

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



Mémoire de Fin d'Études

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie des procédés et la pétrochimie en vue de l'obtention du
diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Génie chimique

Présenté par

**OUENDJELI Fouad riad - GUITOUBI Roumaissa - MEFTAH Abderrahmane- NEGHMOUCHE
Ali Zoubaida - SAYAH Basma**

Thème

**Synthèse vert de nanoparticules de fer
pour le traitement des eaux**

Soutenu le .../ ... /2023. Devant le jury composé de :

Dr.....

Maitre de conférences

Président

Dr. BERRANI Djamel

Maitre de conférences

Rapporteur

Dr.....

Maitre de conférences

Examineur

Année Universitaire 2022/2023

REMERCIONS

REMERCIONS DIEU LE SEIGNEUR DES MONDES ET LA PRIÈRE
ET LA PAIX SUR ASHRAF LES PROPHÈTES ET LES
MISSIONNAIRES SEYDNA MUHAMMAD ET SUR SON DIEU ET SES
COMPAGNONS ET CEUX QUI LES ONT SUIVIS AVEC
BIENVEILLANCE AU JOUR DE LA RELIGION, APRÈS..

JE REMERCIE DIEU TOUT-PUISSANT POUR SA GRATITUDE, QUI
M'A PERMIS D'ACCOMPLIR CETTE ŒUVRE GRÂCE À LUI.

ET PUIS JE REMERCIE CES BONS GARS QUI M'ONT DONNÉ UN
COUP DE MAIN, AU COURS DE CETTE PÉRIODE, DONT LE
PREMIER EST MON MASTER OF THESIS VIRTUE DR. DJAMEL
BARANYC QUI N'A MÉNAGÉ AUCUN EFFORT POUR NOUS
AIDER,

JE REMERCIE ÉGALEMENT L'UNIVERSITÉ ELSHAHID HAMMA
LAKHDAR EL-OUED, DIRIGÉE PAR SON EXCELLENCE OMAR
FARHATI, RECTEUR DE L'UNIVERSITÉ, ET SON EXCELLENCE
LE DOYEN DU COLLÈGE, CHAMSA ALI. NOUS REMERCIONS EN
PARTICULIER LA PORTE DE L'ESPOIR DANS L'ÉTAT D'EL-OUED
A LHAQQA, DIRIGÉE PAR LE DR. FARHAT MOHAMED FOUAD
ET TOUT SON PERSONNEL.

DÉDICACE

C'EST BONNE NUIT SEULEMENT MERCI ET BONNE JOURNÉE NE VOUS OBÉIT. ET LE
MOMENT EST HEUREUX SEULEMENT AVEC VOTRE MÉMOIRE. ET L'AU-DELÀ NE
SERA HEUREUX QU'AVEC VOTRE PARDON. ET LE CIEL EST SEULEMENT BON DE
VOUS VOIR.

QUI A REÇU LE MESSAGE? IL A FAIT LE SECRÉTARIAT. CONSEILLER LA NATION.
AU PROPHÈTE DE LA MISÉRICORDE ET DE LA LUMIÈRE DES DEUX MONDES SEYDNA
MUHAMMAD ALI LA MEILLEURE PRIÈRE ET LA LIVRAISON
À CELUI QUI ME FERA TOMBER L'AMOUR, À CELUI QUE JE SUIS POUR NOUS DONNER
UN MOMENT DE BONHEUR. A CEUX QUI ONT RÉCOLTÉ DES ÉPINES DE DERBY POUR
PAVER LA VOIE DE LA SCIENCE POUR MOI AU GRAND CŒUR PAPA GALI
AU SYMBOLE DE L'AMOUR ET DU BAUME DE GUÉRISON POUR LE CŒUR STABLE
INCHANGÉ, À CET ARBRE DONT LES BRINDILLES TENDENT AUX CIEUX POUR ÊTRE
SOUMIS À LA PRIÈRE POUR MOI, À CEUX QUI SE SONT SACRIFIÉS POUR ÉCLAIRER
MON CHEMIN ET POUR ÊTRE AU SOMMET DU MOURAJI.. MAMAN CHÉRIE
À SINDI ET MA FORCE ET MON SANCTUAIRE APRÈS DIEU À CEUX QUI SONT PLUS
PROCHES DE MOI QUE MON ÂME À CEUX QUI TIRENT MON RÉCONFORT ET MA
PERSISTANCE MES FRÈRES ALA EDIN, MOHAMMED AL-BASHIR
AUX VENTS DE MA VIE À L'AMOUR REMPLI DE BELLES ÉMEUTES À MES CHERS
DERBY ET SŒURS FÉMININES : NAJAT, RADJA, IMENE, BARAA
À L'ÂME SOEUR ET AMIE DU TEMPS AVEC SON DOUX ET AMER, À CELUI QUI A
TOUJOURS ÉTÉ LE PREMIER DANS MON SOUTIEN ET ENCOURAGEMENT ET PRIS MA
MAIN VERS CE QUE JE VOULAIS MES CHERS PRÉTENDANTS OUSSAMA
À CELUI QUI CALME LE BRUIT DE MON CŒUR QUAND ILS SE RENCONTRENT... ET
TON ÂME.

A PROXIMITÉ DE LEUR ÂME. MES CHERS AMIS, DHIKRA ,ZOUBAIDAH
AUX MAINS QUI N'ONT JAMAIS ABANDONNÉ ET N'ONT PAS HÉSITÉ À AIDER UN
INSTANT. MES ÉMINENTS PROFESSEURS

✍ ROUMAISSA

DÉDICACE

À L'APPROCHE DE CETTE OCCASION MÉMORABLE DE MA REMISE DES DIPLÔMES, JE SUIS SUBMERGÉ PAR LA GRATITUDE POUR LE SOUTIEN INCROYABLE ET LES SACRIFICES QUI ONT FAÇONNÉ MON PARCOURS ÉDUCATIF. D'ABORD ET AVANT TOUT, JE SUIS ABD ERRAHMANE , JE TIENS À EXPRIMER MA PLUS PROFONDE RECONNAISSANCE À MA FAMILLE, EN PARTICULIER À MA REMARQUABLE MÈRE, DONT LE DÉVOUEMENT ET LES SACRIFICES INÉBRANLABLES ONT ÉTÉ LA FORCE MOTRICE DE MON SUCCÈS.

MAMAN, TON AMOUR, TES CONSEILS ET TES SACRIFICES ILLIMITÉS ONT NOURRI MES RÊVES ET M'ONT PERMIS D'ATTEINDRE CETTE ÉTAPE CRUCIALE DANS MA VIE. VOTRE CROYANCE CONSTANTE EN MOI M'A PROPULSÉ VERS L'AVANT MÊME DANS LES MOMENTS LES PLUS DIFFICILES.

JE TIENS ÉGALEMENT À REMERCIER CHALEUREUSEMENT MES PROFESSEURS, QUI ONT JOUÉ UN RÔLE DÉTERMINANT DANS MA CROISSANCE SCOLAIRE. VOTRE EXPERTISE, VOTRE PASSION ET VOTRE ENGAGEMENT INÉBRANLABLE À L'ÉGARD DE L'ÉDUCATION M'ONT INSPIRÉ DE BIEN DES FAÇONS. CHACUN D'ENTRE VOUS A JOUÉ UN RÔLE VITAL DANS LA FORMATION DE MES CONNAISSANCES, EN SUSCITANT MA CURIOSITÉ ET EN M'INCULQUANT L'AMOUR DE L'APPRENTISSAGE. VOS CONSEILS ET VOTRE SOUTIEN SONT ALLÉS AU-DELÀ DE LA SALLE DE CLASSE, ME FOURNISSANT DE PRÉCIEUSES LEÇONS DE VIE ET ME PRÉPARANT À L'AVENIR. MA FAMILLE ET MES ENSEIGNANTS, VOUS AVEZ ÉTÉ MES PILIERS DE FORCE TOUT AU LONG DE CE PARCOURS ÉDUCATIF. SANS VOTRE SOUTIEN INDÉFECTIBLE ET VOS SACRIFICES, JE NE SERAIS PAS ICI AUJOURD'HUI, EN TRAIN DE TERMINER MES ÉTUDES AVEC FIERTÉ. ALORS QUE J'ENTAME LE PROCHAIN CHAPITRE DE MA VIE, JE PORTE LES LEÇONS, L'AMOUR ET LES CONSEILS QUE VOUS M'AVEZ DONNÉS. MERCI DU FOND DU CŒUR DE M'AVOIR FAÇONNÉ EN LA PERSONNE QUE JE SUIS AUJOURD'HUI.

 **ABDERRAHMANE**

DÉDICACE

DIEU SOIT LOUÉ QUI M'A PERMIS DE VALORISER CETTE ÉTAPE DE MON PARCOURS UNIVERSITAIRE
PAR MES NOTES. CE FRUIT D'EFFORTS ET DE RÉUSSITES EST DÉDIÉ À :

À L'ÂME BÉNIE ET À L'OMBRE QUI PROTÈGE TOUT LE MONDE DU MAL, MA GRAND-MÈRE BIEN-
AIMÉE, QUI N'A PAS D'ÉGALE, QUE DIEU PROLONGE SA VIE ET LUI ACCORDE LA SANTÉ ET LE BIEN-
ÊTRE.

A CELUI QUI M'A APPRIS À DONNER SANS ATTENDRE.. A CELUI DONT JE PORTE LE NOM AVEC
FIERTÉ.. JE DEMANDE À DIEU DE ME DONNER
VOTRE VIE POUR VOIR LES FRUITS QUI VIENNENT D'ÊTRE RÉCOLTÉS APRÈS UNE LONGUE
ATTENTE..MON CHER PÈRE.

A MON ANGE DE LA VIE, AU SENS DE L'AMOUR ET DE LA TENDRESSE, AU SOURIRE DE LA VIE ET AU
SECRET DE L'EXISTENCE, À CELUI DONT LA SUPPLICATION A ÉTÉ
LE SECRET DE MON SUCCÈS ET DE SA TENDRESSE EST UN BAUME CHIRURGICAL POUR LA PLUS
PRÉCIEUSE DES PERSONNES... MA MÈRE BIEN-AIMÉE.

A MON ÂME SŒUR, LA MOITIÉ DE MON SOURIRE, ET LA FLEUR QUI NE SE FANE JAMAIS, MA SŒUR :
HADIL.

A QUI JE LÈVE LA TÊTE ET UN REMÈDE AU MAL, MES FRÈRES, MA CONSOLATION : MON SECOND
PÈRE, ALA EDDIN. MON PETIT EST GÂTÉ AKRAM.

A CELUI QUI M'A DONNÉ UNE FORTE IMPULSION ET UN LARGE SOUTIEN A CELUI QUI M'A FACILITÉ
LA DIFFICULTÉ ET M'A FACILITÉ TOUTES LES ÉPREUVES A TOI, Ô COMPAGNON DE MON CHEMIN,
MON CHER ÉPOUX : THABET.

À CEUX QUI M'ONT PLU DANS LES CHEMINS DE LA VIE DOUCE ET TRISTE QUI S'EST ÉCOULÉE, LA
COMPAGNE DE LA NOTE : ROUMAÏSSA.

MA SŒUR QUE MA MÈRE N'A PAS ENFANTÉE : SAMAH. ET TOUT LE MONDE VOUS CONNAISSEZ
CHACUN PAR SON NOM.

JE VOUDRAIS PRENDRE UN MOMENT POUR HONORER ET EXPRIMER MA PROFONDE GRATITUDE AU
REGRETTÉ DR BEN HAOUA OTHMAN. BIEN QUE VOUS NE SOYÉZ PLUS PHYSIQUEMENT PRÉSENT,
VOTRE HÉRITAGE VIT DANS LE CŒUR ET L'ESPRIT DE TOUS CEUX QUI ONT EU LA CHANCE DE VOUS
CONNAÎTRE.

ENFIN, JE REMERCIE TOUS CEUX QUI M'ONT APPRIS ET M'ONT APPORTÉ DES CONNAISSANCES, ET
TOUS CEUX QUI M'ONT SOUTENU PENDANT MES ÉTUDES.

 ZOUBAIDA

DÉDICACE

À L'APPROCHE DE CETTE OCCASION MÉMORABLE DE MA REMISE DES DIPLÔMES, JE SUIS SUBMERGÉ PAR LA GRATITUDE ENVERS MA FAMILLE QUI SE TROUVE LOIN DE MOI ET QUI A JOUÉ UN RÔLE CRUCIAL DANS MON PARCOURS ÉDUCATIF. TOUT D'ABORD, JE TIENS À EXPRIMER MA PLUS PROFONDE RECONNAISSANCE À MA REMARQUABLE MÈRE, DONT LE DÉVOUEMENT ET LES SACRIFICES INÉBRANABLES ONT ÉTÉ LA FORCE MOTRICE DE MON SUCCÈS. MAMAN, RIYAD, TON AMOUR, TES CONSEILS ET TES SACRIFICES ILLIMITÉS ONT NOURRI MES RÊVES ET M'ONT PERMIS D'ATTEINDRE CETTE ÉTAPE CRUCIALE DANS MA VIE. MALGRÉ LA DISTANCE QUI NOUS SÉPARE, VOTRE CROYANCE CONSTANTE EN MOI M'A PROPULSÉ VERS L'AVANT, MÊME DANS LES MOMENTS LES PLUS DIFFICILES. MA FAMILLE, VOUS ÊTES MES PILIERS DE FORCE TOUT AU LONG DE CE PARCOURS ÉDUCATIF. SANS VOTRE SOUTIEN INDÉFECTIBLE ET VOS SACRIFICES, JE NE SÉRAIS PAS ICI AUJOURD'HUI, EN TRAIN DE TERMINER MES ÉTUDES AVEC FIERTÉ. ALORS QUE J'ENTAME LE PROCHAIN CHAPITRE DE MA VIE, JE PORTE AVEC MOI LES LEÇONS, L'AMOUR ET LES CONSEILS QUE VOUS, MA FAMILLE, M'AVEZ DONNÉ. DU FOND DU CŒUR, RIYAD, JE VOUS REMERCIE D'AVOIR FAÇONNÉ LA PERSONNE QUE JE SUIS AUJOURD'HUI MALGRÉ LA DISTANCE QUI NOUS SÉPARE.

 RIYAD

DÉDICACE

LOUANGES ET REMERCIEMENTS À DIEU, QUI M'A PERMIS D'ATTEINDRE CE STADE

DE RÉUSSITE ET D'EXCELLENCE

AU DÉBUT DE CETTE DÉDICACE, JE TIENS À REMERCIER MA MÈRE, DONT LA
SUPPLICATION A ÉTÉ LE SECRET DE MA RÉUSSITE, ET MON PÈRE, DONT JE PORTE
LE NOM AVEC FIERTÉ, ET MES SŒURS ET FRÈRES POUR M'AVOIR SOUTENU TOUT
AU LONG DE MES ÉTUDES DEPUIS LE DÉBUT, ET MA GRATITUDE À EUX POUR LEUR

SOUTIEN CONTINU

ET UN MERCI SPÉCIAL À MES AMIES, TELLIA ET NECIRA, QUI M'ONT SOUTENU
PENDANT MA PHASE

ACADÉMIQUE, GRÂCE À ELLES, APRÈS DIEU, LA RÉUSSITE

 **BESMA**

Liste des symboles et abréviations :

DAS : Résistance systémique acquise

NPs : Nanoparticules

NM : Nanomatériaux

IONPs : Iron Oxyde Nanoparticules

MNPs : Nanoparticules Magnétiques

VDOS : Densité d'états Vibratoires (Vibration Densité of States)

Fe : Fer

α -Fe₂O₃ : Hématite

Fe₃O₄ : Magnétite

AA : Acide Ascorbique

APR : Puissance Anti-Radicalaire

CAT: Capacité Antioxydante Total

FRAP: Ferric Reducing Antioxidant Power

DPPH : 1,1- Diphenyl-2-Pierylhydrazyl

TPTZ : 2, 4,6-Tris (2-Pyridyl) -1, 3,5-S-Triazine

E FeSO₄ : Équivalent Sulfate de Fer

EAA : Équivalent Acide Ascorbique

IC₅₀ : Concentration Inhibitrice

UV-Vis : Ultraviolet-Visible

DRX : Diffraction des Rayons X

EDX : Analyse par Rayons X à Dispersion d'énergie

FTIR : Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier

MEB : Microscope Electronique à Balayage

MET : Microscopie Electronique à transitions

SEM: Scanning Electron Microscope

JCPDS: Joint Committee for Powder Diffraction Standard

Nm : Nanomètre

OH : Groupe hydroxyle

RO : Radicaux oxyle

ROO : Peroxyl

PKa : Constant d'ionisation

HEBM : Le broyage à billes à haute énergie

ThO₂: Thorium dioxide

Y₂O₃: Yttrium oxide

Al₂O₃: Aluminium oxide

FSP: Flame Spray Pyrolysis

TEA : Triéthanolamine

PH : Constant d'acidité

H₂ : hydrogène

IRM : Imagerie par résonance magnétique

FeOOH : Oxide-hydroxide

Fe²⁺ : Ion ferreux

PbS : sulfanylidèneplomb

O-H : Hydroxide

CH₂ : Méthane

NP EL-Fe : Nanoparticules de fer d'eucalyptus

C : Carbone

DCO : Demande Chimique en Oxygène

N : Azote

P : Phosphore

MK-FeNPs : Nanoparticules de Fer de Murraya Koenigii

AI-FeNPs : Nanoparticules de Fer de azadiracta indica

MC-FeNPs : Nanoparticules de Fer de mangolia champaca

MI-FeNPs : Nanoparticules de Fer de mangi fera indica

Résumé

Cette note vise à étudier l'utilisation de nanoparticules de fer extraites de composés phénoliques contenus dans cinq feuilles de plantes différentes.

Des composés phénoliques ont été extraits de ces plantes et les nanoparticules ont été caractérisées à l'aide de techniques analytiques avancées telles que la diffraction des rayons X (XRD), l'infrarouge (IR), la microscopie électronique à transmission (TEM) et la microscopie électronique à balayage (SEM). Les résultats prometteurs des nanoparticules de fer ont montré leur capacité à éliminer les métaux lourds, les colorants et de nombreux polluants des eaux usées. De plus, son application en tant que photo catalyseur pour l'analyse de composés a été explorée. Par conséquent, les nanoparticules de fer extraites de ces plantes peuvent être considérées comme une option durable et efficace dans le domaine du traitement des eaux usées, et pour répondre aux besoins biologiques et techniques de ce domaine.

Mots Clé : L'EAU, SYTHESE VERT, NANOPARTICULES DE FER, LES PLANTES

ملخص

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة استخدام جسيمات الحديد النانوية المستخلصة من المركبات الفينولية المحتواة في خمسة أوراق نباتات مختلفة.

حيث تم استخراج المركبات الفينولية من هذه النباتات وتم تمييز الجسيمات النانوية باستخدام تقنيات تحليلية متقدمة مثل حيود الأشعة السينية (XRD) والأشعة تحت الحمراء (IR) والمجهر الإلكتروني الناقل (TEM) والمسح المجهر الإلكتروني (SEM). أظهرت النتائج الواعدة لجسيمات الحديد النانوية قدرتها على إزالة المعادن الثقيلة والأصبغة والعديد من الملوثات في مياه الصرف الصحي. بالإضافة إلى ذلك، تم استكشاف تطبيقها كمحفز ضوئي لتحليل المركبات. لذلك، يمكن اعتبار جسيمات الحديد النانوية المستخرجة من هذه المحطات خيارًا مستدامًا وفعالًا في مجال معالجة مياه الصرف الصحي، وتلبية الاحتياجات البيولوجية والتقنية لهذا المجال.

الكلمات المفتاحية: الماء – توليف الاخضر –جسيمات الحديد النانوية –النباتات

Sommair

Remercions.....	I
Dédicace.....	II
Liste des symboles et abréviations :.....	VII
Résumé.....	IX
Sommair	XI
Liste des figures	XIV
Introduction	1

Chapitre I

informations générales sur les phénols pour diverses feuilles de plantes vertes

Introduction :.....	5
1.Les plantes :.....	6
1.1. Feuilles de Murraya Koenigii :	6
1.2. Feuilles d'eucalyptus :	6
1.3. Cynara Cardunculus :.....	8
1.4. Feuilles de Cynara cardunculus :	8
1.5. Pisum sativum :	9
1.6. Feuilles de mûre des Andes :	10
2-Les composés phénoliques :	12
2.1.Généralités.....	12
2.2. Classification des composés phénoliques :	12
2.3. Les composés non-flavonoïdes :	13
2.4. Les acides phénoliques :.....	13
2.5. Les stilbènes:.....	14
2.6. Les composés flavonoïdes :	14
3. Propriétés chimiques des composés phénoliques.....	18
3.1. Nucléophilie :	18
3.2. Propriétés réductrices :	18
3.3. Acidité :	19
3.4. Liaison hydrogène :	19
3.5. Polarisabilité :	20
Bibliographies :	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.

Chapitre II

synthèse vert de nano particules de fer

Introduction :	27
1.1.L'eau :	28
1.2.Définition de la pollution des eaux:	28
1.3.Méthodes de traitement de l'eau:	28
2.Définition des nanoparticules:	29
2.1.La classification des nanomatériaux :	29
3. Comment atteindre l'échelle nanométrique de la matière en nanotechnologie :	30
3.1.Le chemin de haut en bas :	30
4.Méthodes de synthèse des nanoparticules:	30
4.1.Méthode physique :	30
4.2.Méthodes chimiques :	34
5. Approche verte pour la synthèse des nanoparticules :	37
5.1.Plantes et produits photochimiques :	38
6.Applications de nanoparticules de fer :	38
6.1 Applications magnétiques et électriques :	38
6.2.Applications catalytiques :	39
6.3.Applications médicales :	39
6.4.Amélioration du contraste IRM :	40
6.5.Pour remédier à la pollution de l'eau :	40
7.Concept de l'oxyde de fer :	41
7.1.Nanoparticules d'oxyde de fer :	41
7.2. Composition Magnétite et Maghemite :	41
7.3.Composition hématite :	41
8.Propriétés des nanoparticules de fer :	42
8.1.Propriétés magnétiques :	42
8.2.Propriétés chimiques :	42
8.3.Propriétés optiques de l'hématite dans la lumière ultraviolette et visuelle:	43
9.Applications des nanoparticules d'oxydes de fer :	43
9.1 Applications biologiques :	43
9.2.Applications environnementales :	43
9.3.Applications techniques :	44
Bibliographie :	46

Chapitre III

techniques de caractérisation

Introduction	55
--------------------	----

1. Principe de la spectroscopie infrarouge :	56
2. Technique UV-Visible :	58
2.1 Principe :	59
2.2.é. Caractérisation par adsorption :	59
3. La diffraction par rayons X :	60
Conclusion.....	63
Bibliographie :	64

Chapitre IV

Synthèse verte, caractérisations et traitement des eaux usées par nanoparticules de fer

Introduction	66
1. Exemple de la synthèse verte de nanoparticules de fer	67
1.3. Synthèse verte de nanoparticules de Fe à l'aide d'extraits de feuilles d'eucalyptus pour le traitement d'eaux usées animales	67
4. Synthèse verte de nanoparticules de Fe ₃ O ₄ : Évaluation de leur activité catalytique dans la dégradation du bleu de méthylène.....	69
4.1 Etude par diffraction des rayons X.....	69
4.2 Etude morphologique	70
4.3 Résultats de la dégradation du bleu de méthylène par nanoparticules de Fe ₃ O ₄	70
5. Synthèse biogénique de nanoparticules de Fe ₃ O ₄ à l'aide d'un extrait de pelures de Pisum sativum : Dégradation du colorant Méthyl orange.....	71
5.1. Étude par FTIR.....	71
5.2 Etude par diffraction des rayons X.....	72
5.3 Etude morphologique	73
5.4 Résultats de la dégradation du Méthyl orange par nanoparticules de Fe ₃ O ₄	73
6. Synthèse verte et activité photo catalytique de nanoparticules de magnétite (Fe ₃ O ₄) à partir de l'extrait de feuilles de mûre des Andes	74
6.1 Etude par spectroscopie UV-visible.....	74
6.2 Etude morphologique	75
6.3 Etude par diffraction des rayons X.....	76
6.4 Étude par FTIR.....	76
6.5 Résultats de l'activité photo catalytique des nanoparticules de Fe ₃ O ₄	77
7. Conclusion.....	78
Bibliographie :	79
Conclusion.....	80

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: La feuille de cari (<i>Murraya koenigii</i>)	6
Figure I.2. : feuilles d'eucalyptus	8
Figure I.3 : Feuilles de <i>Cynara cardunculus</i>	9
Figure I.4 : Les pois verts (<i>Pisum sativum</i> L)	10
Figure I.5 : Feuilles de mûre des Andes.....	10
Figure I.6 : Photochimique majeur de la mûre des Andes et des feuilles.	11
Figure I.7 : Classification et structures chimiques des composés phénoliques.....	13
Figure I.8 : Squelette des acides phénoliques (a: acides hydroxy benzoïques, b: acides hydroxy cinnamiques).	14
Figure I.9: Squelette des Stilbènes.	14
Figure I.12: Squelette des flavonols.....	16
Figure I.13 : Squelette des flavones.	16
Figure I.14 : Squelette des flavanones	17
Figure I.15 : Squelette des isoflavones.....	18
Figure I.16 : Oxydation mono-électronique d'un phénol et formes mésomères du radical aryloxy.....	19
Figure I.17 : Structure chimique de l'ion phenoxyde	19
Figure I.18: Exemple de liaisons hydrogènes intramoléculaire de la catéchine.	20

Chapitre II

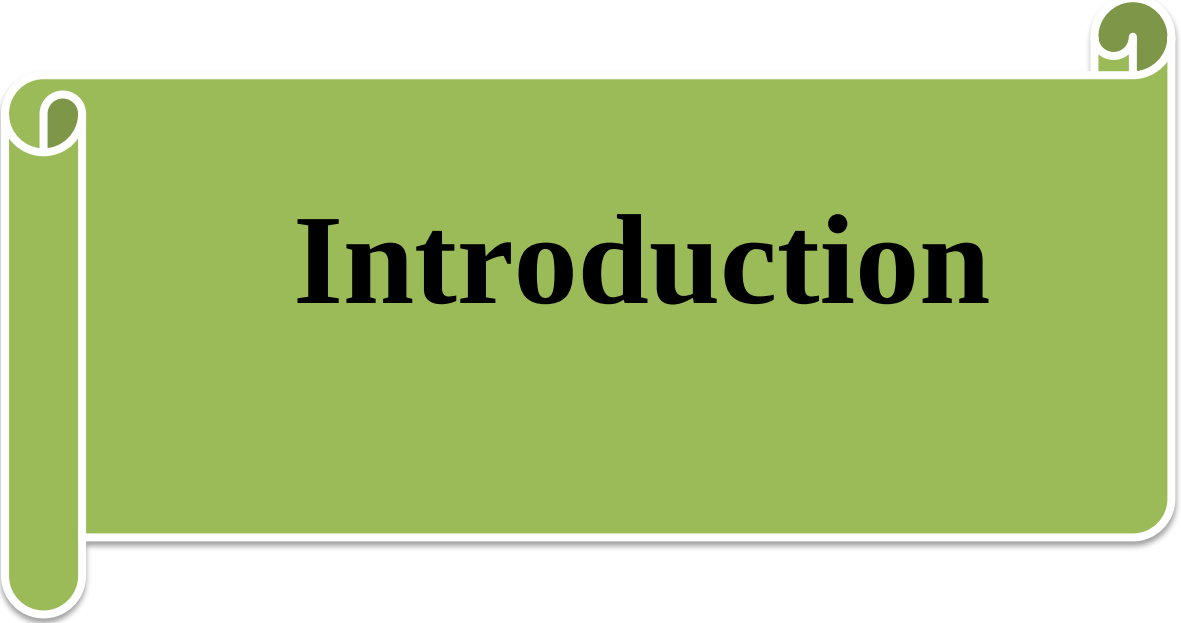
Figure II.2 : Types de nanomatériaux par dimension.....	29
Figure II.3 :Schéma de principe du mouvement du mélange bille et poudre pour la production de nanoparticules.....	31
Figure II.4 : Schéma de la synthèse par pyrolyse par pulvérisation à la flamme.	32
Figure II.5 : Schéma d'une configuration expérimentale à l'échelle du laboratoire de la technique d'électro nébulisation	33
Figure II.6 : montre comment les nanoparticules sont formées à l'aide de la technologie d'électro pulvérisation	34
Figure II.7 : Schéma de principe des différentes étapes du procédé gel-sol du précurseur au gel	35
Figure II.8 : (a) un système typique de micelles inversées, (b) les différentes étapes impliquées dans.....	37
(c) Un seul processus de microémulsion et (c) la séquence de réaction impliquée dans la synthèse de nanoparticules en émulsion	37

Chapitre III

Figure III.1 : Un spectromètre infrarouge	56
Figure III.2: Principe d'un spectromètre à filtres optiques	57
Figure III.3 : Exemple d'un spectromètre à filtres conçu pour l'analyse « en ligne ».....	58
Figure III.4 . Principe d'un spectromètre à monochromateur.....	58
Figure III.5 : Schéma du principe de la spectrophotométrie UV-visible	59
Figure III. 6 : Plans inter réticulaires.....	61
Figure III. 6 : (a) diffractomètre à rayon X (b) le schéma de principe d'un diffractomètre.....	62

Chapitre IV

Figure IV.1 : Diagrammes DRX des nanoparticules (EL-Fe) préparées	68
Figure IV.2 : Spectre FTIR de l'extra (EL) et de nanoparticules (EL-Fe)	68
Figure IV.3 : Efficacité de l'élimination de l'azote total, du phosphore et de la DCO dans les eaux usées	69
Figure IV.4 : Diagrammes DRX des nanoparticules de Fe ₃ O ₄	70
Figure IV.5 : (a) Image MEB et (b) Analyse chimique EDX des nanoparticules de Fe ₃ O ₄ [4] ..	70
Figure IV.6 : (a) Spectre UV-Vis des échantillons Fe ₃ O ₄ , Fe ₃ O ₄ -MB et BM, (b) Dégradation du bleu de méthylène par les nanoparticules de Fe ₃ O ₄	71
Figure IV.7 : Spectre FTIR de : (a) l'extra de <i>Pisum sativum</i> et (b) des nanoparticules PS-Fe ₃ O ₄	72
Figure IV.9 : (A) Images TEM de nanoparticules de PS-Fe ₃ O ₄ (B) Analyse EDX de l'échantillon correspondant	73
Figure IV.10 : Spectrophotomètre UV-vis du colorant méthyl orange en présence de nanoparticules de PS- Fe ₃ O ₄ avec différents intervalles de temps 0, 15, 30 et 60 min	74
Figure IV.11 : Spectres d'absorption UV-vis de (a) l'extra ABL, (b) nanoparticules de Fe ₃ O ₄ non purifié et (c) nanoparticules de Fe ₃ O ₄ purifié	75
Figure IV.12 : Images TEM des nanoparticules de Fe ₃ O ₄	75
Figure IV.13 : Diagramme DRX des nanoparticules de Fe ₃ O ₄	76
Figure IV.14 : Spectres FTIR des nanoparticules de Fe ₃ O ₄	77



Introduction

Introduction

La pollution de l'eau est l'un des problèmes les plus écologiques auxquels le monde est actuellement confronté, ce qui entraîne une détérioration de la qualité de l'eau et de son impact sur l'environnement et la santé publique. Les techniques novatrices de lutte contre la pollution de l'eau sont parmi les outils les plus importants qui peuvent être utilisés pour réduire ce problème environnemental.

Le sujet de la synthèse de nanoparticules de fer à partir de l'extrait de plantes pour améliorer la qualité de l'eau est un sujet très intéressant dans le monde de la recherche scientifique. La pollution de l'eau est l'un des principaux défis environnementaux auxquels l'humanité est confrontée à l'époque actuelle, en particulier dans les zones reculées qui souffrent d'un manque de ressources et de services de base. Par conséquent, les scientifiques et les ingénieurs recherchent de nouveaux moyens efficaces d'améliorer la qualité de l'eau et de la rendre plus saine et plus propre pour l'utilisation humaine. La technologie de synthèse verte vient pour les nanoparticules de fer, est parmi ces technologies innovantes. L'idée de cette technique est d'utiliser les plantes pour synthétiser les nanoparticules de fer, en utilisant des substances naturelles et non toxiques. La synthèse verte des nanoparticules est une technologie moderne qui est encore en cours de développement et d'exploration et qui est très prometteuse dans le domaine du traitement de la pollution des eaux. Cette technique peut être utilisée dans divers processus tels que la purification des eaux usées et de l'eau industrielle lourde, ainsi que dans d'autres domaines tels que l'agriculture et la science de l'environnement et pour l'utilisation et efficaces dans le traitement de la pollution de l'eau. En plus de l'utilisation des nanoparticules de fer dans le traitement de l'eau, cette technologie offre la possibilité de son utilisation dans plusieurs autres domaines, tels que le développement de médicaments et la production d'aliments fonctionnels. En améliorant la technique de synthèse des nanoparticules de fer à partir d'autres sources, des applications plus efficaces peuvent être obtenues.

Ce mémoire comporte quatre chapitres :

Chapitre I : Informations générales sur les phénols pour diverses feuilles de plantes vertes

Chapitre II : Synthèse vert de nano particule de fer.

Chapitre III : technique de caractérisation

Chapitre IV : Synthèse verte, caractérisations et traitement des eaux usées par nanoparticules de fer

En fin une conclusion générale.

Chapitre I
Informations générales sur les phénols
Pour diverses feuilles de plantes vertes

Introduction :

Ce chapitre se penche sur le domaine des composés phénoliques, métabolites secondaires Largement présents dans les plantes, soulignant leur importance dans la recherche au cours de la dernière décennie. Ces composés possèdent une structure de cycle aromatique avec au moins un substituant hydroxyle, et leur potentiel en tant que molécules antioxydantes dépend du nombre et de la position des groupes hydroxyles dans leur structure chimique.

Les composés phénoliques ont retenu une attention considérable en raison de leur nature polyvalente et de leurs divers effets biologiques. Il a notamment été signalé qu'ils présentent des propriétés antioxydantes et jouent un rôle dans l'atténuation de la production de résistance systémique acquise (DAS) et d'ions métalliques chélatés dans les modèles in vitro et in vivo. De plus, les phénoliques présentent un large éventail d'activités biologiques, y compris des propriétés antimicrobiennes et anticancéreuses. Ils ont également démontré leur potentiel en tant qu'agents neuroprotecteurs contre des maladies neurodégénératives comme la maladie d'Alzheimer et la maladie de Parkinson.

Tout au long de ce chapitre, nous explorerons les caractéristiques et les propriétés générales des composés phénoliques, en insistant sur leurs rôles divers dans la biologie végétale. Bien que ne pas étudier les phénoliques de plantes spécifiques, nous allons discuter de plusieurs plantes notables, y compris *Murraya Koenigii* feuilles, *Eucalyptus* feuilles, Feuilles de *cynara cardunculus*, *Pisum sativum* peau, et les feuilles de mûre andine, qui servent d'exemples pour illustrer la présence et l'importance potentielle des composés phénoliques dans diverses sources botaniques. En approfondissant la compréhension générale des phénoliques et de leurs effets biologiques, nous cherchons à fournir des informations précieuses sur l'importance de ces composés dans le métabolisme des plantes et leurs applications potentielles dans différents domaines.

1. Les plantes :

1.1. Feuilles de *Murraya Koenigii* :

La feuille de cari (*Murraya koenigii*), membre de la famille des Rutaceae, qui comprend 150 genres et 1600 espèces [1], est indigène en Asie du Sud, en particulier en Inde, au Sri Lanka et au Bangladesh [2]. *Murraya koenigii*, connue sous le nom de Kari dans la littérature tamoule et kannada, a une histoire qui remonte au 1er et au 4e siècle après JC et a été reconnue pour ses capacités d'aromatisation exceptionnelles [3]. L'arôme et le goût délicieux de la feuille de cari peuvent être attribués à ses composants clés, y compris la Pinene, Sabinene, Caryophyllène, Cardinol et Cardinene [4]. Au-delà de son attrait culinaire, *Murraya koenigii* possède un éventail de produits phytochimiques bioactifs, tels que des alcaloïdes, des huiles essentielles, des phénoliques, des minéraux, des protéines, des terpénoïdes, du tocophérol, du β -carotène et de la lutéine [5]. Qu'elle soit utilisée fraîche, séchée, en poudre ou cuite, cette plante polyvalente trouve des applications sous diverses formes. En particulier, les huiles essentielles extraites de *Murraya koenigii* sont utilisées dans la formulation de crèmes de protection solaire et de traitements contre l'érythème, ainsi qu'à des fins aromatiques dans l'industrie du savon et des cosmétiques [3]. De plus, les produits industriels dérivés de la plante à feuilles de cari comprennent une huile volatile, du glycoside cristallin et de la murragine obtenue à partir de ses fleurs (Pharmacognosie of Ayurvedic Drugs, 1957)

Considérée comme une plante médicinale de grande valeur, *Murraya koenigii* est depuis longtemps utilisée dans les systèmes de soins de santé primaires traditionnels des pays en développement [5]. Ses composés bioactifs ont joué un rôle crucial dans ces anciennes pratiques de guérison, offrant une richesse de potentiel thérapeutique qui s'étend sur plusieurs générations



Figure I.1 : La feuille de cari (*Murraya koenigii*)

1.2. Feuilles d'eucalyptus :

L'eucalyptus, un genre de plantes à fleurs appartenant à la famille des Myrtacées, est originaire d'Australie et comprend environ 700 espèces. Ces grands arbres sempervirents sont

largement cultivés dans le monde entier en raison de leur gamme diversifiée de produits de valeur, y compris l'huile, la gomme, la pâte, le bois, la médecine et l'esthétique. Parmi celles-ci, l'huile essentielle dérivée de son feuillage revêt une importance primordiale et trouve une application étendue dans les industries alimentaires, parfumerie et pharmaceutique.

L'huile possède un large spectre d'activités biologiques, présentant des propriétés antimicrobiennes, fongicides, insecticides, insectifuges, herbicides, acaricides et nématiques. [6] La polyvalence de l'huile essentielle d'eucalyptus a suscité beaucoup d'attention de la part des chercheurs, en raison de sa diversité de potentiels biologiques. Des études ont révélé son efficacité antibactérienne remarquable contre les bactéries Gram positif et Gram négatif, ce qui en fait un candidat potentiel pour l'incorporation dans les produits de soins dentaires en raison de ses propriétés anti-inflammatoires [7] [9]. De plus, cette huile essentielle présente un pouvoir antibactérien important dans la lutte contre les maladies parodontales [8]. Les bienfaits de l'huile essentielle d'eucalyptus vont au-delà de ses propriétés antibactériennes, car elle présente un potentiel antifongique et antidiabétique, des activités insecticides et acaricides, des propriétés répulsives et agit comme pesticide biodégradable. Il démontre également son efficacité en tant que bionématique, aide à la lutte contre les phytopathogènes, possède une activité anthelminthique et peut servir d'agent naturel pour la conservation des aliments. En plus de son large éventail d'applications, l'huile essentielle d'eucalyptus est utilisée depuis longtemps en médecine populaire pour soulager les problèmes respiratoires comme le rhume, la toux, l'écoulement nasal, les maux de gorge, l'asthme, la congestion nasale, la bronchite et la sinusite [10].

Les feuilles (Figure I.2) et les extraits de racines d'Eucalyptus présentent une multitude de propriétés bénéfiques, attribuées à la richesse des phyto constituants végétaux. Ces extraits démontrent des activités antioxydantes, anti-inflammatoires et antitumorales, mettant en évidence leur potentiel thérapeutique [11]. De plus, les extraits de feuilles possèdent des propriétés fongicides et sont prometteurs en allélopathie, effets anti-hyper glycémiques, activité anticancéreuse potentielle, effets antibactériens et capacités neuroprotectrices. Cette diversité d'activités positionne les extraits de feuilles comme des ressources précieuses dans divers domaines, notamment les formulations cosmétiques et les additifs alimentaires [12]. De plus, le moignon d'eucalyptus globuleux, qui fait référence à la partie basale de l'arbre et aux racines ligneuses restantes après l'abattage des tiges, présente des activités antioxydantes et antimicrobiennes, ce qui élargit les utilisations potentielles de l'eucalyptus [13].



Figure I.2. : feuilles d'eucalyptus

1.3. Cynara Cardunculus :

Cynara cardunculus L., une plante herbacée vivace originaire de la région méditerranéenne, est cultivée depuis des siècles comme légume en utilisant des techniques de gestion avancées. Dans son cycle de croissance naturelle, la plante mature *C. cardunculus* affiche une croissance robuste, avec des spécimens individuels atteignant 3 mètres de hauteur et s'étendant sur une vaste zone de 1,5 mètre de diamètre. [13]

Cardunculus L. var. *Scolymus* est une riche source de composés phénoliques bioactifs, ainsi que d'inuline, d'autres fibres et de minéraux. Pour cette raison, il est considéré comme un aliment fonctionnel. Plusieurs études ont décrit de nombreuses activités pharmacologiques associées à l'artichaut, comme des effets hépato protecteurs, antioxydants, anti carcinogènes, hypocholestérolémies, antibactériens, anti-VIH, expulseurs de bile et urinaires. En outre, les activités biologiques de l'artichaut ont été rapportées dans diverses études, principalement les effets antioxydants forts, qui sont attribués à des dérivés d'acide café éoylquinique, et des flavonoïdes tels que les glycosides de lutéoline. [14]

1.4. Feuilles de Cynara cardunculus :

Les feuilles de cardon possèdent non seulement une teneur élevée en lactones de sesquiterpène, mais présentent également une gamme de propriétés bénéfiques. Ces lactones de sesquiterpène contribuent aux activités phytotoxiques, cytotoxiques, fongicides, antivirales et antimicrobiennes du cardon [15,16]. Avec leur composition composée de multiples composés bioactifs, les feuilles de cardon affichent des capacités antioxydantes et antimicrobiennes, les positionnant comme ingrédient prometteur dans l'industrie alimentaire. Leur utilisation potentielle dans diverses applications alimentaires souligne les précieuses contributions que les feuilles de cardon peuvent apporter pour améliorer les aspects nutritionnels et microbiens des produits alimentaires.

L'utilisation des feuilles de cardon va au-delà de leurs utilisations traditionnelles, présentant des applications potentielles comme additif alimentaire ou comme ingrédient dans la

création de nouveaux aliments fonctionnels qui offrent des avantages pour la santé [17, 18]. En outre, l'industrie cosmétique est prometteuse pour l'inclusion des feuilles de cardon, étant donné que divers membres de la famille des Asteraceae, à laquelle appartient le cardon, sont déjà employés dans le secteur cosmétique pour leurs composés bioactifs. Cela suggère que les feuilles de cardon pourraient contribuer au développement de produits cosmétiques, en exploitant leurs propriétés bénéfiques pour améliorer les formulations et répondre à la demande croissante de solutions cosmétiques naturelles et efficaces.



Figure I.3 : Feuilles de *Cynara cardunculus*. 64

1.5. *Pisum sativum* :

Les pois verts (*Pisum sativum* L.), l'une des plus anciennes légumineuses domestiquées et la deuxième plus cultivée, ont établi leur place comme plante annuelle de la saison froide dans la famille des légumineuses. Grâce à leur capacité d'adaptation à diverses régions du monde, Réputés pour leur nature riche en protéines, les pois ont gagné en popularité mondiale en raison de leur importance nutritionnelle, leur prix abordable et leur facilité de culture. Au-delà de leur utilisation traditionnelle comme source alimentaire. [18]

❖ **Pelures de *Pisum sativum* :**

Les pelures de pois ont trouvé des applications innovantes, telles que la production de bioéthanol et de bio-char, la récupération de polysaccharides et de glucides, et l'utilisation comme fibres lignocellulosiques alimentaires.

Ces peaux constituent notamment un réservoir précieux de composés bioactifs, en particulier d'agents antioxydants et anticancéreux connus pour combattre les cancers de la prostate, du côlon et du sein. Le dévoilement des activités biologiques de ces peaux et l'exploitation des avantages de leurs déchets offrent d'autres applications médicales

Des recherches récentes ont mis en évidence la présence de composés phénoliques dans le *Pisum sativum* L., démontrant leur activité antioxydante potentielle et leur capacité à récupérer

efficacement les radicaux libres, résistant ainsi à l'oxydation et à la dégradation causées par ces radicaux nocifs. [18]



Figure I.4 : Les pois verts (*Pisum sativum* L) .65

1.6. Feuilles de mûre des Andes :

La mûre des Andes (*Rubus glaucus* Benth.), aussi connue sous le nom d'Andes Berry ou Mora de Castilla [19], est un fruit indigène qui prospère dans toute la vaste région s'étendant du nord des Andes aux hautes terres du sud du Mexique [19]. Ce fruit succulent a trouvé sa place comme culture commerciale dans divers pays, dont la Colombie, l'Équateur, le Guatemala, le Honduras, le Mexique et le Panama [21].

En ce qui concerne sa composition phénolique, les principaux constituants des feuilles de mûre des Andes sont les ellagitannins et les anthocyanes (24, 25). La présence de ces composés contribue à la diversité des caractéristiques favorisant la santé des feuilles. De plus, les feuilles ont une teneur importante en flavonoïdes, en acide ellagique et en tanins, ce qui renforce leur valeur médicinale (26).



FigureI.5 : Feuilles de mûre des Andes

En particulier, les feuilles de la mûre des Andes, en dehors de leurs baies luxuriantes, possèdent une richesse de composés bénéfiques tels que les flavonoïdes, l'acide ellagique et les tanins. Ces feuilles ont été reconnues pour leurs propriétés multiples, notamment leurs effets hypoglycémiques, leur astringence, leurs propriétés anti diarrhéiques et leur potentiel anti-

inflammatoire. Ils sont traditionnellement utilisés pour leurs propriétés anti-inflammatoires des muqueuses buccales et de la gorge, ce qui en fait une ressource précieuse (27).

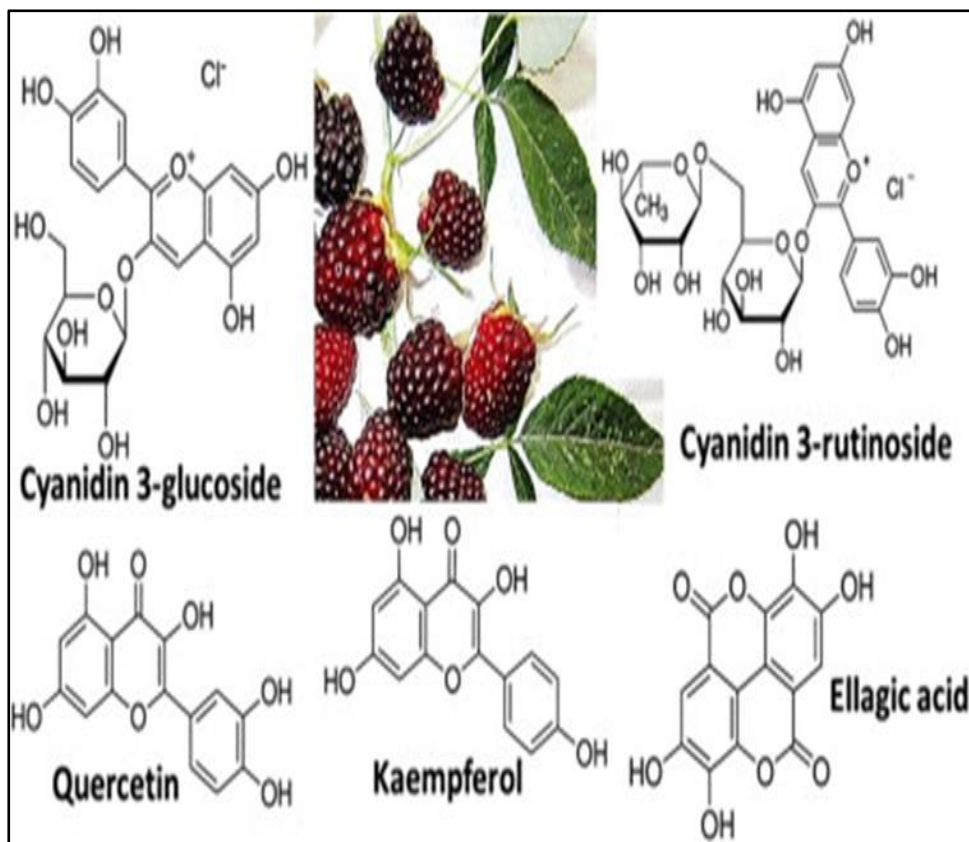


Figure I.6 : Photochimique majeur de la mûre des Andes et des feuilles.

2-Les composés phénoliques :

2.1. Les composés phénoliques

Les composés phénoliques, aussi connus sous le nom de polyphénols, sont une classe de molécules organiques uniques aux plantes et largement répandues dans les tissus forestiers. Ces métabolites secondaires sont essentiels à la survie des plantes et contribuent à divers mécanismes de défense [28].

Les polyphénols contiennent une variété de structures chimiques et sont connus pour varier considérablement selon les espèces végétales.

Il a été démontré que les polyphénols jouent un rôle important dans divers processus physiologiques en tant qu'antioxydants, qui protègent les plantes du stress oxydatif causé par l'environnement, comme les rayons UV, la pollution de l'air et les métaux lourds [29].

En plus de leurs propriétés antioxydante, les polyphénols présentent un large éventail d'activités biologiques.

Ces propriétés ont suscité un intérêt accru pour les applications thérapeutiques potentielles des polyphénols dans la prévention et le traitement de diverses maladies [30...38]

En plus de son rôle protecteur, les polyphénols ont d'autres fonctions importantes dans les plantes. Par exemple, il est responsable de la coloration des tissus végétaux, y compris les feuilles, les fleurs et le bois. Cette couleur est due à la présence de chromophores capables d'absorber la lumière dans le spectre visible [39].

Également responsable du parfum distinctif de nombreuses plantes, [40,41,42].

2.2. Classification des composés phénoliques :

Les composés phénoliques se caractérisent par une grande diversité sur le plan structurel, en fonction de la nature chimique des groupes fonctionnels, allant de molécules phénoliques simples de faible poids moléculaire (<100 g/mol) tels les acides phénoliques à des composés hautement polymérisés (>30 000 g/mol) comme les tanins. [42]

Leur nomenclature est basée sur la distinction entre les composés non-flavonoïdes et les flavonoïdes (*Figure I.7*). [43]

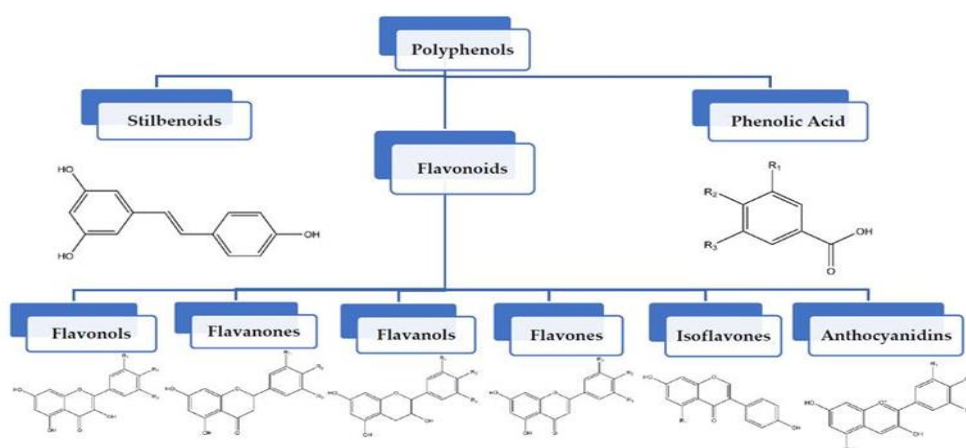


Figure I.7 : Classification et structures chimiques des composés phénoliques⁴³

2.3. Les composés non-flavonoïdes :

Les composés non-flavonoïdes contiennent les acides phénoliques [44], divisés en acides hydroxy benzoïques et acides hydroxy cinnamiques [46], porteurs d'une chaîne [45] latérale insaturée, mais également d'autres dérivés [47] phénoliques comme les stilbènes dont la molécule la plus connue est le resvératrol. [48]

2.4. Les acides phénoliques :

Ils comportent deux groupes : les acides hydrox benzoïques et les acides hydroxy cinnamiques.

2.4.1. Les acides hydrox benzoïques :

Il présente un large éventail d'effets thérapeutiques potentiels utiles dans le traitement du cancer, du diabète, des maladies pulmonaires et cardiovasculaires, ainsi que des effets hépatiques, neuro-et photo protecteurs et des activités antimicrobiennes et anti-inflammatoires. Dans l'ensemble, le potentiel pharmaceutique de l'acide cinnamique peut être attribué à sa capacité à récupérer les radicaux libres. Cependant, des études récentes ont révélé que l'acide cinnamique présente des propriétés pharmacologiques au-delà de celles liées à son activité antioxydante, telles que la capacité d'inhiber la HMG-COA réductase et d'activer la glucokinase, contribuant à réduire l'hypercholestérolémie et l'hyperglycémie, respectivement. (49)

2.4.2 Les acides hydroxy cinnamiques :

Les acides hydroxy cinnamiques (**figure I.8**), un sous-groupe de composés phénoliques, sont des composés aromatiques qui se composent de 9 atomes de carbone et ont une structure de base de C₆-C₃ qui provient de l'acide hydroxy cinnamique. Les structures distinctes des acides hydroxy cinnamiques sont déterminées par les substituants présents sur le cycle aromatique. Les acides hydroxy cinnamiques les plus courants trouvés dans la nature comprennent les acides p-coumarique, férulique, caféique et sinapique parmi les acides cinnamiques. Ces acides hydroxy

cinnamiques possèdent diverses activités biologiques telles que des propriétés antioxydants, anti-inflammatoires et anticancéreuses [50].

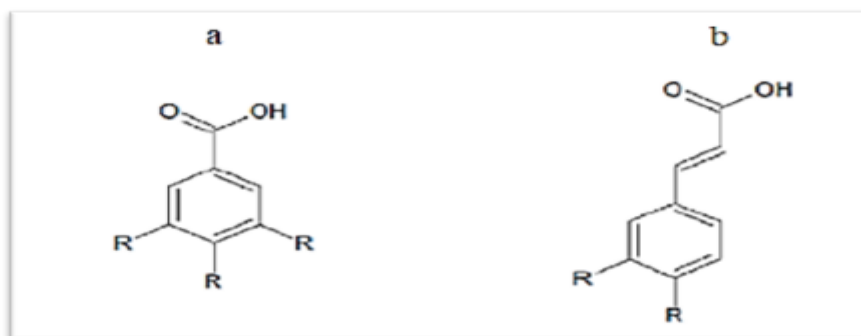


Figure I.8 : Squelette des acides phénoliques (a : acides hydroxy benzoïques, b : acides hydroxy cinnamiques).

2.5. Les stilbènes :

Les stilbènes, un sous-groupe de composés phénoliques, se composent d'au moins deux noyaux aromatiques qui sont reliés par un double liaison, qui leur fournit une réactivité élevée en raison de la résonance des électrons dans toute la molécule. Les stilbènes sont présents dans de nombreuses familles de plantes supérieures, y compris les vitacées, les polygonacées et les fabacées. Parmi les stilbènes, le resvératrol est le plus étudié et largement connu pour ses avantages potentiels pour la santé. [51]

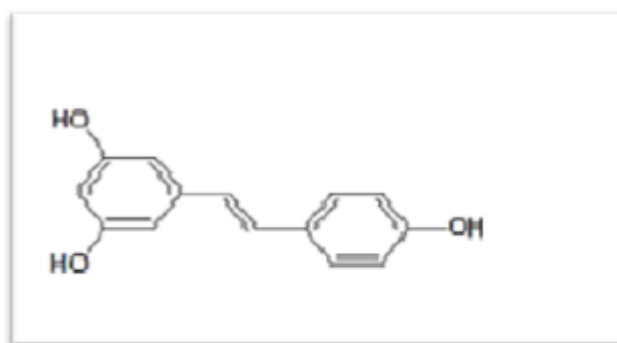


Figure I.9: Squelette des Stilbènes.

2.6. Les composés flavonoïdes :

Les flavonoïdes, un sous-groupe de composés phénoliques, sont nommés d'après le mot latin "flavus", qui signifie jaune, en raison de leur coloration jaune. Il s'agit d'une grande famille de plus de 4000 variétés de métabolites secondaires, représentant la majorité des composés phénoliques dans les plantes [52].

Ces molécules ont un squelette de base composé de deux unités aromatiques avec quinze atomes de carbone, et leur biosynthèse suit une voie complexe. [53]

2.6.1 Les anthocyanes :

Ces molécules faisant partie de la famille des flavonoïdes et capables d'absorber la lumière visible (*Figure I.10*).

Les anthocyanes sont des pigments naturellement colorés et hydrophiles qui donnent ces couleurs allant du bleu, rouge, mauve, rose et orange aux végétaux.

Les anthocyanes, trouvés dans diverses sources végétales, y compris les racines, les tiges, les feuilles et les graines. Sont caractérisés par un noyau aromatique qui est généralement glucosé dans sa structure de base. [54]

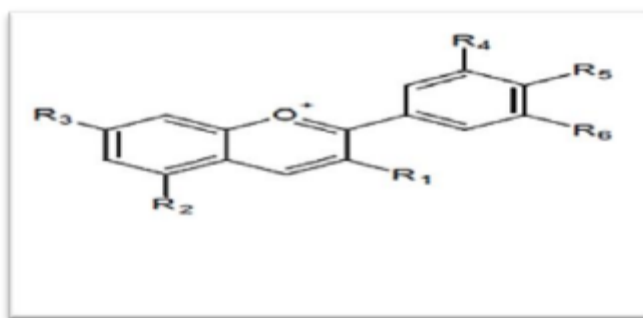


Figure I.10 : *Squelette des anthocyanes.*

2.6.2 Les flavanols :

Contrairement à d'autres classes de flavonoïdes, les flavanols ne sont pas glycosylés dans les aliments (*figure I.11*).

Les flavanols existent sous forme de monomères et sous une forme plus ou moins polymérisée appelée tanins condensés, sont des dimères, oligomères et polymères de catéchines qui sont reliés entre eux par des liaisons entre C4 et C8 ou C6. (L'unité la plus simple des monomères est la catéchine qui est les flavanols principaux des fruits. [55])

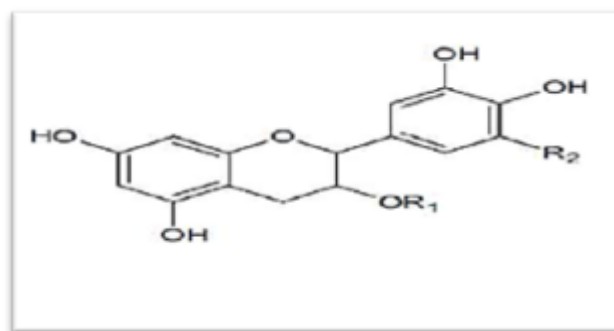


Figure I.11: *Squelette des flavanols*

2.6.3 Les flavanol :

Le flavanol, l'une des principales sous-classes de flavonoïdes, se trouve couramment dans les sources alimentaires et existe souvent sous forme glycosylée (*Figure I.12*). Ces composés

possèdent une puissante activité antioxydant, qui est attribuée à leur structure chimique, leur permettant de récupérer efficacement les radicaux libres. L'activité antioxydant de flavanols a été démontrée pour protéger contre diverses maladies, y compris le cancer, les maladies cardiovasculaires et les maladies neuro dégénératives. [56]

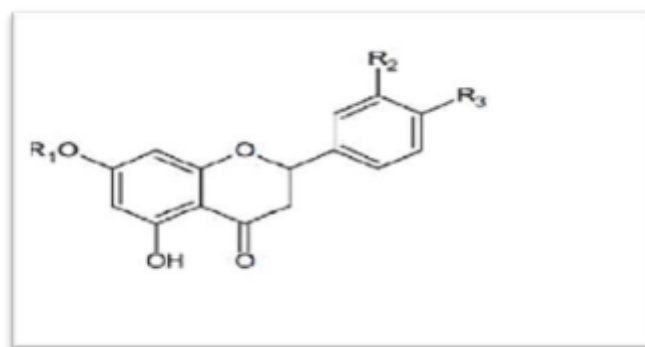


Figure I.12: Squelette des flavonols

2.6.4 Les flavones :

Les flavones, une sous-classe importante de composés phénoliques, sont classés en différents sous-groupes en fonction de leur structure chimique. Les flavones, une des sous-classes les moins communes des flavonoïdes, sont caractérisés par une structure C6-C3-C6 (Figure I.13) et sont présents en petites quantités dans les fruits et légumes.

Certaines saveurs, comme l'apigénine et la lutéoline, sont responsables de la couleur blanche de certaines fleurs, y compris les roses et les œillets. Les flavones possèdent des activités physiologiques remarquables, y compris des propriétés antimicrobiennes et antivirales, ce qui les rend attrayants pour diverses applications dans les industries alimentaires, pharmaceutiques et cosmétiques. [57]

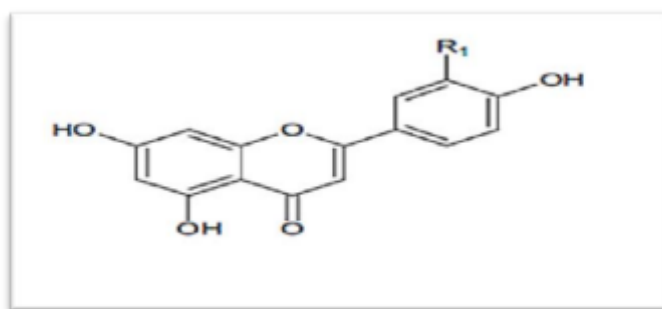


Figure I.13 : Squelette des flavones.

2.6.5 Les Flavanones :

Les flavanones, une sous-classe de flavonoïdes, sont caractérisées par une structure similaire à celle des flavones mais avec une saturation au niveau hétérocyclique (**Figure I.14**). Les flavanones sont présents en grande quantité dans les agrumes, comme les oranges et les citrons, et se retrouvent également dans les tomates et certaines plantes comme la menthe. Les flavanones possèdent plusieurs propriétés bénéfiques, notamment des activités antioxydants, antimicrobiennes et anticancéreuses. Les flavanones notables comprennent la naringenine, l'hesperidine (que l'on trouve dans les oranges) et l'eriodictyol (que l'on trouve dans les citrons), qui ont été étudiés pour leurs avantages potentiels pour la santé. [58, 59]

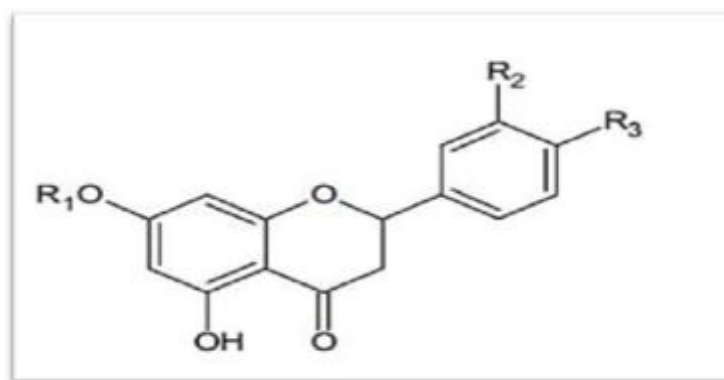


Figure I.14 : Squelette des flavanones

2.6.6 Les isoflavones :

Les isoflavones sont une sous-classe des iso flavonoïdes et se caractérisent par une structure de base avec 15 atomes de carbone (**Figure I.15**). La classe des composés iso flavoniques est classée selon le degré d'oxydation et la présence ou l'absence d'hétérocycles supplémentaires. Cette classification comprend les isoflavones, les iso flavanones, les iso flavanols et les iso flavanes. Les isoflavones se trouvent principalement dans les légumineuses, comme le soja et les produits de soja, qui sont les principales sources alimentaires de ces composés. [60]

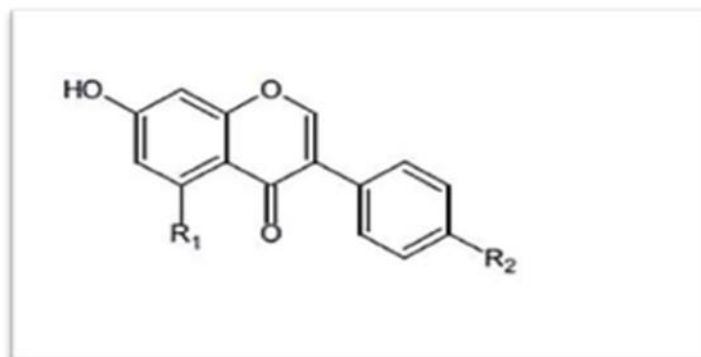


Figure I.15 : Squelette des isoflavones

3. Propriétés chimiques des composés phénoliques

3.1. Nucléophilie :

En termes chimiques, un nucléophile est un composé qui a une affinité pour les noyaux ou les centres chargés positivement, et réagit en donnant des électrons aux composés électrophiles pour former une liaison chimique. L'anneau A de catéchine et d'autres flavanols contient deux centres hautement nucléophiles, C6 et C8, situés en positions ortho et para par rapport à trois groupes hydroxyles ou méthoxyles avec un effet +M. De plus, l'anneau A est activé par la présence d'un groupe de carbone saturé au C4. Ce comportement nucléophile permet des réactions impliquant des substitutions aromatiques électrophiles. [61]

3.2. Propriétés réductrices :

Le potentiel d'ionisation (PI) d'une molécule est l'énergie minimale qu'il faut lui fournir pour lui arracher un électron. Plus un composé aromatique est substitué par des groupements donateurs d'électrons, plus son PI est faible et plus son caractère réducteur est grand. Il peut alors subir une oxydation mono-électronique qui conduit au radical correspondant. Dans le cas d'un phénol Ar-OH, le radical-cation formé est un acide fort qui se déprotone aussitôt pour conduire à un radical phénoxyl ou aryloxyl ArO formé.

Le radical aryloxyl (ArO.) peut être formé directement par transfert d'hydrogène phénolique vers un radical de haute énergie telle que les radicaux oxyle (RO) et Peroxyl (ROO) formés par exemple au cours de l'autoxydation des lipides (*Figure I.16*).

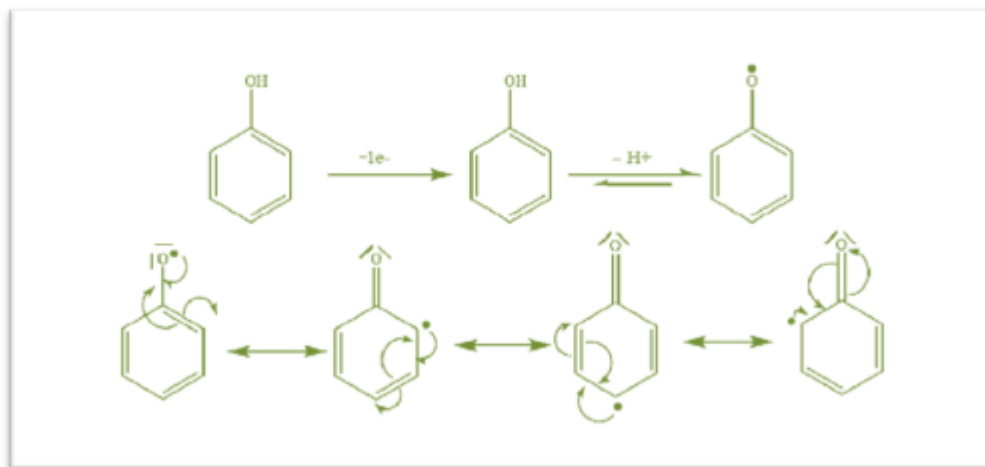


Figure I.16 : Oxydation mono-électronique d'un phénol et formes mésomères du radical aryloxy.

3.3. Acidité :

La présence d'un cycle benzénique et d'un ou plusieurs groupes hydroxyles dans les polyphénols leur confère une propriété importante : l'acidité. Les protons acides labiles de ces composés peuvent entraîner la formation d'anions phénoxydiques stabilisés par résonance, comme le montre la figure (Figure I.17).

Ces anions ont la capacité de perdre un électron, ce qui entraîne la formation d'un radical. [59]

Les composés phénoliques ont une structure aromatique avec des groupes hydroxyles, qui leur confèrent la propriété de l'acidité due aux protons acides labiles, conduisant à la formation d'anions de phénolate stabilisés par résonance. Le radical de phénolate a une réactivité plus faible en raison de sa structure aromatique, qui lui confère une stabilité. Leurs valeurs pKa sont généralement faibles (environ 10), bien que la structure globale de la molécule, la position des groupes phénoliques, et la nature des substituants sur le noyau aromatique peuvent influencer la valeur pKa. [62]

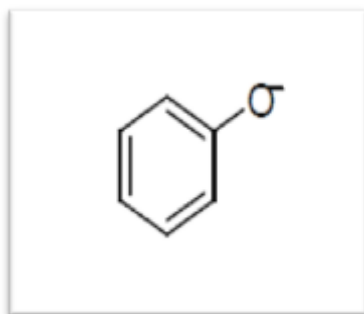


Figure I.17 : Structure chimique de l'ion phénolate

3.4. Liaison hydrogène :

Les composés phénoliques peuvent s'engager dans la liaison inter et/ou intramoléculaire d'hydrogène en plus de la liaison "conventionnelle" d'hydrogène avec des molécules d'eau. Les

groupes hydroxyles adjacents (ortho-substitution) ou les groupes en position ortho par rapport à un groupe carbonyle peuvent former des liaisons hydrogène intramoléculaires communes. Catéchine est un exemple de cette capacité. Il peut créer une liaison hydrogène entre l'oxygène de l'hétérocycle central et un groupe hydroxyle du même cycle, ce qui peut influencer ses propriétés physiques et chimiques (Figure I.18). [63]

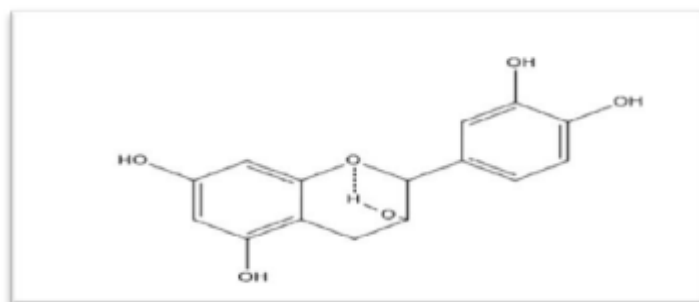


Figure I.18: Exemple de liaisons hydrogènes intramoléculaire de la catéchine.

3.5. Polarisabilité :

La polarité des phénols les rend très solubles dans les solvants polaires, comme l'eau, et leur permet de former de fortes interactions de dispersion moléculaire avec d'autres composés polarisables. C'est parce que les fluctuations électroniques de deux molécules voisines peuvent se coupler, résultant en des forces attrayantes entre eux.

Dans les solutions aqueuses, l'effet hydrophobe renforce l'interaction des phénols avec d'autres entités polarisables, comme les deuxièmes cycles aromatiques. Cet effet est dû à la tendance des molécules non polaires à se regrouper dans l'eau pour minimiser leur exposition au solvant polaire. Par conséquent, le noyau du phénol benzène apolaire interagit fortement avec d'autres molécules non polaires comme un autre cycle aromatique. [53]

Conclusion

En conclusion, des généralisations ont été étudiées sur les feuilles d'un groupe de plantes, à la fois *Murraya Koenigii* feuilles, feuilles d'eucalyptus, *Cynara cardunculus* feuilles, *Pisum sativum* peau et feuilles andines. Le chapitre comprend l'inspection des véhicules dans

Le chapitre comprenait leur examen et la mise en évidence de la présence de composés phénoliques dans leurs documents.

Les flavonoïdes, les composés phénoliques et d'autres types de composés phénoliques trouvés dans ces plantes ont été examinés. En outre, les propriétés chimiques de ces composés ont été examinées, telles que la structure moléculaire, le poids moléculaire, la solubilité et l'activité biologique potentielle. L'étude démontre l'importance de connaître ces propriétés chimiques pour comprendre les effets des composés phénoliques et concevoir leurs applications potentielles.

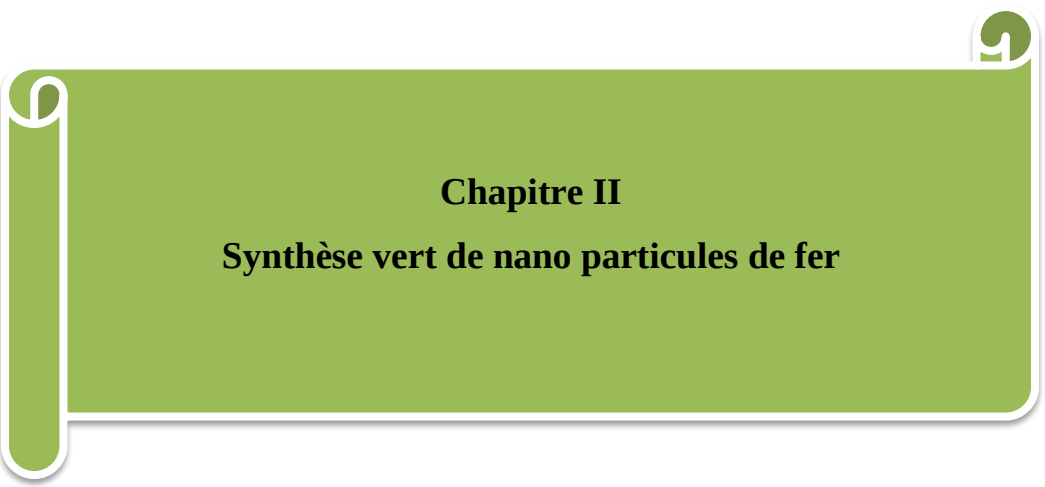
Bibliographies:

- [1] Sangam, S., et al., *A study on functional measures in patients with stroke*. International Journal of Health Sciences and Research, 2015. (1): p. 156-164.
- [2] Bhusal, D. and D.P. Thakur, *Curry Leaf: A Review*. Reviews in Food and Agriculture, 2021. (1): p. 31-33.
- [3] Jain, M., et al., *Curry leaf (Murraya koenigii): A spice with medicinal property*. MOJ Biol Med, 2017. (3): p. 00050.
- [4] Singh, A.P., et al., *LC-MS–MS characterisation of curry leaf flavonols and antioxidant activity*. Food Chemistry, 2011. **127**(1): p. 80-85.
- [5] Patterson, J. and M. Verghese, *Anticancer and toxic effects of curry leaf (Murraya koenigii) extracts*. J Pharmacol Toxicol, 2015. **10**(2): p. 49-59.
- [6] Batish, D.R., et al., *Eucalyptus essential oil as a natural pesticide*. Forest ecology and management, 2008. **256**(12): p. 2166-2174.
- [7] Dohare, S., et al., *Anti-biofilm activity of Eucalyptus globulus oil encapsulated silica nanoparticles against E. coli biofilm*. International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research, 2014. **5**(11): p. 5011.
- [8] Jamil, K., et al., *Estimation of antibacterial activity of plants extracts from Phyllanthus emblica, Terminalia chebula and Eucalyptus globulus against oral pathogens*. Int. J. Dent. Oral Heal, 2017. **3**: p. 100-104.
- [9] Sharma, A.D., et al., *Phytochemical analysis using GC-FID, FPLC fingerprinting, antioxidant, antimicrobial, anti-inflammatory activities analysis of traditionally used Eucalyptus globulus essential oil*. Drug Analytical Research, 2021. **5**(1): p. 26-38.
- [10] Vigo, E., et al., *In-vitro anti-inflammatory effect of Eucalyptus globulus and Thymus vulgaris: nitric oxide inhibition in J774A. 1 murine macrophages*. Journal of Pharmacy and Pharmacology, 2004. **56**(2): p. 257-263.
- [11] Ajilore, B.S., et al., *GC–MS analysis, toxicological and oral glucose tolerance assessments of methanolic leaf extract of Eucalyptus globulus*. Future Journal of Pharmaceutical Sciences, 2021. **7**(1): p. 1-9.
- [12] Jerbi, A., et al., *Essential oil composition and biological activities of Eucalyptus globulus leaves extracts from Tunisia*. Journal of Essential Oil Bearing Plants, 2017. **20**(2): p. 438-448.
- [13] Luís, Â., et al., *Stumps of Eucalyptus globulus as a source of antioxidant and antimicrobial polyphenols*. Molecules, 2014. **19**(10): p. 16428-16446.
- [14] Gerschenson, L.N., et al., *Artichoke*. Nutritional Composition and Antioxidant Properties of Fruits and Vegetables, 2020: p. 55-69.
- [15] Barbosa, C.H., et al., *A new insight on cardoon: Exploring new uses besides cheese making with a view to zero waste*. Foods, 2020. **9**(5): p. 564.

- [16] Rial, C., et al., *Phytotoxicity of cardoon (Cynara cardunculus) allelochemicals on standard target species and weeds*. Journal of Agricultural and food chemistry, 2014. **62**(28): p. 6699-6706.
- [17] Petropoulos, S., et al., *Edible halophytes of the Mediterranean basin: Potential candidates for novel food products*. Trends in food science & technology, 2018. **74**: p. 69-84.
- [18] Ruiz-Cano, D., et al., *Chemical and functional properties of the different by-products of artichoke (Cynara scolymus L.) from industrial canning processing*. Food chemistry, 2014. **160**: p. 134-140.
- [19] Gotor, E., et al., *The scientific information activity of Bioversity International: the descriptor lists*. Genetic Resources and Crop Evolution, 2008. **55**: p. 757-772.
- [20] Scheldeman, X., et al. *Horticultural potential of Andean fruit crops exploring their centre of origin*. in *International Symposium on Sustainable Use of Plant Biodiversity to Promote New Opportunities for Horticultural Production* 598. 2001.
- [21] Franco, G., et al., *El cultivo del lulo: manual técnico*. 2002, Corporación colombiana de investigación agropecuaria-AGROSAVIA.
- [22] Mertz, C., et al., *Analysis of phenolic compounds in two blackberry species (Rubus glaucus and Rubus adenotrichus) by high-performance liquid chromatography with diode array detection and electrospray ion trap mass spectrometry*. Journal of agricultural and food chemistry, 2007. **55**(21): p. 8616-8624.
- [23] Vasco, C., et al., *Phenolic compounds in Rosaceae fruits from Ecuador*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009. **57**(4): p. 1204-1212.
- [24] Gudej, J. and M. Tomczyk, *Determination of flavonoids, tannins and ellagic acid in leaves from Rubus L. species*. Archives of pharmacal research, 2004. **27**: p. 1114-1119.
- [25] Borkowski, B., et al., *Rosliny lecznicze w fitoterapii*. IRiPZ Poznan, 1994: p. 470-471.
- [26] Alasalvar, C., et al., *Comparison of volatiles, phenolics, sugars, antioxidant vitamins, and sensory quality of different colored carrot varieties*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001. **49**(3): p. 1410-1416.
- [27] Esfanjani, A.F. and S.M. Jafari, *Biopolymer nano-particles and natural nano-carriers for nano-encapsulation of phenolic compounds*. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2016. **146**: p. 532-543.
- [28] Coppo, E. and A. Marchese, *Antibacterial activity of polyphenols*. Current pharmaceutical biotechnology, 2014. **15**(4): p. 380-390.
- [29] Farhadi, F., et al., *Antibacterial activity of flavonoids and their structure–activity relationship: An update review*. Phytotherapy Research, 2019. **33**(1): p. 13-40.
- [30] Mickymaray, S., F.A. Alfaiz, and A. Paramasivam, *Efficacy and mechanisms of flavonoids against the emerging opportunistic nontuberculous Mycobacteria*. Antibiotics, 2020. **9**(8): p. 450.
- [31] Pandey, A. and S. Kumar, *Perspective on plant products as antimicrobial agents: A review*. Pharmacologia, 2013. **4**(7): p. 469-480.

- [32] Papuc, C., et al., *Plant polyphenols as antioxidant and antibacterial agents for shelf-life extension of meat and meat products: Classification, structures, sources, and action mechanisms*. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2017. **16**(6): p. 1243-1268.
- [33] Chusnie, T. and A.J. Lamb, *Antimicrobial activity of flavonoid*. Int. J. Antimicrob. Agent, 2005. **26**: p. 343-356.
- [34] Cushnie, T.T. and A.J. Lamb, *Recent advances in understanding the antibacterial properties of flavonoids*. International journal of antimicrobial agents, 2011. **38**(2): p. 99-107.
- [35] Matilla-Cuenca, L., et al., *Antibiofilm activity of flavonoids on staphylococcal biofilms through targeting BAP amyloids*. Scientific Reports, 2020. (1): p. 18968.
- [36] Xie, Y., et al., *Antibacterial activities of flavonoids: structure-activity relationship and mechanism*. Current medicinal chemistry, 2015. (1): p. 132-149.
- [37] Edreva, A., et al., *Stress-protective role of secondary metabolites: diversity of functions and mechanisms*. Gen Appl Plant Physiol, 2008. (1-2): p. 67-78.
- [38] Rodriguez-Delgado, M., et al., *Separation of phenolic compounds by high-performance liquid chromatography with absorbance and fluorimetric detection*. Journal of Chromatography A, 2001. (2): p. 249-257.
- [39] Boubekri, C., *Etude de l'activité antioxydante des polyphénols extraits de Solanum melongena par des techniques électrochimiques*. 2014, Université Mohamed Khider Biskra.
- [40] Abderrahim, B., *Etude phytochimique et activités antioxydante et hépatoprotectrice des extraits de Thymus pallidus*. 2021.
- [41] Djindjian, F., et al., *Us et abus du concept de 'chaîne opératoire' en archéologie*. 2013.
- [42] Babinot, J., *Elaboration de Copolymères Amphiphiles à Base de Poly (3-hydroxyalcanoate) s*. 2012, Paris Est.
- [43] Arraki, K., *Les stilbénoides chez les Cypéracées: isolation, identification et étude de leurs activités biologiques: identification et dosage des stilbènes dans des vins Tunisiens*. 2014, Université de Bordeaux.
- [44] El-Seedi, H.R., et al., *Hydroxycinnamic acids: natural sources, biosynthesis, possible biological activities, and roles in Islamic medicine*. Studies in natural products chemistry, 2018. : p. 269-292.
- [45] Fang, F., et al., *Determination of red wine flavonoids by HPLC and effect of aging*. Food Chemistry, 2007. (1): p. 428-433.
- [46] 46.Kumar, S. and A.K. Pandey, *Chemistry and biological activities of flavonoids: an overview*. The scientific world journal, 2013.
- [47] Barry, A., F. Garcia, and L. Thrupp, *An improved single-disk method for testing the antibiotic susceptibility of rapidly-growing pathogens*. American Journal of Clinical Pathology, 1970. (2): p. 149-158.
- [48] Chacar, S., *Effet des composés phénoliques sur le vieillissement cardiaque et rénal: étude expérimentale chez le rat*. 2018, Université de Poitiers; Université Saint-Joseph (Beyrouth).

- [49] Liu, H., L. Zhang, and S. Lu, *Evaluation of antioxidant and immunity activities of quercetin in isoproterenol-treated rats*. *Molecules*, 2012. (4): p. 4281-4291.
- [50] Stafford, H.A., *Flavonoid metabolism*. 1990.
- [51] Hisayoshi, K., Y. Masashi, and S. Koichi, *A novel cytotoxic prenylated flavonoid from the root of Morus alba*. *Journal of Insect Biotechnology and Sericology*, 2004. (3): p. 113-116.
- [52] Stevens, J.F., et al., *Inhibition of peroxynitrite-mediated LDL oxidation by prenylated flavonoids: the α , β -unsaturated keto functionality of 2'-hydroxychalcones as a novel antioxidant pharmacophore*. *Chemical research in toxicology*, 2003. (10): p. 1277-1286.
- [53] Iwashina, T., *The structure and distribution of the flavonoids in plants*. *Journal of Plant Research*, 2000. (3): p. 287.
- [54] MAA, E.M.N.B.G., et al., *Activité antioxydante des feuilles de l'olivier Olea europea L. subsp europaea var. sylvestris*.
- [55] Nkhili, E.-z. *Polyphénols de l'alimentation: extraction, interactions avec les ions du fer et du cuivre, oxydation et pouvoir antioxydant*. 2009. Avignon.
- [56] Rezaire, A., *Activité anti-oxydante, et caractérisation phénolique du fruit de palmier amazonien Oenocarpus bataua (patawa)*. 2012, Antilles-Guyane.
- [57] D Archivio, M., et al., *Polyphenols, dietary sources and bioavailability*. *Annali-Istituto Superiore di Sanita*, 2007. (4): p. 348.
- [58] Fernández, J., M.D. Curt, and P.L. Aguado, *Industrial applications of Cynara cardunculus L. for energy and other uses*. *Industrial crops and Products*, 2006. (3): p. 222-229.
- [59] Hadjout-Krimat, L., et al., *Study of microwave and convective drying kinetics of pea pods (Pisum sativum L.): A new modeling approach using support vector regression methods optimized by dragonfly algorithm techniques*. *Journal of Food Process Engineering*, 2023. (2): p. e14232.



Chapitre II

Synthèse vert de nano particules de fer

Introduction :

Ce chapitre vise à étudier la technique de synthèse verte des nanoparticules et à comprendre leurs mécanismes de travail et leur efficacité dans le traitement de la pollution de l'eau. Ce chapitre développera la synthèse verte des nanoparticules et étudiera leur impact sur le traitement de la pollution de l'eau.

1.Généralité sur l'eau :

1.1.L'eau :

L'eau joue un grand rôle dans nos vies, elle fait partie intégrante de notre corps et a une grande importance dans de nombreux processus[1]. L'eau est la plus importante source naturelle et vitale de survie sur terre couvrant environ 71% de la surface totale de la terre[2]. L'eau douce est une ressource pour de nombreuses utilisations importantes, y compris [3] la consommation d'eau potable[4], les loisirs, l'irrigation[5], le transport, l'hydroélectricité[6], les utilisations domestiques et industrielles et les utilisations des habitats animaux qui sont d'importance économique[7].

1.2.Définition de la pollution des eaux:

La pollution de l'eau est définie comme un changement dans les caractéristiques et la qualité de l'eau qui la rend impropre à l'utilisation humaine, animale et végétale. Cette pollution se produit lorsque des substances étrangères ou contaminées telles que des produits chimiques, des bactéries, des déchets et de l'énergie thermique ou radioactive sont ajoutés aux eaux souterraines et aux eaux de surface telles que les lacs, les rivières, les océans et les estuaires [8].

1.3.Méthodes de traitement de l'eau :

Notre monde est confronté à de grands défis dans le domaine de la pollution de l'eau, ce qui nécessite des solutions efficaces et durables pour lutter contre la pollution de l'eau et la ramener à des niveaux adaptés à l'utilisation humaine, agricole et industrielle. Plusieurs méthodes ont été développées pour lutter contre la pollution de l'eau, y compris [9,10] .

Traitement physique	Criblage, sédimentation, filtration, flottation, séparation membranaire, moyen granulaire, égalisation des flux
Traitement chimique	Coagulation, précipitation chimique, échange ionique, adsorption, neutralisation, extraction solvant, chloration, autres applications chimiques
Traitement biologique	Digestion aérobie, digestion anaérobie, filière boues activées, filtres bactériens, contacteurs biologiques rotatifs, stabilisation de bassin, élimination biologique des nutriments.

Tableau II.1 : Méthodes de traitement des eaux [9-10]

2.Définition des nanoparticules :

C'est une très petite particule dont les dimensions vont de 1 à 100 nanomètres et qui se compose de quelques centaines d'atomes. Les nanoparticules sont connues pour leurs larges applications dans divers domaines tels que la médecine, l'électronique, l'industrie, l'agriculture, etc., et elles sont d'une grande importance dans la recherche scientifique et les applications de la vie.[11]

2.1.La classification des nanomatériaux :

Comprend tous les matériaux conventionnels tels que les métaux, les céramiques et les polymères, qui sont transformés en matériaux aux dimensions nanométriques. Les nanomatériaux peuvent être classés en quatre catégories principales.[12]

2.1.1Nanomatériaux zéro dimension :

Ce sont des points quantiques, des nanoparticules et des fullerènes, dont les dimensions sont inférieures à 100 nanomètres, de manière aléatoire ou ordonnée. [13, 14].

2.1.2.Nanomatériaux unidimensionnels :

L'une de ses dimensions est inférieure à 100 nanomètres qui sont des nano-lamellaires et des films utilisés dans les revêtements de surface et les emballages de produits alimentaires et autres. [12]

2.1.3.Nanomatériaux bidimensionnels :

Ceux qui ont une échelle bidimensionnelle de moins de 100 nanomètres et comprennent des nanotubes, des cylindres et des nano fibres.[12]

2.1.4.Nanomatériaux 3D :

Il est représenté dans les nanoparticules, les poudres métalliques et les matériaux céramiques ultrafins, et ses dimensions sur les trois axes sont inférieures à 100 nanomètres. Ces matériaux sont utilisés dans diverses industries sous forme de poudres de nanoparticules telles que l'oxyde de silicium, l'oxyde de titane, l'oxyde d'aluminium et autres.[12]

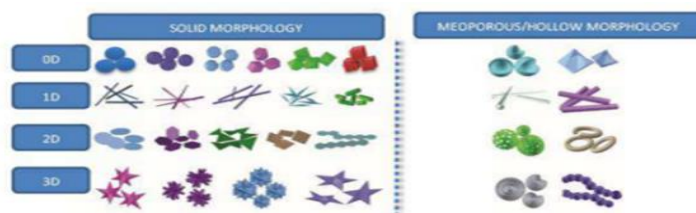


Figure II.2 : Types de nanomatériaux par dimension

3. Comment atteindre l'échelle nanométrique de la matière en nanotechnologie :

3.1.Le chemin de haut en bas :

Le processus commence par un volume de matériau perçu et le volume est progressivement réduit jusqu'à ce que l'échelle nanométrique soit atteinte. [15]

3.2.Le chemin de bas en haut :

Cette méthode commence avec des particules individuelles comme la plus petite unité et s'agrège en assemblages plus grands, généralement chimiques, caractérisés par une petite taille de sortie (un nanomètre), un faible gaspillage de matériau parent et la réalisation d'une liaison forte entre les nanoparticules résultantes. [15]

4.Méthodes de synthèse des nanoparticules:

Les progrès continus de la recherche scientifique ont joué un rôle crucial dans le développement de la nanotechnologie et la production de nanoparticules de façon plus précise et efficace. Diverses méthodes de synthèse de nanoparticules permettent d'utiliser efficacement différents matériaux et divers procédés de fabrication. [16]

4.1.Méthode physique :

Des méthodes physiques sont utilisées pour synthétiser des nanoparticules en appliquant une pression mécanique, une énergie élevée, un rayonnement, ainsi qu'une énergie thermique ou électrique afin d'interagir avec les matériaux et provoquer la corrosion, la dissolution, l'évaporation ou la condensation pour former des nanoparticules.

Fonctionnant principalement selon un principe de « haut en bas », ces méthodes offrent plusieurs avantages, notamment l'absence de solvant et la production de nanoparticules uniformément dispersées. Dans le même temps, ces méthodes physiques réduisent considérablement la production de déchets par rapport aux procédés chimiques traditionnels, ce qui entraîne une meilleure efficacité économique. Parmi nos méthodes les plus importantes. [17]

4.1.1.Le broyage à billes à haute énergie (HEBM) :

C'est une méthode dans laquelle un mélange de poudres est soumis à des collisions à haute énergie générées par des billes dans un broyeur à boulets. Cela entraîne une déformation mécanique.

Cette méthode est fréquemment utilisée pour produire des alliages métalliques avec de très petites tailles de particules allant de 4 à 26 nm. Il est également appelé alliage mécanique et

produit avec succès des dispersions fines et uniformes de particules d'oxyde (telles que ThO_2 , Y_2O_3 , Al_2O_3) dans des superalliages à base de nickel. Ces dispersions sont difficiles à fabriquer en utilisant les procédés classiques de traitement des poudres métalliques.

Le broyage à haute énergie est un moyen de modifier les conditions dans lesquelles se produisent les réactions chimiques. Ceci peut être réalisé soit en modifiant la réactivité des solides broyés, soit en induisant des réactions chimiques pendant le processus de broyage. [18] [19]

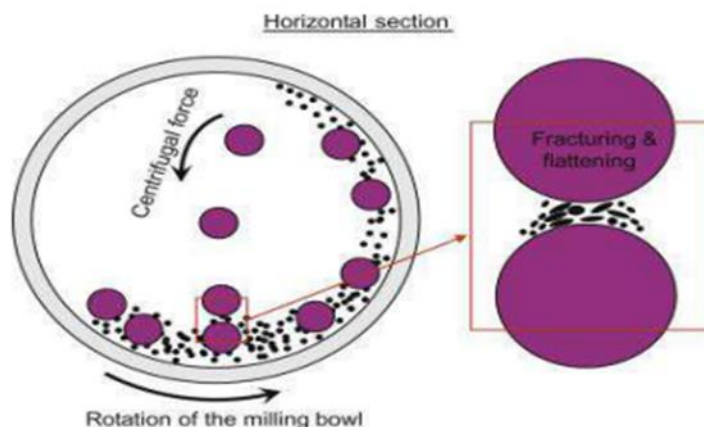


Figure II.3 : Schéma de principe du mouvement du mélange bille et poudre pour la production de nanoparticules [18]

4.1.2. Méthode de projection thermique à la flamme :

La méthode de pyrolyse par pulvérisation (FSP) est un procédé utilisé pour convertir une solution de sel minéral en nanoparticules en les pulvérisant sous forme de fines gouttelettes dans une flamme.

Ce processus est accompli en introduisant une solution aqueuse de saumure saturée d'un sel organique ou inorganique dans une buse de pulvérisation sous pression, qui injecte la solution à travers un tube mince.

Lorsque la solution est pulvérisée dans la flamme chaude, le solvant aqueux se transforme en vapeur et brûle dans la flamme. Au cours du processus de combustion, une réaction de pyrolyse a lieu, qui convertit le sel en un oxyde métallique.

De petites gouttelettes d'oxyde se forment dans l'air chaud et s'agrègent pour former des nanoparticules.

Une méthode de projection à la flamme par pyrolyse est utilisée pour produire des nanoparticules de manière uniforme. [20]

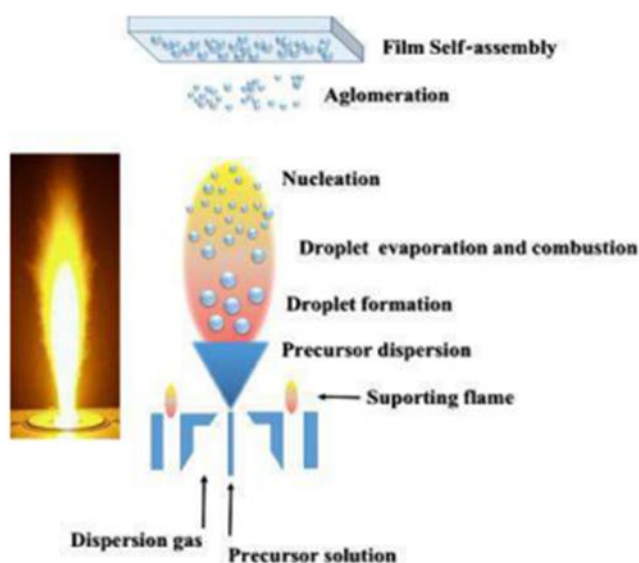


Figure II.4 : Schéma de la synthèse par pyrolyse par pulvérisation à la flamme. [21]

La technologie de pyrolyse par pulvérisation à la flamme (FSP) peut être résumée en quatre étapes principales :

1. L'évaporation ou la décomposition du précurseur, formant des vapeurs métalliques
2. Nucléation dans des conditions de sursaturation.
3. Croissance par amalgame et frittage de particules
4. L'aggrégation des molécules par des liaisons chimiques et des interactions physiques. [17]

Cette technique présente deux avantages majeurs pour produire des microparticules.

Tout d'abord : évitez l'étape de mélange des matériaux dans la solution avant la pulvérisation, mais permettez un mélange homogène au niveau atomique pour assurer une distribution uniforme.

Deuxièmement : seules de basses températures sont nécessaires pour la formation de particules cristallines.

Ce procédé permet d'obtenir des tailles de particules généralement comprises entre 500 et 5 nm, ainsi que de produire des particules nanométriques à haute qualité de surface, le tout à des coûts de production faibles. [21]

4.1.3. Technologie de pulvérisation électrostatique :

La technologie d'électro-pulvérisation, similaire à l'électro-filage, présente des différences dans les matériaux produits.

Elle se déroule en deux étapes : d'abord l'agrégation des nanoparticules, suivie de l'agrégation des nanofibres.

Cette méthode est basée sur un dispositif électromécanique dans lequel une solution de bio polymère et un solvant sont injectés à travers une aiguille de seringue, créant ainsi un champ électrique entre l'aiguille et la plaque collectrice grâce à l'application d'une haute tension.

Le champ électrique surmonte la tension de la goutte de liquide, l'amenant à se déformer et à former un cône de Taylor. Les nanoparticules chargées électriquement sont ensuite libérées lorsque le solvant s'évapore dans l'atmosphère.

Les nanoparticules ou fibres sèches sont ensuite collectées en tant que produit final, comme le montrent les figures ci-dessous. [17] [22]

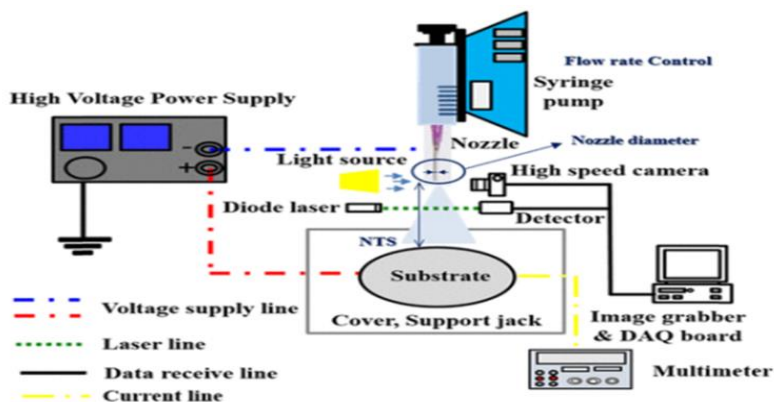


Figure II.5 : Schéma d'une configuration expérimentale à l'échelle du laboratoire de la technique d'électro nébulisation [22]

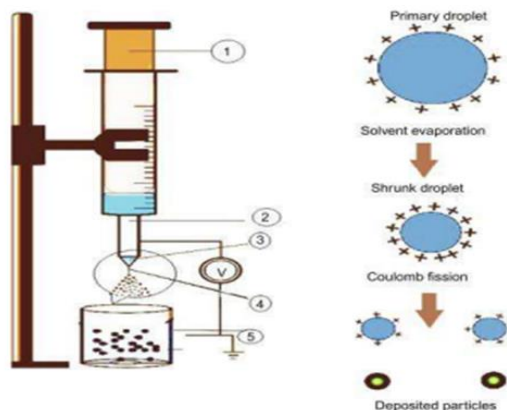


Figure II.6 : montre comment les nanoparticules sont formées à l'aide de la technologie d'électro pulvérisation [22]

La technologie de pulvérisation électrostatique permet de contrôler plusieurs paramètres, tels que les paramètres d'actionnement (tension, débit, distance de collecte) et les paramètres de solution (viscosité, densité, type de bio polymère). Il présente plusieurs avantages, notamment une préparation rapide et la capacité de synthétiser de grandes quantités de nanoparticules (NP) à l'aide de divers solvants. Cependant, il convient de noter que cette technique peut parfois conduire à la décomposition de certaines grosses particules en raison de l'effet thermique. [22] [17]

4.2.Méthodes chimiques :

Les méthodes chimiques sont l'un des moyens courants de produire des nanoparticules en grande quantité. Ces méthodes impliquent divers processus chimiques pour préparer des nanomatériaux et peuvent être appliquées à une variété de matières premières.

Voici quelques-unes des méthodes chimiques les plus courantes pour la préparation de nanoparticules :

4.2.1.Méthode sol-gel :

La méthode Sol-Gel est un procédé chimique par voie humide utilisé pour fabriquer des matériaux à base d'oxydes. Dans ce procédé, les matières de départ sont des composés solubles dans l'eau tels que des halogénures, des nitrates, des sulfates et des al oxydes ou des carboxylates.

Une série d'hydrolyse et de condensation se produit pour former de petites particules nanométriques en suspension dans un liquide appelé sol.

Lorsque les particules solubles interagissent et s'adsorbent dans le colloïde, un réseau tridimensionnel de matériau d'oxyde polymère se forme.

Enfin, l'excès d'eau est éliminé pour ajuster la structure finale du matériau. Par exemple, des nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO NPs) peuvent être préparées en utilisant de l'acétate de zinc déshydraté et de la triéthanolamine (TEA) comme matières premières. [23] [17]

La méthode Sol-Gel permet la production de particules nanométriques de haute qualité d'une taille définie à l'échelle industrielle. Il permet également la préparation simultanée de différents types de nanoparticules, permettant la fabrication de produits multi-composants de manière intégrée. [24]

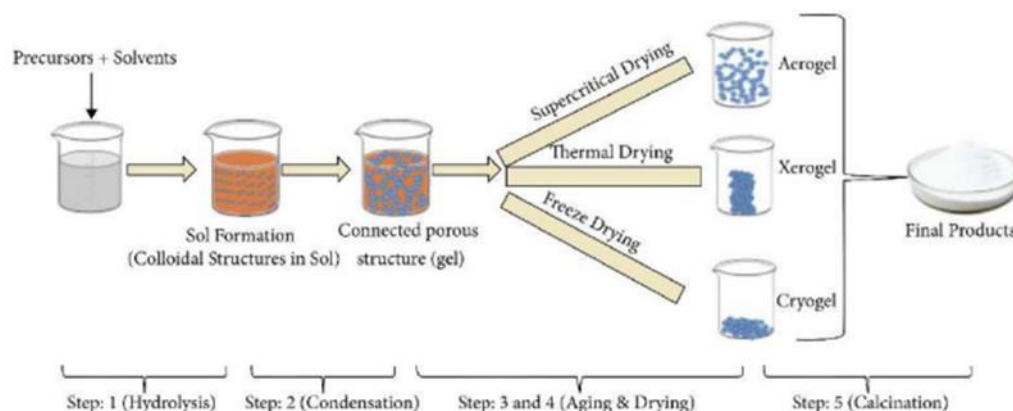


Figure II.7 : Schéma de principe des différentes étapes du procédé gel-sol du précurseur au gel.²³

4.2.2. Préparation hydro thermique :

La synthèse hydrothermale est généralement définie comme le processus de formation ou de croissance de cristaux sous des températures élevées et des pressions d'eau élevées de substances insolubles à une température et une pression inférieures à 100 degrés Celsius et 1 atmosphère de pression. Cela est dû au fait que la production ionique atteint son maximum aux alentours de 250 à 300 degrés Celsius.

Cette méthode est largement utilisée pour la fabrication de nanoparticules à partir d'oxydes métalliques, d'oxydes de phosphate et de lithium-fer. Elle permet de modifier les propriétés des particules en contrôlant les conditions de l'eau, telles que la pression et la température.

Le processus de préparation hydrothermale peut être réalisé selon deux types de systèmes : le procédé discontinu ou le procédé continu. Le premier permet d'effectuer les différentes étapes dans des proportions spécifiques, tandis que le second permet d'obtenir une réaction plus rapide sur une période de temps plus courte. Les nanoparticules sont produites dans une solution chimique contenant des composés solides, liquides ou gazeux, tels que des halogènes et des mousses, sous pression et température contrôlées.

La méthode de préparation hydrothermale offre l'avantage de permettre la production de grandes quantités de nanoparticules avec une taille, une forme, une texture de surface et une composition optimisées, le tout à un coût abordable. Elle permet également de contrôler les propriétés chimiques des matériaux nanométriques, ouvrant ainsi la voie à de nombreuses applications dans des domaines tels que la chimie, la physique, l'électronique, l'énergie, la biologie, etc. [17]

4.2.3. Technologie de microémulsion :

La microémulsion est une technologie qui consiste à créer un système composé d'eau, d'huile et de tensioactifs. Des gouttelettes d'eau dispersées dans l'huile, ou vice versa, sont générées avec des tailles typiquement comprises entre 600 nm et 8000 nm. Les molécules de surfactant jouent un rôle clé dans la formation d'une couche intermédiaire entre les phases aqueuse et organique, réduisant ainsi la tension superficielle et empêchant la fusion des gouttelettes.

A une certaine concentration de tensioactifs, des agrégats de molécules appelés micelles se forment.

Dans le cas d'une microémulsion eau-dans-huile, des micelles inverses se forment dans la phase organique, dans lesquelles les groupements polaires des molécules de tensioactif sont dirigés vers l'intérieur, tandis que les queues hydrophobes sont dirigées vers l'extérieur. Les micelles inversées fournissent un environnement idéal pour la fabrication de nanoparticules.

En général, il existe deux manières d'utiliser la technologie des microémulsions pour préparer des nanoparticules. La première méthode est la microémulsion unique, dans laquelle la réaction de diversification est catalysée au sein d'une microémulsion unique contenant les réactifs séparés. La deuxième méthode consiste à utiliser deux microémulsions distinctes, contenant chacune un réactif différent. Les deux microémulsions sont mélangées dans des proportions appropriées, et le mouvement brownien favorise l'approche et la collision entre les particules. Ces collisions énergétiques permettent le mélange du contenu micellaire, et avec tous les réactifs dans le même compartiment micellaire, la réaction chimique a lieu dans ce réacteur nanométrique. Ensuite, le processus de diversification commence et les nanoparticules se forment. [17,25,26]

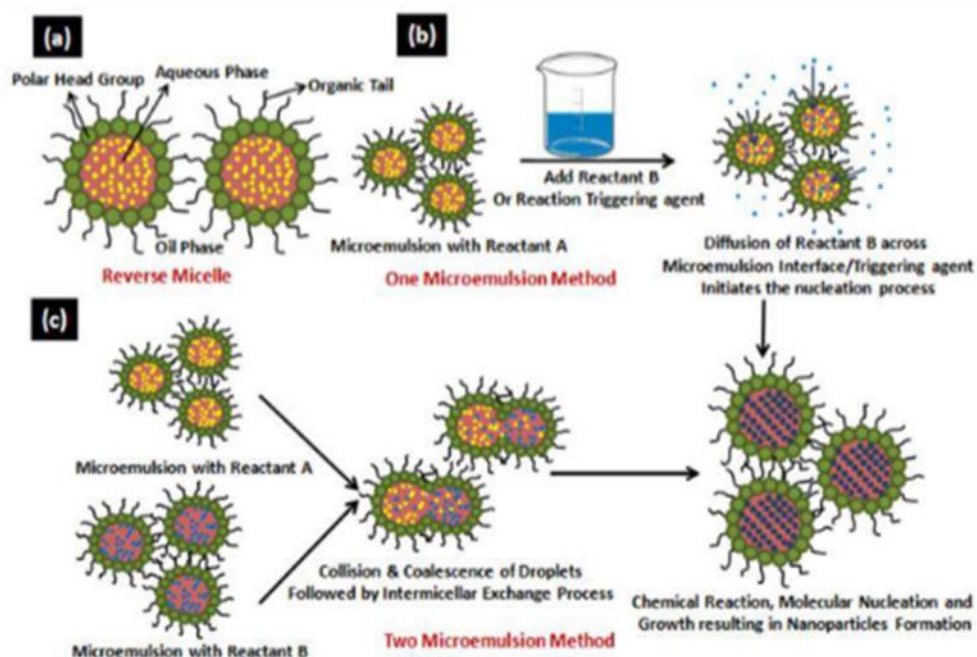


Figure II.8 : (a) un système typique de micelles inversées, (b) les différentes étapes impliquées dans (c) Un seul processus de microémulsion et (c) la séquence de réaction impliquée dans la synthèse de nanoparticules en émulsion [17]

5. Approche verte pour la synthèse des nanoparticules :

Il est clair que l'utilisation de l'approche verte dans la synthèse des programmes nationaux est une étape importante dans la protection de l'environnement et de la santé publique.

La recherche indique que l'utilisation de technologies vertes telles que la synthèse de nanoparticules à partir d'extraits de plantes peut être plus efficace, rentable et sûre par rapport aux méthodes conventionnelles.[27]

Ainsi, cette approche peut être largement appliquée dans différentes industries pour synthétiser les produits nationaux et réduire les impacts négatifs sur l'environnement et la santé publique.

Ce changement d'approche verte nécessite une collaboration entre les gouvernements, les entreprises, les universités et d'autres organisations pour développer de nouvelles technologies et promouvoir la recherche et le développement dans ce domaine.

À long terme, cette approche peut améliorer la qualité de vie et préserver les ressources naturelles pour les générations futures pour la synthèse de nanoparticules dans le respect de l'environnement. Ces méthodes utilisent des matériaux naturels non toxiques et des technologies vertes pour synthétiser les nanoparticules et améliorer les performances environnementales et

sanitaires de ces produits. Par exemple, des extraits de plantes peuvent être utilisés comme source qui est mis à réagir avec des minéraux pour former des NP. [27] Cette approche se caractérise par une disponibilité et une sécurité élevées et peut être largement appliquée pour générer une grande variété de nanoparticules. Cette méthode permet également de réduire les déchets chimiques et d'améliorer la gestion des matières premières. Dans l'ensemble, les approches vertes de synthèse des nanoparticules encouragent davantage la recherche et le développement pour améliorer la qualité des produits et élargir leur gamme d'applications. [28]

5.1.Plantes et produits photochimiques :

Les substances photochimiques peuvent être utilisées pour produire des nanoparticules de manière écologique et plus durable [28,29]. Différentes plantes peuvent être utilisées pour produire rapidement et efficacement des nanoparticules dans les saumures en fonction de la concentration des extraits, du sel, du pH et du contact. Plusieurs approches simples, vertes et rapides pour produire des nanoparticules utilisant des matières végétales comme divers réducteurs ont été rapportées. Des exemples de ces plantes sont le curcuma, la grenade, le jus de betterave et autres.[29]

6.Applications de nanoparticules de fer :

Les nanoparticules de fer ont de nombreuses applications dans divers domaines, notamment :

6.1 Applications magnétiques et électriques :

Les nanoparticules de fer ont un large éventail d'applications dans les champs magnétiques et électriques en raison de leurs propriétés uniques [30] Ils sont utilisés dans des applications majeures telles que les supports d'enregistrement magnétiques [31]. Ces particules peuvent être personnalisées pour obtenir une force coercitive très faible ou très élevée grâce à des traitements spécifiques [32]. Il est également utilisé dans les supports de stockage magnétiques avancés tels que les bandes vidéo et les supports de sauvegarde informatique [33]. Ces particules de fer se caractérisent par leur fort magnétisme [34], leur résistance et leur grande capacité de stockage, ce qui les rend idéales pour stocker des informations numériques en raison de leur capacité à stocker de l'énergie magnétique.[35]

De plus, les nanoparticules de fer flexibles sont largement utilisées dans diverses applications, notamment les noyaux de transformateurs. Il présente des propriétés magnétiques souhaitables telles qu'une aimantation stable et une facilité de traitement [36]

Avec leurs diverses applications dans les champs magnétiques et électriques, les nanoparticules de fer sont une option intéressante pour la recherche, le développement et les nouvelles technologies. Ils offrent de nombreuses possibilités d'amélioration des performances et d'extension des applications futures. [37]

6.2.Applications catalytiques :

Les nanoparticules de fer sont largement utilisées dans des applications catalytiques. Elles jouent un rôle essentiel dans la conversion du charbon (ou du gaz naturel) en gaz synthétique par le processus de vaporéforme [38];[39]. Ces gaz synthétiques, composés de H₂ et de CO, sont ensuite transformés en hydrocarbures par la synthèse de Fischer-Tropsch, qui utilise des catalyseurs à base de fer [41]. Les nanoparticules de fer présentent une activité catalytique supérieure à celle des matériaux traditionnels, avec une sélectivité élevée pour la production de méthane [40]

En plus de leur utilisation dans la gazéification du charbon, les nanoparticules de fer ont également démontré leur efficacité dans d'autres réactions catalytiques. Elles ont été utilisées pour la formation d'alcènes, l'hydrogénation du naphthalène [41], la conversion des composés azotés lors de la pyrolyse du charbon [42], la dégradation du trichloréthylène et la croissance de nanotubes de carbone et de structures nano-gallium. [43,44]

L'utilisation de catalyseurs à base de fer présente des avantages économiques, car ils peuvent être produits à faible coût par rapport à d'autres catalyseurs plus coûteux [45]. Ces recherches ouvrent de nouvelles perspectives pour l'amélioration des performances et l'expansion des applications futures. [46]

6.3.Applications médicales :

Les nanoparticules magnétiques à base de fer sont largement utilisées dans le domaine de la médecine biochimique[47]. Elles trouvent leur application dans plusieurs domaines, tels que la séparation magnétique, le marquage des substances biologiques et l'administration ciblée de médicaments[48]

L'avantage du fer par rapport aux oxydes réside dans sa forte magnétisation en l'absence d'inversion de spin [49]. Dans les cas d'administration ciblée de médicaments et de séparation magnétique[50], un gradient de champ magnétique est utilisé pour exercer une force proportionnelle à l'aimantation des particules, ce qui permet de bénéficier d'une aimantation plus élevée de manière significative.[51]

De plus, le fer est plus doux que les oxydes, ce qui permet de conserver une magnétisation supérieure à des échelles plus importantes.[52]

L'administration ciblée de médicaments magnétique fonctionne de manière similaire, mais implique l'injection de particules magnétiques dans la veine [53], suivie de l'application d'un gradient de champ magnétique dans la région où la livraison est souhaitée. [53]

6.4.Amélioration du contraste IRM :

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) utilise des nanoparticules de fer pour améliorer le contraste. Ces nanoparticules magnétiques présentent plusieurs avantages, dont une forte aimantation et une RMN améliorée [54]. Ils sont utilisés dans diverses applications, telles que l'amélioration du contraste sanguin et le marquage cellulaire [55]. Le fer anisotrope peut également être utilisé pour améliorer l'agent de contraste magnétique [56]. L'utilisation de nanoparticules de fer en IRM nécessite une saturation magnétique pour obtenir des images de meilleure qualité. [57] Dans le domaine médical, l'hyperthermie est un traitement qui consiste à chauffer localement les tissus pour détruire les tumeurs [58,59]. Les particules magnétiques, comme les fer rofluides, sont chauffées pour générer de la chaleur et cibler spécifiquement les tumeurs cancéreuses. Les particules super paramagnétiques sont également utilisées pour le chauffage ferromagnétique. Ces techniques peuvent chauffer une zone spécifique de tissu si les particules sont bien ciblées. [60]

6.5.Pour remédier à la pollution de l'eau :

L'utilisation de matériaux nano magnétiques à base d'oxyde de fer se présente comme une option intéressante pour plusieurs raisons [61]. Ces matériaux se distinguent par leurs propriétés remarquables telles que leur magnétisme [62], leur grande surface spécifique et leur petite taille[63]. La présence de propriétés magnétiques dans les oxydes de fer augmente leur capacité à attirer les métaux lourds et à les éliminer efficacement de l'eau [64]. De plus, la grande surface spécifique et la petite taille des nanoparticules magnétiques leur confèrent la capacité d'interagir efficacement avec les métaux lourds [65]. Ces particules peuvent interagir avec les métaux lourds présents dans l'eau et former des composés insolubles qui facilitent leur élimination de la solution aqueuse [66].

En plus de leurs avantages dans l'élimination des métaux lourds, les nanomatériaux d'oxyde de fer sont sûrs et efficaces dans les applications environnementales [67, 68]

Ils ont été utilisés avec succès dans les procédés de purification de l'eau et le traitement de l'eau contaminée par des métaux lourds. [69]

Grâce à cette technologie prometteuse, nous pouvons améliorer la qualité de l'eau et protéger l'environnement des effets de la pollution de l'eau par les métaux lourds [70].

7. Concept de l'oxyde de fer :

L'oxyde de fer est un composé chimique composé de fer et d'oxygène, présent dans la nature sous différentes formes cristallines, y compris la forme noire appelée magnétite (Fe_3O_4), la forme rouge appelée hématite (Fe_2O_3) et la forme jaune appelée limonite (FeOOH). [71]

7.1. Nanoparticules d'oxyde de fer :

Les particules d'oxyde de fer se présentent naturellement sous diverses formes, les plus courantes étant la maghémite $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, la magnétite Fe_3O_4 et l'hématite. Ils ont des propriétés uniques qui sont d'une grande importance technologique et industrielle. [72]

L'hématite est le nom le plus familier de l'oxyde de fer Fe_2O_3 , la première forme découverte d'oxyde de fer. On l'appelle aussi oxyde de fer, marmite ou ocre rouge. L'hématite est généralement extraite des roches sédimentaires et se caractérise par sa couleur rouge foncé lorsqu'elle cristallise finement, alors qu'elle est noire ou grise lorsqu'elle cristallise grossièrement. Ce matériau a une grande stabilité et est largement utilisé dans les industries techniques et métallurgiques. Sa polyvalence en fait un matériau populaire pour de nombreuses applications. [73]

Dans le même temps, la magnétite sous sa forme Fe_3O_4 possède les propriétés magnétiques les plus énergétiques des trois oxydes de fer. La magnétite est également connue sous le nom de ferrite, d'ardoise et de minerai de fer magnétique. Le troisième type d'oxyde de fer est la maghémite $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, qui possède également de fortes propriétés magnétiques. Ces trois types d'oxyde de fer sont largement utilisés dans les industries mécaniques et métallurgiques en raison de leurs propriétés uniques. [74]

7.2. Composition Magnétite et Maghemite :

La magnétite (Fe_3O_4) est constituée de fer (Fe) et d'oxygène (O) avec des ions Fe^{2+} et Fe^{3+} présents dans sa structure. En revanche, la maghémite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) est un oxyde de fer ne contenant que des ions de fer. [75]

7.3. Composition hématite :

L'hématite, anciennement appelée hématite, tire son nom de la racine grecque signifiant "sang", en raison de sa couleur rouge vif rappelant le sang. Il existe généralement sous forme de

poudre rouge, mais lorsqu'il est pressé, il change de couleur en noir ou en argent. L'hématite est le principal minerai de fer utilisé dans la production de masse et primaire.[76]

8. Propriétés des nanoparticules de fer :

Les nanoparticules de fer présentent une gamme de propriétés chimiques, magnétiques et optiques remarquables en raison d'effets limités en taille[77]. La meilleure propriété réside dans la grande surface des nanoparticules. L'énergie libre de surface représente une grande quantité d'énergie[78], ce qui provoque des changements dans les propriétés magnétiques et une réactivité accrue des nanoparticules. Dans le cas du fer, les effets optiques ne suscitent pas beaucoup d'intérêt[79], mais l'intérêt se porte surtout sur les interactions électroniques et leur effet magnétique[80]

8.1. Propriétés magnétiques :

Les nanoparticules de fer d'une taille de 10 à 20 nanomètres présentent un comportement de super paramagnétisme[81]. Ces particules sont fabriquées à partir de matériaux ferromagnétiques ou ferrimagnétiques. Entre la ferromagnétisme et le superparamagnétisme[82], il existe une température de transition qui augmente avec la taille des particules. La coercivité apparaît lorsque les spins ne peuvent pas se réaligner en raison d'une faible énergie thermique en dessous d'une température spécifique appelée "température de blocage"[83], et le comportement devient ferromagnétique lorsque la température est inférieure à cette plage.[84]

Dans l'enregistrement magnétique[85] , les nan-aiguilles de fer ont également une application. Les nanoparticules de fer permettent de détecter la coercivité la plus élevée ou la plus faible (nulle) dans un matériau en fonction de sa taille[86]. Les électrons 3d sont responsables du magnétisme du fer. Le revêtement des nanoparticules de fer avec différents oxydes réduit non seulement[87] les valeurs de M_s (aimantation de saturation) des nanoparticules de fer, mais affecte également fortement la coercivité[88], ce qui entraîne une coercivité très élevée à basse température, tandis qu'elle diminue avec l'augmentation de la température [89]. Une fine couche continue d'or constitue une barrière efficace contre l'oxygène ou tout autre agent oxydant. L'or est inerte vis-à-vis de l'oxydation, ce qui en fait un revêtement idéal.[90]

8.2. Propriétés chimiques :

Les particules de fer nanométriques présentent une réactivité élevée en vers divers agents oxydants, en particulier l'air[91]. Lorsque les particules nanométriques sont manipulées dans un matériau solide ou liquide, la diffusion de l'oxygène vers leur surface est lente[92], et la réaction

d'oxydation est généralement modérée. La réactivité du fer n'est pas toujours nuisible. La raison pour laquelle il agit comme un agent facilitateur dans un nombre limité de réactions est que sa surface s'oxyde naturellement dans les conditions environnantes[93].

8.3. Propriétés optiques de l'hématite dans la lumière ultraviolette et visuelle :

Généralement, dans les semi-conducteurs de type oxyde, les bandes de parité dans les semi-conducteurs conducteurs consistent en des orbitales d'électrons p et s constituées de cations p ou s. Cependant, l'hématite contient une liaison composée de deux éléments, à savoir le fer, sûrement avec l'état d'oxydation + 3 et l'oxygène. L'hématite se compose de deux atomes de fer liés ensemble par l'oxygène, où l'atome de fer occupe les quatre sites oxydatifs autour de l'atome. Oxygène sous forme de parité p. Les électrons sont remplis dans les niveaux d'énergie disponibles à partir de dessous dans l'ordre d'énergie, où l'hématite consiste en un atome de fer ionisé occupant les quadruples sites oxydatifs sous forme de parité p. Les niveaux d'énergie possibles dans l'oxygène et le fer sont déterminés en état d'oxydation + 3, où il y a 5 électrons au niveau d, Ils sont emballés dans les niveaux de puissance disponibles dans l'ordre de puissance suivant : 3d (3dz, 3dxy, 3dxz, 3dyz, 3dx²-y²).¹⁰⁴

9.Applications des nanoparticules d'oxydes de fer :

9.1 Applications biologiques :

Les nanoparticules d'oxyde de fer sont largement utilisées dans le domaine de la biologie pour diverses applications. Dans le domaine de l'imagerie médicale, elles sont utilisées comme agents de contraste en imagerie par résonance magnétique (IRM) afin d'améliorer la visualisation des tissus et la détection des maladies. De plus, elles pourraient être utilisées dans le traitement du cancer, notamment pour l'administration ciblée de médicaments ou l'hyperthermie magnétique, où les nanoparticules sont chauffées par induction magnétique pour détruire les cellules cancéreuses. Enfin, les nanoparticules d'oxyde de fer peuvent être utilisées en imagerie biologique pour identifier et suivre des cellules ou des molécules spécifiques. [92]

9.2. Applications environnementales :

Les nanoparticules d'oxyde de fer sont utilisées dans diverses applications liées à l'environnement. Elles permettent le traitement de l'eau en éliminant les polluants organiques et inorganiques grâce à leurs propriétés adsorbants et catalytiques. De plus, elles peuvent être utilisées dans le traitement des eaux usées pour éliminer les polluants et les métaux lourds. Dans l'air, les nanoparticules d'oxyde de fer peuvent être utilisées pour éliminer les polluants

atmosphériques grâce à des processus redox. Enfin, elles peuvent également être utilisées pour décomposer les polluants présents dans le sol, contribuant ainsi à la décontamination des sites contaminés. [93]

9.3. Applications techniques :

Les nanoparticules d'oxyde de fer ont de nombreuses applications techniques. Elles sont utilisées en électronique pour fabriquer des dispositifs tels que des mémoires magnétiques et des composants électroniques miniatures. Elles sont également utilisées dans la fabrication de capteurs, tels que des capteurs de pression, des capteurs d'humidité et des capteurs de gaz, en raison de leur sensibilité aux variations du champ magnétique ou de la résistance électrique. Les nanoparticules d'oxyde de fer sont également utilisées pour fabriquer des aimants permanents, des instruments médicaux magnétiques et des appareils électriques tels que des transformateurs et des inducteurs. [92]

Conclusion :

À la conclusion de cet important chapitre sur la synthèse verte des nanoparticules et de leurs applications dans le traitement de la pollution de l'eau, cette technologie est prometteuse pour relever les défis environnementaux et protéger les sources mondiales d'eau.

Les méthodes physiques et chimiques de préparation des nanoparticules ont été abordées de manière exhaustive et détaillée, et ces méthodes se sont avérées efficaces pour obtenir des nanoparticules avec d'excellentes propriétés. Grâce à la technologie de synthèse verte, cet objectif est atteint de manière écologique et durable

En outre, l'étude a révélé que les nanoparticules de fer ont une capacité exceptionnelle à éliminer les polluants de l'eau, tels que les métaux lourds et les composés organiques contaminés. Grâce à leur distribution à l'échelle nanométrique et à leur petite taille, les nanoparticules de fer montrent une grande capacité à interagir avec les polluants et à les convertir en composés inoffensifs. Il a également de nombreuses applications biologiques, environnementales et techniques

Sur la base de ces résultats prometteurs, les nanoparticules de fer peuvent devenir des technologies innovantes et prometteuses à l'avenir

Bibliographie :

- [1] Stern, D.N., *Le moment présent en psychothérapie: un monde dans un grain de sable*. 2003: Odile Jacob.
- [2] Kêdowidé, C.M.G., M.P. Sedogo, and G. Cisse, *Dynamique spatio temporelle de l'agriculture urbaine à Ouagadougou: Cas du Maraîchage comme une activité montante de stratégie de survie*. [VertigO] La revue électronique en sciences de l'environnement, 2010. (2).
- [3] Nkengfack, H., E.N. Domguia, and F. Kamajou, *Analyse Des Determinants De L'Offre De L'Eau Potable Au Cameroun*. 2017.
- [4] Nauges*, C. and A. Reynaud*, *Estimation de la demande domestique d'eau potable en France*. Revue économique, 2001(1): p. 167-185.
- [5] VanderZaag, A., et al., *Survival of Escherichia coli in agricultural soil and presence in tile drainage and shallow groundwater*. Canadian Journal of Soil Science, 2010. (3): p. 495-505.
- [6] Klingeman, P.C., J.-P. Bravard, and Y. Giuliani, *Les impacts morphodynamiques sur un cours d'eau soumis à un aménagement hydroélectrique à dérivation: le Rhône en Chautagne (France)/Morphodynamic impacts on a river affected by a hydro-electric diversion scheme: the Rhône in the Chautagne region of France*. Géocarrefour, 1994. (1): p. 73-87.
- [7] SIDÉRA, I., *Animaux domestiques, bêtes sauvages et objets en matières animales du Rubané au Michelsberg: de l'économie aux symboles, des techniques à la culture*. Gallia Préhistoire—Archéologie de la France préhistorique, 2000. : p. 107-194.
- [8] SMAIL, L. and M.F. BOUKHOULDA, *Contribution à l'étude de la désinfection de l'air par l'ozone généré par décharge à barrière diélectrique*. 2022.
- [9] Nathanson, J.A., *Water pollution*. Encyclopædia Britannica, 2019.
- [10] Bhargava, A., *Physico-chemical waste water treatment technologies: an overview*. Int J Sci Res Educ, 2016. (5): p. 5308-5319.
- [11] El-Seedi, H.R., et al., *Metal nanoparticles fabricated by green chemistry using natural extracts: Biosynthesis, mechanisms, and applications*. RSC advances, 2019. **9**(42): p. 24539-24559.
- [12] سمير, et al., *Synthèse verte de nanoparticules d'argent*. 2020.

- [13] Dikshit, P.K., et al., *Green synthesis of metallic nanoparticles: Applications and limitations*. Catalysts, 2021. (8): p. 902.
- [14] Ealia, S.A.M. and M. Saravanakumar. *A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application*. in *IOP conference series: materials science and engineering*. 2017. IOP Publishing.
- [15] Dhand, C., et al., *Methods and strategies for the synthesis of diverse nanoparticles and their applications: a comprehensive overview*. Rsc Advances, 2015. (127): p. 105003-105037.
- [16] Faraji, G., H.S. Kim, and H.T. Kashi, *Severe plastic deformation: methods, processing and properties*. 2018: Elsevier.
- [17] Rane, A.V., et al., *Methods for synthesis of nanoparticles and fabrication of nanocomposites*, in *Synthesis of inorganic nanomaterials*. 2018, Elsevier. p. 121-139.
- [18] Lu, A.H., E.e.L. Salabas, and F. Schüth, *Magnetic nanoparticles: synthesis, protection, functionalization, and application*. Angewandte Chemie International Edition, 2007. (8): p. 1222-1244.
- [19] Nunes, D., et al., *Synthesis, design, and morphology of metal oxide nanostructures*. Metal Oxide Nanostructures, 2019: p. 21-57.
- [20] Taheri, A. and S.M. Jafari, *Nanostructures of gums for encapsulation of food ingredients*, in *Biopolymer Nanostructures for Food Encapsulation Purposes*. 2019, Elsevier. p. 521-578.
- [21] Ponath, P., A. Posadas, and A. Demkov, *Ge (001) surface cleaning methods for device integration*. Applied Physics Reviews, 2017. (2): p. 021308.
- [22] Bokov, D., et al., *Nanomaterial by sol-gel method: synthesis and application*. Advances in Materials Science and Engineering, 2021. : p. 1-21.
- [23] Hussain, T. and R. Batool, *Microemulsion route for the synthesis of nano-structured catalytic materials*. Properties and Uses of Microemulsions, 2017..
- [24] Solanki, J.N. and Z.V.P. Murthy, *Controlled size silver nanoparticles synthesis with water-in-oil microemulsion method: a topical review*. Industrial & engineering chemistry research, 2011. (22): p. 12311-12323.
- [25] Hebbalalu, D., et al., *Greener techniques for the synthesis of silver nanoparticles using plant extracts, enzymes, bacteria, biodegradable polymers, and microwaves*. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2013. (7): p. 703-712.

- [26] Silver, S., *Bacterial silver resistance: molecular biology and uses and misuses of silver compounds*. FEMS microbiology reviews, 2003. (2-3): p. 341-353.
- [27] Yadav, N., S. Khatak, and U.S. Sara, *Solid lipid nanoparticles-a review*. Int. J. Appl. Pharm, 2013. (2): p. 8-18.
- [28] Didier, A. *Enregistrement et électroacoustique moderne enregistrement magnétique*. in *Annales des Télécommunications*. 1958. Springer.
- [29] Naud, C.c., *Particules magnétiques pour le traitement du cancer par effet magnéto-mécanique, application au glioblastome*. 2019, Université Grenoble Alpes (ComUE).
- [30] Briand, A., et al. *Influence de la vitesse de filtration sur le colmatage de filtres THE plissés pour différents types d'aérosols*. in *ACTES du 14e CONGRES FRANÇAIS sur les AEROSOLS CFA 98 Paris, 8-9 decembre 1998*. 1998.
- [31] Kayvantash, D., *Caractérisation des particules ferrugineuses dans la Seine avec le magnétisme environnemental*. 2016, Paris Sciences et Lettres (ComUE).
- [32] Devillers, N., *Caractérisation et modélisation de composants de stockage électrochimique et électrostatique*. 2012, Université de Franche-Comté.
- [33] Costanzo, S., *Synthèse, caractérisation et spectroscopie de nanoparticules de Co et (coeur) Co/(coquille) CoO auto-organisées*. 2017, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
- [34] Cornu, J.-M., *Nouvelles technologies, nouvelles pensées? Vol. 1*. 2008: FYP éditions.
- [35] Truffault, L., *Synthèse et caractérisation de nanoparticules à base d'oxydes de cérium et de fer pour la filtration des UV dans les produits solaires*. 2010, Université d'Orléans; University of Wollongong (Wollongong, Australie).
- [36] Boudet, N., *Gazéification du charbon*. 2009: Ed. Techniques Ingénieur.
- [37] Couhert, C., *Pyrolyse flash à haute température de la biomasse ligno-cellulosique et de ses composés: production de gaz de synthèse*. 2007, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [38] Barthe, L., *Synthèse et dépôt de nanoparticules métalliques dans un support poreux par imprégnation en voie sèche dans un lit fluidisé: élaboration de catalyseurs supportés*. 2007.
- [39] Chamoumi, M., *Nouvelle Génération de Catalyseurs Supportés par Valorisation d'un Résidu d'Enrichissement (Procédé UGS) d'une Scorie de TiO₂: Le Catalyseur Ni-UGSO Appliqué au Reformage de Méthane [New Generation of Catalysts Supported by*

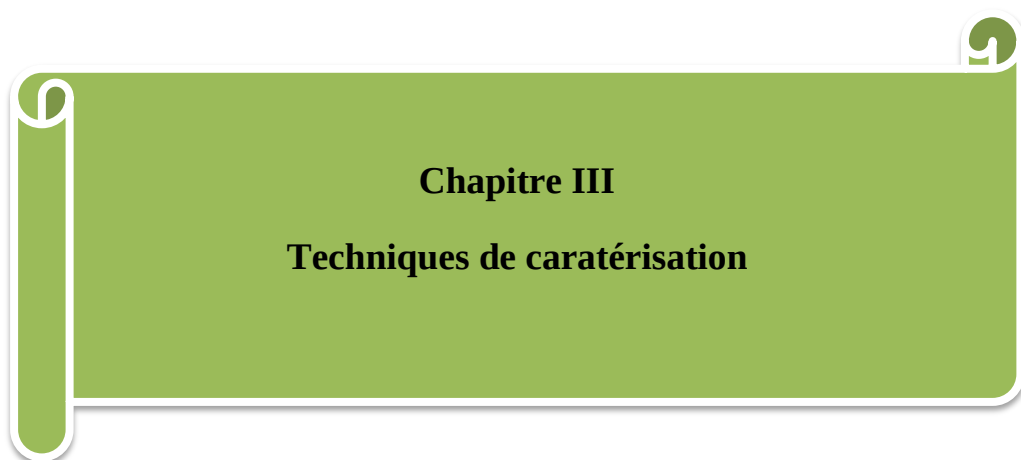
- Upgrading an Enrichment Residue (UGS Process) of TiO₂ Slag: Ni-UGSO Catalyst Applied to Methane Reforming*]. 2017, Université de Sherbrooke Sherbrooke, QC, Canada.
- [40] Al Akoumy, C., *NANOPARTICULES «YOLK-SHELL» STIMULABLES PAR CO₂ POUR LA CATALYSE CONTRÔLÉE PAR GAZ*. 2022.
- [41] Commandre, J.-M., *Formation des oxydes d'azote lors de la combustion de cokes de pétrole dans des conditions de précalcinateur de cimenterie*. 2002, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT.
- [42] Larue, C., *Impact de Nanoparticules de TiO₂ et de Nanotubes de Carbone sur les Végétaux*. 2011, AgroParisTech.
- [43] Kurtjak, M., et al., *Biocompatible nano-gallium/hydroxyapatite nanocomposite with antimicrobial activity*. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 2016. : p. 1-13.
- [44] Morcrette, M., *Micro et nanoparticules pour des applications biotechnologiques: fabrication de nanoparticules par copolymère dibloc pour l'imagerie médicale; destruction de cellules cancéreuses par vibrations magnéto-mécaniques de microparticules magnétiques*. 2015, Université Grenoble Alpes.
- [45] Zeghilet, N. and E.O.S. El Hadeif, *Optimisation des paramètres de détection et de quantification des résidus d'antibiotiques dans la viande blanche par chromatographie liquide haute performance (HPLC)*. 2009.
- [46] Vichery, C., *Procédé de recuit protégé appliqué à des nanoparticules d'oxyde de fer: étude des relations structure/propriétés magnétiques*. 2012, Ecole Polytechnique X.
- [47] Decaffmeyer, M., A. Thomas, and R. Brasseur, *Les médicaments peptidiques: mythe ou réalité?* BASE, 2008.
- [48] Souriau, J.-M. *Modèle de particule à spin dans le champ électromagnétique et gravitationnel*. in *Annales de l'IHP Physique théorique*. 1974.
- [49] Gatel, C., *Elaboration et étude d'un système hybride" Oxyde ferrimagnétique/Métal non magnétique/Oxyde ferrimagnétique"*. 2004, INSA de Toulouse.
- [50] Mornet, S., *Synthèse et Modification Chimique de la Surface de Nanoparticules de Maghémite à des Fins D'applications Biomédicales*. 2002, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I.

- [51] Belharet, K., *Navigation prédictive d'un microrobot magnétique: Instrumentation, commande et validation*. 2013, Université d'Orléans.
- [52] Le Goff, G.L.G., *Immobilisation de biomolécules pour l'analyse multiparamétrique sur biopuces: application au génotypage érythrocytaire haut-débit*. 2011, Université Claude Bernard-Lyon I.
- [53] Ung, D., *Nanoparticules métalliques anisotropes synthétisées par voie chimique: fils, plaquettes et particules hybrides de cobalt-nickel, propriétés structurales et magnétiques; fils d'argent auto-organisés*. 2005, Université Paris-Diderot-Paris VII.
- [54] Mellal, L.s., *Modélisation et commande de microrobots magnétiques pour le traitement ciblé du cancer*. 2016, Université d'Orléans.
- [55] Maclair, G., *Développement d'algorithmes temps réel de traitement de séquences d'images animées biomédicales pour la thérapie guidée par IRM*. 2008, Bordeaux 1.
- [56] Jacques, F., *Méthodologie expérimentale pour la détermination des limites d'emploi des équipements de protection individuelle des sapeurs-pompiers-Application à la lutte contre le feu par des essais sur l'Homme en conditions opérationnelles*. 2008, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- [57] Balint, P., *Elaboration et étude du comportement de micro/nanoparticules antiferromagnétiques synthétiques pour applications biotechnologiques*. 2011, Université de Grenoble.
- [58] Gibert, M., *Voir son steak comme un animal mort: véganisme et psychologie morale*. 2015: Lux Éditeur.
- [59] BOUZIDI, A., *CONTRIBUTION A LA MODELISATION DES MATERIAUX SUPRACONDUCTEURS A HAUT TEMPERATURE CRITIQUE (HTC)*. 2012, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila.
- [60] Balogoun, C.K., et al., *Préparation des charbons actifs par voie chimique à l'acide phosphorique à base de coque de noix de coco*. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 2015. (1): p. 563-580.
- [61] Obeid, L.G., *Synthèse et caractérisation de matériaux magnétiques pour l'adsorption de polluants présents dans les eaux*. 2014, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
- [62] Mboug, N. and M. Goletti, *Formulation d'insecticides en poudre par adsorption des huiles essentielles de Xylopi aethiopica et de Ocimum gratissimum sur des argiles camerounaises modifiées*. 2012, Montpellier, Ecole nationale supérieure de chimie.

- [63] Bentahar, Y., *Caractérisation physico-chimique des argiles marocaines: application à l'adsorption de l'arsenic et des colorants cationiques en solution aqueuse*. 2016, COMUE Université Côte d'Azur (2015-2019); Université Abdelmalek Essaâdi
- [64] Orm, N.B., *Nano-matériaux hybrides pour l'élimination de micro-polluants organiques (HAP) dans les effluents aqueux*. 2012, Université Claude Bernard-Lyon I.
- [65] LALMI, S. and A. LAZREG, *Effet de deux molécules nanométriques sur les paramètres physiologiques des escargots «Helix aspersa»*. 2016, Université laarbi tebessi tebessa.
- [66] Crini, G., A.J. Montiel, and P.-M. Badot, *Traitement et épuration des eaux industrielles polluées: Procédés membranaires, bioadsorption et oxydation chimique*. 2007: Presses Univ. Franche-Comté.
- [67] Festy, B., et al., *Qualité de l'eau*. Environnement et santé publique-Fondements et pratiques, 2003: p. 333-368.
- [68] Soenen, S.J., et al., *Intracellular nanoparticle coating stability determines nanoparticle diagnostics efficacy and cell functionality*. Small, 2010. **6**(19): p. 2136-2145.
- [69] Tedjani, M.L., *Optimizing the Biosynthesis Temperature of Iron Oxide Nanoparticles Using Moringa Oleifera Extract and Study of their Biological Activities*. 2022, University of Eloued جامعة الشهيد حمه لخضر.
- [70] Teja, A.S. and P.-Y. Koh, *Synthesis, properties, and applications of magnetic iron oxide nanoparticles*. Progress in crystal growth and characterization of materials, 2009. **55**(1-2): p. 22-45.
- [71] Tiquia-Arashiro, S. and D. Rodrigues, *Nanoparticles Synthesized by Microorganisms, in Extremophiles: Applications in Nanotechnology*. 2016, Springer International Publishing: Cham. p. 1-51.
- [72] de Lima, J.F., et al., *ZnO: CeO₂-based nanopowders with low catalytic activity as UV absorbers*. Applied Surface Science, 2009. **255**(22): p. 9006-9009.
- [73] *Punicagrantum. L.* 2022.
- [74] Etrillard, C., *Synthèse de nanoparticules à transition de spin et étude des propriétés, application en électronique moléculaire*. 2011, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I.
- [75] Tourbin, M., *Caractérisation et comportement de suspensions concentrées de nanoparticules sous écoulement: Application aux processus d'agrégation et de rupture*. 2006.

- [76] Gaffet, E., *Nanomatériaux: différentes voies de synthèse, propriétés, applications et marchés*. Actualité et dossier en santé publique, 2008. : p. 183.
- [77] Rousset, A., *Sur quelques aspects des nanomatériaux*. ACTUALITE CHIMIQUE, 2005. : p. 15.
- [78] Dormann, J., *Le phénomène de superparamagnétisme*. Revue de physique appliquée, 1981. (6): p. 275-301.
- [79] Younsi, K., *Etude expérimentale et théorique des propriétés structurales et magnétiques des nanomatériaux Pr (Co, Fe) 3*. 2011, Université Paris-Est.
- [80] Néel, L. *Étude théorique du couplage ferro-antiferromagnétique dans les couches minces*. in *Annales de Physique*. 1967.
- [81] Paris, P. and J. Tréherne, *Un sélecteur magnétique pour l'enregistrement de spectres d'électrons à l'aide d'un détecteur au silicium*. Revue de Physique Appliquée, 1969. (2): p. 291-292.
- [82] Garnero, C., *Synthèse organométallique de nanoparticules de FeCo pour l'intégration sur inductance*. 2016, INSA de Toulouse.
- [83] Dadi, R., *Synthèse de nanoparticules d 'oxydes métalliques et leur activité antibactérienne*. 2019, Université Paris-Nord-Paris XIII.
- [84] Ammar, M., *Étude du magnétisme de composites métal-oxyde et métal-diélectrique nanostructurés pour composants passifs intégrés*. 2007, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan.
- [85] Bourezg, A., *Propriétés physiques de couches minces de Co_{100-x} Pdx élaborées sous vide par évaporation thermique*. 2018.
- [86] Ardigo, M.R., *Optimisation d'interconnecteurs métalliques pour la production d'hydrogène par électrolyse de la vapeur d'eau à haute température (EVHT)*. 2012, Université de Bourgogne.
- [87] Askri, D., *Etude de la biodistribution et de la toxicité des Nanoparticules de Fer chez le rat et sur une lignée de neuroblastome*. 2018, Université Grenoble Alpes; Université de Carthage (Tunisie).
- [88] Mehadjebi, S. and A. Chaieb, *La synthèse des nano poudres de Cu O avec la méthode précipitation Sol-Gel en utilisant le précurseur CuSO₄ et l'étude de leurs propriétés structurales et optiques*. 2017.

- [89] Wautier, J.-L., *le sens de la médecine: ou la révolution culturelle dans le système de santé*. le sens de la médecine, 2013: p. 1-170.
- [90] Joshy, K., S. Snigdha, and S. Thomas, *Nanotechnology and Its Implication in Antiviral Drug Delivery*. Nanoparticles for Drug Delivery, 2021: p. 169-207.
- [91] Li, S., et al., *Few-layer transition metal dichalcogenides (MoS₂, WS₂, and WSe₂) for water splitting and degradation of organic pollutants: Understanding the piezocatalytic effect*. Nano Energy, 2019. : p. 104083.



Chapitre III

Techniques de caractérisation

Introduction

Ce chapitre vise à fournir un aperçu complet des techniques de caractérisation utilisées pour les nanoparticules de fer. Il explore diverses méthodes analytiques qui permettent de sonder et de comprendre les propriétés structurales, morphologiques et magnétiques de ces nanoparticules. En acquérant des connaissances sur leurs caractéristiques, une compréhension plus approfondie peut-être obtenue, conduisant à l'optimisation des méthodes de synthèse et l'adaptation des propriétés des nanoparticules pour répondre aux exigences d'application spécifiques. Des techniques comme XRD, TEM, SEM révèlent la composition, la taille, la forme, La compréhension de ces propriétés permet l'optimisation pour diverses applications.

1. Principe de la spectroscopie infrarouge :

La spectroscopie IR est une technique spectroscopique qui utilise l'interaction de la lumière IR avec les liaisons chimiques d'une molécule pour déterminer sa structure moléculaire. Contrairement aux autres spectroscopies optiques qui impliquent des transitions électroniques, la spectroscopie IR est basée sur l'absorption du rayonnement par les niveaux d'énergie vibratoire de la molécule. Le rayonnement IR a une gamme de longueurs d'onde de 0,8 μm à 1000 μm et est divisé en trois catégories : proche infrarouge (0,8 à 2,5 μm ou 12500-4000 cm^{-1}), moyen infrarouge (2,5 à 25 μm ou 4000-400 cm^{-1}) et loin infrarouge (25 à 1000 μm ou 400-10 cm^{-1}) [1]



Figure III.1 : Un spectromètre infrarouge

❖ Principe de fonctionnement et appareillage :

Les spectres sont acquis à l'aide de spectromètres qui incluent au moins 4 parties essentielles :

- Une source lumineuse
- Un système de séparation de lumière polychromatique en fonction des longueurs d'onde
- Un système permettant de présenter l'échantillon
- Un ou plusieurs capteurs photosensibles.

Le dispositif de filtration (*Figure III.2*) a été utilisé pour sélectionner les longueurs d'onde de la source lumineuse à l'aide d'une série de filtres optiques d'interférence placés sur un barillet rotatif. Les filtres sont placés séquentiellement dans le chemin de lumière, où la source de lumière dans ce dispositif est la lampe halogène au tungstène, qui génère une lumière multi-longueurs d'onde. Le détecteur général utilise généralement des semi-conducteurs au plomb

(PbS) pour détecter la lumière purifiée et la convertir en un signal électrique mesurable et analytique

Ce système d'analyse de routine simple dispose de 3 à 20 filtres, est puissant et a un bon rapport signal/bruit. Ce système est utilisé dans de nombreuses applications analytiques courantes et a été développé pour répondre à différents besoins. Les fabricants de matériel sont en mesure de fournir les kits de filtre les plus appropriés, ce qui facilite la réalisation d'analyses précises et efficaces par les chercheurs. La **(Figure III.3)** montre un exemple de dispositif de filtrage conçu pour le contrôle direct [1]. La matière première est transportée en déplaçant le tapis dans la machine. Lampe quartz-halogène est utilisé pour produire un faisceau de lumière parallèle qui éclaire le produit à analyser. Le barillet du filtre est alimenté à une vitesse de rotation d'environ 50Hz, ce qui permet de mesurer presque en continu l'échantillon analysé. Une proportion de lumière proche infrarouge, réfléchie par le produit de l'analyseur, est recueillie à l'aide d'un miroir incurvé et se concentre sur le détecteur de sulfure de plomb.

Cette machine est une option appropriée pour analyser des produits de granulométrie fine et de granulométrie normale. Il a été mis en œuvre dans de nombreuses applications, telles que la mesure de l'humidité dans divers produits et l'analyse des protéines dans un tourteau de soja. Le principe du spectromètre monochrome **(Figure III.4)** est appliqué dans ce dispositif, qui est très similaire au principe du dispositif de filtration mentionné précédemment. Un réseau monochrome tridimensionnel est utilisé pour sélectionner la lumière à différentes longueurs d'onde dans ce système. La rotation de la grille monochrome est contrôlée à l'aide d'un autre moteur, qui fournit une large gamme d'angles différents pour des longueurs d'onde spécifiques. Ce moteur peut être ajusté pour choisir la longueur d'onde souhaitée, permettant le changement de couleur et l'onde optique transmise.[2]

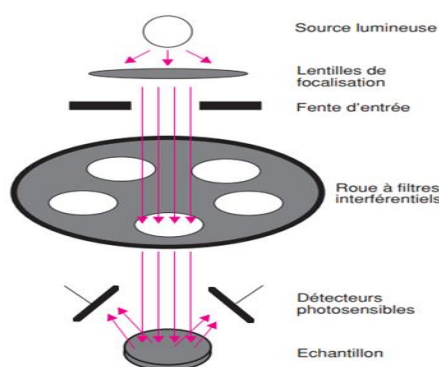


Figure III.2: Principe d'un spectromètre à filtres optiques

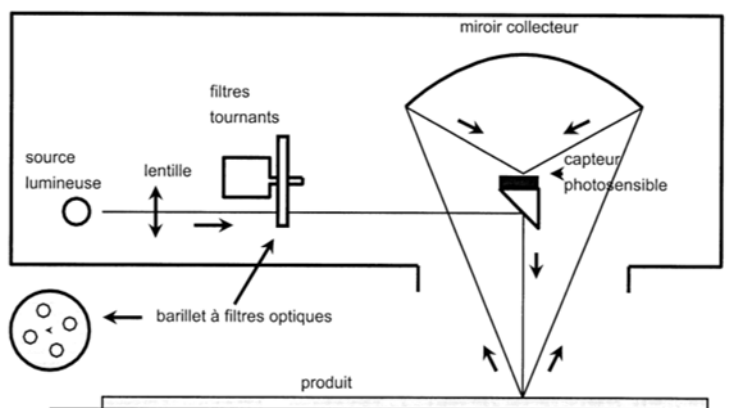


Figure III.3 : Exemple d'un spectromètre à filtres conçu pour l'analyse « en ligne ».

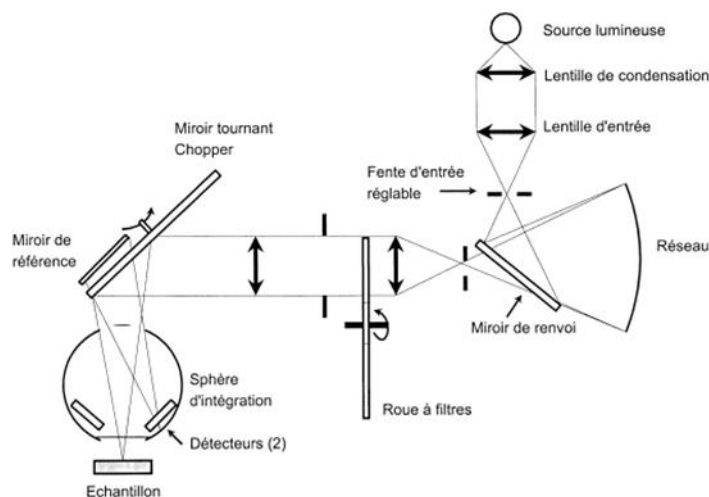


Figure III.4 . Principe d'un spectromètre à monochromateur

2. Technique UV-Visible :

Le spectrophotomètre UV-visible fonctionne sur le principe que lorsqu'un atome ou une molécule absorbe un rayonnement électromagnétique dans le domaine UV ou visible, un électron passe d'un état fondamental stable à un état excité. L'appareil fonctionne en faisant passer un faisceau de lumière d'une longueur d'onde spécifique à travers un échantillon, puis en mesurant l'intensité de la lumière transmise à sa sortie de l'échantillon. La différence d'intensité entre l'incident et la lumière transmise est utilisée pour déterminer l'absorbance de l'échantillon à cette longueur d'onde particulière. L'absorbance est alors liée à la concentration de l'espèce absorbante dans l'échantillon par la loi Beer-Lambert [3].

2.1 Principe :

Le spectrophotomètre se compose généralement d'une source de lumière, d'un monochromateur pour sélectionner la longueur d'onde souhaitée, d'un porte-échantillon et d'un détecteur. Le détecteur mesure l'intensité de la lumière transmise, et les données sont enregistrées et analysées par un ordinateur. La spectrophotométrie UV-visible est couramment utilisée pour l'analyse quantitative de divers composés, y compris les composés phénoliques, dans un large éventail de domaines, comme les produits pharmaceutiques, les aliments et l'analyse environnementale.

Le principe de fonctionnement de l'appareil est représenté sur la (**Figure III.5**) . Il est composé essentiellement de [3]:

Une source de lumière (généralement UV et visible) ;

Un monochromateur (tel un prisme) permettant la sélection de longueur d'onde ;

Un détecteur (ou un signal est récolté).

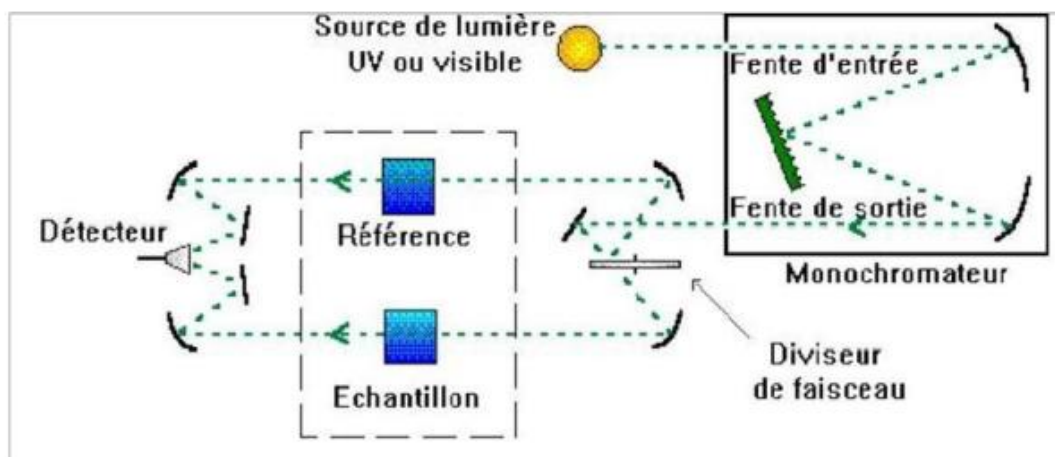


Figure III.5 : Schéma du principe de la spectrophotométrie UV-visible [3].

2.2.é. Caractérisation par adsorption :

L'adsorption est un phénomène inter facial dans lequel des molécules sont attachées à la surface d'un solide. Ce processus se produit à l'interface entre un solide et un gaz ou un liquide [1]. L'adsorption a de nombreuses applications dans divers domaines, tels que la dépollution et la purification dans des industries telles que le pétrole, la pétrochimie, les produits chimiques et les applications environnementales et pharmaceutiques [4]. Les propriétés de surface du matériau adsorbant et les propriétés physicochimiques des molécules adsorbées déterminent l'étendue de l'adsorption. L'adsorption est un processus réversible, et la force de l'adsorption dépend de la

nature de l'adsorbant et de l'adsorbant, ainsi que des conditions de température et de pression du système.

3. La diffraction par rayons X :

La diffraction des rayons X (DRX) est une technique scientifique utilisée pour déterminer la structure cristalline et l'orientation des matériaux [5]. Cette méthode consiste à exposer un matériau à un faisceau de rayons X, qui interagissent avec les atomes dans le matériau et diffractent ou dispersent. En analysant le schéma des rayons X dispersés, la structure cristalline du matériau peut être déterminée.

La diffraction par rayons X a de nombreuses applications, y compris fournir des informations sur les paramètres de réseau, la composition, la taille moyenne du grain, et les textures présentes dans un matériau. Ceci est réalisé en comparant le modèle de diffraction du matériel aux bases de données contenant plus de 69500 cartes JCPDS (Joint Committee for Powder Diffraction Standards) [6]

La diffraction des rayons X est un phénomène bien connu qui se produit lorsque les rayons X interagissent avec la matière organisée. L'onde diffractée résultante dépend de la structure cristallographique, car elle résulte de l'interférence des ondes émises par chaque atome. Pour caractériser un échantillon, un faisceau de rayons X monochromatique est dirigé vers l'échantillon, où il interagit avec le nuage d'électrons des atomes. Si l'échantillon a une structure cristalline, un phénomène de diffraction peut se produire lorsque les ondes de rayons X sont en phase, ce qui est atteint lorsque la condition de Bragg est satisfaite [7]:

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

Tel que :

$d(hkl)$: représente la distance inter réticulaire des plans (hkl) du réseau cristallin.

λ : la longueur d'onde du faisceau incident.

n : un entier qui représente l'ordre de la réflexion.

Θ : représente l'angle de diffraction de Bragg.

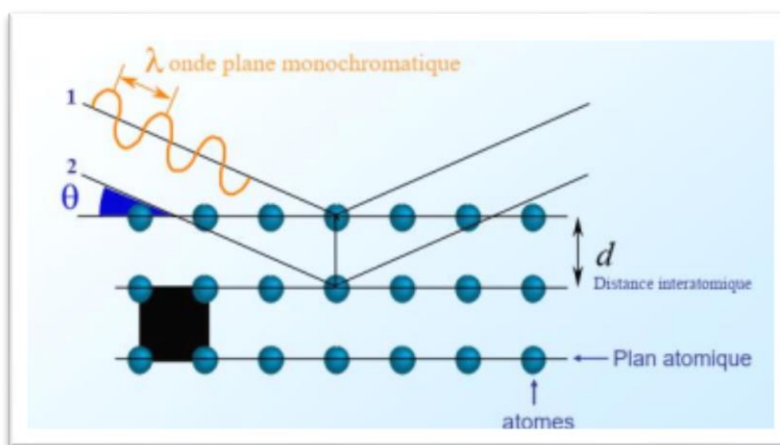


Figure III. 6 : Plans inter réticulaires

❖ Principe de DRX :

Dans la diffraction des rayons X, un faisceau de rayons X monochromatique est utilisé pour analyser la structure cristalline d'un échantillon. Le faisceau de rayons X est dirigé et limité par une fente de divergence pour contrôler la surface de l'échantillon au centre du goniomètre. La fente de réception placée devant le détecteur enregistre l'intensité du faisceau. L'anode du tube à rayons X, la lentille de l'échantillon et la fente du détecteur sont positionnées sur le cercle de mise au point. L'intensité du rayonnement diffracté est enregistrée par le détecteur sous forme d'impulsions électriques qui sont utilisées pour générer des diagrammes de l'intensité du rayonnement diffracté en fonction de l'angle de diffraction $I = f(2\theta)$.

Cette information est essentielle pour l'analyse de la structure cristalline. Lorsque les rayons X interagissent avec la matière, divers phénomènes peuvent se produire :

- L'absorption (transformation de l'énergie absorbée en chaleur par la vibration du (réseau).
- La transmission, fraction de rayons X qui n'interagit pas avec l'échantillon (utilisée en imagerie).
- La fluorescence, émission d'un rayonnement X secondaire lors de l'excitation du matériau par le rayonnement X incident utilisé pour déterminer la composition chimique des matériaux.
- La diffusion, Dans le domaine de la physique, la diffusion est définie comme un phénomène dans lequel une particule subit un changement de direction ou émet un photon après une collision avec un électron d'une orbite atomique. Cette diffusion induite par la collision peut impliquer un changement d'énergie ou non. La diffusion élastique, aussi appelée diffusion de Rayleigh, fait référence à la situation où il n'y a pas de changement d'énergie. D'autre part, la diffusion

inélastique, également connue sous le nom de diffusion Compton, se réfère à la situation où il y a un changement d'énergie. [8]

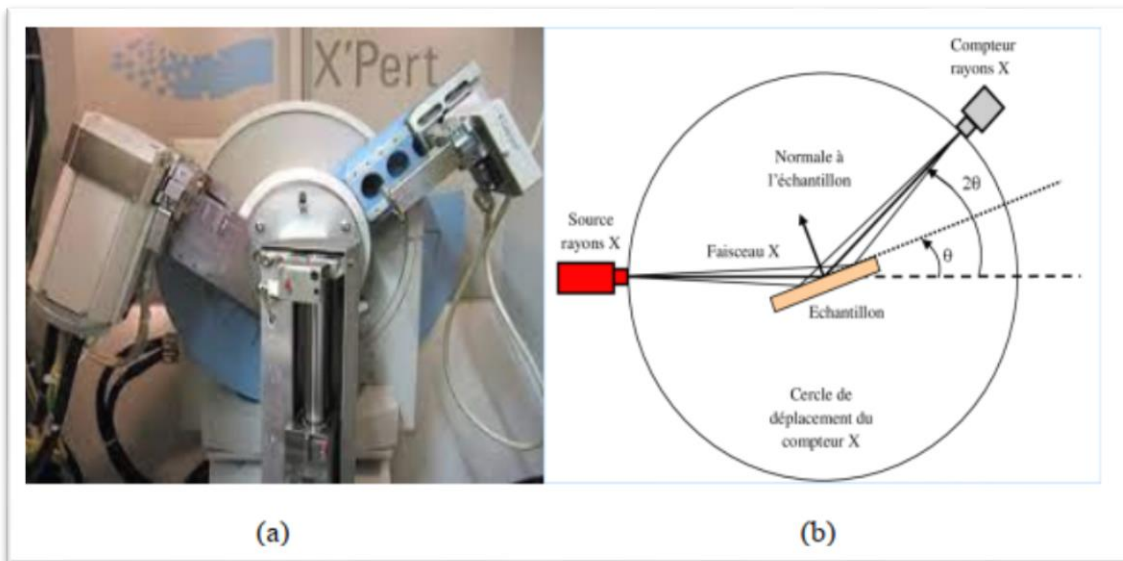


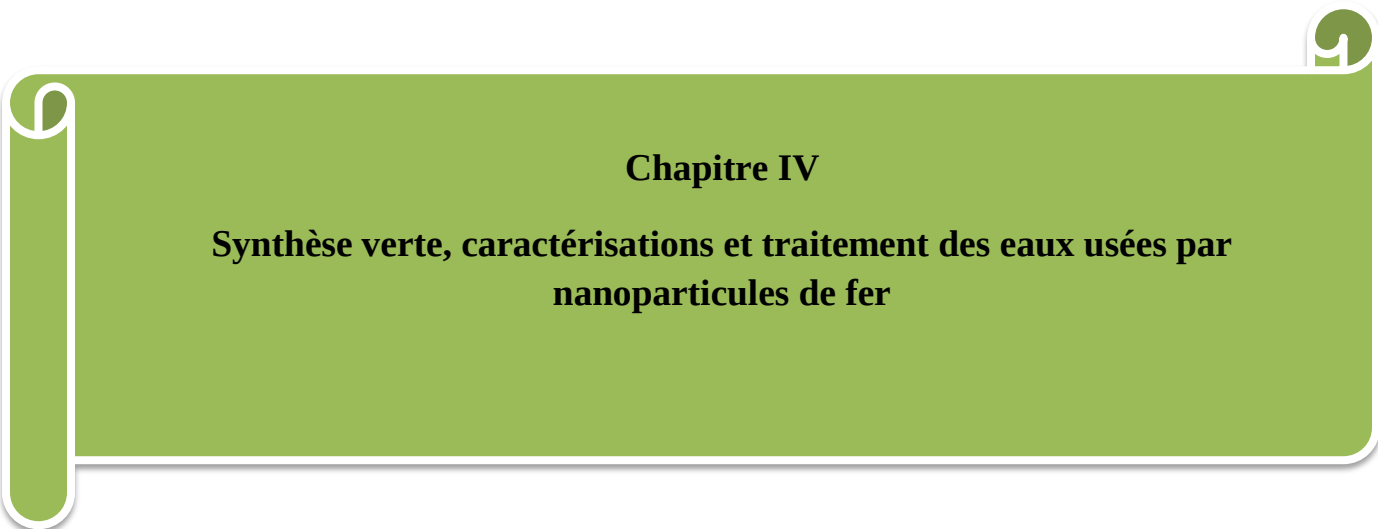
Figure III. 6 : (a)diffractomètre à rayon X (b) le schéma de principe d'un diffractomètre.

Conclusion

Les techniques de caractérisation sont essentielles pour déterminer les propriétés physiques et chimiques des nanoparticules, qui à leur tour influencent leur performance dans différentes applications. Certaines des techniques de caractérisation les plus couramment utilisées comprennent la microscopie électronique à balayage (MEB), la diffraction des rayons X (XRD), la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) et la spectroscopie UV-visible. Le MEB fournissent des informations sur la forme et la morphologie de surface des nanoparticules, tandis que DRX est utilisé pour déterminer leur structure cristalline. En revanche, la spectroscopie FTIR et la spectroscopie UV-visible fournissent des informations sur la composition chimique et les propriétés optiques des nanoparticules, respectivement.

Bibliographie :

- [1] BENBAYER, C., *Caractérisation des polymères*. 2021.
- [2] Benson, I., *The characteristics and scope of continuous on-line near infrared measurements*. Food Tech Europe (United Kingdom), 1995.
- [3] Chelbi, S., et al., *CARACTERISATIONS STRUCTURALE ET OPTIQUE DE L'AEROGEL DE TiO₂ ELABORE DANS L'ETHANOL SUPERCRITIQUE*. Revue Algérienne De Physique, 2015. (2): p. 69-73.
- [4] Mazouz, M. and L. Khelaifia, *Evaluation du pouvoir d'adsorption d'une chabon actif commercial*. 2018.
- [5] Lian-Ming, S. and M. Francis, *Traité Génie des Procédés, technique de l'ingénieur, vol JB2, adsorption Aspects théoriques, centre français*. J2730, J, 2009. 2731: p. 3-4.
- [6] Chitour, S., *Chimie des Surfaces; Introduction à la Catalyse*. Edition OPU Alger, 1981.
- [7] Atout, H., *Dégradation des polluants organiques par des procédés d'oxydation avancée: synthèse des matériaux photocatalytiques*. 2018.
- [8] Serna, F., J. Lagneau, and J.-M. Carpentier, *La diffraction des rayons X: une technique puissante pour résoudre certains problèmes industriels et technologiques*. Chim. Nouv, 2014: p. 1-12.



Chapitre IV

Synthèse verte, caractérisations et traitement des eaux usées par nanoparticules de fer

Introduction

Les nanomatériaux sont des matériaux nouveaux qui ont un impact technologique potentiel dans diverses applications. Ils offrent de grandes possibilités dans diverses disciplines, y compris la dépollution des eaux usées. Actuellement, plusieurs techniques de traitement des eaux usées sont appliquées et l'utilisation de nanomatériaux pour l'élimination des polluants est une technologie émergente. Il est donc évident que les tendances de publication dans le domaine des eaux usées à base de fer ont considérablement augmenté.

1. Exemple de la synthèse verte de nanoparticules de fer

1.1. Préparation de l'extrait

L'extrait de feuilles de *Murraya Koenigii* a été préparé à partir d'environ 25 g de feuilles. Ces dernières ont été soigneusement lavées à l'eau distillée, séchées, réduites en poudre à l'aide d'un mixeur et finement écrasées à l'aide d'un mortier et d'un pilon. 6 g de feuilles réduites en poudre ont été mélangés à 100 ml d'eau distillée dans un bécher et bouillis à 80 °C pendant 1 heure, puis filtrées sous vide à l'aide d'un papier filtre pour obtenir l'extrait [1].

1.2. Synthèse de nanoparticules de fer

0,01 M d'une solution aqueuse de nitrate ferrique ($\text{FeNO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) a été mélangé à l'extrait de *Murraya Koenigii*, pendant 15 minutes sous une agitation dans un rapport 1:1, à température ambiante. Ici, l'extrait de *Murraya Koenigii* a été utilisé comme agent réducteur et stabilisateur. La formation de nanoparticules de fer a été indiquée par le changement de couleur de la solution, qui est passée du rose clair au noir. Le précipité noir a été lavé plusieurs fois avec de l'éthanol 1 :1 et de l'eau, puis avec de l'eau bi-distillée. Les nanoparticules obtenues ont été séchées à 60 °C dans l'étuve [2].

1.3. Synthèse verte de nanoparticules de Fe à l'aide d'extraits de feuilles d'eucalyptus pour le traitement d'eaux usées animales

Dans cette étude, des nanoparticules de fer ont été synthétisées par une voie biosynthétique utilisant des extraits de feuilles d'eucalyptus (EL-Fe NPs). La microscopie électronique à balayage (MEB) et le spectromètre à dispersion d'énergie (EDX) ont confirmé la réussite de la synthèse des nanoparticules de fer sphéroïdales. En outre, la diffraction des rayons X (XRD) et le spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) ont indiqué que certains polyphénols sont liés aux surfaces des nanoparticules EL-Fe en tant qu'agent de couverture/stabilisation [3].

1.3.1. Etude par diffraction des rayons X

Le diagramme DRX des nanoparticules (EL-Fe) telles que préparées est présenté dans la Figure IV.1. On observe que l'ensemble du diagramme est dépourvu de pics de diffraction distincts, ce qui suggère que les nanoparticules (EL-Fe) synthétisées sont principalement de nature amorphe. Un pic caractéristique moins évident du fer zéro ($\alpha\text{-Fe}$) a été observé à environ 2θ de 44,9°. Le large pic d'épaulement à $2\theta = 25^\circ$ peut être identifié comme des matériaux

organiques adsorbés à partir d'un extrait de feuille d'eucalyptus comme agent de couverture/stabilisation, ce qui était cohérent avec les résultats FTIR suivantes [3].

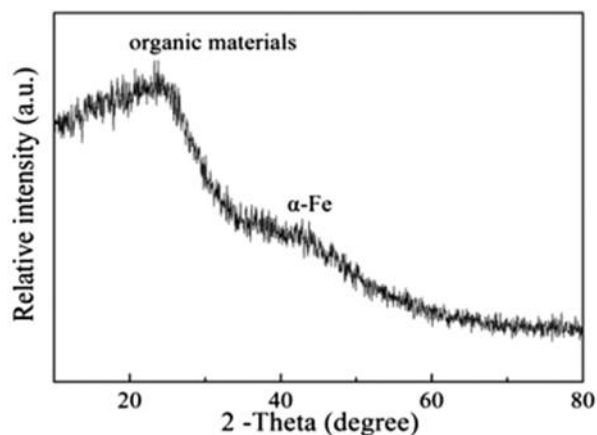


Figure IV.1 : Diagrammes DRX des nanoparticules (EL-Fe) préparées [3]

1.3.2. Étude par FTIR

Comme le montre la figure IV.2, le spectre FTIR des nanoparticules (EL-Fe) montre des vibrations d'étirement à 1616 cm^{-1} pour C = C et 1044 cm^{-1} pour les pics d'absorption C-O-C et O-H, respectivement. Sur la base de ce qui précède, différents groupes fonctionnels dans les extraits de feuilles, y compris les phénols, les amines, les carboxyles et les carbonyles, sont confirmés. Certains polyphénols sont liés aux surfaces des NPs (EL-Fe), les stabilisant ainsi en interagissant avec les groupes aminés ou carboxyliques libres. De plus, les bandes d'adsorption autour de 546 cm^{-1} et 424 cm^{-1} se réfèrent aux étirements Fe-O de Fe_3O_4 et Fe_2O_3 , confirmant la formation des nanoparticules d'oxyde de fer [3].

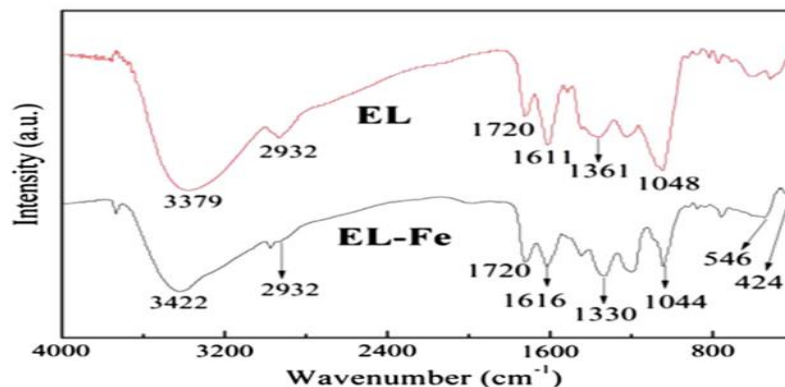


Figure IV.2 : Spectre FTIR de l'extrait (EL) et de nanoparticules (EL-Fe) [3]

1.3.3. Résultats de traitement d'eaux usées

Les résultats montrent l'énorme potentiel des nanoparticules (EL-Fe) pour la dépollution in situ des eaux usées animales. Les résultats ont indiqué que 71,7% de l'azote total et 84,5% de la DCO ont été éliminés, respectivement. Ceci a démontré le potentiel énorme des nanoparticules (EL-Fe) pour la dépollution des eaux usées animales [3].

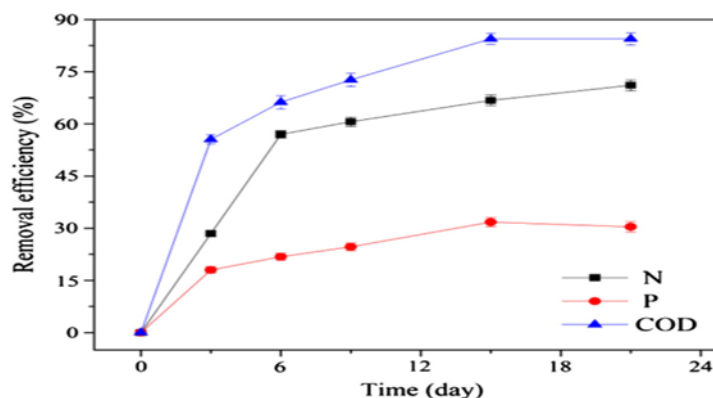


Figure IV.3 : Efficacité de l'élimination de l'azote total, du phosphore et de la DCO dans les eaux usées [3]

4. Synthèse verte de nanoparticules de Fe_3O_4 : Évaluation de leur activité catalytique dans la dégradation du bleu de méthylène

Ce travail présente la synthèse verte de nanoparticules de Fe_3O_4 à partir de l'extrait de feuilles de *Cynara cardunculus*. Cette voie de synthèse verte offre une alternative nouvelle et écologique à l'obtention de nanoparticules d'oxyde de fer. Des nanoparticules fonctionnelles avec des applications catalytiques potentielles, en particulier pour l'assainissement de l'eau contenant des colorants organiques, ont été synthétisées. La caractérisation structurale des nanoparticules de Fe_3O_4 a été réalisée par microscopie électronique à balayage (MEB) et par diffraction des rayons X [4].

4.1 Etude par diffraction des rayons X

La caractérisation structurale de l'échantillon est fondamentale pour confirmer la structure des nanoparticules obtenues. Sur la base des intensités observées dans le diagramme par diffraction des rayons X, la symétrie associée était la structure du Fe_3O_4 (Fm3m-325) selon la carte JCPDF N° 96-900-5813. Dans ce sens, nous pouvons affirmer que la réduction des ions Fe a été réalisée par les agents réducteurs présents sur l'extrait de feuille de *Cynara cardunculus* [4].

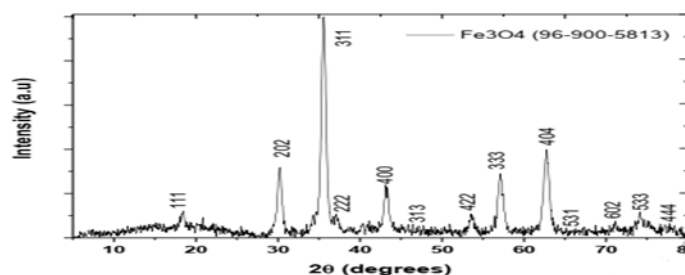


Figure IV.4 : Diagrammes DRX des nanoparticules de Fe₃O₄ [4]

4.2 Etude morphologique

La morphologie observée dans la figure IV.5 (a) est semi-sphérique, plusieurs agglomérats peuvent être appréciés. L'interaction magnétique générée par les individus Fe₃O₄ est envisagée pour expliquer cette agglomération observée par MEB. Afin d'établir la composition chimique des nanoparticules, la figure IV.5 (b) présente un spectre EDX de l'échantillon, les principaux composants observés sont Fe et O. Initialement, la composition chimique est cohérente avec la synthèse des nanoparticules de Fe₃O₄ [4].

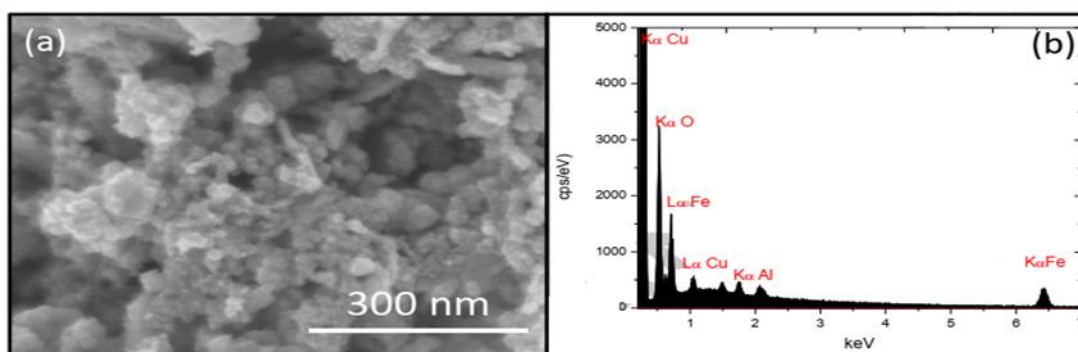


Figure IV.5 : (a) Image MEB et (b) Analyse chimique EDX des nanoparticules de Fe₃O₄ [4]

4.3 Résultats de la dégradation du bleu de méthylène par nanoparticules de Fe₃O₄

La figure IV.6 (a) montre le spectre UV-Vis associé aux nanoparticules de Fe₃O₄, au BM et au Fe₃O₄/BM au temps t=0. Dans cette image, on peut apprécier l'intensité typique à 658 nm. Cependant, le spectre UV-Vis des nanoparticules de Fe₃O₄ ne présente qu'une faible intensité à 230 nm, qui peut être associée aux composés organiques dérivés de la synthèse verte des nanoparticules de Fe₃O₄. Dans ce sens, la figure IV.6 (b) montre clairement la dégradation du BM par les nanoparticules de Fe₃O₄ dans une un de temps de 80 min. La bande d'absorption

typique associée au bleu de méthylène a diminué et a finalement disparu après 80 minutes de réaction, ce qui indique que la dégradation du colorant bleu de méthylène a lieu.

Les nanoparticules de Fe_3O_4 ont été évaluées sur la dégradation du bleu de méthylène. Des modèles cinétiques d'adsorption ont été utilisés pour établir le comportement pendant le processus de dégradation du bleu de méthylène. Les calculs du facteur de corrélation indiquent la meilleure adéquation linéaire entre les modèles théoriques et les données expérimentales obtenues lors de la dégradation du bleu de méthylène [4].

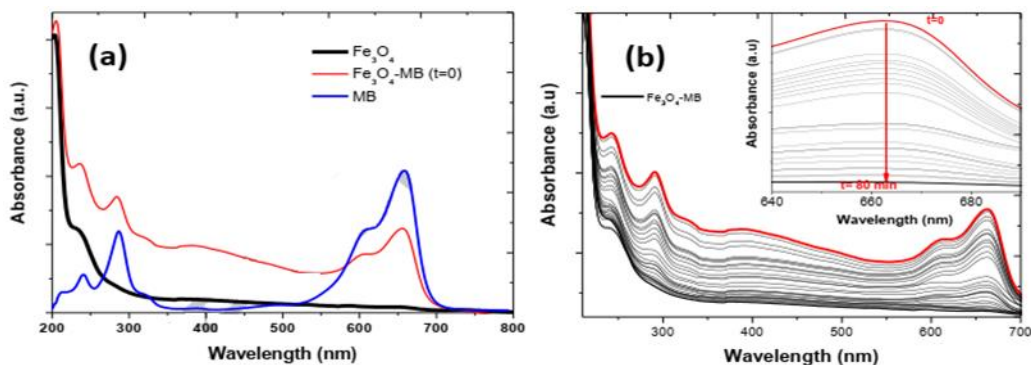


Figure IV.6 : (a) Spectre UV-Vis des échantillons Fe_3O_4 , $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-MB}$ et MB, (b) Dégradation du bleu de méthylène par les nanoparticules de Fe_3O_4 [4]

5. Synthèse biogénique de nanoparticules de Fe_3O_4 à l'aide d'un extrait de pelures de *Pisum sativum* : Dégradation du colorant Méthyl orange

Dans cette étude, des nanoparticules magnétiques Fe_3O_4 ont été synthétisées par une méthode facile et écologique utilisant un extrait aqueux de pelures de *Pisum sativum* (PS) comme agent réducteur et de fermeture. Les nanoparticules PS- Fe_3O_4 ainsi synthétisées sont caractérisées par diverses techniques telles que FTIR, DRX et TEM [5].

5.1. Étude par FTIR

La figure IV.7 (a, b) indique les spectres FTIR de l'extrait de *Pisum sativum* et des nanoparticules magnétiques Fe_3O_4 synthétisées. La spectroscopie FTIR a été réalisée pour identifier les biomolécules probables présentes dans l'extrait de *Pisum sativum* responsables de la réduction et de la stabilisation des nanoparticules de Fe_3O_4 . Un pic majeur a été identifié à environ 3435 cm^{-1} correspondant aux vibrations d'étirement O-H (groupe poly phénolique) a été déplacé à 3456 cm^{-1} . Le pic à 1635 cm^{-1} a révélé l'implication de la vibration d'étirement C=O des dérivés d'acide a été déplacé à 1646 cm^{-1} . Le pic à 585 cm^{-1} indique la bande caractéristique de Fe-O qui implique la présence de nanoparticules de PS- Fe_3O_4 [5].

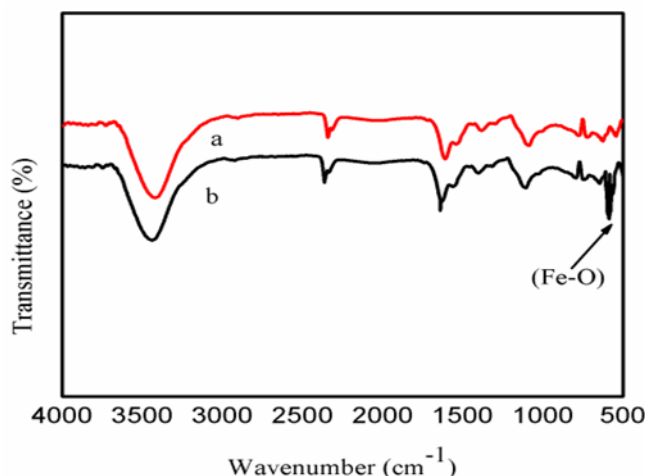


Figure IV.7 : Spectre FTIR de : (a) l'extrait de *Pisum sativum* et (b) des nanoparticules PS-Fe₃O₄. [5]

5.2 Etude par diffraction des rayons X

La figure IV.8 montre le diagramme DRX des nanoparticules PS-Fe₃O₄. Tous les pics du diagramme de Fe₃O₄ peuvent être indexés à la structure cubique à faces centrées. Les nanoparticules PS-Fe₃O₄ synthétisées étaient hautement cristallines et les pics de diffraction pouvaient être clairement attribués à la phase cubique à faces centrées du fer métallique. Une série de pics de diffraction caractéristiques indexés sur les plans (220), (311), (222), (400), (331), (422), (333) et (440) apparaissant à $2\theta = 29.0, 35.0, 36.6, 42.6, 47.1, 52.6, 57.2$ et 61.7° respectivement, coïncident avec les données DRX standard pour l'extrait de *Pisum sativum* de nanoparticules d'oxyde de fer avec une structure cubique à faces centrées (JCPDS N° : 82-1533). La taille moyenne des cristallites des nanoparticules PS-Fe₃O₄ est égale 38 nm. [5]

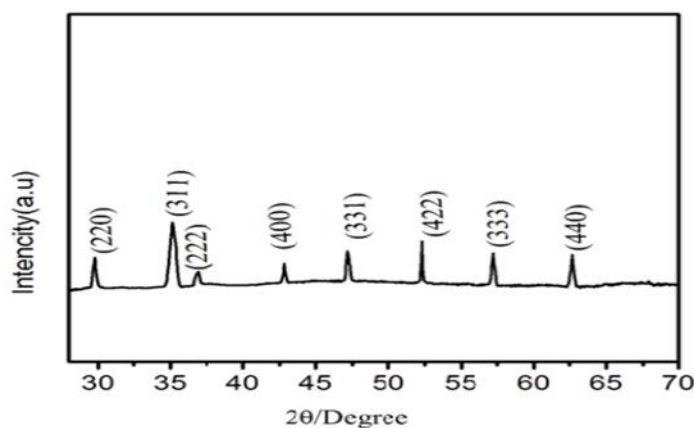


Figure IV.8 : Diagrammes DRX des nanoparticules de Fe₃O₄ [5]

5.3 Etude morphologique

La figure IV.9 (A) montre une morphologie sphérique agglomérée avec une taille moyenne de 20-30 nm. Le résultat de l'analyse par spectroscopie à dispersion d'énergie (EDX) est illustré à la figure IV.9 (B), ce qui confirme la présence significative de fer élémentaire. Pour confirmer que l'ensemble des nanoparticules contient du fer et de l'oxygène, aucun élément supplémentaire n'a été observé. Les résultats ci-dessus indiquent la forme sphérique et le fer élémentaire formés par une méthode verte. [5]

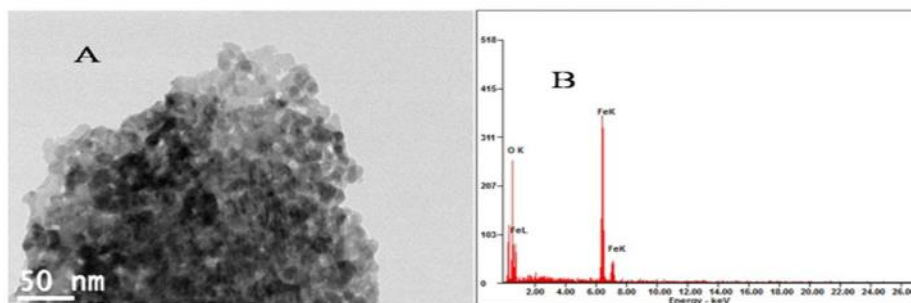


Figure IV.9 : (A) Images TEM de nanoparticules de PS-Fe₃O₄ (B) Analyse EDX de l'échantillon correspondant [5]

5.4 Résultats de la dégradation du Méthyl orange par nanoparticules de Fe₃O₄

Les résultats montrent que les nanoparticules de Fe₃O₄ obtenues présentent une surface spécifique élevée (17.6 m²/g) et une forme sphérique agglomérée avec une taille comprise entre 20 et 30 nm. Les propriétés magnétiques de nanoparticules de PS-Fe₃O₄ montrent clairement une nature ferromagnétique avec une magnétisation à saturation de 64,2 emu/g. En outre, les propriétés catalytiques des nanoparticules PS-Fe₃O₄ pour la dégradation du colorant Méthyl orange (MO) en solution aqueuse ont été étudiées par spectroscopie UV visible (figure IV.10). Les résultats montrent que les nanoparticules PS-Fe₃O₄ sont un catalyseur efficace pour la dégradation du colorant Méthyl orange que ceux précédemment rapportés [5].

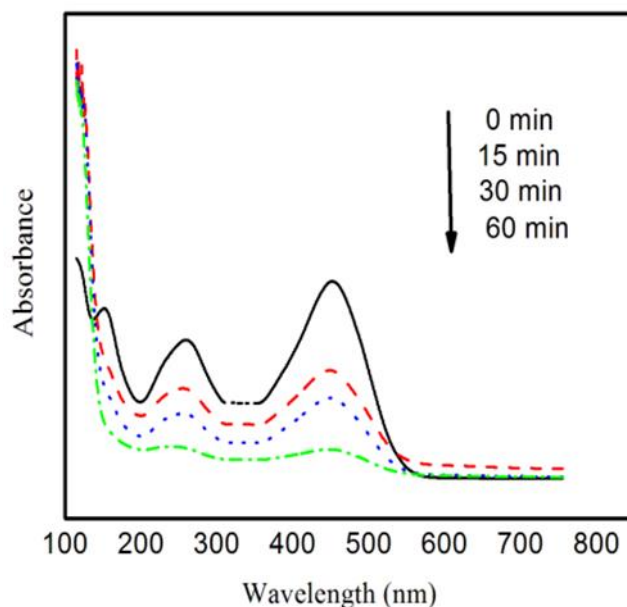


Figure IV.10 : Spectrophotomètre UV-vis du colorant méthyl orange en présence de nanoparticules de PS- Fe_3O_4 avec différents intervalles de temps 0, 15, 30 et 60 min [5]

6. Synthèse verte et activité photo catalytique de nanoparticules de magnétite (Fe_3O_4) à partir de l'extrait de feuilles de mûre des Andes

Dans la présente étude, une synthèse simple de nanoparticules de magnétite (Fe_3O_4) a été développée à partir d'un extrait de feuille de mûre des Andes. La technique de spectroscopie UV-vis a été utilisée pour étudier la formation initiale des nanoparticules de Fe_3O_4 . La morphologie et la cristallinité des nanoparticules ont été étudiées à l'aide de la microscopie électronique à transmission (TEM), de la diffraction des rayons X (XRD) et de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) [6].

6.1 Etude par spectroscopie UV-visible

Les substances de l'extrait (ABL) sont responsables de la formation de nanoparticules de Fe_3O_4 . Cela est confirmé lorsque la couleur des mélanges réactionnels devient noire après l'ajout de l'extrait jaune (ABL) au FeSO_4 (figure IV.11). La figure (IV.11a) montre clairement que l'extrait (ABL) présente une forte bande d'absorption à 240 et 360 nm, qui est attribuée à la présence de flavonoïdes et de tanins dans (ABL). L'absence du pic de l'extrait (ABL) à 240 et 360 nm dans le spectre des nanoparticules contenant du fer (figure IV.11 b et c) indique clairement que les flavonoïdes et les composés de tanin agissent en tant qu'agents réducteurs dans le processus de synthèse. Après la réaction, les spectres UV présentaient une large

absorption à une longueur d'onde plus élevée et il n'y avait pas d'absorption nette à des longueurs d'onde plus faibles, ce qui a confirmé la formation de nanoparticules de Fe_3O_4 [6].

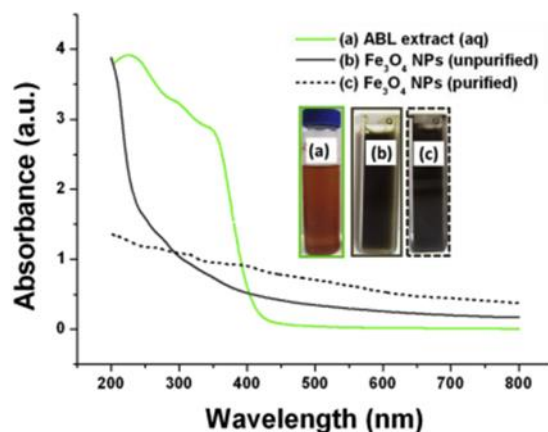


Figure IV.11 : Spectres d'absorption UV-vis de (a) l'extrait ABL, (b) nanoparticules de Fe_3O_4 non purifiées et (c) nanoparticules de Fe_3O_4 purifiées [6]

6.2 Etude morphologique

La morphologie des nanoparticules de Fe_3O_4 synthétisées à l'aide de l'extrait ABL et les images TEM représentatives sont montrées dans la figure IV.12. L'image montre clairement que les nanoparticules de Fe_3O_4 sont de nature sphérique et agglomérante avec une taille allant de 40 à 70 nm. Les divers composés poly phénoliques présents dans l'extrait de feuilles pourraient être responsables de la formation de groupements et de l'aggrégation des nanoparticules et agir en tant qu'agents de fermeture et de stabilisation [6].

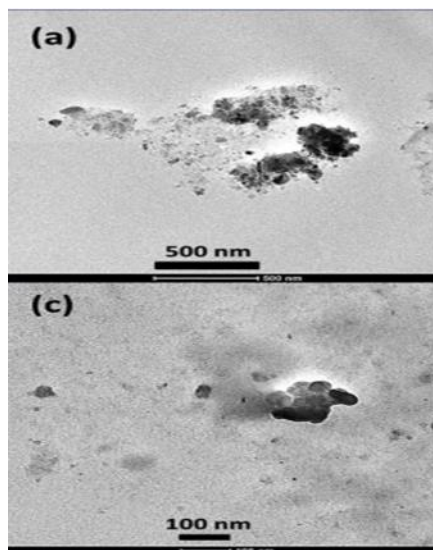


Figure IV.12 : Images TEM des nanoparticules de Fe_3O_4 [6]

6.3 Etude par diffraction des rayons X

La nature cristalline des nano particules de Fe_3O_4 est confirmée par l'analyse DRX comme le montre la figure IV.13. On constate que tous les pics de réflexion de Bragg à $2\theta = 29.81^\circ$ (220), 35.21° (311), 42.85° (400), 53.26° (422), 56.80° (511), 62.40° (440) et 89.50° (622) qui sont plus nets et coïncident bien avec la phase spinelle cubique de Fe_3O_4 (ICSD N° : 98-018-3973). Cependant, d'autres réflexions supplémentaires étaient très faibles, ce qui peut être dû à l'orientation préférentielle des NP de Fe_3O_4 . De petits pics indésirables qui peuvent correspondre à des impuretés provenant de l'extrait ABL. Aucun pic $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (hématite) ou d'hydroxydes métalliques n'a été détecté, ce qui confirme la formation complète de Fe_3O_4 . La taille cristalline moyenne des nanoparticules de Fe_3O_4 est de 18.69 nm [6].

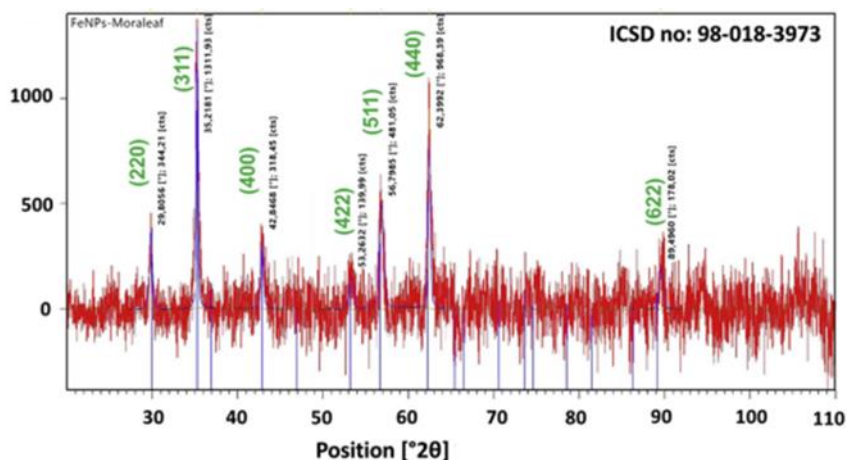


Figure IV.13 : Diagramme DRX des nanoparticules de Fe_3O_4 [6]

6.4 Étude par FTIR

Le spectre FTIR des nanoparticules de Fe_3O_4 utilisant l'extrait ABL est montré dans la figure IV.14. Les nanoparticules de Fe_3O_4 présentent une absorption à environ 3565, 3011, 2945, 2882, 1552, 1044, 948, 853, 804, 570 et 480 cm^{-1} . Le pic d'absorption à 3565 cm^{-1} est dû à la vibration d'étirement O-H, tandis que les pics à 3011, 2948 et 2882 cm^{-1} correspondent aux vibrations aromatiques C-H et aliphatiques C-H des nanoparticules de Fe_3O_4 . Les pics à 1552 cm^{-1} correspondent à l'étirement C=C dans les anneaux aromatiques et à l'étirement antisymétrique du groupe carboxylate (COO^-), tandis que 1044 cm^{-1} a été attribué au C-O-C du groupe phénolique. Par la suite, le spectre affiché à 570 et 480 cm^{-1} peut être attribué aux modes de vibration d'étirement Fe-O caractéristiques du Fe_3O_4 . Les résultats de FTIR indiquent la formation de nanoparticules de Fe_3O_4 , ce qui est cohérent avec les résultats de la DRX [6].

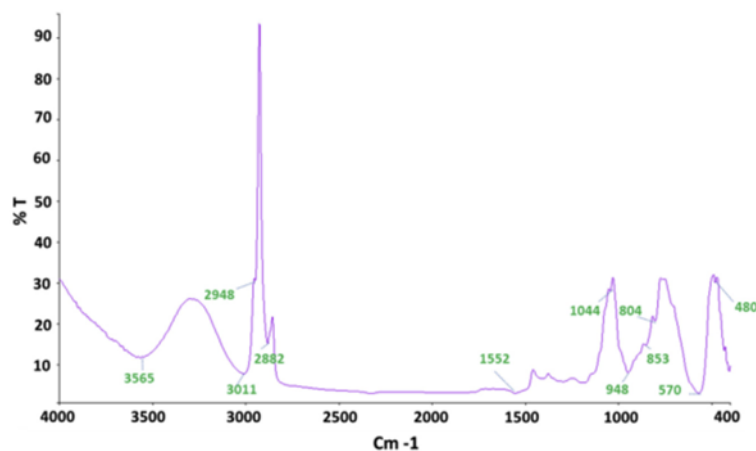


Figure IV.14 : Spectres FTIR des nanoparticules de Fe₃O₄ [6]

6.5 Résultats de l'activité photo catalytique des nanoparticules de Fe₃O₄

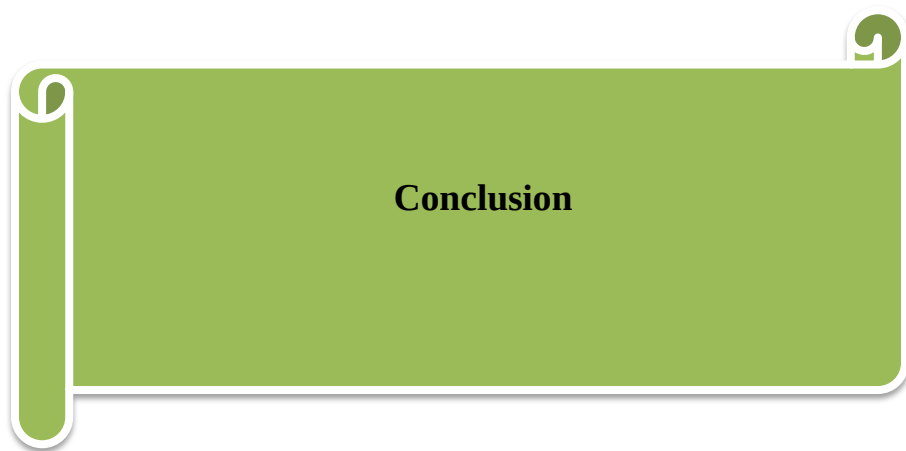
La caractérisation TEM indiqué la formation de nanoparticules de Fe₃O₄ sphériques d'une taille moyenne de $54,5 \pm 24,6$ nm. Les études XRD et FTIR ont confirmé l'existence de la phase spinelle cubique des nanoparticules de Fe₃O₄ et le pic de Fe-O à 570 cm⁻¹. Il a été observé que les nanoparticules de Fe₃O₄ telles que synthétisées présentaient une activité photo catalytique pour la dégradation des colorants organiques tels que le bleu de méthylène ($k = 0.0105475 \text{ min}^{-1}$), le rouge de Congo ($k = 0.0043240 \text{ min}^{-1}$), et le méthyle orange ($k = 0.0028930 \text{ min}^{-1}$), de manière efficace [6].

7. Conclusion

La production d'eaux usées est l'un des problèmes environnementaux les plus importants qui nécessitent un traitement des eaux usées dans les activités quotidiennes pour éviter les dommages causés aux humains, aux animaux, aux sols et aux plantes, ainsi que la propagation de diverses maladies. Les nanoparticules à base de fer, ont plusieurs avantages avec des performances efficaces dans l'assainissement des eaux usées. La surface spécifique, la réactivité élevée, la fonctionnalisation de la surface, les propriétés dépendantes de la taille, etc. sont les caractéristiques les plus courantes.

Bibliographie :

- [1] Devatha, C. P., Arun Kumar Thalla, and Shweta Y. Katte. "Green synthesis of iron nanoparticles using different leaf extracts for treatment of domestic waste water." *Journal of cleaner production* 139 (2016): 1425-1435.
- [2] Sravanthi, K., D. Ayodhya, and P. Yadgiri Swamy. "Green synthesis, characterization of biomaterial-supported zero-valent iron nanoparticles for contaminated water treatment." *Journal of Analytical Science and Technology* 9 (2018): 1-11.
- [3] Wang, Ting, et al. "Green synthesis of Fe nanoparticles using eucalyptus leaf extracts for treatment of eutrophic wastewater." *Science of the total environment* 466 (2014): 210-213.
- [4] de Jesús Ruíz-Baltazar, Álvaro, et al. "Eco-friendly synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles: evaluation of their catalytic activity in methylene blue degradation by kinetic adsorption models." *Results in Physics* 12 (2019): 989-995.
- [5] Prasad, Cheera, Gutha Yuvaraja, and Ponneri Venkateswarlu. "Biogenic synthesis of Fe₃O₄ magnetic nanoparticles using *Pisum sativum* peels extract and its effect on magnetic and Methyl orange dye degradation studies." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 424 (2017): 376-381.
- [6] Kumar, Brajesh, et al. "Phytosynthesis and photocatalytic activity of magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles using the Andean blackberry leaf." *Materials Chemistry and Physics* 179 (2016): 310-315.



nous avons trouvé une technologie qui est une approche prometteuse, efficace et durable pour traiter l'eau contaminée appelée synthèse verte des nanoparticules. Cinq feuilles de plantes importantes, les feuilles de *Murraya Koenigii*, les feuilles d'eucalyptus, les feuilles de *Candunculus*, la peau de *Pisum sativum* et les feuilles de mûre des Andes ont été étudiées en mettant l'accent sur l'étude des composés phénoliques trouvés dans ces différentes plantes.

Les méthodes de traitement des eaux contaminées ont été examinées à l'aide de méthodes physiques et chimiques, et la façon d'appliquer la synthèse environnementale dans ce contexte. Les nanoparticules extraites ont été étudiées et décrites à l'aide de techniques analytiques avancées telles que l'analyse infrarouge (IR), l'analyse par rayons X (XRD), la microscopie électronique (MEB) et la microscopie électronique à diffusion arrière (MET).

En outre, les résultats d'études antérieures sur le traitement des eaux contaminées ont été analysés et comparés à l'utilisation de nanoparticules de fer extraites des feuilles de ces plantes. Les résultats ont démontré l'efficacité des nanoparticules de fer dans l'élimination des polluants organiques et minéraux de l'eau contaminée, ainsi que l'impact des extraits végétaux sur la performance de ces particules.

Sur la base de ces études et analyses, on peut conclure que la technique de synthèse verte des nanoparticules a un grand potentiel dans le traitement et l'amélioration de la qualité des eaux contaminées, tout en préservant l'environnement, et améliorer la qualité de l'eau contaminée en éliminant les polluants organiques et minéraux. Cette technologie repose sur l'extraction de nanoparticules à partir d'extraits de plantes, ce qui les rend plus durables et respectueux de l'environnement.