

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département De Génie Des Procédés

N° : 2021/2022

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE: Science et Technologie

FILIERE: Génie des Procédés

SPECIALITE: Génie des Procédés des Matériaux

Thème

Synthèse et étude d'un photocatalyseur nanocomposite

Présenté Par : Boussayoud Lakhdar

Encadré Par : Benhabiles Sadjia

Sayoud Bachir

Date de soutenance: 13/07/2022

Jury de Soutenance

Président : Fathi Chouikh

Grade : MCA

Univ MSB Jijel

Encadreur : Benhabiles Sadjia

Grade : MCB

Univ MSB Jijel

Examineur 1: Bouchair Abdennour

Grade : MCB

Univ MSB Jijel

Promotion : 2021 /2022

Remerciement

Tout d'abord, nous voudrions remercier Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné la force, la volonté et surtout le courage de pouvoir terminer ce travail. Nos remerciements vont tout particulièrement à Mme. Benhabiles Sadjia qui a bien voulu assurer notre encadrement. Nous lui devons une immense reconnaissance et un très grand respect. Je tiens à remercier Dr Fathi Chouikh et Dr Abdennour Bouchair pour avoir accepté de participer à notre jury. Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants de notre département sans exception pour leur aide et leur soutien moral.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail, en premier lieu, à ma mère « MERIAMA », qui n'a jamais cessé de me soutenir, et qui a été toujours présente, contre vents et marées, afin de m'apporter courage et encouragement, patience, énergie positive et persévérance, je lui serai reconnaissant toute ma vie.

Aussi, je le dédie à mon père « Mohamed », qui a toujours insisté à valoriser la science et l'éducation, et les mettre au-devant et au-dessus de toutes autres considérations matérielles.

Je serai d'une ingratitude ignoble, si j'oublierai à cette occasion, mes chers frères « DJAMEL EDDINE, TAHAR et AYOUB », qui sont, en réalité, mes compagnons de route et de parcours, mes confidents et mes amis les plus proches et intimes.

À la vertu de la vraie amitié, je tiens à citer dans cette dédicace, mes amis qui, tout au long de notre amitié, ont gardé fidélité, humilité, dévouement, principes et honnêteté.

Et finalement, à tous ceux qui combattent pour que la science rayonne et prenne une place grandiose dans notre pays.

LAKHDAR

DEDICACE

*Je dédie ce travail avec amour, respect et appréciation à mes chers parents
qui étaient à mes côtés jusqu' à ce moment, à mes Chers frères, à Ma très
chère sœur, Ma belle nièce Asma et à tous mes très chers amis*

BACHIR

Remerciement

Dédicace

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures et graphe

Introduction générale1

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

I.1. La pollution de l'eau.....3

I.2. Généralités sur les colorants.....3

 I.2.1. Définition.....4

 I.2.2. Classification des colorants.....4

I.3. Les semi-conducteur..... 5

 I.3.1. Définition5

 I.3.2. Bandes d'énergie6

 I.3.3. Bande interdite (gap énergétique).....6

 I.3.4. Types des semi-conducteurs7

 I.3.4.1. Semi-conducteur pur ou intrinsèque7

 I.3.4.2. Semi-conducteur dopés ou extrinsèque.....7

 I.3.4.2.1. Semi-conducteur extrinsèque type N7

 I.3.4.2.2. Semi-conducteur extrinsèque type P8

 I.3.5. Les matériaux semi conducteur9

 I.3.5.1 Semi-conducteur intrinsèque simple.....9

 I.3.5.2. Semi-conducteur intrinsèque composés.....9

I.4. La photocatalyse	10
I.4.1. Phocatalyse hétérogène.....	10
I.4.1.1.Définition	10
I.4.1.2.Principe.....	11
I.4.1.3.Facteur influençant de photocatalyse hétérogène	13
I.5.photocatalyse et semi-conducteur dopés.....	14

Chapitre II : Matériels et Méthodes

II.1. Méthyle orange.....	17
II.1.1. Définition.....	17
II.2.Préparation des photocatalyseurs.....	17
I.2.1. Les techniques sol-gel.....	17
II.2.2. Protocole pour préparer $Zn_{1-x}Ca_xO$	18
II.3. Caractérisation	21
II.3.1. band gap.....	21
II.3.2. Spectrophotomètre UV-visible	21
II.3.2.1. Définition.....	21
II.3.2.2. Le principe.....	22
II.3.2.3. Courbe d'étalonnage du MO.....	23
II.4. Montage expérimental pour les tests photocatalytiques.....	23

Chapitre III : Résultats et discussions

III. Introduction	25
-------------------------	----

III.1. Détermination de l'énergie de la bande interdite (E_g).....	25
III.2. Effet de la concentration initiale.....	26
III.3 Effet de pH.....	28
III.4. Effet de photocatalyseur.....	29
III.5. Modélisation de la cinétique de la photocatalyse	30
III.5.1. Modèle du pseudo premier ordre.....	31
III.5.2. Modèle du pseudo second ordre.....	32
<i>Conclusion générale</i>	34

Liste des Tableaux

Tableau I.1: Classification des colorants textiles.....4

Tableau I.2: Comparaisons de l'activité photocatalytique de divers catalyseurs.....15

Tableau III.1: l'énergie gap (eV).....25

Tableau III.2: Paramètres cinétiques de photocatalyse du MO sur les Catalyseurs.....33

Liste des Figures

Figure I.1 : Schéma des bandes d'énergie des semi conducteur.....	6
Figure I.2 : Silicium dopé au Phosphore (dopage n) : a T = 0K et b T ≠ 0.....	8
Figure I.3 : Silicium dopé au Bore (dopage p) : a T = 0K et b T ≠ 0K.....	9
Figure I.4 : Schéma illustrant les mécanismes de la photocatalyse.....	12
Figure II.1 : Structure chimique du méthyle orange (MO).....	17
Figure II.2 : schéma de préparation de Zn _{1-x} Ca _x O par méthode sol-gel.....	19
Figure II.3 : Préparation des catalyseurs par méthode de sol -gel.....	20
Figure II.4: le matériau broyé.....	20
Figure II.5: Photo numérique du spectrophotomètre UV-visible utilisé.....	22
Figure II.6: Courbe d'étalonnage du MO.....	23
Figure II.7: les testes photocatalytique de MO.....	24
Figure III.1 : Variation de $(\alpha h\nu)^2$ avec l'énergie photonique ($h\nu$) pour Les catalyseurs.....
.....	26
Figure III.2 : Effet du temps de contact et la concentration initial du MO sur Les.....
catalyseurs.....	27

Figure III.3: Effet du pH sur le taux d'élimination du MO.....29

Figure III.4: Effet des catalyseurs sur le taux d'élimination du MO.....30

Figure III.5: Représentation linéaire du modèle cinétique Pseudo premier ordre.....31

Figure III.6: Représentation linéaire du modèle cinétique pseudo second ordre.....32

Introduction

Générale

Introduction générale

L'eau est un élément indispensable à la vie et à la plupart des activités humaines, telles que les activités agricoles, industrielles et domestiques (alimentation en eau potable).

Bien que l'eau soit très présente sur terre, l'eau douce ne présente que 1 % du total des ressources, le reste étant de l'eau salée ou bloquée sous forme de glace. Mise à part la rareté de cette eau douce, sa répartition géographique n'est pas du tout uniforme sur la terre. A titre d'exemple, les pays les plus riches en eau sur le pourtour méditerranéen détiennent les deux tiers des ressources, alors que d'autres pays du sud sont en dessous du seuil de pénurie.

En effet, la question de pénurie d'eau douce est devenue un problème mondial. Les données alarmantes concernant les changements climatiques (sécheresses, inondations...) et l'épuisement des nappes phréatiques rendent mêmes les pays riches en eau, vulnérables à un tel problème, surtout avec le développement de leur activité économique et industrielle. La gestion des eaux usées est alors devenue une nécessité, et le sujet d'épuration et de recyclage des eaux s'est posé, de plus en plus, ces dernières années [1].

Les eaux usées sont généralement traitées par des produits chimiques et des méthodes physiques telles que la méthode électrochimique [2], la coagulation et la floculation [3], la séparation membranaire [4], la biodégradation [5], le procédé de Fenton [6], l'oxydation ou l'ozonation [7],

De nouvelles technologies sont alors apparues ces dernières années, parmi lesquelles les procédés d'oxydation avancés (POA). Il s'agit de technologies basées sur la production d'espèces oxydantes très réactives comme le radical hydroxyle, pour dégrader les polluants organiques. A titre d'exemple la photocatalyse hétérogène.

La photocatalyse hétérogène est l'un de ces POA qui a déjà démontré sa capacité à traiter un grand nombre de polluants. Propulsée par l'avancée des technologies dites photoniques, cette technique a gagné du terrain ces dernières années et s'est révélée très efficace pour éliminer les composés toxiques dans l'eau de façon économique et propre, car elle utilise une source d'énergie renouvelable et des matériaux semi-conducteurs à coût limité comme le dioxyde de titane [1].

Dans ce travail nous nous sommes intéressés la préparation et la caractérisation de nouveaux photocatalyseurs (ZnO dopé avec du Calcium), dans le but d'étendre la zone du spectre d'absorption de ce dernier vers le visible et de ralentir la recombinaison des charges photogénérées, phénomène qui limite fortement l'activité photocatalytique.

Ce mémoire est articulé en trois chapitres. Le premier chapitre présente une mise au point bibliographique qui commence par un rappel sur les semi-conducteurs et le principe de la photocatalyse, et une présentation des travaux actuels sur la photocatalyse avec les semi-conducteurs.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons une synthèse des méthodes expérimentales de préparation et de caractérisation des photocatalyseurs ainsi que l'appareillage utilisé.

Enfin le troisième chapitre concerne une étude sur la préparation, la caractérisation et l'activité photocatalytique des photocatalyseurs $Zn_{1-x}Ca_xO$ préparés.

Références de l'introduction

- [1] Mehdi Ismail ; Préparation et caractérisation de nouveaux matériaux pour les réactions de dépollution photocatalytique de l'eau dans le visible ;thèse de doctorat ; 2017.
- [2] P.V.Nidheesh, M. Zhou, and M. A. Oturan; An overview on the removal of synthetic dyes from water by electrochemical advanced oxidation processes; Chemosphere 197(2018)210–27.
- [3] A.Szygula, E. Guibal, M. A. Palacino, M. Ruiz, and A. M. Sastre; Removal of an anionic dye (Acid Blue 92) by coagulation– flocculation using chitosan; Journal of Environmental Management 90(2009)2979–86.
- [4] A.Alventosa–deLara, S. Barredo–Damas, M. I. Alcaina–Miranda, and M. I. Iborra–Clar; Ultrafiltration technology with a ceramic membrane for reactive dye removal: Optimization of membrane performance; Journal of Hazardous Materials 209–210(2012)492–500.
- [5] B.Sudarjanto, B. Keller–Lehmann, and J. Keller; Optimization of integrated chemical–biological degradation of a reactive azo dye using response surface methodology; Journal of Hazardous Materials B138(2006)160–8.
- [6] M.Karatas, Y. A. Argun, and M. E. Argun; Decolorization of antraquinonic dye, Reactive Blue 114 from synthetic wastewater by Fenton process: Kinetics and thermodynamics; Journal of Industrial and Engineering Chemistry 18 (3)(2012)1058–62.
- [7] G.Moussavi, and M. Mahmoudi; Degradation and biodegradability improvement of the reactive red 198 azo dye using catalytic ozonation with MgO nanocrystals; Chemical Engineering Journal 152 (1)(2009)1–7.

CHAPITRE I

Synthèse

Bibliographique

I.1. La pollution de l'eau

La pollution est une modification néfaste de l'environnement naturel qui se manifeste en tout ou en partie comme un sous-produit de l'action humaine, par des effets directs ou indirects sur les perturbations de l'écosystème, dont les conséquences peuvent affecter la migration ou l'extinction de certaines espèces incapables de s'adapter [1]. Les eaux usées des différentes industries sont devenues un véritable enjeu sanitaire et environnemental. Car non seulement ils rendent le milieu aquatique inesthétique et dangereux, mais ils contaminent à coup sûr l'eau potable [2]. Parmi les industries qui consomment beaucoup d'eau, l'industrie textile génère beaucoup de déchets organiques. : Phénols, hydrocarbures, détergents, pesticides, colorants, etc.

I.2. Généralité sur les colorants

Nous vivons dans un monde où tout est coloré, nos vêtements, notre nourriture, nos cosmétiques, nos médicaments et plus encore. Par rapport aux colorants naturels, ces colorants deviennent de plus en plus des colorants synthétiques en raison de leur facilité de synthèse, de leur vitesse de production rapide et de leur grande variété de couleurs. Aujourd'hui, les colorants synthétiques sont une véritable industrie, la capitale de la chimie moderne. La production mondiale de ces colorants synthétiques est estimée à 800 000 t.an⁻¹. Certains de ces colorants, environ 140 000 t.an⁻¹, sont libérés lors des étapes de fabrication et de coloration des tissus [3].

I.2.1. Définition

Un colorant est un matériau auto-colorant qui peut être immobilisé sur un support. La couleur des différentes substances est plus ou moins liée à leur composition chimique. Les colorants sont divisés en deux grandes catégories : les colorants naturels "issus de matières minérales ou organiques" et les colorants produits par synthèse chimique [3]. En général, les colorants consistent en un ensemble de chromophores, d'auxophores et de structures aromatiques.

I.2.2. Classification des colorants textiles

Tableau I.1: Classification des colorants textiles

Classification chimique	Classification tinctoriale
Les colorants azoïques.	Les colorants réactifs
Les colorants indigoïdes.	Les colorants directs.
Les colorants xanthènes.	Les colorants de cuve.

Les colorants nitrés et nitrosés.	Les colorants basiques ou cationiques.
Les colorants triphénylméthanes.	Les colorants acides ou anioniques.
Les phtalocyanines.	Les colorants mordants.

Le **Tableau I.1** énumère les principes de classification les plus courants dans l'industrie textile, basés sur la structure chimique des colorants synthétiques et les méthodes appliquées à différents substrats tels que les fibres textiles, le papier, le cuir et les plastiques [4].

I.3. Les semi-conducteur

I.3.1. Définition

Les semi-conducteurs sont des matériaux solides ou liquides qui conduisent l'électricité à température ambiante, mais pas aussi facilement que les métaux conducteurs. À la basse température, un semi-conducteur pur se comporte comme un isolant, à des températures élevées ou en présence de lumière ou d'impuretés, la conductivité des semi-conducteurs augmente considérablement, rivalisant même avec celle des métaux. Dont la conductivité électrique est intermédiaire entre celle des métaux et des isolants $10^{-6}\text{S/m} < \sigma < 10^5\text{S/m}$.

Le comportement électrique des semi-conducteurs, comme celui des métaux et des isolants est généralement modélisé à l'aide de la théorie des bandes d'énergie [5].

1.3.2. Bandes d'énergie

Le comportement électrique des semi-conducteurs est souvent modélisé à l'aide de la théorie des bandes, un modèle quantique en physique du solide qui détermine les énergies admissibles des électrons dans les solides et aide à comprendre le concept de conductivité électrique dérivé des molécules orbitales.

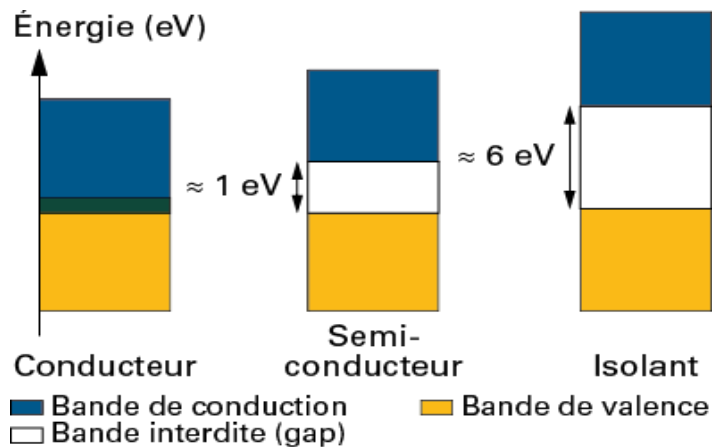


Figure 1.1: Schéma des bandes d'énergie des semi-conducteur

1.3.3. Bande interdite (gap énergétique)

En physique du solide, l'énergie d'écart E_g est la différence d'énergie entre le haut de la bande de valence et le bas de la bande de conduction d'un isolant ou d'un semi-conducteur. La bande de valence est complètement remplie d'électrons, tandis que la bande de conduction est vide. Cependant, si les électrons de la bande de valence gagnent suffisamment d'énergie

(au moins autant que l'énergie de l'écart), ils peuvent atteindre la bande de conduction. La conductivité d'un semi-conducteur est étroitement liée à son énergie interstitielle.

1.3.4. types des semi-conducteurs

On distingue deux types de semi-conducteurs : pur et dopé.

1.3.4.1. Semi-conducteur pur ou intrinsèque

Un semi-conducteur est dit pur ou non dopé lorsque les porteurs de charge proviennent de la rupture de paires électron-trou due à l'agitation thermique du réseau cristallin. Le comportement électrique ne dépend que de la structure et de l'excitation thermique. Les niveaux d'impuretés sont très faibles (moins d'un atome d'éléments semi-conducteurs) [6].

1.3.4.2. Semi-conducteur dopé ou extrinsèque

Les semi-conducteurs intrinsèques sont dopés avec des impuretés soigneusement choisies [3], afin qu'ils occupent la majorité (ou la prédominance) des porteurs de charge (électrons ou trous) dans les bandes de conduction ou de valence. L'introduction de ces dopants perturbe la bande interdite, créant des états accessibles au sein de ces bandes et rendant l'espace plus perméable, tout en maintenant la neutralité de charge globale dans le matériau [4]. Ainsi, selon le dopage, nous avons des semi-conducteurs extrinsèques de type N ou de type P.

1.3.4.2.1. Semi-conducteur extrinsèque de type N

C'est un semi-conducteur dopé N avec des impuretés de type donneur qui créent des électrons en excès qui sont faiblement liés à ces atomes, leur donnant plus de degrés de liberté dans le réseau cristallin. Ainsi, comme les atomes donneurs sont ionisés positivement,

des niveaux d'énergie supplémentaires sont introduits dans la bande de conduction. Ce semi-conducteur de type N a la particularité d'avoir une majorité d'électrons dans la bande de conduction et une minorité de trous dans la bande de valence.

1.3.4.2.2. Semi-conducteur extrinsèque de type P

C'est un semi-conducteur dopé P avec des impuretés de type accepteur qui créent des trous en excès. Par conséquent, un niveau d'énergie supplémentaire est introduit dans la bande de valence et les atomes accepteurs sont ionisés négativement. Ce semi-conducteur de type P a pour caractéristiques que les trous dans la bande de valence sont majoritaires et les électrons dans la bande de conduction sont minoritaires [9].

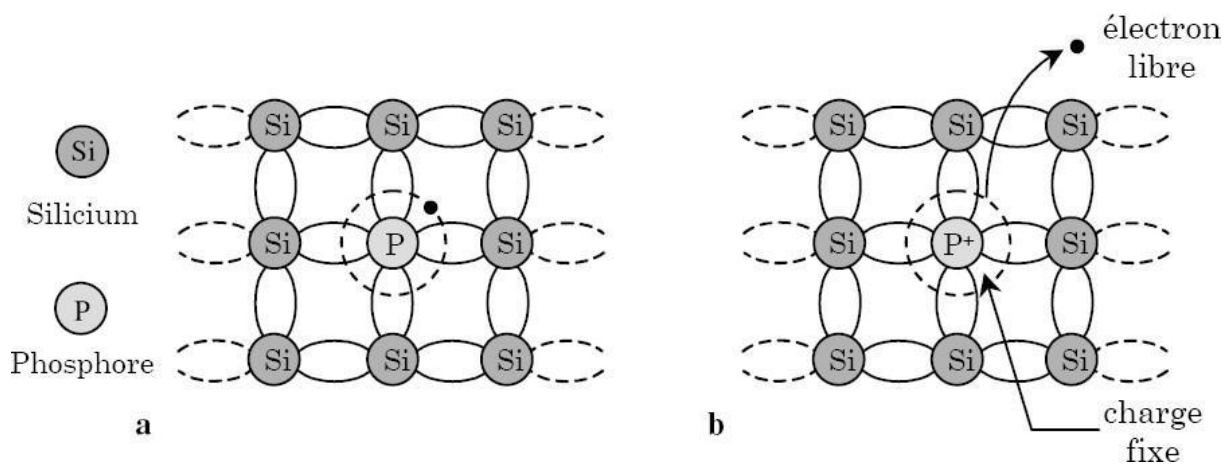


Figure 1.2 : Silicium dopé au Phosphore (dopage n) : a $T = 0K$ et b $T \neq 0$

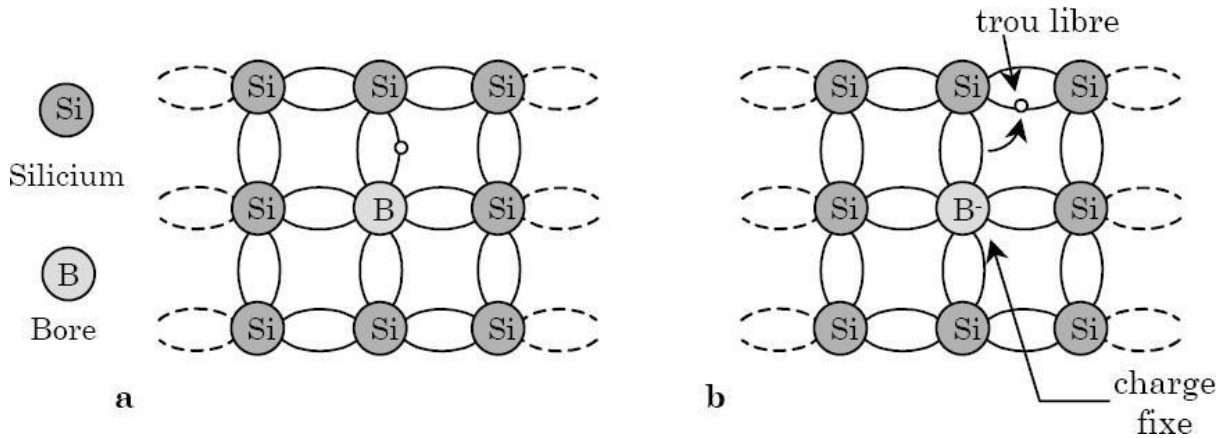


Figure 1.3 : Silicium dopé au Bore (dopage p) : a $T = 0K$ et b $T \neq 0K$

1.3.5. Les matériaux semi-conducteurs

La famille des semi-conducteurs est très vaste. Les semi-conducteurs sont classés selon leur composition chimique. Ça existe:

1.3.5.1. Semi-conducteurs intrinsèques simples

Les semi-conducteurs intrinsèques simples sont constitués d'un seul élément, comme ceux de I. a. colonne IV du tableau périodique ; le silicium (Si) et le germanium (Ge).

1.3.5.2. Semi-conducteurs intrinsèques composés

Dans cette catégorie, les semi-conducteurs sont composés d'au moins deux types d'atomes différents. Les semi-conducteurs binaires de classe (II-VI) sont constitués d'un élément dans la colonne II et d'un autre élément dans la colonne VI du tableau périodique. Les semi-conducteurs de type (III-V) sont constitués d'un élément dans la colonne III et d'un autre élément dans la colonne V du tableau périodique. Conducteur de classe (IV-VI).

Il existe d'autres types de semi-conducteurs constitués de trois atomes différents (ternaire) ou même de quatre atomes (quaternaires).

I.4.La Photocatalyse

Plus que jamais, les enjeux environnementaux sont au cœur de la recherche et du développement industriel. Dans les années 1980, ils ont abouti au concept de développement durable avec le principe de lier développement économique et maintien des équilibres écologiques [10], conduisant au développement de technologies de traitement plus efficaces telles que les procédés d'oxydation avancés. Les procédés photocatalytiques hétérogènes font partie des procédés d'oxydation avancés.

La photocatalyse est généralement utilisée pour la purification de l'air et le traitement de l'eau. C'est l'action d'une substance appelée "photocatalyseur" qui augmente la vitesse d'une réaction chimique thermodynamiquement possible sous l'action de la lumière sans interférer avec l'équation d'équilibre de la réaction.

Actuellement, le terme "photocatalyse" désigne plus spécifiquement la "photocatalyse hétérogène", dans laquelle le photocatalyseur est un semi-conducteur, plutôt qu'une molécule ou un complexe de métal de transition [11].

I.4.1. Photocatalyse hétérogène

I.4.1.1. Définition

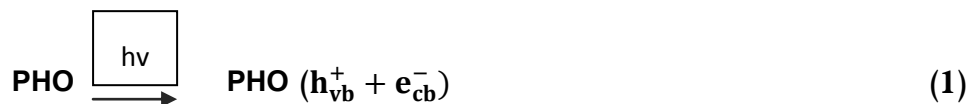
Cette technique compte parmi les procédés étudiés ces trente dernières années. Le terme photocatalyse désigne l'accélération de la vitesse d'une réaction photo-induite en présence

d'un catalyseur. La photocatalyse hétérogène désigne l'excitation d'un semi conducteur par un rayonnement, donne lieu à des modifications électroniques au niveau de sa structure, engendrant la formation de radicaux responsables de réactions d'oxydoréduction avec différents composés adsorbés à sa surface [12].

1.4.1.2. Principe

La dégradation par la photocatalyse hétérogène (HP) se produit en raison de la formation d'espèces à haut potentiel d'oxydation ($\text{HO}\cdot$, $\text{O}\cdot$) qui effectuent l'oxydation en composés plus simples, conduisant à la minéralisation

Au cours du processus HP, l'irradiation de la surface du photocatalyseur (PHO) conduit à l'adsorption d'énergie, transférant un électron (e^-_{vb}) de la bande de valence (VB) à la bande de conduction (CB) (e^-_{cb}), générant un trou (h^+_{vb}) dans le VB (Éq. (1)).



Après la formation du couple e^-_{vb} / h^+_{vb} , deux processus peuvent se produire :

- (i) une recombinaison interne, libérant de l'énergie thermique et/ou de la luminance, ramenant le catalyseur à son état d'origine ;
- (ii) avec le système excité, les réactions 2 à 5 se produiront dans CB, générant des espèces à haut potentiel d'oxydation

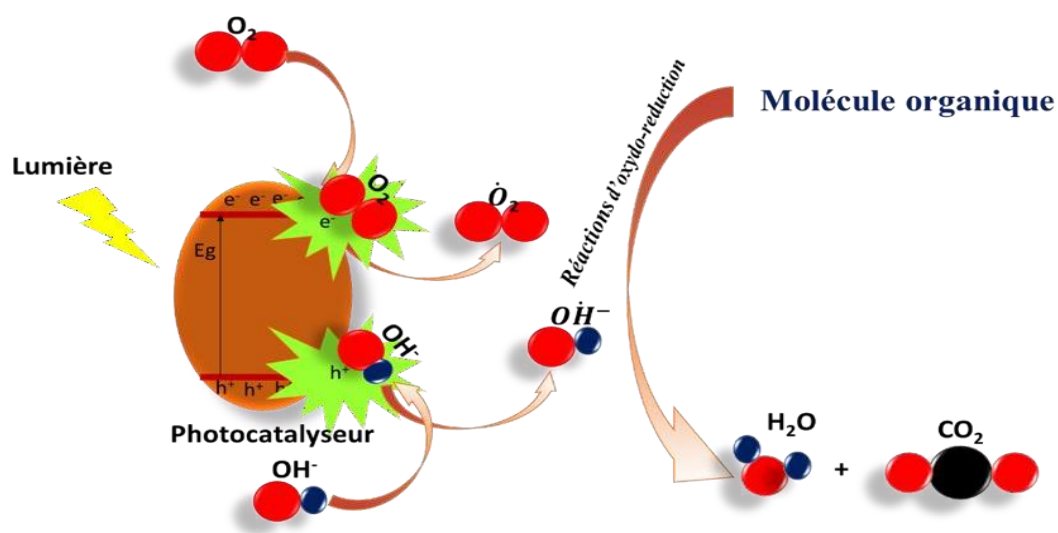


Figure I.4 : Schéma illustrant les mécanismes de la photocatalyse.

Par la suite ces deux groupes de radicaux libres migrent encore dans la solution et interagissent avec les molécules de colorant, jusqu'à la minéralisation totale et la production d'eau et de dioxyde du carbone. La **Figure I.4** illustre le mécanisme général de la photodégradation.

La vitesse de dégradation des colorants dépend de la nature du colorant, de sa

concentration, du pH de la solution, de la source d'irradiation (spectre et densité de puissance), et de la surface du photocatalyseur (rugosité, morphologie,)[13] [14].

I.4.1.3. Facteurs influençant la photocatalyse hétérogène

- La dose du catalyseur
- La concentration initiale du polluant
- Le pH
- Le flux lumineux
- La structure cristalline du catalyseur
- La taille des particules
- La composition aqueuse
- L'oxygène dissous
- La température
- Le débit

I.5. Photocatalyse et semi-conducteurs dopés

Les semi conducteurs sont largement utilisés dans la photocatalyse ces dernières années en raison de leur grande stabilité, de leur non-toxicité et de leur efficacité photocatalytique. En revanche plusieurs matériaux ont été utilisés comme dopants pour ces semi-conducteurs afin d'augmenter encore l'efficacité d'oxydation des polluants.

Le tableau ci-dessous représente quelques semi-conducteurs dopés ou supportés sur d'autres matériaux, appliqués en photocatalyse.

Tableau I.2: Comparaisons de l'activité photocatalytique de divers catalyseurs

catalyseurs	Méthode de synthèse	colorant	Type de lumière	Temps d'irradiation (min)	Dose du catalyseur (g/L)	Elimination (%)	Références
Ag/ZnO-TiO ₂	Synthèse assisté par micro-ondes	RhB	solaire	30 min	1.5	30	[15]
TiO ₂ /ZnO doppé Cu	Sol-gel	MO	Visible	120	0.6	48.7	[16]
ZnO/TiO ₂ composites	Solvothermal	MO	UV	150	0.3	98.9	[17]

ZnO– graphène– TiO ₂	Sol–gel	RhB	visible	180	1	92.5	[18]
Ag/ZnO/graphène	Synthèse assisté par micro–ondes	MO	UV	80	1	99.6	[19]
ZnO/rGO	Méthode améliorée en deux étapes	MO	UV	120	1	99.1	[20]
TiO ₂ /ZnO hérissons	Solvothermal	MO	UV	30	1	97	[18]

Références de Chapitre I

- [1] Boufenar , K. Litim, A. Elaboration d'un charbon actif pour l'élimination de la Rhodamine B en phase aqueuse par adsorption. Mémoire de master, Université de Jijel, 2020.
- [2] Aichour, A. Synthèse et propriétés de bio adsorbants encapsulés dans l'alginate : application à l'élimination des colorants du milieu aqueux .Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas–Sétif 1,2019.
- [3] Manssour H.B et al. La colorante textile source de contamination de l'eau : Criblage de la toxicité et des méthodes de traitement. Journal of Water Science, 21,2011, 209–238.
- [4] Chaouche, K. Etude de la dégradation photo catalytique d'un colorant synthétique et d'un tensioactif. Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2011
- [5] Salamé,B. Mesure de charges dans les matériaux semi-conducteurs et les métaux avec une méthode elasto-électrique. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie,2015.
- [6] H. Mathieu, physique des semi-conducteurs et des composant électroniques, édition Dunod .Paris (2009).
- [9] H. Mathieu, « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », 6 Ed. DUNOD (2009)
- [10] : Thomas Martinez, « revêtement photocatalytique pour matériaux de construction », thèse de doctorat de L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, le 03/02/2012, page 13.28.29
- [11] :La photocatalyse: dépollution de l'eauou de l'air et matériaux techniques–ingenieur.fr

[12] : Hoigné J., Hrubec J (Ed.), The Handbook of Environmental Chemistry (5) Part C, Part II, Berlin: Springer, 1998

[13] : Mouna Khiari, « Nanocomposites en couches minces à base de ZnO chargé en nanoparticules d'argent : Application à la photocatalyse », thèse de doctorat de L'UNIVERSITÉ DE REIMS, le 31/03/2022, page 22.23

[14]: Albornoz, L.L., da Silva, S.W., Bortolozzi, J.P., Banús, E.D., Brussino, P., Ulla, M.A., Bernardes, A.M., Degradation and mineralization of erythromycin by heterogeneous photocatalysis using SnO₂-doped TiO₂ structured catalysts: activity and stability, Chemosphere

[15] L. Li, X. Zhang, W. Zhang, L. Wang, X. Chen, Y. Gao, Microwave-assisted synthesis of nanocomposite Ag/ZnO-TiO₂ and photocatalytic degradation Rhodamine B with different modes, Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp. 457 (2014) 134–141.

[16] M.R.D. Khaki, M.S. Shafeeyan, A.A.A. Raman, W.M.A.W. Daud, Evaluating the efficiency of nano-sized Cu doped TiO₂/ZnO photocatalyst under visible light irradiation, J. Mol. Liq. (2017).

[17] M.Y. Xie, K.Y. Su, X.Y. Peng, R.J. Wu, M. Chavali, W.C. Chang, Hydrogen production by photocatalytic water-splitting on Pt-doped TiO₂-ZnO under visible light, J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 70 (2017) 161–167.

[18] P. Nuengmatcha, S. Chanthai, R. Mahachai, W.C. Oh, Visible light-driven photocatalytic degradation of rhodamine B and industrial dyes (texbrite BAC-L and texbrite NFW-L) by ZnO-graphene-TiO₂ composite, J. Environ. Chem. Eng. 4 (2016) 2170–2177.

[19] P. Dou, F. Tan, W. Wang, A. Sarreshteh, X. Qiao, X. Qiu, J. Chen, One-step microwave-assisted synthesis of Ag/ZnO/graphene nanocomposites with enhanced photocatalytic activity, *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 302 (2015) 17–22.

[20] B. Su, Y. Dong, Z. Jin, Q. Wang, Z. Lei, Enhanced photocatalytic performance of ZnO/rGO composite materials prepared via an improved two-steps method, *Ceram. Int.* 42 (2016) 7632–7638.

CHAPITRE II

Matériels

Et

Méthodes

II.1. Méthyle orange

II.1.1. Définition

C'est un colorant anionique de formule brute: $C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$ utilisé en chimie Comme indicateur coloré pour marquer la présence d'un milieu acide ou d'un milieu basique.

Sa masse molaire est de : 327.34 g/mol.

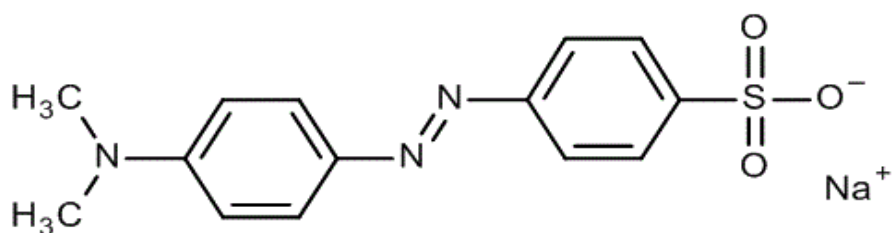


Figure II.1 : Structure chimique du méthyle orange (MO)

II.2. Préparation des photocatalyseurs

II.2.1. Les techniques sol-gel

Les techniques sol-gel permettent de produire des nanomatériaux à partir de solutions d'oxydes ou de solutions colloïdales. Elles sont basées sur des réactions de polymérisation inorganiques.

L'intérêt du procédé sol-gel réside dans la possibilité de contrôler l'homogénéité et la nanostructure au cours des premières étapes de fabrication.

Cette technique permet la production de pièces massives mais aussi de dépôts superficiels sur des plaques ou des fibres. Elle est également utilisée pour la production de composites fibreux.

Les matériaux issus du procédé sol-gel couvrent presque tous les domaines des matériaux fonctionnels : optique, magnétique, électronique, super conducteur à haute température, catalyseur, énergie, capteurs, etc.

Avantage:

Cette technique permet de contrôler efficacement la taille des particules et l'homogénéité de la distribution des particules. Ce procédé est réalisé à des températures plus basses que pour les autres procédés.

Inconvénient :

- coût élevé des matériaux de base
- faible rendement et produits de faible densité
- résidus de carbone et autres composés, certains composés organiques étant dangereux pour la santé.

II.2.2. Protocole pour préparer $Zn_{1-x}Ca_xO$

Nous avons préparé une poudre de particules de $Zn_{1-x}Ca_xO$ par la méthode du sol gel, deux béchers en verre différents, dans l'un nous avons mis les nitrates de zinc et nitrates de calcium dissous dans 10 ml d'eau distillée, et dans l'autre nous avons mis de l'acide citrique également dissous Dans un volume de 10 ml d'eau distillée, la première coupelle (nitrate de

zinc + nitrate de calcium) est placée sous agitation magnétique pour assurer l'homogénéité de la solution.

Après la dissolution complète des matières premières, les deux solutions sont mélangées en ajoutant goutte à goutte une solution (acide citrique + eau distillée) à la solution (nitrate de zinc + nitrate de calcium). La solution est maintenue à une température confinée entre (70–80) jusqu'à l'évaporation totale des gaz, Au bout de six heures, on obtient un gel transparent et homogène, puis on monte la température à 300 degrés Celsius pour se débarrasser de toutes les fonctions organiques pouvant être présentes dans le gel, le matériau que l'on obtient est broyé dans un mortier puis cuit pendant quatre heures à 500°C, pour obtenir à la fin le $Zn_{1-x}Ca_xO$.

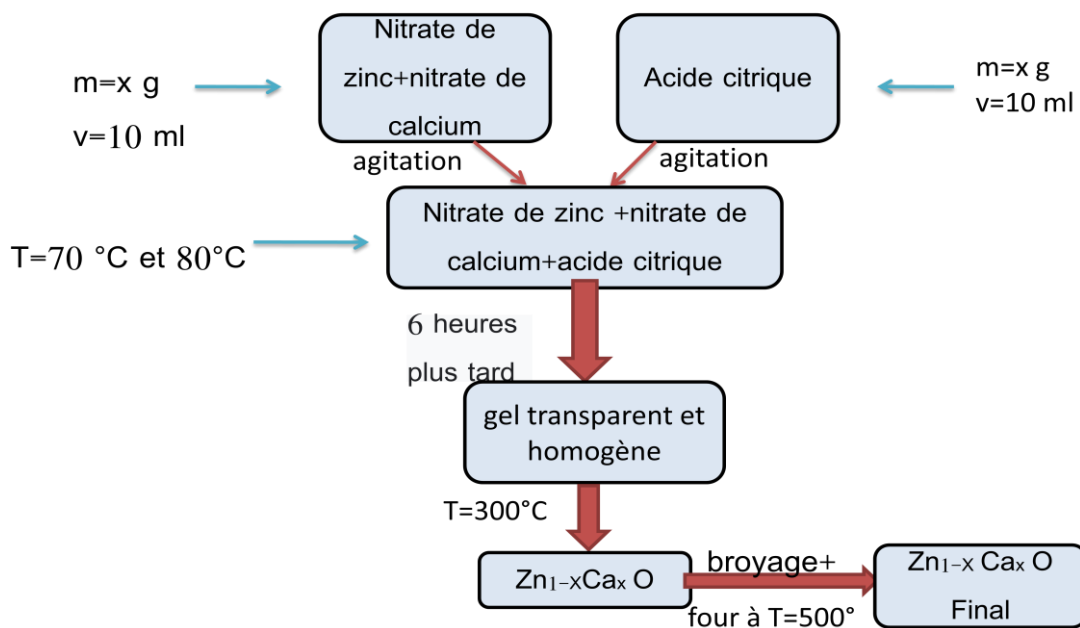


Figure II.2 : schéma de préparation de $Zn_{1-x}Ca_xO$ par méthode sol-gel



Figure II.3 : Préparation des catalyseurs par méthode de sol gel



Figure II.4: le matériau broyé

Nous avons suivi Les mêmes étapes de préparation pour tous les photocatalyseurs, nous avons changé les quantités initiales de produits chimiques utilisés.

II.3. Caractérisation

II.3.1. band gap

La détermination du gap optique (E_g) du catalyseur synthétisé a été effectuée par les mesures de l'absorption en fonction de la longueur d'onde λ (nm) diffuse à l'aide d'un spectrophotomètre (Specord 200 Plus) qui fonctionne dans la gamme (200–1100nm). Le tracé de la courbe $(\alpha h\nu)^n$ en fonction de l'énergie du photon incident ($h\nu$) permet de déduire la valeur du gap optique du catalyseur en extrapolant la partie linéaire de $(\alpha h\nu)^n$ à l'axe des abscisses selon la relation de Tauc :

$$(\alpha h\nu)^n = \text{cte} * (h\nu - E_g)$$

Avec:

$n = 0,5$: transition directe, $n = 2$: transition indirecte,

$h\nu$: énergie du photon incident = $1240/\lambda$,

α : coefficient d'absorption.

II.3.2. Spectrophotomètre UV-visible

II.3.2.1. Définition

La spectrophotométrie est une méthode analytique quantitative qui consiste à mesurer l'absorbance ou la densité optique d'une substance chimique donnée, généralement en

solution. Plus l'échantillon est concentré plus il absorbe la lumière dans les limites de proportionnalité énoncées par la loi de Beer-Lambert. C'est une technique mettant en jeu les photons dont les longueurs d'onde sont dans le domaine de l'ultraviolet (200nm-400nm), du visible (400nm – 800 nm). La densité optique des échantillons est déterminée par un spectrophotomètre préalablement étalonné sur la longueur d'onde d'absorption de la substance à étudier.

L'intérêt de la spectrophotométrie en chimie est de caractériser une espèce chimique, de déterminer la concentration d'une espèce en solution ou de suivre la cinétique d'apparition ou dégradation d'une espèce quelconque [1].



Figure II.5: Photo numérique du spectrophotomètre UV-visible utilisé.

II.3.2.2. Le principe

La spectrophotométrie repose sur l'interaction du rayonnement électromagnétique et de la matière dans le domaine s'étendant du proche UV au très proche IR soit entre 180 et 1100nm. Cette partie du spectre est relativement pauvre en informations

sur la structure des composés moléculaires. En revanche, l'absorbance des composés dans le proche UV et le visible est exploitée en analyse quantitative par application de la loi de Beer Lambert [1].

II.3.2.3. Courbe d'étalonnage du MO

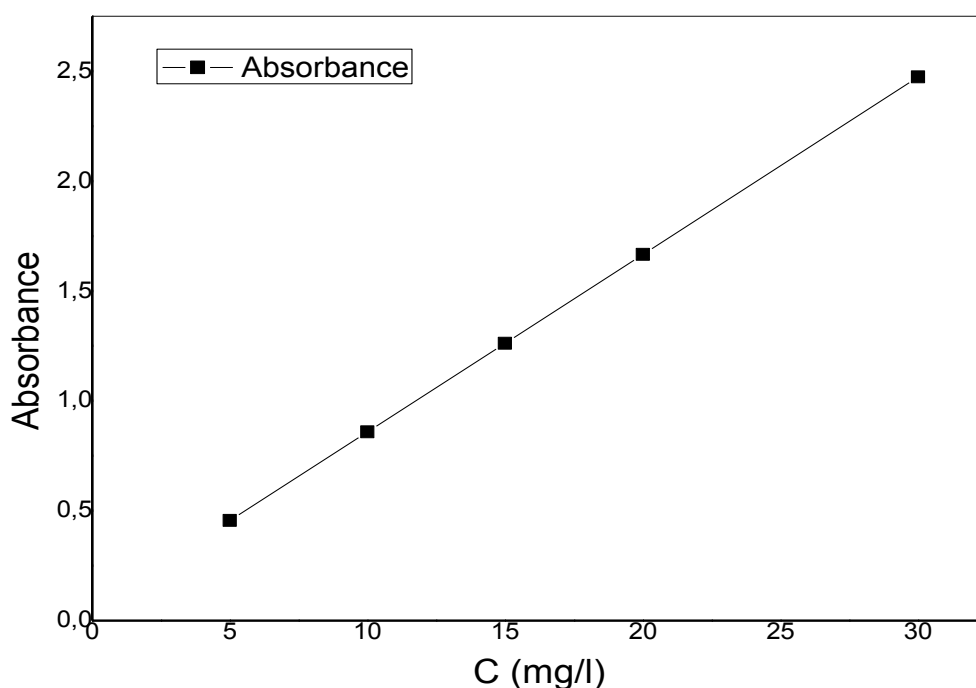


Figure II.6: Courbe d'étalonnage du MO ($\lambda=465$)

II.4. Montage expérimental pour les tests photocatalytiques

L'ensemble des catalyseurs préparés (ZnO , $\text{Zn}_{0.9}\text{Ca}_{0.1}\text{O}$, $\text{Zn}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{O}$, $\text{Zn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{O}$) ont été testés en utilisant le même dispositif expérimental et dans les mêmes conditions d'analyse sous illuminations solaire.

Le méthyle orange (**MO**) a été choisi comme modèle de contamination pour étudier l'efficacité photocatalytique sous irradiation solaire.

Les tests photocatalytiques sont réalisés sur trois solutions de concentrations différentes : 10 mg/L, 20 mg/L, 30 mg/L avec quartes catalyseurs différents.

Dans un bécher, on met 500 ml de solution de MO et 0,5g de photocatalyseur, le mélange réactionnel est maintenu sous agitation magnétique à l'abri de la lumière dans le laboratoire pendant 30 minutes, puis exposé au soleil pendant deux heures sous agitation, pendant ce temps des prélèvements d'aliquotes de 8ml ont été réalisé à intervalles réguliers dans des tubes (12 tubes), et les tubes ont été passé dans une centrifugeuse afin de séparer le photocatalyseur et la solution pour les faire passer ensuite dans un spectrophotomètre UV-visible pour mesurer la concentration de la solution.



Figure II. 7: les testes photocatalytique de MO

Références de chapitre II

[1] étude de l'élimination des polluants organiques dans les effluents industriels par les procédés photocatalytiques en présence de (UV-ZnO), master, 2016

CHAPITRE III

Résultats

Et

Discussions

III. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats obtenus en ce qui concerne l'étude de la photocatalyse sur les quatre photocatalyseurs préparés, ainsi que l'analyse et l'interprétation de ces résultats.

III.1. Détermination de l'énergie de la bande interdite (E_g)

Afin de déterminer l'énergie de la bande interdite de nos matériaux, la courbe $(\alpha h\nu)^2$ en fonction de $(h\nu)$ a été tracé, et la partie linéaire de la courbe est extrapolée jusqu'à $(\alpha h\nu)^2 = 0$

[1], les valeurs obtenus sont représentés dans le **Tableau III.1**

Tableau III.1: l'énergie gap (eV)

Matériaux	ZnO	Zn _{0.7} Ca _{0.3} O	Zn _{0.5} Ca _{0.5} O	Zn _{0.9} Ca _{0.1} O
E_g (eV)	2.72	2.78	2.87	3.00

D'après la **Figure III.1**, l'énergie des bandes interdites des quatre photocatalyseurs ZnO, Zn_{0.7}Ca_{0.3}O, Zn_{0.5}Ca_{0.5}O, Zn_{0.9}Ca_{0.1}O sont respectivement 2.72 eV, 2.78 eV, 2.87 eV et 3.00 eV. Cette légère différence entre les quatre valeurs peut être du à la structure granulaire, la nature et la concentration du précurseur, des défauts structuraux et de la structure cristallines des matériaux [2].

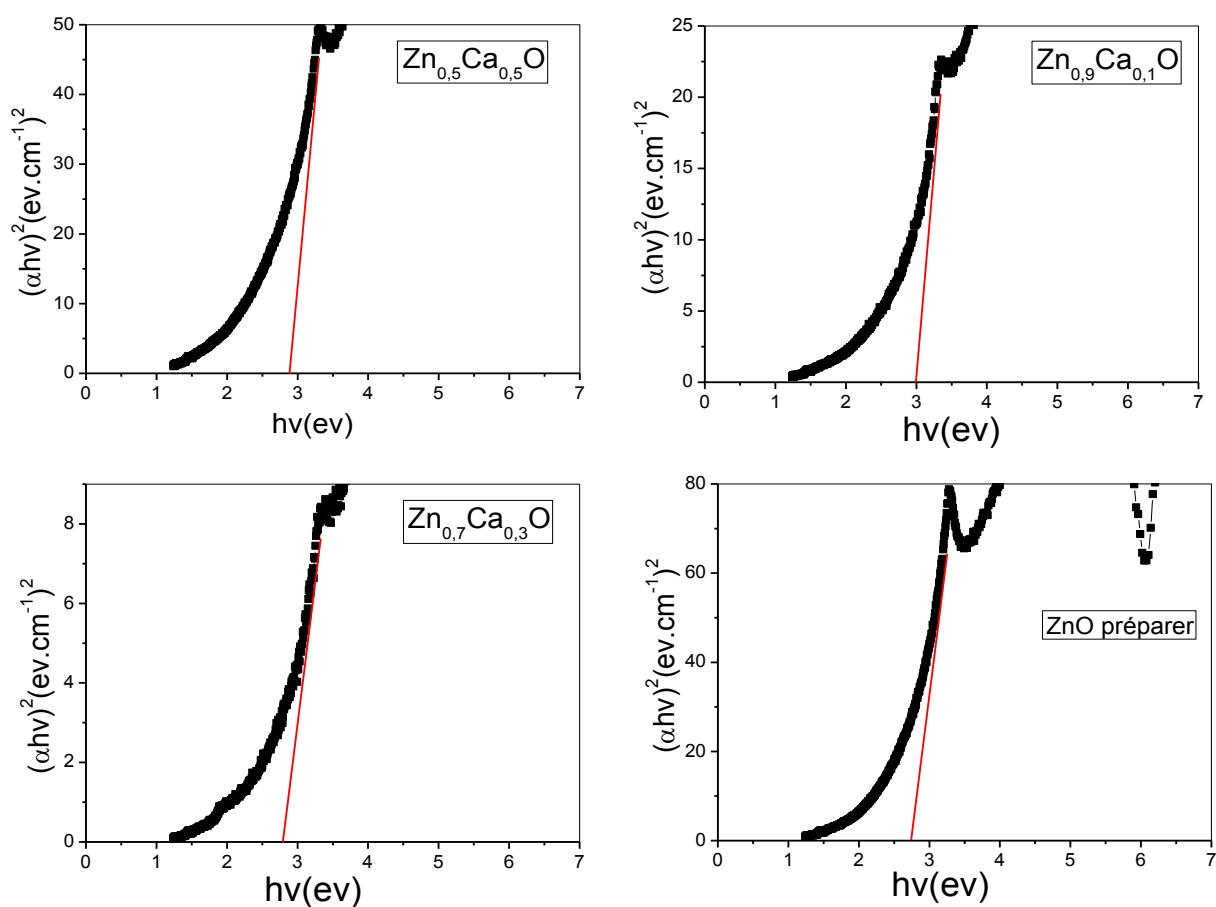


Figure III.1: Variation de $(\alpha.h\nu)^2$ avec l'énergie photonique ($h\nu$) pour Les catalyseurs

III.2. Effet de la concentration initiale des colorants et le temps de contact

L'effet de la concentration initiale de MO a été étudié pour des concentrations de 10 ; 20; 30 mg/L avec un pH constant ($\text{pH} \approx 7$). les graphes sont représenté sur **Figure III.2**

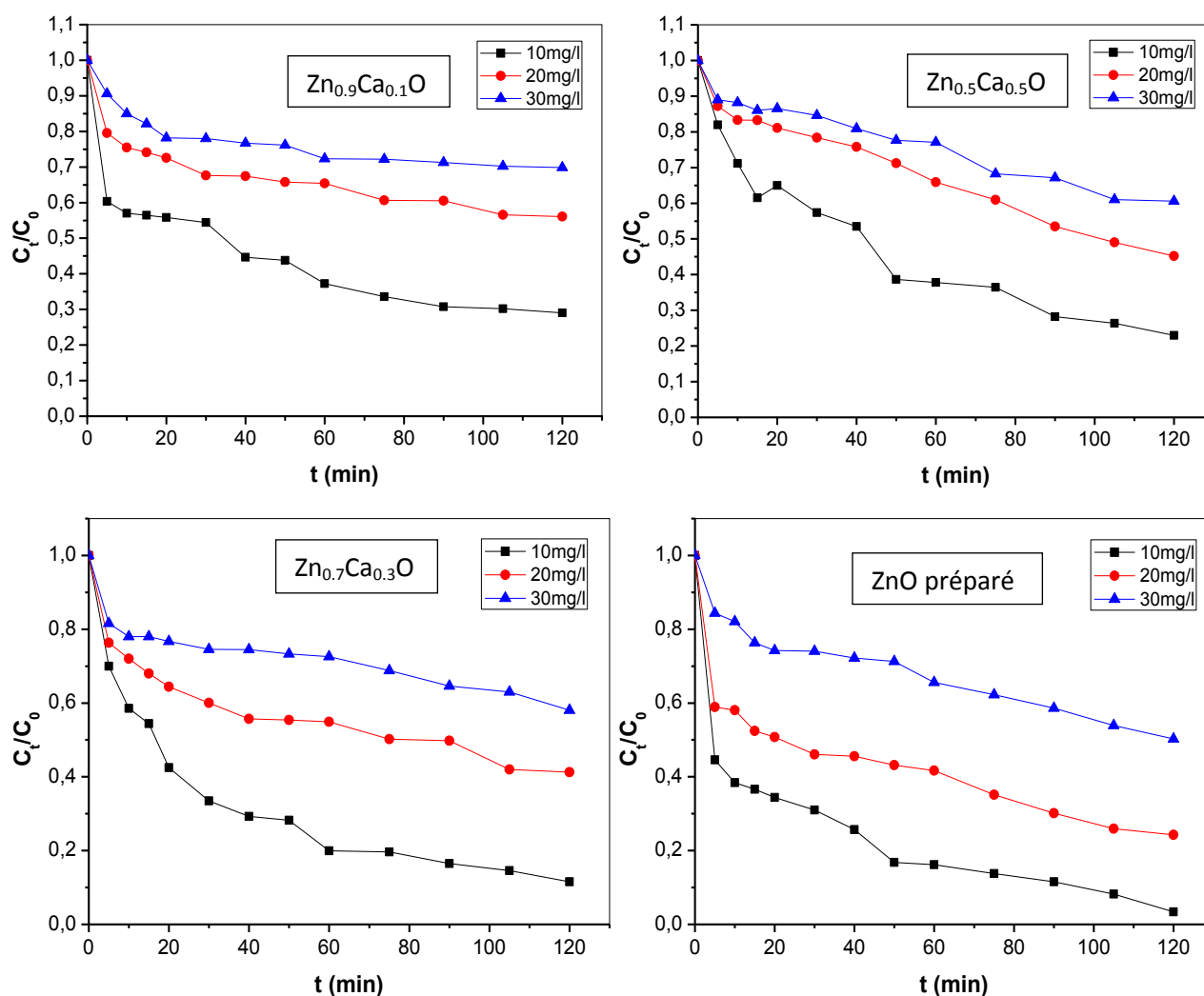


Figure III.2 : Effet du temps de contact et la concentration initial du MO sur

Les catalyseurs

Le meilleur taux d'élimination pour la plus petite concentration initiale (10 mg/L) a été enregistré à 95 % et 90 % pour le ZnO et le Zn_{0.7}Ca_{0.3}O respectivement après 120 min.

Quant au taux d'enlèvement pour Zn_{0.5}Ca_{0.5}O et Zn_{0.9}Ca_{0.1}O légèrement inférieur par rapport aux deux précédents, on note un taux de 70% pour le Zn_{0.9}Ca_{0.1}O et 80% pour le Zn_{0.5}Ca_{0.5}O.

Le taux de dégradation de MO a diminué lorsque la concentration initiale a augmenté, et cela peut s'expliquer par ce qui a été trouvé dans la littérature:

- ✓ La concentration élevée peut causer un encombrement stérique et par la suite empêcher la pénétration de lumière à l'intérieur de la solution.
- ✓ les sites actifs peuvent être recouverts de colorants à forte concentration de colorant et cela conduit à une génération diminuée des radicaux OH à la surface du catalyseur [3-4].
- ✓ Comme on peut l'expliquer encore par le fait qu'une quantité importante de lumière solaire peut être absorbée par les molécules de colorant plutôt que par le catalyseur [5].

III.3.Effet de pH

Pour des solutions avec une concentration initiale de 20 mg/L, l'effet du pH sur le taux d'élimination de MO a été étudié pour des valeurs de pH : 3, 6, 9 pour ZnO et $Zn_{0.7}Ca_{0.3}O$. D'après le graph la disparition de MO est meilleure à pH = 6.

Le pH de la solution affecte principalement le processus de photocatalyse et l'interprétation de leur effet sur l'efficacité du processus de photocatalyse du colorant est une tâche très difficile car elle implique de nombreux autres paramètres, tels que la charge de surface du photocatalyseur et la charge du colorant [6].

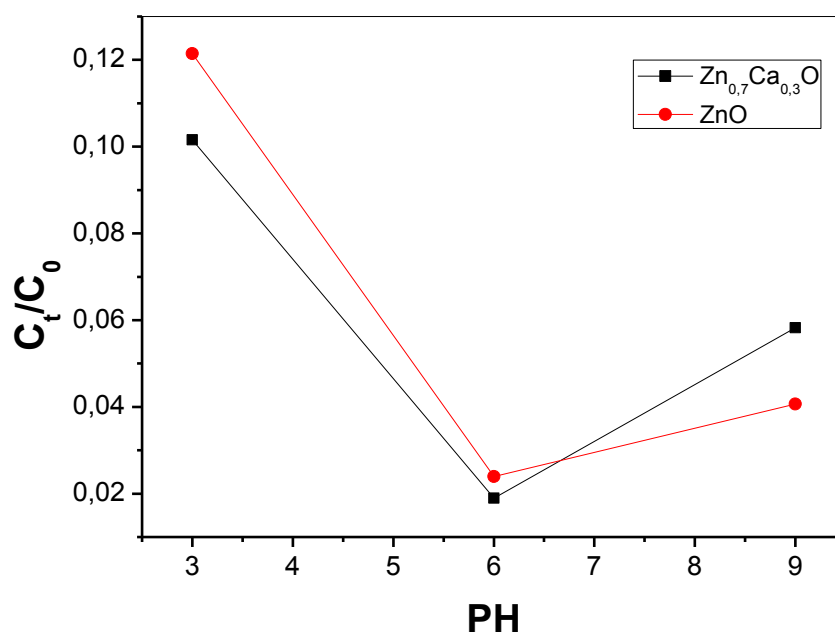


Figure III.3: Effet du pH sur le taux d'élimination du MO

III.4. Effet de photocatalyseur

Les graphes de l'effet du photocatalyseur sont représentés dans la *Figure III.4*

MO a présenté des taux de photodégradation différents pour les quatre photocatalyseurs

ZnO, Zn_{0,9}Ca_{0,1}O, Zn_{0,7}Ca_{0,3}O, Zn_{0,5}Ca_{0,5}O, ce qui peut être dû à

- ✓ Leur structure qui joue un rôle important dans l'activité de dégradation des photocatalyseurs envers ces colorants.
- ✓ La nature de leurs surfaces spécifiques des photocatalyseurs en fournissant une qualité et une quantité suffisantes de site actif [7],
- ✓ Et de leurs énergies gaps.

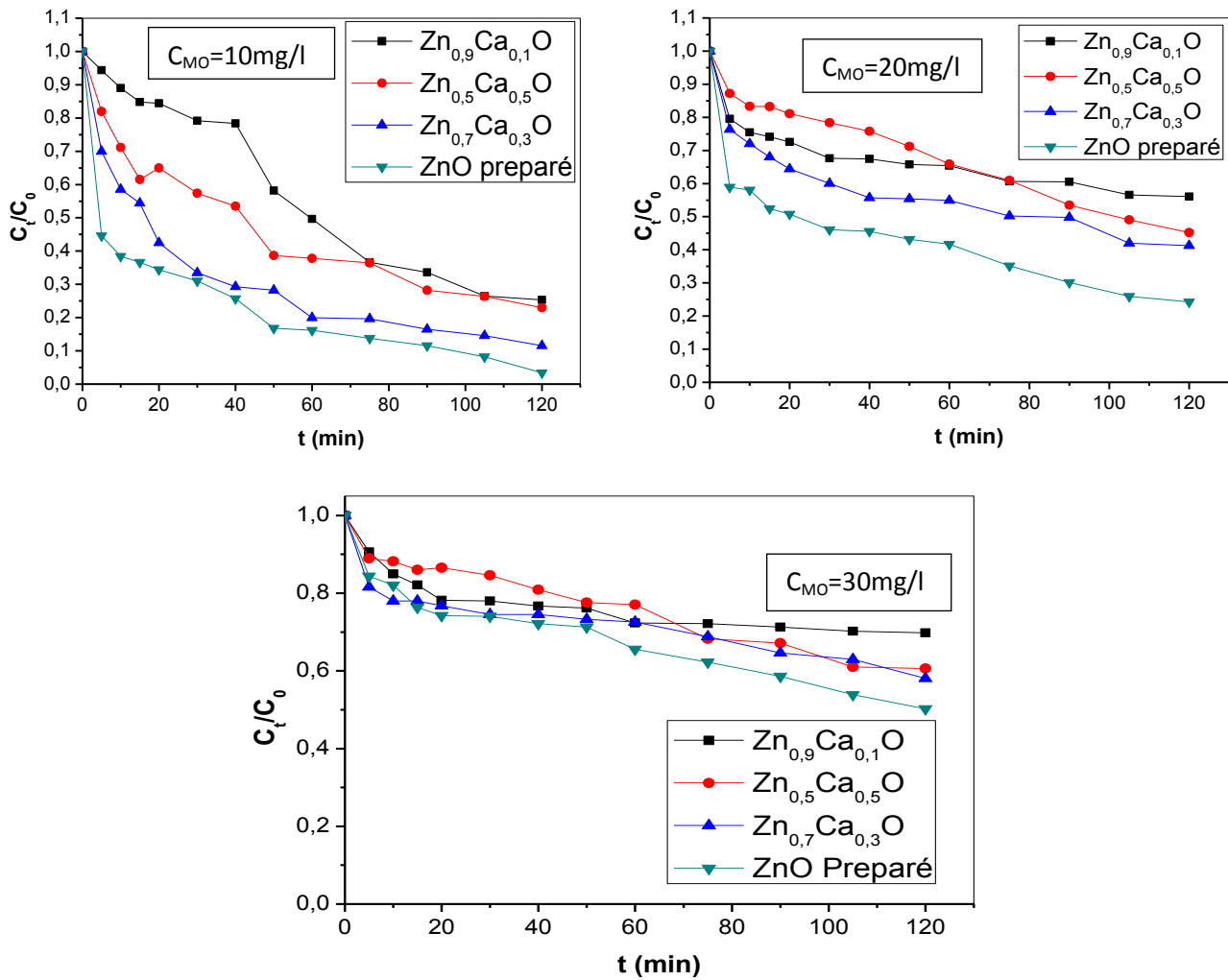


Figure III.4: Effet des catalyseurs sur le taux d'élimination du MO

III.5. Modélisation de la cinétique de la photocatalyse

Afin de mieux comprendre le mécanisme d'interaction, les modèles du pseudo-premier ordre et du pseudo-second ordre ont été appliqués sur les résultats expérimentaux pour simuler la cinétique d'élimination de MO sur (ZnO , $\text{Zn}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{O}$, $\text{Zn}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{O}$, $\text{Zn}_{0.9}\text{Ca}_{0.1}\text{O}$).

III.5.1. Modèle du pseudo premier ordre

En appliquant l'équation de pseudo-premier ordre [8] pour décrire la réaction, le tracé de $\ln(C_t/C_0)$ en fonction du temps t , donne une droite de pente k_1 , l'équations différentielle est :

- Premier-ordre : $(dc/dt) = -k_1c \rightarrow \ln(C_t/C_0) = -k_1t$

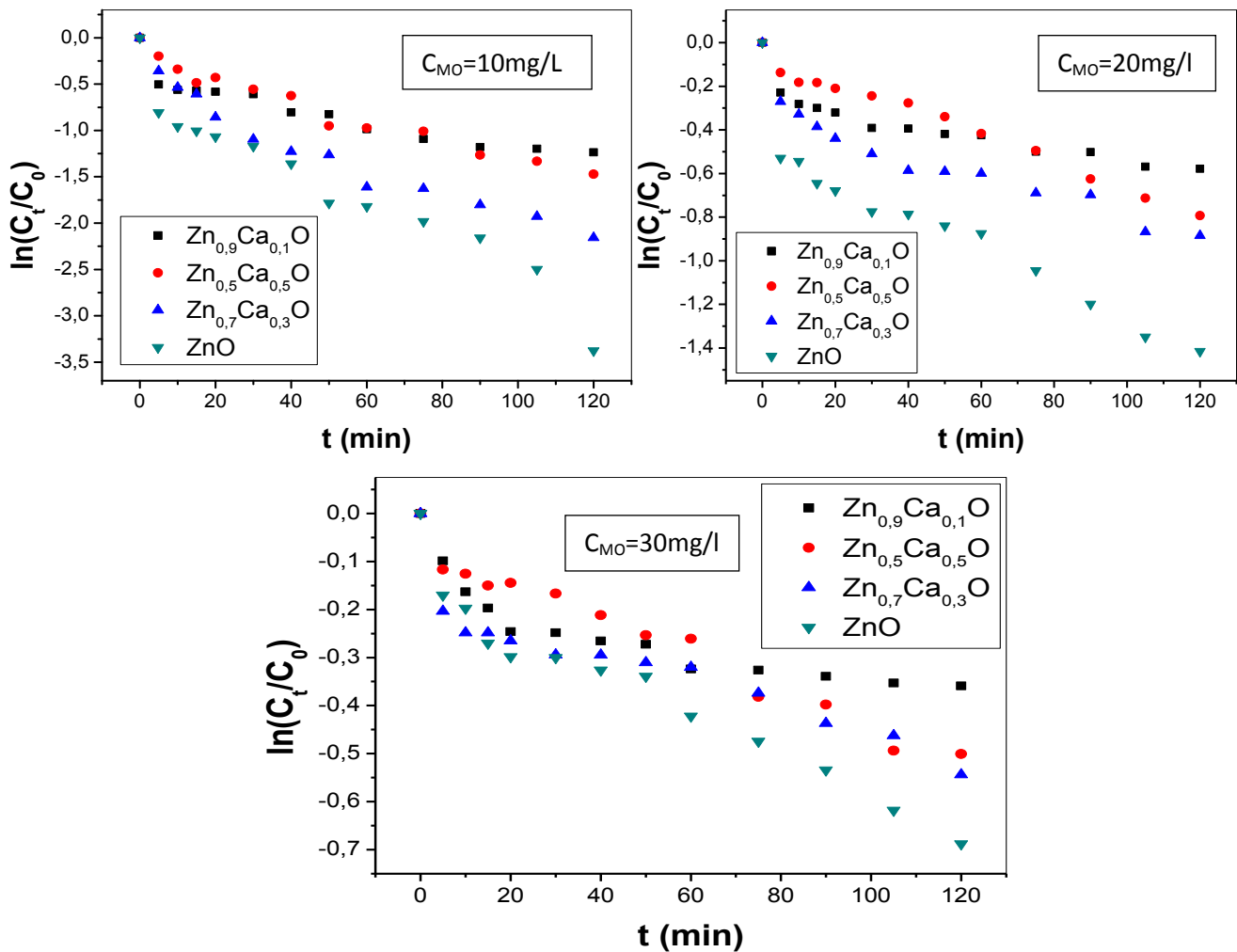


Figure III.5: Représentation linéaire du modèle cinétique Pseudo premier ordre

III.5.2. Modèle du pseudo second ordre

En appliquant l'équation du pseudo seconde ordre [9], le tracé de t/C_t en fonction du temps t (min) donnera une droite de pente $1/C_t$ et d'ordonnée à l'origine $1/k_2c_t^2$, l'équation différentielle est :

•Second-ordre : $(dc/dt) = -k_2c^2 \rightarrow 1/C_t = 1/C_0 + k_2t$

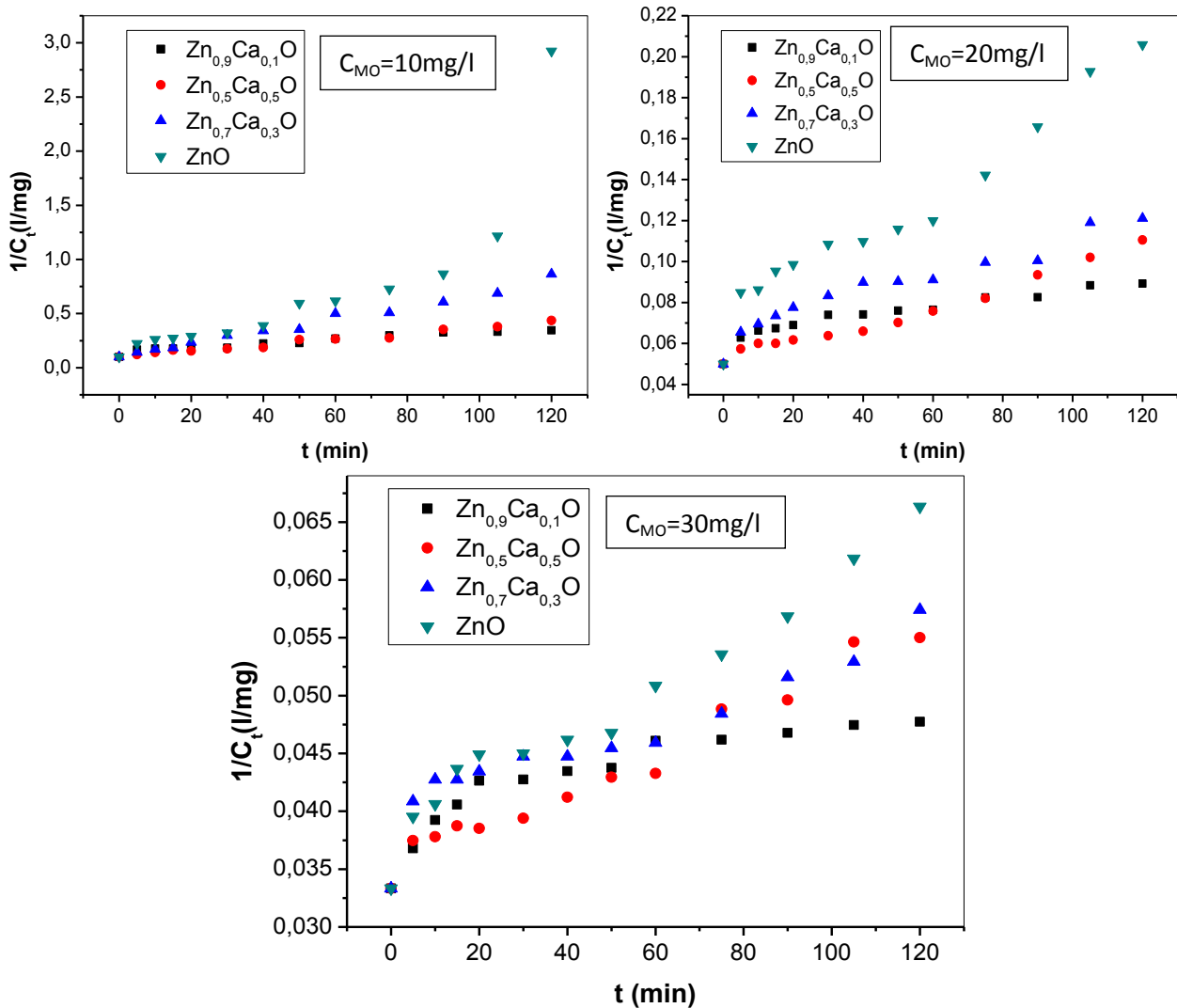


Figure III.6: Représentation linéaire du modèle cinétique pseudo second ordre

En comparant les coefficients de régression (R^2) obtenus à partir de la **Figure.III.6**, on peut voir que le R^2 obtenu par le modèle de second ordre était meilleur par rapport au modèle de premier ordre voir le **Tableau III.2**. Les résultats ont indiqué que la cinétique de désintégration du MO suivait un puits cinétique de second ordre.

Tableau III.2: Paramètres cinétiques de photocatalyse du MO sur les
Catalyseurs

Catalyseur	Modèle	Pseudo premier ordre		Pseudo seconde ordre	
	C_0 (mg/l)	K_1 (min^{-1})	R^2	K_2 ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	R^2
ZnO	10	-0,02087	0,91642	0,01567	0,67556
	20	-0,00574	0,84826	0,00109	0,94568
	30	-0,0046	0,9242	$2,27713 \cdot 10^{-4}$	0,95267
Zn _{0.7} Ca _{0.3} O	10	-0,01595	0,91713	0,00584	0,98197
	20	-0,00598	0,97907	$4,94806 \cdot 10^{-4}$	0,92211
	30	-0,0030	0,81393	$1,41568 \cdot 10^{-4}$	0,86548
Zn _{0.5} Ca _{0.5} O	10	-0,01131	0,95015	0,00265	0,97786
	20	-0,00352	0,77326	$4,60805 \cdot 10^{-4}$	0,96941
	30	-0,0038	0,9611	$1,69689 \cdot 10^{-4}$	0,96542
Zn _{0.9} Ca _{0.1} O	10	-0,00831	0,84176	0,00187	0,9418
	20	-0,00892	0,86541	$2,54426 \cdot 10^{-4}$	0,8506
	30	-0,0023	0,71841	$9,73184 \cdot 10^{-5}$	0,76403

References de Chapitre III

[1] R. Hatefi, H. Younesi, A. Mashinchian–Moradi et al., A facile decoration of anatase Fe₃O₄/TiO₂nanocomposite with graphene quantum dots: Synthesis, characterization, and photocatalytic activity, *Advanced Powder Technology*,2021

[2] Anca–Ionela Istrate ● Florin Nastase ● Iuliana Mihalache ● Florin Comanescu ● Raluca Gavrilă ● Oana Tutunaru ● Cosmin Romanitan ● Vasilica Tucureanu ● Monica Nedelcu ● Raluca Müller; Synthesis and characterization of Ca doped ZnO thin films by sol–gel method; *Journal of Sol–Gel Science and Technology*; 2019

[3] N. Guettaï, A.H. Amar ; Photocatalytic oxidation of methyl orange in presence of titaniumDioxide in aqueous suspension. Part I: Parametric study. *Desalination* 185(2005), 427–437.

[4] L.Mammeri ; Dégradation photocatalytique du 1–NAPHTOL en présence d’oxyde de fer naturel chromophore et de TiO₂ en solution aqueuse ; Thèse de doctorat ; Université Frère Mentouri; 2016

[5] N. Sobana, B. Krishnakumar, M. Swaminathan; Synergism and effect of operational Parameters on solar photocatalytic degradation of an azo dye (Direct Yellow 4) using activated carbon–loaded zinc oxide; *Materials Science in Semiconductor Processing* 16 (2013), 1046–1051

[6] N. Hadj Salah ; Etude de la dégradation photocatalytique de polluants organiques en présence de dioxyde de titane, en suspension aqueuse et en lit fixe ; Thèse de doctorat, Université deGrenoble, 2012

[7] C.C.Mao; H.S.Weng ; Promoting effect of adding carbon black to TiO₂ for aqueous photocatalytic degradation of methyl orange; Chemical engineering journal 155(2009)744–749

[8] nguyen chi hieu and al, enhanced remobal, seoaration and purification technology journal, volume 232, 2020, pp 1–14.

[9] S.Basha; C.Barr; D.Keane; K.Nolan; On the adsorption/photodegradation of amoxicillin in aqueous solutions by an integrated photocatalytic adsorbent (IPCA): experimental studies and kinetics analysis Photochemical and Photobiological Sciences 10(6):1014–22

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail de ce mémoire s'inscrit dans le cadre général de la dépollution de l'eau et en particulier la photocatalyse en phase liquide. Les résultats obtenus ont révélé que :

- ✓ Les photocatalyseurs préparés dans ce travail ont révélé une très bonne efficacité pour la dégradation du MO. Ce qui indique que la méthode sol-gel est une méthode très efficace dans la préparation des semi-conducteurs.

- ✓ Les meilleurs taux d'élimination ont été enregistrés pour le ZnO et le $\text{Zn}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{O}$; pour la plus petite concentration initiale ; qui ont été de 95% et 90% respectivement au bout de 120 min à pH neutre.

- ✓ La dégradation du colorant a été meilleure à pH neutre et acide contrairement au pH alcalin qui a été défavorable.

Les résultats ont montré aussi que l'augmentation de la concentration initiale de colorant diminue le taux de dégradation pour tous les photocatalyseurs et les réactions de dégradation suivent une cinétique de pseudo deuxième ordre.

Résumé

Les colorants synthétiques sont considérés comme une source majeure de pollution environnementale et représentent un facteur très dangereux pour la santé publique.

Plusieurs façons de se débarrasser des différents polluants organiques présents dans l'eau, parmi ces méthodes on retrouve le procédé de photocatalyse.

Le but de notre travail est d'étudier l'élimination du méthyle orange dans l'eau par le processus de photocatalyse à l'aide de photocatalyseurs que nous préparons par la méthode sol-gal.

Le meilleur taux d'élimination pour la plus petite concentration initiale (10 mg/L) a été enregistré à 95 % et 90 % pour ZnO et $Zn_{0.7}Ca_{0.3}O$ respectivement après 120 min à pH=7.

Cela montre que les photocatalyseurs préparés dans ce travail ont une très bonne efficacité dans la dégradation du MO.

Mots clés : photocatalyseurs, nanocomposite, méthyle orange, polluants organiques

Abstract

Synthetic dyes are considered a major source of environmental pollution and represent a very dangerous factor for public health.

Several ways to get rid of the various organic pollutants present in the water, among these methods we find the photocatalysis process.

The aim of our work is to study the elimination of methyl orange in water by the process of photocatalysis using photocatalysts that we prepare by the sol-gal method.

The best elimination rate for the smallest initial concentration (10 mg/L) was recorded at 95% and 90% for ZnO and $Zn_{0.7}Ca_{0.3}O$ respectively after 120 min at pH=7.

This shows that the photocatalysts prepared in this work have a very good efficiency in MO degradation.

Keywords : photocatalyseurs, nanocomposite, methyl orange, organic pollutants

ملخص

تعتبر الأصباغ الاصطناعية مصدرًا رئيسيًا لتلوث البيئة وتمثل عاملاً بالغ الخطورة على الصحة العامة .
عدة طرق للتخلص من الملوثات العضوية المختلفة الموجودة في الماء ، ومن بين هذه الطرق نجد عملية التحفيز الضوئي
الهدف من عملنا هو دراسة التخلص من برتقال الميثيل في الماء من خلال عملية التحفيز الضوئي باستخدام المحفزات
الضوئية التي نعدّها بطريقة سول جل .
على التوالي ZnO و $Zn_{0.7}Ca_{0.3}O$ تم تسجيل أفضل معدل إزالة لأصغر تركيز أولي (10 ملجم / لتر) عند 95% و 90% لـ
بعد 120 دقيقة عند الرقم الهيدروجيني يساوي 7 .
يوضح هذا أن المحفزات الضوئية التي تم تحضيرها في هذا العمل لها كفاءة جيدة جدًا في تدهور برتقال الميثيل .
الكلمات المفتاحية: المحفزات الضوئية ، المركبات النانوية ، برتقال الميثيل ، الملوثات العضوية