

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Mohamed Seddik Benyahia - Jijel



FACULTÉ DES SCIENCES EXACTE ET INFORMATIQUE

DÉPARTEMENT DE CHIMIE

Mémoire de fin d'études

Présentation pour l'obtention du diplôme de

Master

Spécialité : Chimie Analytique

Option : Chimie des Matériaux

Thème

**Etude des méthodes de synthèse et les caractéristiques des
matériaux utilisés en photocatalyse**

Présenté par

MAROUF Dina

Le 21/10/2020

Devant le jury :

Président : A. KHALED

MCA Univ. MSB Jijel

Encadreur : H. BOUCHLOUKH

MCA Univ. MSB Jijel

Examineur : B. MEZHOUD

MCB Univ. MSB Jijel

Promotion 2019/2020

Remerciement

*Je remercie tout d'abord le bon **DIEU**, qui m'a donné le courage, la patience et la volonté pour réaliser ce travail.*

*Je tiens à remercier vivement ma promotrice Mme **BOUCHLOUKH Hadjira**, Maître de Conférences à la Faculté de Science Exacte, Université Mohamed Sadik Ben Yahya Jijel, qui a accepté de m'encadrer. Qu'elle trouve ici ma profonde gratitude pour son suivi constant et ses conseils dont elle m'est fait part au cours de la réalisation de ce travail.*

*Je suis très sensible à l'honneur que me fait **Monsieur A. Khaled**, en acceptant de présider le jury de ma soutenance. Mes remerciements s'adressent aussi à **Monsieur B. Mezhoud**, pour l'intérêt qu'il porte à ce travail en acceptant de l'examiner.*

Je voudrais exprimer à toute ma famille, et plus particulièrement à mes parents, mes soeurs, ma profonde reconnaissance pour leur patience et leur réconfort dans les moments de doutes et de découragements, Je ne saurai passer sous silence l'apport inestimable des autres membres de ma famille.

Dédicaces



Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux Tout d'abord je tiens à remercier le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour arriver à ce stade afin de réaliser ce travail que je dédie :

A Mes chers parents

source de vie, d'amour et d'affection

A mes très chères sœurs

A mes beaux frères

A mes neveux : Imrane & Younes

A ma nièce : Aya

A mes amies

A tous ceux que j'aime et que m'aiment

Dina

Sommaire

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

CHAPITRE I : Généralités sur les colorants

I.1.Histoire	3
I.2.Définition	3
I.3.Classification de colorants	4
I.3.1.Colorant naturels	4
I.3.2.Colorant synthétiques	4
I.3.2.1.Classification chimique.....	5
I.3.2.2.Classification tinctoriale.....	7
I.4.Toxicité des colorants	8
I.5.Impact des colorants sur l'environnement et la santé	8
I.5.1.Dangers à cours terme	8
I.5.2.Dangers à long terme	9
I.6. Méthyle Orange (MO)	10
I.6.1.Définition	10
I.6.2.Utilisation de méthyle orange	11
I.6.3.Toxicité de méthyle orange.....	11
I.6.4.Dégradabilité de méthyle orange.....	11

CHAPITRE II : Procédés des traitements des eaux

II.1.Introduction	12
II.2.Technique conventionnelles et leurs limites	12
II.2.1.Procédés physiques	12
II.2.1.1.Adsorption	12
II.2.1.2.Filtration membranaire	13
II.2.2.Procédés physico-chimiques	13
II.2.2.1.Coagulation / floculation	13
II.2.3.Procédés biologiques	13
II.3.Procédés d'oxydation avancés	13
II.3.2.Description et caractéristiques du radical hydroxyle $\cdot\text{OH}$	14
II.3.3.Mécanisme réactionnel du radical hydroxyle ($\cdot\text{OH}$)	15

CHAPITRE III : Photocatalyse Hétérogène

III.1.Introduction	17
III.2.Rappels sur les matériaux semi-conducteurs	17
III.3.Photocatalyseur ZnO	20
III.3.1.Structure cristalline	21
III.3.2.Propriétés de l'oxyde de zinc	22
III.3.2.1.Propriétés électroniques	22
III.3.2.2.Propriétés optiques et luminescence	22
III.3.2.3.Propriétés chimiques et catalytiques	22
III.3.3.Synthèse de l'oxyde de zinc	23
III.3.3.1.Voie sol gel	23
III.3.3.2.Méthode coprécipitation	23
III.3.3.3.Méthode hydrothermale	24
III.3.3.4.Synthèse par réaction à l'état solide	24
III.3.4.Méthodes de caractérisation et techniques d'analyse.....	24
III.3.4.1.Diffraction des Rayons X (DRX).....	25
III.3.4.2.Microscopie Électronique à Balayage (MEB).....	25
III.3.4.3.Microscopie électronique à transmission (MET).....	25
III.4.Principe de la photocatalyse hétérogène	25
III.5. Aspect cinétique de la photocatalyse.....	27
III.6.Influence des différents paramètres en photocatalyse hétérogène	27
III.6.1.Influence de la masse de catalyseur	27
III.6.2.Influence de la concentration initiale des réactifs.....	28
III.6.3.Influence de la longueur d'onde	28
III.6.4.Influence de flux lumineux.....	28
III.6.5.Influence de la température	28
III.7. Avantages et inconvénients de la photocatalyse	29
III.8. Domaines d'application de la photocatalyse.....	30
Conclusion générale	31
Références bibliographiques	33

Liste des abréviations et symboles

POAs : Procédés d'Oxydation Avancés

DCO : Demande Chimique en Oxygène

UV : Ultra-violet

SC : Semi-conducteur

Eg : Energie de gap

BV : Bande de Valence

BC : Bande de Conduction

λ : Longueur d'onde

ZnO : Dioxyde de Zinc

IR : Infrarouge

MO : Méthyle Orange

C₀ : Concentration initiale

T : Température

V : Volume

m : Masse

ev : Electron volt

nm : Nano mètre

eq : Equation

e⁻ : Electron

DRX : Diffraction des Rayons X

MEB : Microscopie Electronique à Balayage

MET : Microscopies Electronique à Transmission

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.1 : Domaines d'absorption de quelques couleurs.....	3
---	---

CHAPITRE II

Figure II.1 : Différentes étapes de transfert d'un soluté lors de son adsorption sur un matériau microporeux.....	12
Figure II.2 : Différents procédés d'oxydation avancés.....	14
Figure II.3 : Caractéristiques du radical $\bullet\text{OH}$	15

CHAPITRE III

Figure III.1 : Configuration des bandes électroniques d'un matériau conducteur : deux cas possibles.....	18
Figure III.2 : Bandes électroniques d'un matériau isolant ou semi-conducteur.....	18
Figure III.3 : Structures cristallines possibles du ZnO	21
Figure III.4 : Structure de bandes du ZnO	22
Figure III.5 : Dispositif expérimental de la méthode hydrothermale.....	24
Figure III.6 : Principe de la photocatalyse hétérogène.....	26
Figure III.7 : Étapes d'un procédé catalytique	27
Figure III.8 : Influence des 5 paramètres fondamentaux en photocatalyse sur la vitesse de réaction.....	29
Figure III.9 : Domaines d'applications de la photocatalyse.....	30

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau I.1 : Principaux groupements chromophores et auxochromes.....	4
Tableau I.2 : Classification chimique des colorants.....	5
Tableau I.3 : Classification tinctoriale des colorants.....	7
Tableau I.4 : Caractéristiques du méthyle orange.....	10

CHAPITRE II

Tableau II.1 : Comparaison des pouvoirs oxydants de divers oxydant chimiques.....	15
--	----

CHAPITRE III

Tableau III.1 : Energie de bande interdite et longueur d'onde d'activation des différents semi-conducteurs.....	19
Tableau III.2 : Caractéristiques de Photocatalyseur ZnO.....	20
Tableau III.3 : Avantages et Inconvénients de la photocatalyse.....	29

Introduction générale

L'eau est un élément essentiel dans le monde où nous vivons. Elle constitue une partie importante des cellules composant tout être vivant. De plus, la majeure partie des réactions biochimiques formant le métabolisme humain, ainsi que les réactions intervenant lors de la formation et de la croissance des cellules se passent dans un milieu aqueux.

Du point de vue industriel, l'eau est considérée comme une des principales matières premières. En effet, d'une façon générale, l'industrie tire avantages des propriétés physico-chimiques de l'eau et l'utilise à profusion comme sources d'énergie, comme milieu hautement calorifique, comme solvant, etc. Cette dernière qualité (solvant universel) est particulièrement responsable du problème de pollution des eaux [1].

Ce développement industriel et l'augmentation de leur utilisations s'est traduit par un accroissement des rejets dans l'environnement, parmi lesquelles on peut citer les plus connues du grand public comme les métaux, les nitrates, les phosphates, les pesticides et les colorants, les médicaments (et leurs métabolites). L'effet de ces polluants sur la santé et de leurs risques écologiques nécessite le développement de procédés plus efficaces capables de dégrader des polluants récalcitrants aux méthodes conventionnelles.

Plusieurs procédés de traitement chimiques ou même physiques sont en cours d'utilisation. Et chacune de ces méthodes présente des avantages et des inconvénients. La recherche de méthodes alternatives ou complémentaires de traitement de l'eau a conduit à l'émergence de nouvelles technologies ces dernières années.

Parmi ces méthodes, des procédés d'oxydation avancés ont été proposés comme alternative, qui est des techniques basées sur la production d'espèces oxydantes réactives permettant l'oxydation d'un grand nombre de polluants organiques [2].

La photocatalyse hétérogène est l'une des procédés d'oxydation avancés, s'inscrit comme la plus récente de ces méthodes, elle repose sur l'irradiation par la lumière ultraviolette d'un semi conducteur mis en contact avec l'eau faisant intervenir lors du processus de dégradation le radical HO° . Cette technique représente de nos jours une solution émergente au problème de pollution des eaux et de l'air pour les composés organiques persistants.

Dans ce mémoire, nous sommes intéressés d'étudier des méthodes de synthèse et les caractéristique des matériaux utilisés en photocatalyse.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

- ✓ Le premier chapitre est consacré pour donner des généralités sur les colorants, leurs structures et leurs constitutions chimiques, ainsi que la toxicité engendrée par leur

présence dans les eaux des rejets industriels, et leur impact sur l'environnement et la santé.

- ✓ Le second chapitre présente les différents procédés de traitement des eaux.
- ✓ Le troisième chapitre est une étude sur la photocatalyse hétérogène son principe, ses avantages, les facteurs influençant et les composantes traitées par photocatalyse.



Chapitre I :
Généralités sur
les
Colorants

I.1.Histoire

Depuis la préhistoire, les colorants occupent une grande attention par l'homme, soit naturels d'origine animale ou végétale, ou bien extraits de minerais. Les égyptiens ont été les premiers qui s'intéressent par les colorants, ainsi ils utilisaient comme colorants du safran, du pastel et de la garance.

Au milieu du XIX^{ème} siècle, la chimie naissante révolutionne l'utilisation des colorants. Avec la découverte des colorants synthétiques et leur production industrielle, en citant quelques colorants et leurs date de création : mauvéine 1856, magenta 1859 (colorant triphénylméthane), chrysoïdine 1876 (colorant azoïque), phénothiazine 1883, phtalocyanines 1928, triazinyl 1954, diketopyrrolopyrrole (DPP) 1974...etc. [3].

I.2.Définition

Les colorants sont des substances chimiques colorées qui interagissent avec le milieu dans lequel elle est introduite [4].

Ces colorants ont la capacité d'absorber le rayonnement lumineux dans le spectre situé entre 380 nm et 750 nm [5].

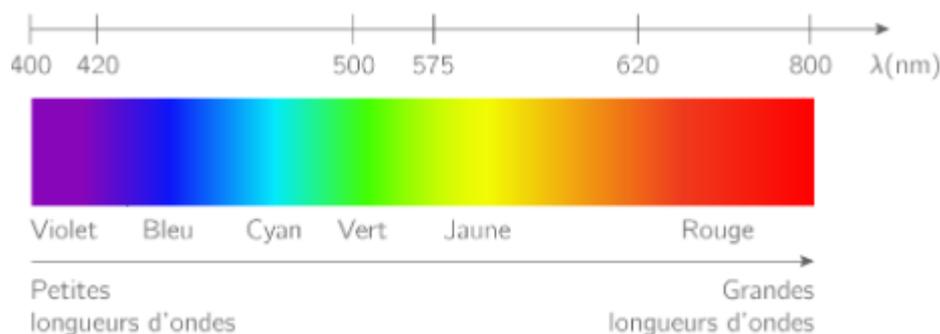


Figure I.1 : Domaines d'absorption de quelques couleurs [6].

Cette propriété est due à l'existence de deux groupes d'atomes appelés chromophores et auxchromes.

➤ Le groupement chromophore

Les chromophores sont des groupes aromatiques conjugués, permettent d'absorber les rayonnements lumineux dans le visible ce qui permettent aux espèces organiques d'être colorées [7].

➤ Le groupement auxochromes

Le terme “auxochrome” en grec auxanein signifie “renforcer” et de “chromos” signifie “couleur”. Un groupement est dit auxochrome s’il vient accentuer les effets d’un groupement chromophore [8].

Les auxochromes ont la propriété d’élargir l’intervalle de l’adsorption vers des longueurs d’onde très élevées, par conséquent une influence sur la couleur de l’espèce chimique dans le domaine visible, en leur absence elle absorberait dans le domaine des ultraviolets et serait incolore [9].

Tableau I.1 : Principaux groupements chromophores et auxochromes [10].

Groupes chromophores	Groupes auxochromes
Azo (-N=N-)	Amino (-NH ₂)
Nitroso (-NO ou -N-OH), Nitro (-NO ₂)	Méthylamino (-NHCH ₃)
Carbonyl (=C=O)	Diméthylamino (-N(CH ₃) ₂)
Vinyl (-C=C-H ₂)	Hydroxyl (-HO)
Nitro (-NO ₂ ou =NO-OH)	Alkoxy (-OR)
Thiocarbonyl (>C=S)	Groupes donneurs d'électrons

I.3. Classification des colorants

I.3.1. Colorant naturels

Les colorants naturels, dont la plupart sont d’origine végétale, forment une gamme très étendue de nuances (du jaune au bleu, en passant par le vert et même le noir). La chlorophylle, le lycopène et le bêta-carotène sont parmi les colorants les plus rencontrés et les plus utilisés dans les industries agroalimentaires. À des doses réglementées, les colorants naturels sont bénéfiques pour la santé. Certains de ces colorants sont connus pour leurs activités anti-oxydantes, antimutagènes, voire anti-carcinogènes [11].

I.3.2. Colorant synthétiques

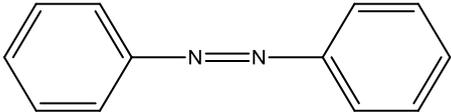
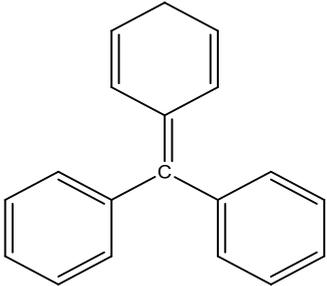
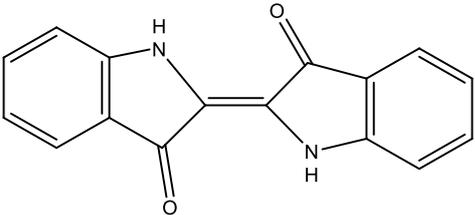
C’est Perkin, qui découvrant La Mauvéine en 1856, par l’action des oxydants sur l’aniline fonda l’industrie des matières colorantes artificielles [9].

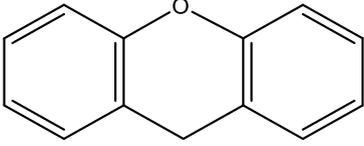
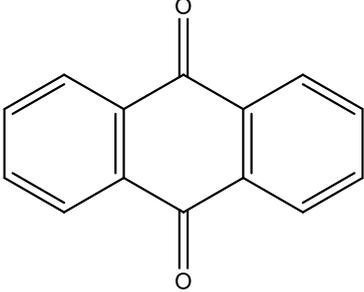
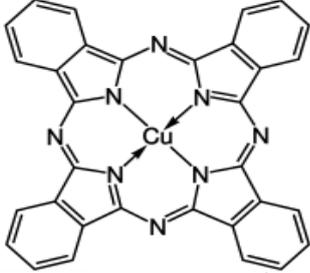
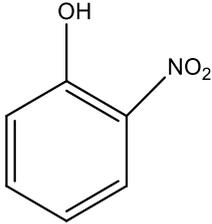
Les colorants synthétiques sont classés selon leur structure chimique et leur méthode d’application.

I.3.2.1. Classification chimique

La classification chimique s'appuie sur la nature du groupe chromophore.

Tableau I.2 : Classification chimique des colorants [12, 13].

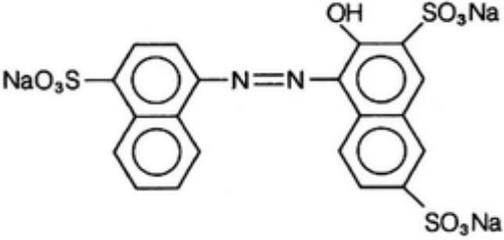
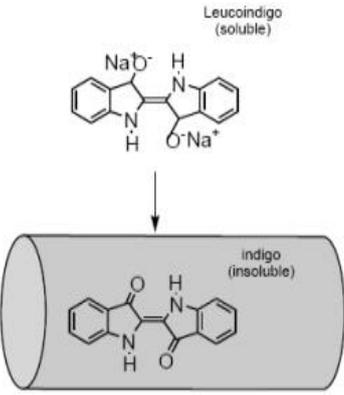
Colorants	Caractéristiques et propriétés
<p style="text-align: center;">Azoïques</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Caractérisés par un ou plusieurs groupements chromophore $-N=N-$. • Constituent 50 % de la production mondiale des colorants • Très toxique et difficile pour éliminer.
<p style="text-align: center;">Les colorants triphénylméthanés</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Un carbone lié par trois cycles phényle • Rarement à utiliser mais on trouve surtout dans le domaine d'industrie.
<p style="text-align: center;">Les colorants indigoïdes</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Sont utilisés dans la teinture des textiles. • Faible résistance à la lumière. • Forme générale dérivée de l'indigo.

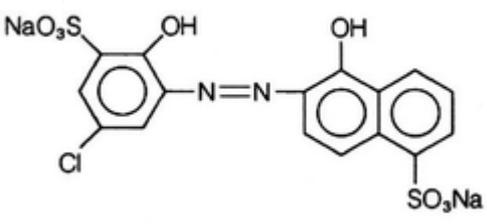
<p>Les colorants xanthènes</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Le composé le plus connu est la fluorescéine et l'éosine. • Utilisés dans le domaine médical.
<p>Les colorants anthraquinoniques</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Caractérisés par le groupement chromophore $>C=O$. • Classer les deuxièmes en importance après les azoïque. • Représenter 20 à 25% du marché des colorants textiles.
<p>Les phtalocyanines</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Ayant une structure très complexe basée sur un atome centrale métallique. • On retrouvés dans les couleurs bleu turquoise et vert.
<p>Les colorants nitrés et nitrosés</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Caractérisés par la présence de groupe nitro NO_2 et un groupe hydroxyle OH liés par un cycle benzénique.

I.3.2.2. Classification tinctoriale

La classification tinctoriale ayant un intérêt très intéressant dans les applications des colorants. Ceci est dû à la solubilité du colorant dans le bain de teinture et de l'affinité entre le colorant et la fibre. On distingue différentes catégories tinctoriales définies cette fois par les auxochromes.

Tableau I.3 : Classification tinctoriale des colorants [14].

Colorants	Caractéristiques et propriétés
<p>Les colorants développés ou azoïques insolubles</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Insoluble dans l'eau. • Utilisées pour développer toutes les nuances de rouge, orange, jaune et marron.
<p>Les colorants acides ou anioniques</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Soluble dans l'eau. • Appliqués sur la laine, la soie et le nylon lorsqu'une liaison ionique est établie entre le groupe protonisé $-NH_2$ de la fibre et le groupe acide du colorant.
<p>Les colorants basiques ou cationiques</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Caractérisés par un groupe basique dans leur structure. • Ayant la propriété de réagir avec un groupe acide de fibre et de teindre la laine et la soie. • Présente une faible résistance à la lumière.
<p>Les colorants de cuve</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Insolubles dans l'eau. • Appliqués sur la fibre après transformation par réduction alcaline leuccodérivés.

<p>Les colorants réactifs</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Soluble dans l'eau. • Présence d'un groupe chromophore : familles azoïques, anthraquinoniques et phtalocyanines.
<p>Les colorants directs</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Soluble dans l'eau et de nature anionique. • Ils ont une bonne résistance à la lumière.
<p>Les colorants à mordants</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisés pour teindre la laine, le cuir, la soie, le papier et les fibres cellulosiques.
<p>Les colorants dispersés</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Insoluble dans l'eau et non ionique. • Utilisés pour teindre les synthétiques en milieu acide.

I.4. Toxicité des colorants

Une étude effectuée sur les colorants azoïques sont les plus toxiques car ils sont des colorants liposolubles, ce qui mène l'Organisation mondiale de la Santé à exclure leur utilisation dans les substances d'alimentation.

Dès 1947, Miller et Miller observent que certains aminoazoïques se fixent sur les protéines du foie par des liaisons covalentes, ce qui conduit à des virus cancérogènes.

Certains colorants azoïques semblent avoir une action sur le sang, abaissent la teneur en hémoglobine et augmentent la formation des réticulocytes. Peuvent aussi inhiber les tractus et les enzymes digestifs [15].

I.5. Impact des colorants sur l'environnement et la santé

I.5.1. Les dangers à court terme

➤ Eutrophisation

Eutrophisation c'est le déséquilibre et la modification de milieu aquatique à cause de phosphore qui utilise comme un détergent, ou le nitrate libéré sous action des microorganismes sur les colorants [16] ces ions minéraux peuvent devenir toxiques car leur consommation par les

plantes aquatiques conduit à l'appauvrissement en oxygène par inhibition de la photosynthèse dans les strates les plus profondes des cours d'eau et des eaux stagnantes.

➤ **Sous-oxygénation**

Lorsque des charges importantes de matière organique sont apportées au milieu via des rejets ponctuels, les processus naturels de régulation ne peuvent plus compenser la consommation bactérienne d'oxygène. Manahan [17] estime que la dégradation de 7 à 8 mg de matière organique par des micro-organismes suffit pour consommer l'oxygène contenu dans un litre d'eau.

➤ **Couleur, Turbidité, Odeur**

L'accumulation des matières organiques dans les cours d'eau induit l'apparition de mauvais goûts, prolifération bactérienne, odeurs pestilentielles et colorations anormales. Willmott et al [18] ont évalué qu'une coloration pouvait être perçue par l'œil humain à partir de 5×10^{-6} g. L⁻¹. En dehors de l'aspect inesthétique, les agents colorants ont la capacité d'interférer avec la transmission de la lumière dans l'eau, bloquant ainsi la photosynthèse des plantes aquatiques.

I.5.2. Les dangers à long terme

➤ **La persistance**

Les colorants organiques synthétiques sont des composés impossibles à épurer par dégradations biologiques naturelles [19] Cette persistance est en étroite relation avec leur réactivité chimique:

- Les composés insaturés sont moins persistants que les saturés,
- Les alcanes sont moins persistants que les aromatiques,
- La persistance des aromatiques augmente avec le nombre de substituant,
- Les substituants halogènes augmentent plus la persistance des colorants que les groupements alkyles.

➤ **Cancer**

Les colorants ont des effets mutagènes, tératogène ou cancérigène apparaissent après dégradation de la molécule initiale en sous-produits d'oxydation : amine cancérigène pour les azoïques [20], leuco-dérivé pour les triphénylméthanés [21].

➤ Sous produits de chloration

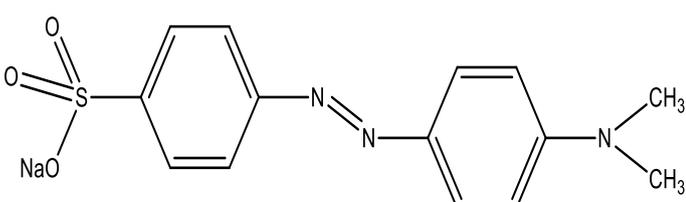
Le chlore utilisé pour éliminer les microorganismes pathogènes réagit avec la matière organique pour former des trihalométhanes (THM) pouvant atteindre plusieurs centaines de mg. L⁻¹. Ils sont responsables de développement de cancer du foie, des poumons, des reins et de la peau chez l'homme [5].

I.6.Méthyle Orange (MO)

I.6.1.Définition

Le méthyle orange est un colorant azoïque autrement appelé l'Hélianthine, orangé III ou encore orangé de méthyle, est un indicateur coloré utilisé en chimie pour marquer la présence d'un milieu acide (il vire en rose-rouge) ou d'un milieu basique (il vire en jaune-orangé). On l'utilise donc pour les dosages acido-basiques. Sa formule chimique est C₁₄H₁₄N₃O₃Na lorsqu'il est sous forme de sel et sa masse molaire est égale à 327,33 g. mol⁻¹. Le couple acide-base correspondant est C₁₄H₁₄N₃O₂S-OH / C₁₄H₁₄N₃O₂S-O⁻. Le pK_a de ce couple est 3,39 [22].

Tableau I.4 : Caractéristiques du méthyle orange

Nom	Méthyle orange
Formule brute	C ₁₄ H ₁₄ N ₃ NaO ₃ S
Structure chimique	
Masse molaire (g/mole)	327,33
Groupement fonctionnel	-SO ₃ ⁻ -N=N-
Solubilité (g.l ⁻¹)	5,2
λ _{Max} (nm)	465
pK _a	3,39

I.6.2.Utilisation de méthyle orange

- ✓ Pour être utilisé exclusivement dans la fabrication, reconditionnement, transformation ou laboratoire [23].

I.6.3.Toxicité de méthyle orange

- ✓ Toxique en cas d'ingestion,
- ✓ Danger par aspiration,
- ✓ Par contact oculaire: Irritations. Risque de: cécité (lésion irréversible du nerf optique),
- ✓ Les colorants azoïques avec un composant arylaminique sont classés comme potentiellement cancérigènes,
- ✓ Un contact prolongé ou répété avec le produit peut donner lieu à une élimination de la graisse de la peau, susceptible de provoquer une dermatose de contact non allergique et permettant l'absorption du produit par la peau [23].

I.6.4.Dégradabilité de méthyle orange

- ✓ Ammuri et al ont été étudié la photolyse directe de MO. Les résultats obtenus montrent une photo-dégradation ne dépasse pas 7% de la quantité initiale du colorant [24].
- ✓ Quardawi et al ont été étudié, dans le cadre de doctorat en sciences, la dégradation photocatalytique de (MO) par l'irradiation UV, les résultats montrent que la photolyse de ce colorant étudié, donné de très faibles taux de décoloration après une journée d'exposition de colorant aux UV [25].



Chapitre II :

Procédés de

traitement

II.1.Introduction

Ces dernières années, le traitement des déchets industriels est devenu très importante dans notre monde moderne, en raison de l'augmentation abusive de l'utilisation de composés organiques synthétiques (colorants, pesticides, plastiques). Pour cette raison, les scientifiques de l'environnement ont étudié la mise au point plusieurs méthodes pour obtenir une qualité conforme à la réglementation, et optimiser les processus existants qui doivent être efficaces et peu coûteux.

II.2. Technique conventionnelles et leurs limites

II.2.1. Les procédés physiques

II.2.1.1.Adsorption

L'adsorption ou la chimisorption c'est la fixation covalente directe d'une particule liquide ou gaz appelé adsorbat, sur la surface d'un matériau solide appelé adsorbant d'une manière plus ou moins réversible [26].

Le charbon activé est considéré le plus communément utilisé pour réduire la couleur, mais cette technique n'est efficace que sur certaines catégories de colorants (cationiques, anionique, dispersés, de cuve et réactifs) [27].

Le mécanisme d'adsorption se déroule en trois étapes. La réaction limitante est la diffusion à travers un film pendant le début de la réaction, puis la diffusion-adsorption dans la structure poreuse au voisinage de l'équilibre [28].

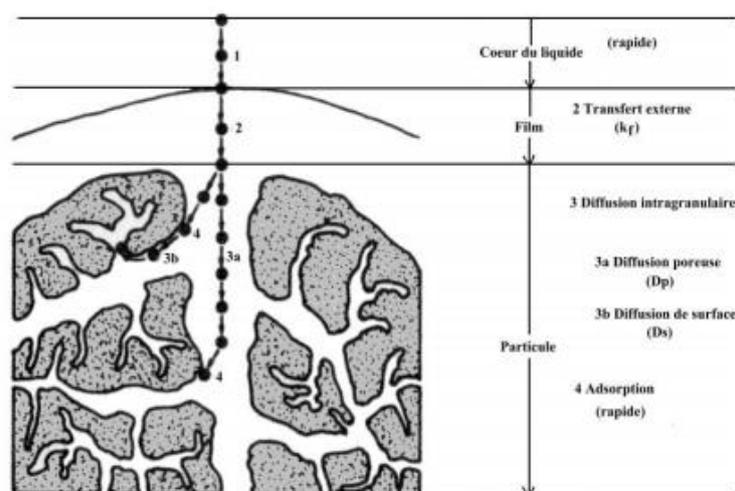


Figure II.1: Les étapes de l'adsorption [28].

II.2.1.2. Filtration membranaire

Dans ce procédé, les effluents sont retenus par une membrane semi-perméable qui contient des pores dont la taille de diamètre est inférieure à celui des particules à éliminer. Parmi les quatre types de procédés, la nanofiltration et l'osmose inverse sont les plus adaptés à la rétention partielle de la couleur et des petites molécules organiques [29].

La nanofiltration s'utilise au traitement des bains de teinture de colorants réactifs en agissant comme un filtre moléculaire pendant que la microfiltration retient les matériaux colloïdaux tels que les colorants dispersés ou de cuve grâce à une « membrane écran » [30].

II.2.2. Les procédés physico-chimiques

II.2.2.1. Coagulation / Flocculation

La coagulation/flocculation, est un procédé de traitement des eaux usées industrielles. Ces procédés ayant l'avantage de débarrasser les matières en suspension et les particules colloïdales qui ne peuvent être décantées par elles-mêmes, afin de diminuer les teneurs en DCO et la turbidité de l'eau. À l'ajout des produits chimiques (sels métalliques) se mène à la formation des floccs, qui permet d'éliminer par une simple décantation.

Les coagulants inorganiques tels que l'alun sont les plus satisfaisants pour la décoloration des effluents textiles contenant des colorants de cuve et au soufre, mais sont totalement inefficaces pour les colorants réactifs, azoïques, acides et basiques [31, 32].

Par ailleurs, la coagulation-flocculation ne peut pas être utilisée pour les colorants fortement solubles dans l'eau. Enfin, d'importantes quantités de boue sont formées avec ce procédé : leur réutilisation reste la seule issue mais demande des investissements supplémentaires pour les régénérer.

II.2.3. Les procédés biologiques

Les procédés biologiques sont communément utilisés en particulier pour le traitement des eaux résiduaires urbaines. Ce traitement repose sur l'utilisation de microorganismes qui dégradent les polluants organiques en composés moins toxiques ou les minéralisent en dioxyde de carbone, eau et sels inorganiques. Ces techniques peuvent être utilisées selon deux modes aérobies, appliquent par des microorganismes (Bactérie) en présence de l'oxygène et anaérobie par des microorganismes dégradent les polluants organiques en absence de l'oxygène [33].

II.3. Les procédés d'oxydation avancés

Les procédés d'oxydation avancés (POAs) utilisent après l'échec des traitements conventionnels (tel que les traitements chimiques classiques), sont des procédés de traitement des eaux et les effluents industriels dans des conditions de température et de pression ambiantes générant des

radicaux fortement réactifs (spécialement des radicaux hydroxyles) en quantité suffisante pour effectuer la minéraliser les polluants organiques en CO_2 , H_2O [34].

Il existe plusieurs manières de classifier les POAs, selon la phase homogène ou hétérogène, selon le mode de production des radicaux hydroxyles (chimique, photochimique ou électrochimique....etc.) selon que la méthode soit ancienne ou émergente ex : la sonolyse.

La figure suivante regroupe les principaux POAs rencontrés dans la littérature.

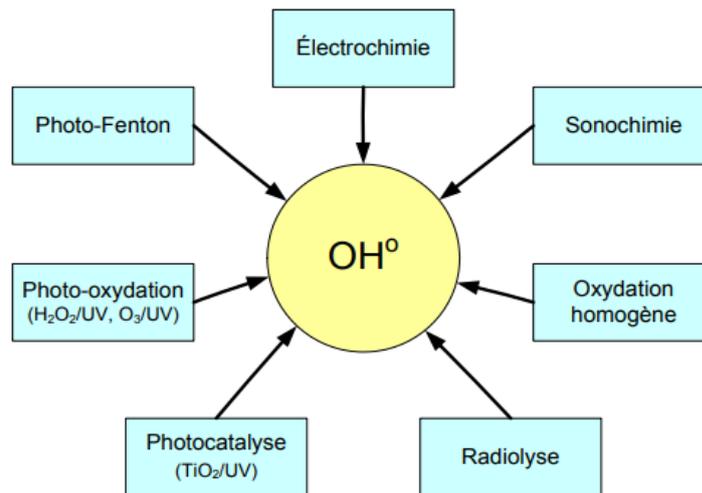


Figure II.2 : Différents procédés d'oxydation avancés [34].

II.3.1. Description et caractéristiques du radical hydroxyle $\cdot\text{OH}$

Le radical hydroxyle ($\cdot\text{OH}$) est une molécule composée d'un atome d'oxygène et d'hydrogène possédant un électron non apparié (électron célibataire) sur son orbital externe.

Les radicaux hydroxyles sont produits à partir d'une rupture homolytique d'une liaison covalente, c'est à-dire que les deux électrons mis en jeu lors de cette liaison sont également partagés, un électron pour chaque atome [35(a, b)]. Cette propriété confère un fort caractère polaire et est donc très réactive vis-à-vis de nombreux composés organiques (aromatiques et aliphatiques), inorganiques et bactériens [36]. Son potentiel normal d'oxydoréduction est de 2,81 V par rapport à l'électrode normale à hydrogène. Il est de loin l'un des oxydants les plus puissants qui puissent être utilisés en traitement des eaux (**Tableau II.1**).

Les principales caractéristiques du radical hydroxyle sont illustrées dans **la figure II.3**.



Figure II.3: Caractéristiques du radical $\bullet\text{OH}$ [37].

Tableau II.1 : Comparaison des pouvoirs oxydants de divers oxydant chimiques [38].

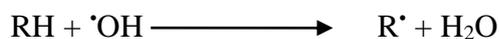
Couple redox	Potentiel, (V/ENH), 25°C
$\text{Cl}_2 / \text{Cl}^-$	1,36
$\text{Br}_2 / \text{Br}^-$	1,06
$\text{OH}^\bullet / \text{H}_2\text{O}$	2,81
$\text{H}_2\text{O}_2 / \text{H}_2\text{O}$	1,77
$\text{MnO}_4^- / \text{Mn}^{2+}$	1,51
$\text{S}_2 \text{O}_8^{2-} / \text{SO}_4^{2-}$	2,08
O_3 / O_2	2,07
$\text{HClO} / \text{Cl}^-$	1,49

II.3.2.Mécanisme réactionnel du radical hydroxyle ($\bullet\text{OH}$)

Les réactions d'oxydation impliquant les radicaux hydroxyles en présence de substrats organiques (en milieu aqueux) sont principalement des réactions d'addition électrophile et des réactions d'abstraction d'hydrogène [38], mais on peut trouver aussi des réactions d'oxydoréduction. Donc les radicaux hydroxyles sont des oxydants non sélectifs qui peuvent réagir suivant trois mécanismes possibles.

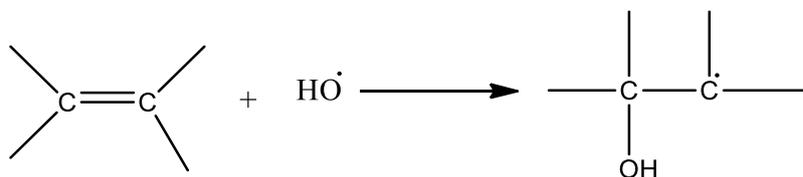
➤ **Arrachement d'atome d'hydrogène**

Ce mécanisme se produit sur les chaînes hydrocarbonées saturées, au niveau desquelles les sites radicalaires sont créés, ce qui permet à l'oxygène de l'attaquer. Ce processus mène ensuite à la rupture homolytique d'une liaison C-H [27].



➤ **Addition électrophile sur une double liaison**

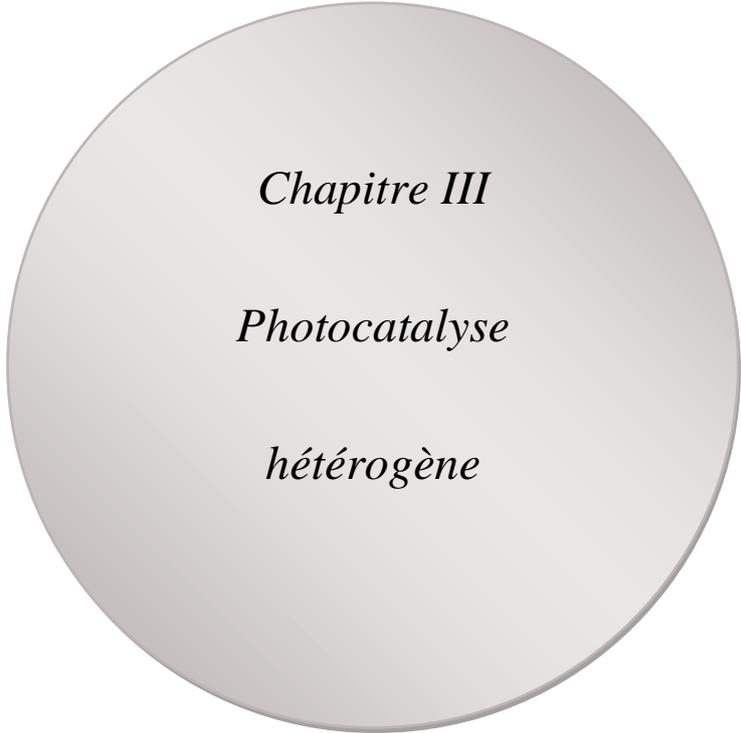
Cette addition peut produire des composés aromatiques et des composés aliphatiques insaturés, celle-ci est réalisée lorsque les radicaux réagissent comme un substituant électrophile en s'additionnant sur les doubles liaisons [34].



➤ **Transfert d'électrons (Oxydoréduction)**

Le radical hydroxyle réagit également par simple transfert d'électron, ce phénomène d'oxydation conduit à l'ionisation de la molécule [34].





Chapitre III

Photocatalyse

hétérogène

III.1.Introduction

La photocatalyse hétérogène est un procédé d'oxydation avancé, utilisée dans le domaine du traitement de l'eau, de l'air et de la désodorisation. La photocatalyse hétérogène repose sur l'irradiation d'un semi-conducteur jouant le rôle de catalyseur par un rayonnement lumineux de longueur d'onde inférieur à 387 nm [39].

Cette technique présente l'avantage de permettre la dégradation des polluants organiques à une température ambiante et à une pression atmosphérique sans ajout des réactifs chimiques.

III.2. Rappels sur les matériaux semi-conducteurs

Selon Hermann, un semi-conducteur est un solide dont la conductivité électrique σ varie exponentiellement avec la température T selon l'équation [40].

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{\left(-\frac{\Delta H_C}{RT}\right)}$$

Avec :

σ_0 : Facteur pré exponentiel (S.m⁻¹).

ΔH_C : Enthalpie de conduction (kJ/mol).

Les semi-conducteurs sont des conducteurs d'électrons avec une valeur de résistance électrique à température ambiante comprise entre 10⁻² à 10⁹ Ω.cm. Ils se situent donc entre les bons conducteurs (10⁻⁶ Ω. cm) et les isolants (10¹⁴ à 10²² Ω. cm). La résistivité électrique d'un semi-conducteur dépend fortement de la température [41].

Tous les matériaux sont caractérisés par deux bandes appellent, bande de valence est riche en électrons mais ne participe pas aux phénomènes de conduction (pour les électrons), et bande de conduction quant à elle, est soit vide (comme aux températures proches du zéro absolu dans un semi-conducteur), soit semi-remplie d'électrons (comme dans le cas des métaux) Cependant, c'est elle qui permet aux électrons de circuler dans le solide.

Dans les conducteurs (métaux), la bande de conduction et la bande de valence se chevauchent. Les électrons peuvent donc passer directement de la bande de valence à la bande de conduction et circuler dans tout le solide. C'est le cas des métaux, bons conducteurs électriques [41].

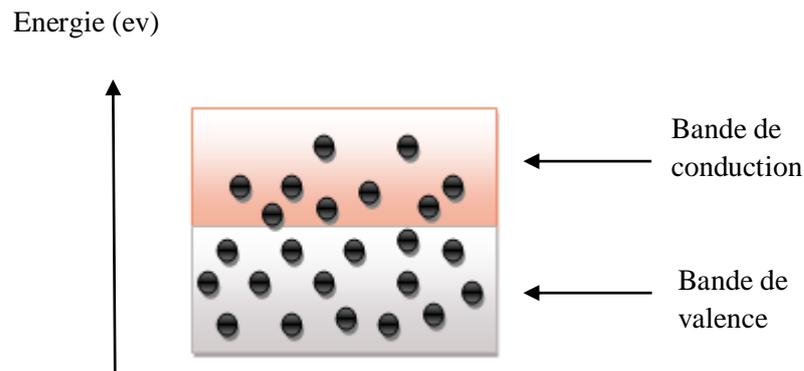


Figure III.1: Configuration des bandes électroniques d'un matériau conducteur.

Dans un cristal non métallique, le phénomène d'interférence entre l'onde d'un électron (liée à la longueur d'onde et au mouvement de l'électron dans une bande d'énergie) et le champ électrique du réseau cristallin induit la formation des bandes d'énergie interdites inaccessibles aux électrons, aussi appelé « Gap ».

Les isolants et semi-conducteurs possèdent une bande de valence totalement pleine (saturée) d'électrons et une bande de conduction totalement vide [41].

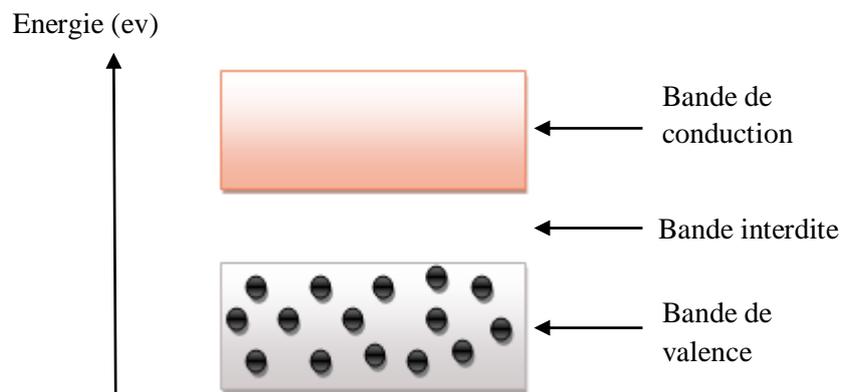


Figure III.2: Bandes électroniques d'un matériau isolant ou semi-conducteur.

Dans le cas d'un isolant, le gap énergétique (bande interdite) entre les deux est tel (plusieurs eV) qu'en conditions « normales », ni un champ électrique, ni la température ne peuvent faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction. Il existe cependant une tension de claquage (de valeur très élevée), qui pourra forcer le matériau à conduire les électrons si elle est appliquée. Dans les semi-conducteurs, sous l'effet d'un apport énergétique (élévation de température, champ magnétique, absorption de lumière), supérieur ou égal à la largeur de la bande interdite « Gap », certains de ses électrons de valence (liés à leurs atomes) peuvent être promus dans la bande de conduction et devenir des électrons de conduction. La place laissée

vacante dans la bande de valence est appelée lacune électronique ou « trou ». Il y a formation d'une paire électron/trou. Si, au cours de son déplacement, l'électron de conduction ainsi formé reprend sa place originale dans la bande de valence, on parle de recombinaison directe électron/trou. C'est la largeur de la bande énergétique interdite entre la bande de valence et de conduction qui va déterminer quelle longueur d'onde d'un rayonnement lumineux (donc quelle énergie lumineuse) le semi-conducteur pourra absorber : il faut avoir $h\nu \geq E_g$, ce qui implique que la longueur d'onde λ doit satisfaire la relation suivante [42] :

$$\lambda \geq hc/E_g$$

Avec :

λ : Longueur d'onde d'irradiation (m),

h: Constante de Planck ($h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ J.s),

C: Vitesse de la lumière ($C = 3.0 \cdot 10^8$ m.s⁻¹),

$E_{\text{Excitation}}$: Energie d'excitation (eV)

En photocatalyse hétérogène les semi conducteurs sont des catalyseurs ayant une large bande interdite. Bien souvent ce sont des oxydes ou des sulfures (TiO₂, ZnO, CeO, SnO₂, CdS, ZnS) (**tableau III.1**).

Tableau III.1 : Energie de bande interdite et longueur d'onde d'activation des différents semi-conducteurs [43].

Semi-conducteur	Bande de valence E°(V/ESH*)	Bande de conduction E°(V/ESH*)	Energie de bande interdite (eV)	Longueur d'onde (nm)
TiO ₂	+3,1	-0,1	3,2	387
ZnO	+3,0	-0,2	3,2	387
SnO ₂	+4,1	+0,3	3,9	318
ZnS	+1,4	-2,3	3,7	336
WO ₃	+3,0	+0,2	2,8	443
CdS	+2,1	-0,4	2,5	497

III.3. Le photocatalyseur l'oxyde de zinc

Le photocatalyseur est bon quand il est stable, activé sous lumière visible et/ou proche UV, génère des paires électrons-trous hautement énergétiques et de durée de vie élevée. Il résiste à la photocorrosion, est non toxique, économique et facilement disponible [44].

ZnO est un photo-catalyseur très utilisé pour la photo-dégradation des polluants organiques [45, 46], soit sous l'irradiation UV [47], ou sous la lumière solaire [48], en raison de ses avantages attractives : sa structure cristallographique de type hexagonale compacte stable, sa large bande gap (3.2 eV), sa grande énergie de liaison d'excitation (60MeV), ainsi sa surface BET ($50 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) [49, 50]. Grâce à son énergie de bande, l'oxyde de zinc est devenu une alternative approprié au TiO_2 [51]. ZnO est un matériau très abondant sur Terre qui ne produit pas des sous-produits toxiques [52]. ZnO a connu beaucoup d'attention dans le domaine de la recherche scientifique grâce à sa faible toxicité, de sa haute stabilité chimique et thermique.

❖ Les caractéristiques de catalyseur ZnO

Tableau III.2 : Caractéristiques de phtocatalyseur ZnO [53].

Formule brute	ZnO
Masse molaire (g/mole)	81,38
Masse volumique (g/cm^3)	5,6
Pureté	99
Etat physique	Poudre blanche
pH en solution aqueuse	8-9
Surface spécifique (m^2 / g)	5,05

❖ Quelques études précédentes du photocatalyseur ZnO sur le MO:

Tripathy, N et al ont été étudié la dégradation photocatalytique de MO par le photocatalyseur ZnO sous l'irradiation de la lumière ultraviolette, et ont trouvé une diminution de la concentration de colorant MO qui a été surveillée par spectroscopie UV-visible à différents intervalles de temps jusqu'à ce que le colorant soit complètement dégradé en produit final incolore. Une décomposition rapide du colorant MO a été observée avec un taux de dégradation de $\sim 96,3\%$ dans les 120 minutes initiales [54].

Kaur, J et al ont été déduit A partir d'une expérience photocatalytique que la présence de ZnO et de lumière UV est nécessaire pour la photodégradation de MO. Ils ont été observés que le MO est complètement dégradé en 80 min lorsque la quantité de catalyseur est de 1 g/L et la concentration initiale de MO est de 0,03 mM [55].

III.3.1. Structure cristalline

L'oxyde de zinc peut exister dans la nature sous forme de poudre ou de cristal massif. Il se présente sous forme de minéral [56].

ZnO peut exister selon les conditions d'élaboration, sous trois types de structures différentes. Il se cristallise selon hexagonale compacte Wurtzite stable dans les conditions normales, et aussi peut exister selon structure cubique (Rock-Salt), et la structure blende qui apparaissent sous des pressions très élevées [54]. Ces structures sont illustrées sur la figure III.5.

ZnO cristallise selon la structure la plus stable, c'est-à-dire la structure wurtzite, dans laquelle les ions d'oxygène sont disposés suivant un réseau de type hexagonal compact [57], et où les atomes de zinc occupent la moitié des positions interstitielles tétraédriques ayant le même arrangement que les ions d'oxygène (**figure III.3**). En fait l'environnement de chaque ion n'est pas une symétrie exactement tétraédrique.

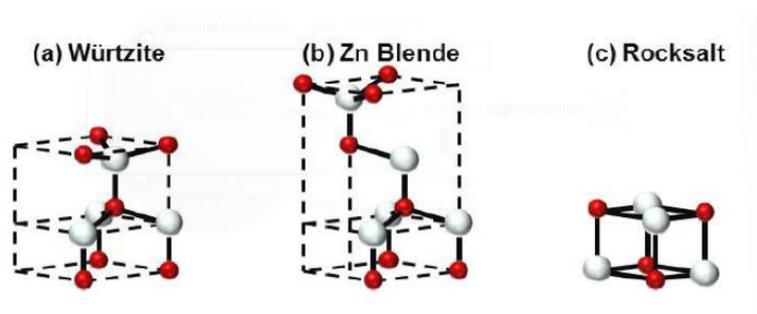


Figure III.3: Structures cristallines possibles du ZnO [57].

III.3.2. Les propriétés de l'oxyde de zinc

III.3.2.1. Propriétés électroniques

La figure III.4 montre l'existence d'une bande vide d'états entre 0 et 3,4 eV appelée bande interdite ou "gap" du matériau. Le gap correspond à l'énergie nécessaire pour faire passer un électron de la bande de valence (BV) vers la bande de conduction (BC). Le passage d'électron de la bande de valence vers la bande de conduction crée une paire électron-trou liés par une interaction coulombienne au sein de la structure cristalline. Ils se comportent comme une seule particule appelée exciton. L'énergie de liaison de l'exciton est de 60 meV. A température ambiante l'énergie de liaison est supérieure à l'énergie de l'agitation thermique qui est de 23 meV, ce qui veut dire que l'exciton créé ne sera pas détruit thermiquement [58].

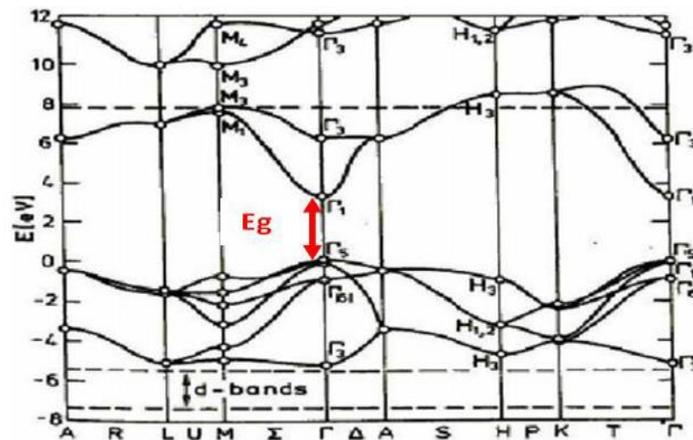


Figure III.4 : Structure de bandes du ZnO [58].

III.3.2.2. Propriétés optiques et luminescence

L'oxyde de zinc est un semi conducteur transparent dans le visible sous la forme massive ayant un indice de réfraction égal à 2 qui varie entre 1,90 et 2,20 suivant les auteurs [59]. D'autre part sous forme de couche mince, présente une forte absorption et diffusion des rayonnements ultraviolets grâce à son large bande interdite [60].

III.3.2.3. Propriétés chimiques et catalytiques

L'efficacité de l'oxyde de zinc comme catalyseur dépend de son mode de préparation. Elle est essentiellement due au degré de perfection du réseau cristallin, et aux propriétés semi conductrices (lacunes, atomes en positions interstitiels,...).

L'oxyde de zinc est utilisé en tant que piège et capteur chimique de gaz (H_2S , CO_2 , H_2 , CH_4). En suspension dans l'eau, il peut jouer le rôle de catalyseur photochimique pour un certain nombre

de réactions comme l'oxydation de l'oxygène en ozone, l'oxydation de l'ammoniaque en nitrate, la réduction du bleu de méthylène, la synthèse du peroxyde d'hydrogène, et aussi de l'oxydation des phénols [61].

III.3.3.Synthèse de l'oxyde de zinc

III.3.3.1.La voie sol gel

Le procédé sol gel est un processus très simple définie par « solution gélification », un sol est une suspension colloïdale stable de 1 à 1000 nm dans un liquide, gel est un solide semi rigide continue dans un liquide.

Cette procédé est basé sur une solution contient des précurseurs généralement sont des sels métalliques sont transformés à un solides par des réaction chimique (hydrolyse et condensation) à température ambiante [62, 63].

Le processus sol gel contient plusieurs avantages, entre autres :

- Consommé moins d'énergie.
- L'homogénéité des éléments permet de contrôler la stoechiométrie.
- Autorisé la fabrication de matériaux (poreux, colloïdes, revêtements, monolithes).
- Permet de développer des matériaux purement inorganiques, ou hybrides organiques-inorganiques.

III.3.3.2.La méthode coprécipitation

La coprécipitation est parmi les techniques les plus utilisées dans la synthèse des oxydes mixtes. Permet de précipité au moins deux composants métalliques dans une solution et dans un milieu basique. Le obtenue et lavé et filtré pour enlevé les impuretés, puis séché et calciné pour obtenir le produit finale. Celle-ci présente plusieurs avantages [64, 65]:

- Haute pureté du produit.
- Faible traitement thermique.
- Obtention d'une surface spécifique de produits importante.
- Faible coût.

III.3.3.3.Méthode hydrothermale

La synthèse hydrothermale est un processus est caractérisée par un autoclave contenant les réactifs et le solvant sous température et pression élevées pour cristalliser les matériaux céramiques anhydres directement à partir de solution [66].

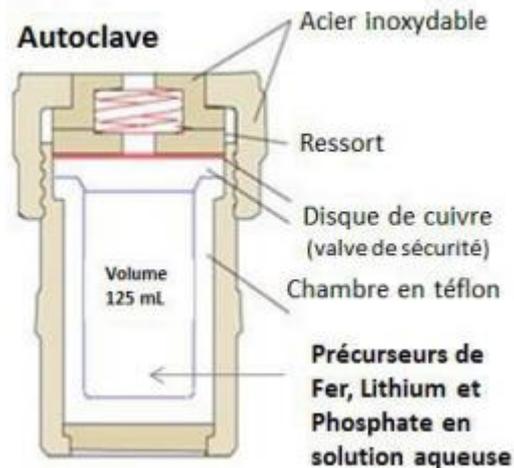


Figure III.5 : Dispositif expérimental de la méthode hydrothermale [67].

III.3.3.4.Synthèse par réaction à l'état solide

La synthèse par réaction à l'état solide est la méthode la plus classique. Cette méthode se trouve par une réaction en phase solide à haute température.

Le principe est de mélanger des composés solides en poudre sont pesés en quantités stœchiométriques et mélangés soigneusement par broyage dans un mortier augmenter le contact inter-facial, par un traitement thermique approprié on obtient un nouveau matériau [68].

III.3.4.Méthodes de caractérisation et techniques d'analyse

Les photocatalyseurs sont caractérisés par des méthodes analytique qui permettent d'étudier la phase cristallographique de matériau, sa texture, sa morphologie pour voir leur efficacité et capacité d'être des photocatalyseur.

III.3.4.1. La Diffraction des Rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X est une technique d'analyse basée sur des interactions entre les rayons X et la matière par une longueur d'onde connue. Elle donne plusieurs informations sur les matériaux, permet d'identifier la phase, la texture et mesure la taille du cristal, Détecter des phases minoritaires cristallines, déterminer la tension et les défauts des cristaux [69].

III.3.4.2. Microscopie Électronique à Balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage fournit des images en haute résolution de la surface d'un échantillon par utilisation d'un faisceau d'électrons balayant la surface de l'échantillon à analyser. Cette technique permet de visualiser la forme du matériau en trois dimension, et d'étudier Microanalyse les caractéristiques des particules, étudier aussi texture, morphologie des matériaux [70].

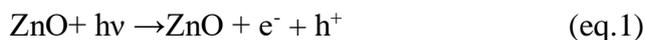
III.3.4.3. Microscopie électronique à transmission (MET)

C'est une technique de microscopie basée sur un faisceau d'électrons est « transmis » à travers un échantillon donnent naissance à une image.

La microscopie électronique à transmission permet visualiser les structures cristallines et leur morphologies, tailles, défauts cristallins (impuretés lacunes, atomes interstitiels, dislocations, pores), et d'étudier les structures des matériaux amorphes et déterminer des distances interplans [71].

III.4. Principe de la photocatalyse hétérogène

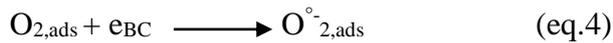
Le principe de la photocatalyse consiste à irradier un semi-conducteur à l'aide d'un apport énergétiques (photons) supérieure ou égale à celle de la bande interdite, Ces photo-excitations permettent les électrons (e^-) de la bande de valence (BV) de passer à des orbitales vacantes de la bande de conduction (BC) se qui conduit à la formation de paires électrons/trous (eq.1) [72].



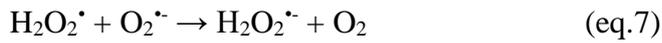
A la surface du semi-conducteur Les paires électron-trou peuvent se recombiner pour réagir avec les espèces adsorbées. Ainsi que les h^+ (trous positifs) peuvent réagissent avec l' H_2O ou OH^- adsorbés, donnant un radical OH^\bullet (eq.2, eq.3) [72].



D'autre part, Les électrons qui se trouvent dans la bande de conduction peuvent réduire l'oxygène dissous avec formation de radical superoxyde $\text{O}_2^{\bullet-}$ (eq.4).



En parallèle, ces anions superoxydes vont mener à la formation de H_2O_2 , soit via l'éq.5 et l'éq.6, soit via les réactions.7 et 8. Les radicaux OH^\bullet sont alors générés à partir de H_2O_2 suivant les équations. 9 et/ou 10 [73].



En revanche, Ces radicaux OH^\bullet très oxydants sont responsables de la dégradation du polluants organiques dans les eaux usées, en formant des produits non toxiques tels que le CO_2 , H_2O et N_2 comme le montre l'équation 11 [73].



Le schéma suivants se montrer le principe de la photocatalyse hétérogène et l'importance de ces réactions pour la dégradation du polluants organiques.

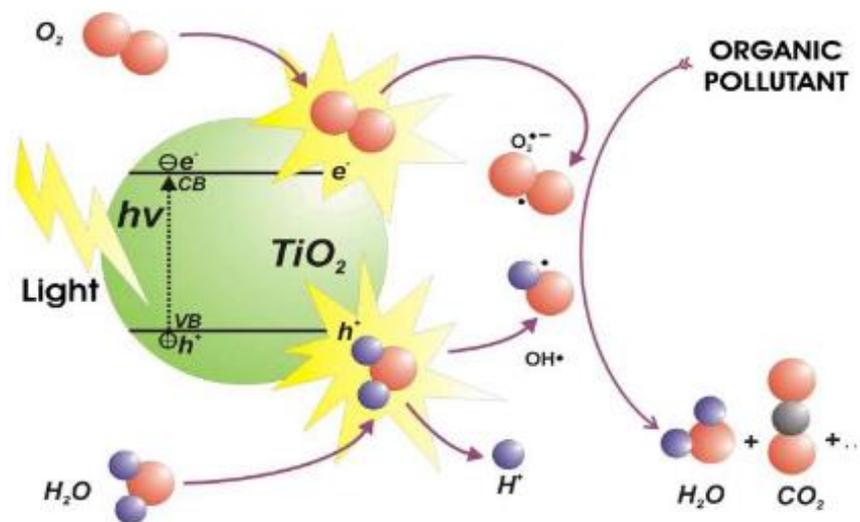


Figure III.6 : Principe de la photocatalyse hétérogène [73].

III.5. Aspect cinétique de la photocatalyse

Le mécanisme réactionnel de la photocatalyse est caractérisé par un processus physique qui comporte le transport jusqu'à l'interface solide où la transformation a lieu. On peut décrire la cinétique de ce processus en étapes suivantes [74] :

- Diffusion de la matière polluante du liquide jusqu'à l'interface du catalyseur;
- Adsorption de polluants sur le catalyseur;
- Réaction photocatalytique des molécules adsorbées (oxydation des substances adsorbées);
- Réduction des trous - électrons (réaction chimique);
- Désorption du produit de la réaction;
- Diffusion du produit vers le milieu liquide (dans la phase homogène).

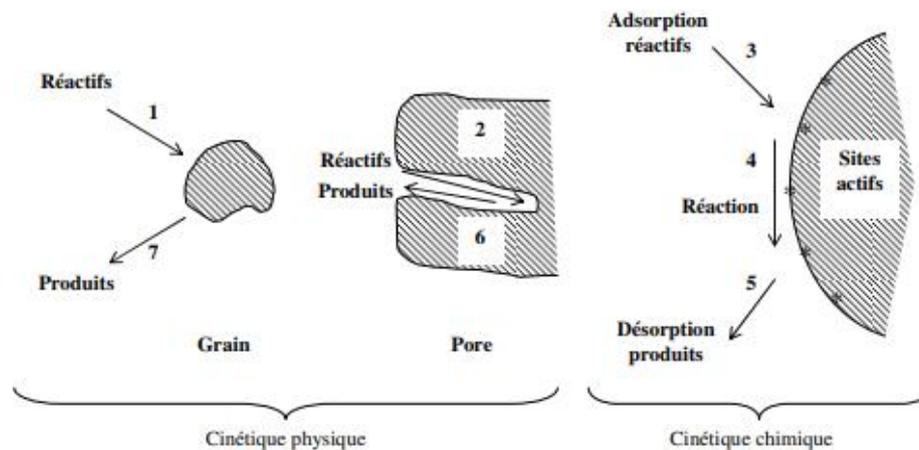


Figure III.7: Étapes d'un procédé catalytique [75].

III.6. Influence des différents paramètres en photocatalyse hétérogène

La vitesse de la réaction photocatalytique dépend des paramètres réactionnels (pH de la solution, concentration initiale du composé organique, intensité de la lumière, masse du catalyseur, température) et des paramètres liés aux caractéristiques du photocatalyseur (surface spécifique, gap, taille des cristallites...) [76].

III.6.1. Influence de la masse de catalyseur

L'augmentation de la masse du catalyseur conduit à l'augmentation de la vitesse initiale de la réaction. En raison de l'influence de la surface spécifique du catalyseur sur la vitesse de réaction entre les e^- et les h^+ avec le substrat. Cependant, au-dessus d'une certaine masse de catalyseur, la vitesse de réaction devient indépendante de la masse du catalyseur [76].

III.6.2. Influence de la concentration initiale des réactifs

La vitesse de dégradation est proportionnelle à la concentration des réactifs, jusqu'à une certaine valeur puis elle devient indépendante. Cela signifie que l'augmentation de la concentration initiale des réactifs mène à une saturation de la surface du photocatalyseur (sites actifs saturés) [75].

III.6.3. Influence de la longueur d'onde

La vitesse initiale de réaction est dépendante de la longueur d'onde du rayonnement, et pour que le photocatalyseur soit efficace, une longueur d'onde apportant l'énergie suffisante pour franchir le gap [77].

III.6.4. Influence de flux lumineux

La vitesse initiale est proportionnelle au flux lumineux, ce qui confirme que le processus photocatalytique est purement photo induit. D'autre part, au-delà d'une certaine valeur (25 mW.cm^{-2}), les paires $\{e^-, h^+\}$ photogénérées sont tellement nombreuses (densité très élevée) que leur probabilité de se recombiner avant de réagir avec les espèces adsorbées augmente, ralentissant de fait l'efficacité du processus [78].

III.6.5. Influence de la température

La chaleur n'a aucune influence sur le système photocatalytique, car il s'agit d'un processus d'activation photonique. D'autre part, la température a un effet sur les propriétés d'adsorption/désorption et peut de ce fait influencer indirectement les performances du processus. Il est ainsi généralement admis qu'un optimum de température existe entre $20 \text{ }^\circ\text{C}$ et $80 \text{ }^\circ\text{C}$: à basse température, la désorption des produits demeure l'étape limitante, tandis que l'adsorption des réactifs est défavorisée à haute température [72].

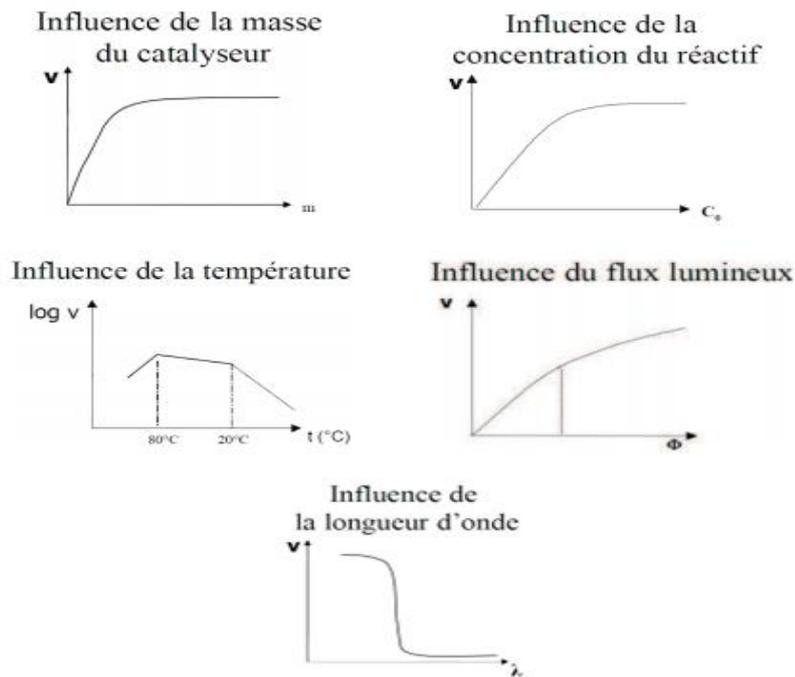


Figure 08: Influence des 5 paramètres fondamentaux en photocatalyse sur la vitesse de réaction [76].

III.7. Avantages et inconvénients de la photocatalyse

La photocatalyse a beaucoup d'avantages et peu d'inconvénients par rapport aux autres procédés de traitements ceci est illustré dans le tableau suivant [79, 80]:

Tableau III.3: avantages et inconvénients de la photocatalyse

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> -Installation simple. -C'est une technologie destructive et non sélective. -Minéralisation totale possible: formation de H_2O et CO_2 et autres espèces. -Elle fonctionne à température et pression ambiante. -Elle est efficace pour des faibles concentrations en polluants. -Elle nécessite une faible consommation d'énergie. 	<ul style="list-style-type: none"> -Nécessité d'utiliser des procédés de séparation (filtration ou centrifugation) du catalyseur en suspension peuvent augmenter le coût de traitement. -Eventuelle formation de sous produit.

III.8. Domaines d'application de la photocatalyse

La photocatalyse trouve de multiples applications [81].

- ✓ **Dépollution de l'eau:** purification et potabilisation de l'eau, traitement des effluents industriels afin de limiter les rejets chargés en composés toxiques ;
- ✓ **Dépollution de l'air:** destruction des bactéries à l'origine de nuisances olfactives ou présentes en milieu hospitalier, réduction de la pollution de l'air d'un environnement urbain;
- ✓ **Surfaces dites autonettoyantes:** augmentation de la durée entre deux nettoyages d'une surface.

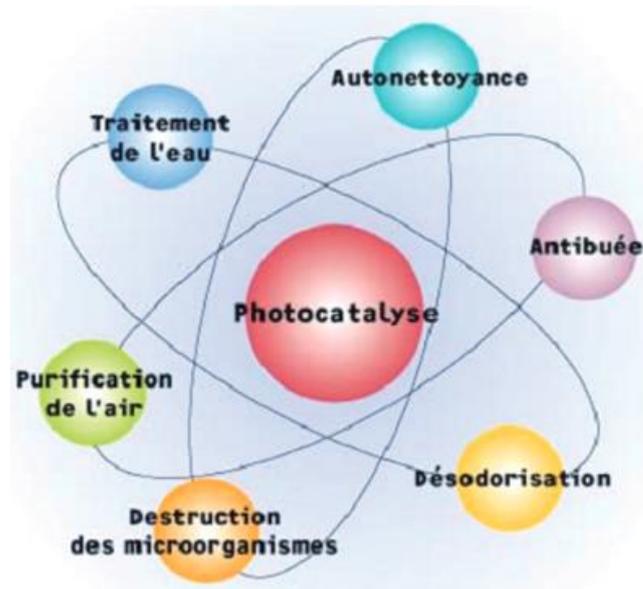


Figure III.9: Domaines d'application de la photocatalyse [81].

Conclusion générale

Les rejets industriels contenant des produits toxiques sont devenus très préoccupants ce qui a provoqué une large prise de conscience et conduit les législations à une plus grande sévérité au regard des limites tolérées.

La présence des colorants synthétiques dans les effluents des stations d'épuration, les eaux de surface et les eaux souterraines, est devenue un problème écologique sérieux, à cause de nombreuses perturbations de la faune aquatique et constituent un risque pour la santé humaine. En effet, ces substances ne peuvent pas être traitées dans les stations d'épuration des eaux usées, ce qui engendre leur pénétration et leur accumulation dans l'écosystème aquatique. Le traitement de cette pollution devient un enjeu sociétal ; la dégradation de ces résidus est donc nécessaire avant leur rejet dans l'environnement.

Avec la prise de conscience des risques que les colorants synthétiques peuvent porter à la santé humaine et à l'environnement, plusieurs études se sont intéressées sur le développement de nouvelles approches pour les procédés de traitement des eaux permettant l'élimination de ces molécules toxiques et non biodégradables.

Les procédés d'oxydation avancés ont été proposés comme une alternative. Pour le traitement de divers effluents. Ces procédés reposent sur la formation in situ des radicaux hydroxyles. Les radicaux hydroxyles sont des espèces hautement actives et qui possèdent un pouvoir oxydant supérieur à celui des oxydants traditionnels, ils sont capables de réagir rapidement et d'une manière non sélective avec la plupart des composés organiques indésirables, réputés difficilement oxydables par voie biologique ou par des traitements chimiques conventionnels.

Le développement de ces procédés d'oxydation avancés dans les filières de traitement des eaux reste encore limité en raison des coûts d'investissement et des coûts opératoires associés. On distingue plusieurs groupes de (POAs) : des procédés d'oxydation chimique en phase homogène, des procédés photocatalytiques en phase homogène et/ou hétérogène et qui peuvent permettre l'exploitation de l'énergie solaire, des procédés d'oxydation sonochimique et finalement des procédés d'oxydation électrochimique.

La photocatalyse hétérogène s'avère l'une des alternatives les plus prometteuses, en matière de dépollution des eaux, car c'est une technologie facile à mettre en œuvre et surtout propre, qui ne nécessite pas l'ajout d'autres agents chimiques. Ce procédé est basé essentiellement sur la production d'espèces actives par un catalyseur. Elle utilise comme énergie, la lumière issue du soleil qui est une énergie renouvelable et ce qui est l'objet de notre étude d'autant plus que notre pays dispose de gisement solaire important.

Cette étude, avait pour but l'évaluation d'une technologie émergente, la photocatalyse hétérogène, comme alternative aux traitements traditionnels de l'eau pour la dégradation des colorants, et d'étudier les méthodes de synthèse et les caractéristique des matériaux utilisés en photocatalyse.

- Le Méthyle Orange a été choisis comme modèle de pollution chimique, sont largement employées dans l'industrie chimique, et les laboratoires.
- Nous avons choisis l'oxyde de Zinc grâce à ses nombreuses propriétés physico-chimiques, optoélectroniques intéressantes, ses composants non toxiques et très abondants sur Terre. Le ZnO est un semi-conducteur très prometteur dans plusieurs domaines d'applications, notamment comme capteur de gaz et en tant que photocatalyseur dans la dépollution de milieux aqueux.
- Grace aux résultats de *Tripathy, N et al*, *Kaur, J et al* nous avons conclu que la photo-dégradation par irradiation UV de ce polluant en présence de l'oxyde de zinc est efficace.

Références bibliographiques

- [1] COUILLARD, D., CLUIS, D., PEDNEAULT, M. Compilation de certains rejets industriels : bilan des polluants. Rapport scientifique. Québec. Vol 47, (1974), p 1-246.
- [2] SUTY H., TRAVERSAY, C., M. COSTE, M. (2003). Application of Advanced oxydation processes: Present and future. Journal of Water science and technologie, vol 49, (2003), p 227–233.
- [3] CHRISTIE, M. R. Collor Chemistry : A Brief Historical Perspective. RSC. (2007).
- [4] SBAI, G., OUKILI, K., LOUKILI, M. Etude de la dégradation des colorants de textile application sur le Bleu de Méthylène. Journal de l'innovation et les études appliquées, 2016, Vol. 16, (2016), p 272-279.
- [5] BEN MANSOUR, H., BOUGHZALA, O., DRIDI, D., BARILLIER, D., CHEKIR-GHEDIRA, L., MOSRATI, R. Les colorants textiles sources de contamination de l'eau : CRIBLAGE de la toxicité et des méthodes de traitement. Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science, Vol 24, (2011), p 193-327.
- [6] <https://tpeyesinventions.wordpress.com/2017/01/03/i-1-definition-de-la-couleur-et-de-la-vision/>.
- [7] CAPON, M., COURILLEU, V., VALTTE, C. Chimie des couleurs et des odeurs, culture et technique, (1993).
- [8] <http://webphysique.fr/auxochrome/>.
- [9] SEYEWETZ, A., SISLEY, P. Chimie des matières colorantes artificielles. Libraires de l'Académie de Médecine, Paris, (1896).
- [10] BIZANI, E., FYTIANOS, K., POULIOS, I., TSIRIDIS, V. Photocatalytic decolorization and degradation of dye solutions and wastewaters in the presence of titanium dioxide, journal of Hazardous Materials, vol 136, (2006), p 85–94.
- [11] BEN MANSOUR, H., LATRACH TLEMCANI, L. Les colorants naturels sont-ils de bons additifs alimentaires. Journal de Phytothérapie, vol 7, (2009), 202–210.
- [12] M.N CREPY, M. N. Dermatoses professionnelles aux colorants. Fiche d'allergologie-dermatologie professionnelle hôpital Cochin, (2004).
- [13] CHRISTIE, R. M. Colour chemistry. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, United Kingdom. 2nd edition, (2001).
- [14] CHAKRABORTY, J. N. Fundamentals and Practices in Coloration of Textiles. Woodhead Publishing India, 2nd edition, India, (2014).

- [15] ALBRECHT, R., MANCHON, P. Annales de la nutrition et de l'alimentation. Journal de métabolisme et toxicité des colorants azoïques, Vol 27, (1973), p 1-9.
- [16] KAUSHIK, G., GOPAL, M, I.S. THAKUR, I. S. Evaluation of performance and community dynamics of microorganisms during treatment of distillery spent wash in a three stage bioreactor. Journal of Bioresour Technology, vol 101, (2010), p 4296-4305.
- [17] MANAHAN S.E. Environmental chemistry. Lewis publishing, 6^e édition, Atlanta, GA, USA, (1994).
- [18] WILLMOTT, N.J., GUTHERIE, J. T., NELSON, G. The biotechnology approach to colour removal from textile effluent. Journal of Soc. Dyers Colour, vol 114, (1998), p 38-41.
- [19] PAGGA, U., BROWN, D., The degradation of dyestuffs part II: behaviour of dyestuffs in aerobic biodegradation tests. Journal of Chemosphere, vol 15, (1986), p 479-491.
- [20] TSUDA, S., MATSUSAKA, N., MADARAME, H., The comet assay in eight mouse organs: result with 24 azo compounds. Mutation Research. Journal of Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, vol 465, (2000), p 11-26.
- [21] CULP, S.J., BELAND, F.A., HEFLICH, R.H., Mutagenicity and carcinogenicity in relation to DNA adduct formation in rats fed leucomolachite green. Journal of Mutation research, vol 506-507, (2002), p 55- 63.
- [22] <https://fr.wikipedia.org/wiki/H%C3%A9lianthine>.
- [23] <http://www.spc.ac-aix-marseille.fr/labospc/sites/www.spc/labospc/IMG/pdf/helianthine.pdf>.
- [24] AMMURI, A. HEJIOUEJ, S. ZIAT, K. SAIDI, M. Dégradation photo-catalytique d'un colorant azoïque, orange de méthyle, par une suspension aqueuse de trioxyde de bismuth (photodegradation of methyl orange in solution in presence of bismuth trioxide). Journal de Physico-Chimie des Matériaux, Substances Naturelles et Environnement, vol 5, (2014), p 2066-2072.
- [25] AL-QARADAWI, S., SALMAN, S. R. Dégradation photocatalytique du méthylorange comme composé modèle, Journal de photochimie et photobiologie A: Chimie, Vol 148, (2002), P 161-168.
- [26] GOYAL, M., BANSAL, R. C. Activated carbon adsorption. the academic division of T&F Informa plc, 2005.

- [27] CRINI, G, BADOT, P. Traitement et épuration des eaux industrielles polluées: procédés membranaires, bioadsorption et oxydation chimique. Presses universitaires de Franche-Comté, 2007.
- [28] WEBER W.J. Evolution of a Technology, *Journal of Environmental Engineering*, vol 110, (1984), p 899-917.
- [29] TAYLOR, J.S., JACOBS, E. P. Water treatment membrane processes. MCGRAW HILL, New-York, NY, 1996.
- [30] VANDER BRUGGEN, B., LEJON, L., VANDECASTEELE, C. Reuse, treatment and discharge of the concentrate of pressure-driven membrane processes. *Journal of Environ. Sci. Technol.*, vol 37, (2003), p 3733-3738.
- [31] HAO, O.J., KIM, H., P.C. CHIANG, P.C. Decolorization of wastewater. *Journal of Crit. Rev. Environ. Sci. Technol*, vol 30, (2000), p 449-505.
- [32] VENDEVIVERE, P. C., BIANCHI, R., VERSTRAETE, W. Treatment and reuse from the textile wet-processing industry: review of emerging technologies. *Journal of Chem. Technol. Biotechnol*, vol 72, (1998), p 289-302.
- [33] FARHADIAN, M., DUCHEZ, D., VACHELAND, C., LARROCHE, C. Monoaromatics removal from polluted water through bioreactors—A review. *Journal of Water Research.*, vol 42, (2008), p 1325 – 1341.
- [34] ZAVISKA, F., DRODUI, P., MERCIER, G., BLAIS, J.F. Procédés d'oxydation avancée dans le traitement des eaux et des effluents industriels: Application à la dégradation des polluants réfractaires. *Revue des sciences de l'eau/ Journal of Water Science*, vol 22, (2009), 535–564.
- [35] (a) MILLET, M. L'oxygène et les radicaux libres (1^{re} partie). *Journal de l'Institut britannique d'études d'organes*, vol 23, (1992), p 67-70.
- [35] (b) MILLET, M. L'oxygène et les radicaux libres (2^e partie). *Journal de l'Institut britannique d'études d'organes*, vol 23, (1992), p 45-50.
- [36] PULGARIN, C., ADLER, N., PERINGER, P., COMNINELLIS, C. Electrochemical detoxification of a 1,4-benzoquinone solution in wastewater treatment. *Journal of Water Research*, vol 28, (1994), p 887-893.
- [37] OPPENLANDER, T. Photochemical Purification of Water and Air. *Advanced Oxidation Processes (AOPs): Principles, Reaction Mechanisms, Reactor Concepts*. Wiley-VCH, 2003.
- [38] DORÉ, M. Chimie des oxydants et traitement des eaux. TEC. DOC. LAVOISIER, Paris, 1989.

- [39] TRILLAS, M., PERAL, J., DONENECH, X. Photocatalyzed degradation of phenol, 2,4-Dichlorophenol, phenoxyacetic acid and 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid over Supported TiO₂ in a flow system. *Journal. Chemical. Technology and Biotechnology*, vol 67, (1996), p 237-242.
- [40] LANGMUIR, I. The Constitution and Fundamental Properties of Solids and Liquids, *Journal of the American Chemical Society*, vol 38, (1916), p 2221-2295, part 1.
- [41] Kittel, C. *Introduction to solid state physics (Physique de l'état solide)*. Paris : 5nd edition Bordas, 1983.
- [42] SUWAVCHAWALIT, C., WONGNAWA, S. Influence of calcination on the microstructures and photocatalytic activity of potassium oxalate-doped TiO₂ powders, *journal of applied Catalysis A: General*, vol 338, (2008), p 87-99.
- [43] MALATO, S. *Solar Photocatalytic decomposition of pentachlorophenol dissolved in water*. Editorial CIEMAT, Madrid, Spain, 54 edition, (1999).
- [44] CARP, O., HUISMAN, C. L., RELLER, A. Photoinduced reactivity of titanium dioxide. *Journal of Progress in Solid State Chemistry*, vol 32, (2004), p 33-177.
- [45] HAYAT, K., GONDAL, M.A., KHALED, M.M., AHMED, Sh., SHEMSI, A.M. Nano ZnO synthesis by modified sol gel method and its application in heterogeneous photocatalytic removal of phenol from water. *Journal of Appl. Catal. A-Gen*, vol 393, (2011), p 122-129.
- [46] HENLEY, S.J., ASHFOLD, M.N.R., CHERNES, D. The growth of transparent conducting ZnO films by pulsed laser ablation. *Journal of Surf. Coat. Technol*, vol 177–178, (2004), p 271-276.
- [47] YAN, H., HOU, J. Growth and photocatalytic properties of one-dimensional ZnO nanostructures prepared by thermal evaporation. *Journal of Mater. Res. Bull*, vol 44, (2009), p 1954-1958.
- [48] PARDESHI, S.K., PATIL, A.B. J. Hazard. Solar photocatalytic degradation of resorcinol a model endocrine disrupter in water using zinc oxide. *Journal of Mater*, vol 163, (2009), p 403-409.
- [49] AKHAVAN, O. Photocatalytic reduction of graphene oxides hybridized by ZnO nanoparticles in ethanol. *Journal of Carbon*, vol 49, (2011), p 11-18.

- [50] OZEROV, I., BULGAKOV, A.V., NELSON, D., CASTELL, R., SENTIS, M., MARINE, W. Ablation de ZnO par laser UV (193 nm) : nano-agrégats en phase gazeuse. *Nano. J. Phys. IV France*, vol 108, (2003), p 37 – 40.
- [51] SAKTHIVELA, S., NEPPOLIAN, B., SHANKAR, M.V., ARABINDOO, B., PALANICHAMY, M., MURUGESAN, V. Solar photocatalytic degradation of azo dye: comparison of photocatalytic efficiency of ZnO and TiO₂. *Journal of Sol. Energ. Mat. Sol. C*, vol 77, (2003), p 65-82.
- [52] HIDAKA, H., NOHARA, K., OISHI, K., ZHAO, J., SERPONE, N., PELIZZETTI, E. Photodegradation of surfactants. XV: Formation of SO₄²⁻ ions in the photooxidation of sulfur-containing surfactants. *Journal of Chemosphere*, vol 29, (1994), p 2619 -2624.
- [53] https://fr.wikipedia.org/wiki/Oxyde_de_zinc
- [54] TRIPATHIE, N., AHMAD, R., KUK, H., LEE, D.H., HAHN, Y.B., KHANG, G. Dégradation rapide de l'orange méthylique à l'aide d'un photocatalyseur à sphères de ZnO poreux. *Journal de photochimie et photobiologie*, vol 161, (2016), p 312-317.
- [55] KAUR, J., BANSAL, S., SINGHAL, S. Photocatalytic degradation of methyl orange using ZnO nanopowders synthesized via thermal decomposition of oxalate precursor method. *Physica B: Condensed Matter*, vol 416, (2013), p 33–38.
- [56] AYOUCHE, R., LEINEN, D., MARTIN, F., GABAS, M., DALCHIELE, E., RAMOS-BARRADO, J. R. Thin. Preparation and characterization of transparent ZnO thin films obtained by spray pyrolysis, *journal thin solid film*, Vol 426, (2003), p 68-77.
- [57] DING, Y., WANG, Z.L., SUN, T., QIU, J. Zinc-blende ZnO and its role in nucleating wurtzite tetrapods and twinned nanowires. *Applied Physics Letters*, vol 15, (2007), p 153510
- [58] REBIEN, M., HENRION, W., Bär, M., FISCHER, CH.H. Optical properties of ZnO thin films: ion layer gas reaction compared to sputter deposition. *Journal of Applied Physics. Letters*, vol 80, (2002), p 3518-3520.
- [59] A. DUTTA, A., BASU, S. Modified CVD growth and characterization of ZnO thin films. *Journal of Mater. Chem. Phys*, vol 34, (1993), p 41- 45.
- [60] REBIEN, M., HENRION, W., BAR, M., FISHER, H. Optical properties of ZnO thin films: Ion layer gas reaction compared to sputter deposition. *Journal of App. Phys. Lett.*, vol 80, (2002), p 3518.
- [61] MARKHAM, M. C., HANAN, M. C., EVANS, S. W. Factors Influencing the Oxidation of Phenols, Catalyzed by Zinc Oxide and Light. *Journal of Am.Chem.Soc.*, vol 76, (1954), p 820-823.

- [62] CORRIU, R., NGUYEN, T. A. Chimie moléculaire, sol-gel et nanomatériaux, Éditions École Polytechnique, Paris, 2008.
- [63] ALAIN, C. P. Introduction to Sol-Gel Processing, 2^{ème} éd, Springer, France, 1998.
- [64] FU, C.M., CHAO, Y. C., HUNG, S. H., LIN, C. P., TANG, J. Impedance spectra of field-aligned CrO₂ needle-shape powders. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. vol 282, (2004), 283-286.
- [65] NAZARI, M., GHASEMI, N., MADDAH, H., MOLTAGH, M. M. Synthesis and characterization of maghemite nanopowders by chemical precipitation method. Journal of Nanostruct. Chem, vol 4, (2014), P 2-5.
- [66] RIMAN, R. E., SUCHANEK, W. L., LENCKA, M.M. Hydrothermal crystallization of ceramics. Journal of Ann. Chim-Sci. Mat, vol 27, (2002), P 15-36.
- [67] LACHAL, M. Study of insertion/deinsertion mechanisms of alkaline cations (Li⁺,Na⁺) within FePO₄ olivine structure for Li-ion and Na-ion batteries, 2015. https://www.researchgate.net/figure/2-Schema-du-dispositif-experimental-de-synthese-hydrothermale-representation-dun_fig7_283056690.
- [68] KIM, G., LEE, N., KIM, K. B., KIM, K. B., CHANG, H., SONG, S. J, PARK, J. Y. Various synthesis methods of aliovalent-doped ceria and their electrical properties for intermediate temperature solid oxide electrolytes. International journal of Hydrogen energy, vol 38, (2013), p 1571-1587.
- [69] CLEGG, W. X-ray Crystallography. Oxford université, 2 ed, New york, 2015.
- [70] GOLDSTEIN, J., NEWBURY, D., JOY, D. C, LYMAN, C. E., ECHLIN, P., LIFSHIN, E., SAWYER, L., MICHAEL, J. R. Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis, 3 ed, Springer science, new york, 2003
- [71] FULTZ, B., HOWE, J. M. Transmission Electron Microscopy and Diffractometry of Materials, 4nd ed, graduat texte in physics, New York. 2003
- [72] SIMON, J. C., DAUBY, B., NONET, S. Evaluation de l'efficacité de l'oxydation avancée par photocatalyse hétérogène UV/TiO₂ sur un effluent industriel contaminé par des composés organiques non biodégradables (colorants), journal Scientifique des ISILF, n°22, (2008), p 2-25.

- [73] GANDHIMATHI, R., DURAI, N. J., NIDHEESH, P. V., RAMESH, S. T., KANMANI, S. Use of combined coagulation-adsorption process as pretreatment of landfill leachate. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, vol 10, (2013).
- [74] CHERGUI, S., ALLOUNE, R. Procédé d'oxydation avancée pour le traitement des eaux usées: Principe et applications. *Journal de Revue des Energies Renouvelables*, alger, (2007), p 163-170.
- [75] SCACCHI, G., BOUCHY, M., FOUCAUT, J. F., ZAHRAA, O. *Cinétique et Catalyse. Technique & Documentation*, paris, 1996.
- [76] HERRMANN J. M. Environmental photocatalysis: perspectives for China. *Journal of Science China Chemistry*, vol 53, (2010), p 1831- 1843.
- [77] OHTANI, B. Preparing articles on photocatalysis - Beyond the illusions, misconceptions, and speculation. *Chemistry Letters*, vol 37, (2008), p 217-229.
- [78] ACERO, J., BENITEZ, J., GONZALEZ, M., BENITEZ, R. Kinetics of Fenuron Decomposition by Single-Chemical Oxidants and Combined Systems. *Ind. Journal of Eng. Chem. Res.*, vol 41, (2002), p 4225-4232.
- [79] TAO, Y., WU, C. Y., MAZYCK, D. W. Removal of methanol from pulp and paper mills using combined activated carbon adsorption and photocatalytic regeneration. *Journal of Chemosphere*, vol. 65, 2006, p. 35-42.
- [80] MAHOODI, N. M., ARAMI, M., LIMAEI, N. Y., TABRIZI, N. S. Decolorization and aromatic ring degradation kinetics of Direct Red 80 by UV oxidation in the presence of hydrogen peroxide utilizing TiO₂ as a photocatalyst. *Journal of Chemical Engineering*, vol 112, (2005), p 191-196.
- [81] BOUAFIA, S. Photocatalyse Solaire : Application du rayonnement solaire au traitement de l'eau. *Journal de Recherche et Développement*, n° 20, (2011), p 6-7.

Résumé

Ce mémoire, traite des méthodes de synthèse et les caractéristiques des matériaux utilisé en photocatalyse pour la dégradation d'un colorant synthétique.

Le principe de la photocatalyse hétérogène est basé sur l'absorption, par un semi-conducteur, des photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite, permettant de faire passer des électrons de la bande de valence (E_v), à la bande de conduction (E_c).

Mots clés : dégradation photocatalytique, polluants organiques, photocatalyse, colorant, semi conducteur.

Abstract:

This Memorandum deals with synthetic methods and the characteristics of materials used in photocatalysis for the degradation of a synthetic dye.

The principle of heterogeneous photocatalysis is based on the absorption, by a semiconductor, of photons of energy equal to or greater than the width of the forbidden band, allowing electrons to pass from the valence band (E_v) to the conduction band (E_c).

Key word: photocatalytic degradation, organic pollutants, photocatalysis, dye, semiconductor

ملخص :

تتناول هذه المذكرة الطرق التركيبية وخصائص المواد المستخدمة في التحفيز الضوئي لتفكيك الصبغة الاصطناعية يعتمد مبدأ التحفيز الضوئي غير المتجانس على الامتصاص ، بواسطة أشباه الموصلات ، لفوتونات من الطاقة تساوي أو تزيد عن عرض النطاق الممنوع ، مما يسمح للإلكترونات بالمرور عبر نطاق التكافؤ (E_v)، إلى نطاق التوصيل (E_c).
الكلمات المفتاحية: التحلل الضوئي ، الملوثات العضوية ، التحفيز الضوئي ، الصبغة ، أشباه الموصلات.