core nanoparticles: Classification, preparation methods, routes of administration and recent advances in cancer treatment," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 314, p. 102871, 2023.
- [35] S. Fakhari Tehrani, "Propriétés de surface des nanoparticules et interactions avec les cellules endothéliales vasculaires," 2020.
- [36] S. Guo, D. Fu, A. Utupova, D. Sun, M. Zhou, Z. Jin, and K. Zhao, "Applications of polymer-based nanoparticles in vaccine field," *Nanotechnology Reviews*, vol. 8, pp. 143-155, 2019.
- [37] H. MME BOZETINE, "Synthèse des nanostructures de ZnO par la méthode hydrothermale et leurs applications," Université de Tizi Ouzou-Mouloud Mammeri, 2017.
- [38] S. Cherif, "Couplage d'un procédé biologique à un procédé photocatalytique pour la dégradation des molécules organiques récalcitrantes," 2021.
- [39] S. Gulati, M. Sachdeva, and K. Bhasin, "Various synthetic routes for the preparation of nanoparticles," in *AIP Conference Proceedings*, 2018.
- [40] S. Jadoun, R. Arif, N. K. Jangid, and R. K. Meena, "Green synthesis of nanoparticles using plant extracts: A review," *Environmental Chemistry Letters*, vol. 19, pp. 355-374, 2021.
- [41] I. Khan, K. Saeed, and I. Khan, "Nanoparticles: Properties, applications and toxicities," *Arabian journal of chemistry*, vol. 12, pp. 908-931, 2019.
- [42] S.-E. Jin and H.-E. Jin, "Synthesis, characterization, and three-dimensional structure generation of zinc oxide-based nanomedicine for biomedical applications," *Pharmaceutics*, vol. 11, p. 575, 2019.
- [43] Q. Wei, Y. Pan, Z. Zhang, S. Yan, and Z. Li, "Copper-based nanomaterials for biomedical applications," *Chemical Engineering Journal*, p. 149040, 2024.
- [44] B. Abderrhmane, "Optimisation de biosynthèse des nanoparticules d'oxyde de fer par l'utilisation de différents extraits des plantes et évaluation de leur activité biologique," Université d'El-Oued, 2022.
- [45] S. S. Salem and A. Fouda, "Green synthesis of metallic nanoparticles and their prospective biotechnological applications: an overview," *Biological trace element research*, vol. 199, pp. 344-370, 2021.
- [46] B. M. Kassahun, "Unleashing the exploitation of coriander (*Coriander sativum* L.) for biological, industrial and pharmaceutical applications," *Academic Research Journal of Agricultural Science and Research*, vol. 8, pp. 552-564, 2020.
- [47] A. H. Momin, S. S. Acharya, and A. V. Gajjar, "Coriandrum sativum-review of advances in phytopharmacology," *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, vol. 3, p. 1233, 2012.
- [48] P. M. Paarakh, "Coriandrum sativum Linn. Review," *Pharmacologyonline*, vol. 3, pp. 561-573, 2009.
- [49] G. A. Burdock and I. G. Carabin, "Safety assessment of coriander (*Coriandrum sativum* L.) essential oil as a food ingredient," *Food and chemical Toxicology*, vol. 47, pp. 22-34, 2009.
- [50] D. Singh, A. Tanwar, and P. Agrawal, "An overview on coriander," *J Biomed Pharm Res*, vol. 4, pp. 67-70, 2015.
- [51] H. Slimi, "Élaboration et caractérisation de couches minces co-dopées In, Co, préparées par la pulvérisation cathodique, applications aux cellules photovoltaïques," Université du Littoral Côte d'Opale; Université de Sfax. Faculté des sciences, 2019.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIE

- [52] T. Le Bahers, "Optimisation des cellules solaires à colorants à base de ZnO par une approche combinée théorie/expérience," Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 2011.
- [53] D. Mora Fonz, "A Theoretical Study on the Surfaces of Zinc Oxide," UCL (University College London), 2016.
- [54] D. BARANI, "Optimisation des conditions opératoires de synthèse verte de nanoparticules de ZnO à l'aide d'extrait des feuilles de Phoenix Dactylifera. L," Université Mohamed Khider-Biskra, 2020.
- [55] D. K. Sharma, S. Shukla, K. K. Sharma, and V. Kumar, "A review on ZnO: Fundamental properties and applications," *Materials Today: Proceedings*, vol. 49, pp. 3028-3035, 2022.
- [56] S. Amara, "Caractérisation optique et structurale des couches minces d'oxydes complexes pour applications photoniques," 2018.
- [57] Y. G. Habba, "Étude des nanostructures de ZnO pour leur application dans l'environnement: détection de gaz et dépollution de l'eau," Université Paris-Est, 2017.
- [58] M. TOUATI TLIBA, "Etude des propriétés optiques et électroniques des couches minces de ZnO dopé et non dopé: élaboration et application," Université Kasdi Merbah Ouargla, 2019.
- [59] M. Ayachi, "Elaboration et caractérisation des couches minces de ZnO non dopées et dopées aux métaux de transition," 2021.
- [60] L. DJOUADI, "Préparation des Nanocomposites à base de TiO₂ montmorillonite dopés par Bi et Soufre: Etude de leur activité photocatalytique," Université Blida1-Saad Dahlab, 2019.
- [61] B. Mohamed, "Etude de l'Activité Photocatalytique des Catalyseurs Bi₂O₃ et WO₃ Synthétisés vis-à-vis la Dégradation de l'Orange II et du Phénol," univesite djillali liabes, 2018.
- [62] G. P. Atheba, "Traitement des eaux par action combinée de la photocatalyse solaire et de l'adsorption sur charbon actif: conception et réalisation du procédé," *Université Paul Verlaine*, 2009.
- [63] A. A. EDDINE, "Modelisation-et-optimisation-de-la-photodegradation. ," UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID - TLEMEN, 2019.
- [64] M. S. MOUETSI, "ÉLABORATION ET CARACTERISATION PAR DIFFERENTES TECHNIQUES DE COUCHES MINCES D'OXYDES METALLIQUES UTILISABLES COMME CAPTEURS ET POUR LA PHOTOCATALYSE," 2024.
- [65] N. M. Mahmoodi, M. Arami, N. Y. Limaee, and N. S. Tabrizi, "Decolorization and aromatic ring degradation kinetics of Direct Red 80 by UV oxidation in the presence of hydrogen peroxide utilizing TiO₂ as a photocatalyst," *Chemical Engineering Journal*, vol. 112, pp. 191-196, 2005.
- [66] I. Sayah, "Etude de revêtements photocatalytiques à base de dioxyde de titane nanostructuré élaborés par pulvérisation cathodique magnétron en condition réactive," Belfort-Montbéliard, 2014.
- [67] J. Simon, B. Dauby, and S. Nonet, "Evaluation de l'efficacité de l'oxydation avancée par photocatalyse hétérogène UV/TiO₂ sur un effluent industriel contaminé par des composés organiques non biodégradables (colorants)," *Revue scientifique des ISILF*, vol. 22, pp. 18-20, 2008.
- [68] K. Soutsas, V. Karayannis, I. Poulios, A. Riga, K. Ntampeglitis, X. Spiliotis, and G. Papapolymerou, "Decolorization and degradation of reactive azo dyes via heterogeneous photocatalytic processes," *Desalination*, vol. 250, pp. 345-350, 2010.



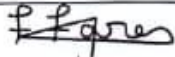
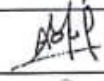

REFERENCE BIBLIOGRAPHIE

- [69] M. M. Shameem, S. Sasikanth, R. Annamalai, and R. G. Raman, "A brief review on polymer nanocomposites and its applications," *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 2536-2539, 2021.
- [70] M. El Achaby, "Nanocomposites graphène-polymère thermoplastique: Fabrication et étude des propriétés structurales, thermiques, rhéologiques et mécaniques," Université Mohammed V-Agdal, Faculté des Sciences de Rabat; Faculté des ..., 2012.
- [71] M. Bensaid, "ETUDE DES POLYMERES PAR DYNAMIQUES MOLECULAIRE», " *Do Oran. Universite Des Cienes et de la technologie Mohamed Boudiaf p*, pp. 23-24, 2015.
- [72] S. E. Hachani, "Synthèse et caractérisation d'un nouveau matériau composite à base de polystyrène," UNIVERSITE Mohamed Khider Biskra, 2017.
- [73] N. Tahari, "Réactivité d'argile modifiée par polymérisation. Etude de l'adsorption des polluants des eaux usées," 2022.
- [74] M. Lezehari, "Preparation et caracterisation de supports adsorbants à base d'argiles pontees et d'alginates," Blida, 2011.
- [75] N. NORDINE, "Etude expérimentale du potentiel d'adsorption de polluants métalliques sur la sciure de bois brute et modifiée. Analyse cinétique et thermodynamique," 2018.
- [76] L. Chabane, "Etude Physico-mecanique Des Billesgelifiees Comosites A Base De Monttmorillonites Pontees, D'alginat Et De Polyvinyl Alcool : Application A L'adsorption Dynamiques Su Lit Fix ", department génie des procédés, Université Saad Dahleb - Blida, 2017.
- [77] Y. Y. C. Sang, "Vers des micromousses stimulables," Université Paris-Diderot-Paris VII, 2009.
- [78] H. Faller, "Les applications et la toxicité des algues marines," 2011.
- [79] A. Muthuvel, M. Jothibas, and C. Manoharan, "Effect of chemically synthesis compared to biosynthesized ZnO-NPs using Solanum nigrum leaf extract and their photocatalytic, antibacterial and in-vitro antioxidant activity," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 8, p. 103705, 2020.
- [80] A. Rosset, "Synthèse et caractérisation de nanoparticules catalytiques pour une application en photocatalyse solaire," Université de Perpignan, 2017.
- [81] A. Kerour and S. Boudjadar, "Synthèse écologique des nanoparticules des oxydes de cuivre et application photocatalytique," Université Frères Mentouri-Constantine 1.
- [82] H. Trir, "Conception des dispositifs optoélectroniques à base d'oxyde de cuivre," Université de mohamed kheider biskra, 2021.
- [83] W. Zerguine, "Électrosynthèse et caractérisation de semiconducteur pour des applications dans les cellules photoélectrochimiques," 2021.
- [84] بوزيد and ضبيع, "Préparation, et caractérisation des films nanocomposites polymère/nanoparticule" Production de matériaux d'emballage antibactériens et respectueux de l'environnement", " université Ghardaia, 2023.
- [85] H. Hameed, A. Waheed, M. S. Sharif, M. Saleem, A. Afreen, M. Tariq, A. Kamal, W. A. Al-Onazi, D. A. Al Farraj, and S. Ahmad, "Green synthesis of zinc oxide (ZnO) nanoparticles from green algae and their assessment in various biological applications," *Micromachines*, vol. 14, p. 928, 2023.
- [86] R. Ahlam and H. Karima, "Traitement et contrôle des huiles lubrifiantes usagées avec des nanomatériaux, La fabrication de nanoparticules pour le traitement des eaux et des huiles usagées, Smart-NM-Traitement," université de Ghardaia 2023.
- [87] D. Aouf, Y. Khane, F. Fenniche, S. Albukhaty, G. M. Sulaiman, S. Khane, A. Henni, A. Zoukel, N. Dizge, and H. A. Mohammed, "Biogenic silver nanoparticles of

REFERENCE BIBLIOGRAPHIE

- Moringa oleifera leaf extract: Characterization and photocatalytic application," *Nanotechnology Reviews*, vol. 13, p. 20240002, 2024.
- [88] S. Hammami, "Étude de dégradation des colorants de textile par les procédés d'oxydation avancée. Application à la dépollution des rejets industriels," Université de Marne la Vallée, 2008.
- [89] R. Chokkareddy and G. G. Redhi, "Green synthesis of metal nanoparticles and its reaction mechanisms," *Green metal nanoparticles: synthesis, characterization and their applications*, pp. 113-139, 2018.

Autorisation d'impression finale d'un mémoire de master

	Nom et prénom	Signature
Le président de jury	MANSOURI Khaled	
Examineur 1	BOURAS Hadj Daoud	
Examineur 2	FENNICHE Fares	
Encadrant	AOUF Mohammed	
Co-encadrant	KHANE Yasmina	

Soussigne Mr : MANSOURI Khaled

Président de jury des étudiant (s) :

- MIMOUNI Abdelmalek
- KELLOU Kacem

Filière : Génie des procédés : Spécialité : Génie chimique

Thème : Synthèse et caractérisation des nanoparticules d'oxyde de zinc et leur application sur la photodégradation d'oxalate vert de malachite.

Autorise-le (s) étudiant (s) mentionné (s) ci-dessus à imprimer et déposer leur (s) manuscrit final au niveau du département.

Ghardaïa le : 02/07/2024

Le président de jury



Le chef de département

