

الجمهورية الجزائرية
الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث
العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Saida - Dr Moulay Tahar

جامعة سعيدة – د. مولاي الطاهر

Faculté des Sciences et Technologie

كلية العلوم والتكنولوجيا

Département de Science de la matière

قسم علوم المادة

MEMOIRE

Elaboré en vue de l'obtention du diplôme de master en Chimie

Spécialité : Chimie Inorganique

Intitulé :

Etude de la dégradation d'un colorant organique par des procédés d'oxydation avancée

Présenté par :

M^{elle} CHENIKHAR Messaouda Douaa
M^{elle} Hadji Marwa

Soutenu le 18-06-2026 devant le jury composé de :

Mr BENALI Omar.	Université de Saïda - Dr MOULAY Tahar	Président
Mr MEDJAHED Baghdad	Université de Saïda - Dr MOULAY Tahar	Encadrant
M ^{me} OULDKADA Zahra	Université de Saïda - Dr MOULAY Tahar	Examinatrice

Année universitaire 2025/2026

Dédicaces

Je dédie ce projet

*À ma chère mère , À mon chère père , Qui n'ont jamais cessé , de formuler
des prières à mon égard , de me soutenir et de m' épauler pour que je
puisse atteindre mes objectifs .*

*À mes frères Karim et Islam , pour ses soutiens moral et leurs conseils
précieux tout au long de mes études .*

*À mes sœurs Amal Nassira, Fadhlila et Khadidja, pour leurs affections,
leurs soutiens indéfectible et leurs conseils avisés. Vous êtes ma force et
ma source d'inspiration*

À ma chère binôme Marwa ,pour sa entente et sa sympathie

*À mes amies Fadia , Zineb et Nurhan, pour leurs encouragements et les
moments de joie partagés ont été une source de motivation et ont enrichi
ma vie de manière inestimable*

.

Douaa

Dédicaces

A mes chers parents : *A la source de ma force, le refuge de mon cœur et le souffle de mes réussites. Votre amour inconditionnel, vos sacrifices silencieux et vos prières constantes ont été la lumière qui a guidé chacun de mes pas. Merci d'avoir cru en moi, même lorsque je doutais sur moi-même.*

À ma grand-mère bien-aimée : *Toi qui es la douceur de mon enfance, la sagesse de mes pas et la lumière de mes jours. Merci pour ton amour inconditionnel, tes prières silencieuses et ta présence réconfortante. Tu es mon trésor le plus précieux.*

A ma sœur Sabrina : *Le compagnon de toujours, le pilier de mon cœur et le soutien indéfectibles dans chaque étape de ma vie, merci pour votre amour vos encouragement et votre présence qui m'a apporté beaucoup de courage et de sérénité.*

A mes frères Zino et Mohamed *Merci pour votre support*

A toute la famille HADJI et SAIDI : *Chacun avec son nom je vous dédié ce travail avec tout mon amour, je suis tellement fière de vous comme je suis fière de porter votre nom.*

A ma chère binôme Douaa : *A ma complice et amie précieuse, Travailler a tes cotes a rendu ce parcours bien plus agréable et motivant je suis vraiment chanceuse de t'avoir eue comme copine dans cette aventure*

A mes meilleures amie Zinie, Hadil, Alae, Nada, Meriem et Amira, *Merci pour votre présence précieuse, votre écoute, votre soutien sincère et les moments de réconfort que vous m'avez offerts*

Enfin à ma promo : *Je dédie ce mémoire à toute ma promotion, avec qui j'ai partagé ces années intenses d'apprentissage, de doutes, de réussites et de travail acharné. Que cette étape franchie soit le début d'un avenir prometteur pour chacun(e) d'entre nous.*

Marwa

Remerciements

Nous remercions d'abord le bon Dieu tout puissant qui nous a donné la santé, le courage, la force de résister et la volonté d'accomplir ce travail.

Un remerciement exceptionnel à notre encadrant monsieur

***Pr. Baghdad Medjahed**, pour son accompagnement, ses précieux conseils, ainsi que sa disponibilité tout au long de ce parcours.*

Nous adressons également nos sincères remerciements à monsieur

***Pr. Benali Omar** qui nous a fait l'honneur d'accepter de présider le jury de notre mémoire.*

*Nous remercions Madame **Dr. Ouldkada Zahra**, pour avoir accepté d'examiner ce travail et de faire partie du jury.*

*Nous remercions chaleureusement Madame **Soumia Boudali** ingénieur de laboratoire de chimie inorganique pour la réalisation de cette étude expérimentale.*

Nous remercions également tous les enseignants du département de sciences de la matière de l'université du « Dr Moulay Tahar » et plus particulièrement l'équipe de formation spécialité chimie inorganique

Nous remercions vont également à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Sommaire

Titre	Page
Introduction Générale	1
<i>PARTIE THEORIQUE : Synthèse bibliographique</i>	
<i>Chapitre I : La pollution par les colorants</i>	
I.1. Histoire d'utilisation des colorants	7
I.2. Définition des colorants	7
I.3. Classification des colorants	8
I.3.1 Les colorants naturels	9
I.3.2 .Les colorants synthétiques.	9
I.3.2.1 Classification chimique des colorants synthétiques	12
I.4 Application des colorants	13
I.5 L'impact des colorants sur les eaux	13
I .6 Impact des colorants sur l'environnement et la santé	13
I.6.1 Impacts environnementaux	14
I.6.2 Les impacts dangereux sur la santé	14
I.7. Définition de Rouge Congo	15
I .8. Structure de Rouge Congo	16
<i>Chapitre II: les procédés d'oxydation avancés</i>	
II.1. Définition	20
II. 2.Les différentes types des POA	20
II.3. Le radical hydroxyle ($\bullet\text{OH}$)	21
II.4. Les avantage d'utilisation des POA	21
II.5. La photolyse	22
II.6. Définition de l'adsorption	22
II.7. La photocatalyse hétérogène	22
II.8. Les principaux facteurs influençant la photocatalyse hétérogène	24
II.9. Applications de la photocatalyse	24
II.10 Les Oxydes	25
Références bibliographiques	27

PARTIE EXPERIMENTALE	
III.1.Matériels et produits utilisés	29
III.1.1.Produits chimiques utilisés	30
III.1.2.Matérielsutilisés	31
III.2.Colorimètre.	32
III.3.Préparation de la courbe d'étalonnage du Rouge Congo.	33
III.4.Etude expérimentale de la dégradation du Rouge Congo	33
III.4.1.Photolyse	34
III.4.2Adsorption	34
III.4.3.Photocatalyse	34
PARTIE RESULTATS ET DISCUSSION	
Introduction	38
I. Etablissement de la courbe d'étalonnage	38
II. Etude de la dégradation du colorant par le procédé photolyse	38
II.1 Etude de l'effet du temps d'irradiation	39
II.2 Etude de l'effet de la concentration initiale du colorant	39
III Etude de la dégradation du colorant par adsorption	40
IV Etude de la dégradation du colorant par photocatalyse	41
IV.1 Etude cinétique	41
IV.2 Etude de l'effet de la concentration initiale	42
IV.3 Etude de l'effet de la quantité du catalyseur, rapport m/V	44
IV.4 Effet de la température	45
IV.5 Effet de pH initial de la phase aqueuse	46
V. Etude comparative	48
Conclusion general	50

Liste des figures		
N°	Titre	Page
Figure 1	L'indigo.	09
Figure 2	Le kermès	09
Figure 3	Le covhenille	09
Figure 4	Le safran	09
Figure 5	Les racines de granace	09
Figure 6	Structure de colorant azoïque	10
Figure 7	Structure de colorant triphénylméthane	10
Figure 8	Structure de colorant anthraquinonique	11
Figure 9	Structure de colorant indigoïde	11
Figure 10	Structure colorant xanthène	11
Figure 11	Structure de colorant nitré et nitrosé	12
Figure 12	Structure phtalocyanine	12
Figure 13	Le Rouge Congo	15
Figure 14	Structure de Rouge Congo	15
Figure 15	Caractéristiques du radical $\bullet\text{OH}$	21
Figure 16	Schéma montrant le mécanisme de base de la photocatalyse hétérogène (exemple de ZnO)	23
Figure 17	Nombre de publications sur la photocatalyse hétérogène par Pays	25
Figure 18	L'acide Chlorhydrique utilisé.	29
Figure 19	L'hydroxyde de sodium (NaOH) utilisé	29
Figure 20	L'Oxyde de Zinc (ZnO) utilisé.	30
Figure 21	Un Colorimètre	32
Figure 22	Les concentrations des solutions étalons.	33
Figure 23	Le montage utilisé pour le traitement et la réalisation d'étude.	35
Figure 24	Courbe d'étalonnage	38
Figure 25	Evolution du rendement en fonction du temps	39
Figure 26	Evolution du rendement en fonction de la concentration initiale	40
Figure 27	Evolution du rendement en fonction du temps d'agitation des deux phases	41

Figure 28	Evolution du rendement en fonction du temps d'irradiation en présence du catalyseur ZnO	41
Figure 29	Evolution du rendement en fonction de la concentration initiale du colorant – photocatalyse	43
Figure 30	Evolution du rendement en fonction du rapport m/V (quantité du catalyseur)	44
Figure 31	Evolution du rendement en fonction de la température – Photocatalyse	46
Figure 32	Evolution du rendement en fonction du pH initial – Photocatalyse	47

Liste des tableaux		
N°	Titre	Page
Tableau 1	Principaux groupes chromophores et auxochromes, classés par Intensité.	8
Tableau 2	Exemples des applications de la photocatalyse dans le traitement de l'air et de l'eau.	25
Tableau 3	Classification des oxydes selon leur composition chimique	26
Tableau 4	Propriétés physico-chimiques de Rouge Congo.	30
Tableau 5	Matériels utilisés.	31
Tableau 6	Comparaison globale	49

Liste des abréviations

POA : procédé d'oxydation avancée.

A : Absorbance.

C_0 : est la concentration initiale du substrat (mol/L)

C_t : est la concentration du substrat à l'instant t (mol/L)

pH: Potentiel d'hydrogène.

UV-Vis : Ultraviolet- Visible.

λ : Longueur d'onde de la radiation (nm).

IUPAC : Union internationale de chimie pure et appliqué.

Résumé

Cette étude expérimentale a permis de comparer les performances de la photolyse, de l'adsorption sur ZnO et de la photocatalyse pour la dégradation du colorant Rouge Congo. Les résultats montrent que la photolyse présente une efficacité limitée, avec un rendement de 34,2 %, en raison de la faible dégradation du colorant sous irradiation seule. L'adsorption sur ZnO améliore l'élimination du polluant en atteignant un rendement de 53 %, mais elle ne conduit qu'à sa fixation sur la surface du matériau. La photocatalyse s'est révélée être le procédé le plus efficace, avec un rendement de 92 % et un temps d'équilibre de seulement 20 min. Cette supériorité est attribuée à la combinaison de l'adsorption du colorant et de sa dégradation par les espèces réactives générées à la surface du ZnO sous irradiation. Ces résultats démontrent le fort potentiel de la photocatalyse pour le traitement des effluents contenant des colorants organiques.

Mots clés; Procédé d'oxydation avancée; Colorant; Photocatalyse; Photolyse; Adsorption

Abstract

This experimental study was conducted to compare the performance of three Congo Red degradation processes: photolysis, adsorption onto ZnO, and ZnO-assisted photocatalysis. The results showed that photolysis exhibited limited efficiency, achieving a degradation yield of only 34.2% due to the weak direct action of light on the dye molecules. Adsorption on ZnO improved the removal efficiency, reaching 53%, but mainly transferred the pollutant from the aqueous phase to the adsorbent surface without destroying it. In contrast, photocatalysis proved to be the most effective technique, providing a degradation yield of 92% within only 20 minutes. Its superior performance is attributed to the combined effect of dye adsorption and oxidative degradation by highly reactive species generated on the ZnO surface under light irradiation. Overall, the findings demonstrate that ZnO-assisted photocatalysis is a promising and efficient method for the treatment of wastewater contaminated with organic dyes such as Congo Red.

Keywords: Advanced Oxidation Process; Dye; Photocatalysis; Photolysis; Adsorption.

ملخص

هدفت هذه الدراسة التجريبية إلى مقارنة أداء ثلاث تقنيات لإزالة صبغة الكونغو الأحمر، وهي: التحلل الضوئي، والتحفيز الضوئي باستخدام أكسيد الزنك (ZnO)، والامتزاز على أكسيد الزنك. أظهرت النتائج أن التحلل الضوئي يحقق كفاءة محدودة، حيث بلغ مردود التحلل 34.2% فقط نتيجة التأثير المباشر الضعيف للإشعاع الضوئي على جزيئات الصبغة. أما الامتزاز على أكسيد الزنك فقد أدى إلى تحسين عملية الإزالة، محققاً مردوداً قدره 53%، إلا أنه يقتصر على تثبيت الملوث على سطح المادة المازة دون تفكيكه. في المقابل، أثبتت تقنية التحفيز الضوئي أنها الأكثر فعالية، إذ حققت مردود تحلل بلغ 92% خلال 20 دقيقة فقط. ويرجع هذا الأداء المتميز إلى التأثير التآزري بين امتزاز جزيئات الصبغة على سطح أكسيد الزنك وتحللها بواسطة الأنواع المؤكسدة عالية النشاط المتولدة تحت تأثير الإشعاع الضوئي. وتؤكد هذه النتائج أن التحفيز الضوئي باستخدام أكسيد الزنك يُعد تقنية واعدة وفعالة لمعالجة المياه الملوثة بالأصبغ العضوية، وعلى وجه الخصوص صبغة الكونغو الأحمر.

الكلمات المفتاحية: عمليات الأكسدة المتقدمة؛ الصبغة؛ التحفيز الضوئي؛ التحلل الضوئي؛ الامتزاز

Introduction Générale

I .Introduction:

L'eau est une ressource essentielle à la vie. Depuis l'aube de la civilisation humaine, son approvisionnement constitue un élément fondamental pour de nombreux usages tels que la consommation, l'agriculture, l'industrie et les besoins domestiques. Cependant, dans les pays en développement, une grande partie des problèmes de santé est liée au manque d'accès à l'eau potable. En effet, environ 80 % des infections et plus d'un tiers des décès sont attribués à la consommation d'une eau contaminée [1].

Par ailleurs, l'industrie textile représente l'un des secteurs les plus polluants au monde en raison du rejet des effluents contenant des colorants et des produits auxiliaires dans l'environnement, notamment dans les eaux souterraines et les rivières [2]. Les colorants sont largement utilisés pour teindre divers matériaux tels que les textiles, le cuir, le papier, les plastiques, ainsi que certains produits alimentaires [3]. La plupart de ces colorants sont d'origine synthétique et possèdent une structure chimique complexe, ce qui les rend résistants à la lumière et à l'oxydation, et donc difficilement biodégradables. En outre, ils peuvent présenter des effets toxiques, mutagènes et cancérigènes, menaçant ainsi la santé humaine et les écosystèmes aquatiques [4].

Dans ce contexte, l'élimination des colorants des effluents industriels devient une nécessité environnementale majeure. Toutefois, leur traitement de manière efficace et économique demeure un défi important pour l'industrie textile. Par conséquent, la gestion durable des ressources en eau passe par le traitement et la réutilisation des eaux usées [5].

Ainsi, l'accès à une eau de bonne qualité exige la mise en œuvre de technologies adaptées pour prévenir et réduire la contamination. Parmi les différentes méthodes de traitement des eaux (physiques, chimiques et biologiques), la photocatalyse apparaît comme une technique prometteuse pour la dégradation des polluants organiques [6].

Les procédés d'oxydation avancés (POA) sont reconnus comme des technologies propres pour le traitement de l'eau contenant des polluants récalcitrants et bio-réfractaires tels que les pesticides. Le concept principal des POA dans le processus de traitement de l'eau est basé sur la génération in situ de radicaux hydroxyles ($\cdot\text{OH}$), hautement réactifs qui oxydent sans distinction une large gamme de polluants organiques récalcitrants pour une minéralisation

complète des contaminants organiques en dioxyde de carbone, eau et sels minéraux et capable de transformer le composé de pesticide en espèces plus biodégradables [7].

Le présent travail a pour objectif d'étudier et de comparer les performances de trois techniques de traitement, à savoir la photolyse, l'adsorption sur oxyde de zinc (ZnO) et la photocatalyse assistée par ZnO. L'étude porte sur l'évaluation de l'efficacité de ces procédés en termes de rendement de dégradation et de temps d'équilibre, ainsi que sur l'influence de différents paramètres opératoires. Les résultats obtenus permettent d'identifier la méthode la plus performante et de mettre en évidence le potentiel de la photocatalyse au ZnO pour le traitement des eaux contaminées par les colorants organiques.

Ce manuscrit est subdivisé en trois parties: Partie bibliographique, partie expérimentale et enfin la partie résultats et discussion.

La première partie est composée de deux chapitres qui concernent une revue bibliographique sur les colorants ainsi que sur les procédés d'oxydations avancés.

La partie expérimentale concerne la description de la méthode de dosage et des essais expérimentale réalisés.

En fin la partie résultats et discussion qui résume les résultats expérimentaux trouvés ainsi que leurs interprétation.

En conclusion les principaux résultats de cette étude ont été présentés.

PARTIE THEORIQUE :
Synthèse Bibliographique.

Chapitre I:
La pollution par les colorants.

I.1. Histoire d'utilisation des colorants :

En 1856, William Henry Perkin découvre le premier colorant synthétique, la mauvéine¹. Âgé d'à peine 18 ans à ce moment-là, il fait cette découverte par hasard alors qu'il s'efforce de trouver un procédé pour synthétiser la quinine à partir de la houille de charbon.

Il est loin de se douter de l'impact de sa découverte qui viendra transformer un savoir-faire millénaire, où les couleurs sont tirées uniquement de la nature [8]. Grâce à la découverte de Perkin, l'Angleterre sera la première à commercialiser les colorants synthétiques, suivie de près par la France et l'Allemagne. Le succès considérable de la mauvéine incite ensuite de nombreux chimistes à entreprendre des recherches analogues.

C'est ainsi que plusieurs dizaines de colorants synthétiques sont mis au point pendant les années qui suivent [9]. Les premières découvertes apparaissent petit à petit entre 1856 et 1869 avec l'élaboration de produits donnant principalement le bleu, le rouge et le violet. La décennie suivante voit naître de nombreux tons de jaune, d'orangé et de rouge grâce à l'invention de l'alizarine synthétique (Graebe et Liebermann 1868, Perkin 1869)² qui présente les mêmes propriétés que la garance naturelle. Quoique les années 1880 offrent une gamme de colorants de synthèse de plus en plus variée, certaines teintures naturelles persistent, tel l'indigo, qui n'est synthétisé et mis en marché qu'en 18973 . C'est ainsi que l'indigo naturel est encore utilisé en cette fin du xix^e siècle et en début du xix^e siècle, soit jusqu'à 1920 environ [10].

I.2. Définition des colorants :

Un colorant est une substance colorée, qui peut être d'origine naturelle (animale ou végétale) ou fabriquée chimiquement (synthétique ou biochimique). On l'utilise pour donner de la couleur à divers produits comme les aliments, les médicaments, les cosmétiques ou les textiles [11].

Les matières colorantes sont un assemblage de groupes chromophores, auxochromes et de structures aromatiques conjuguées (cycles benzéniques, anthracène, perylène, etc.

Ces groupements sont capables de transformer la lumière blanche dans le spectre visible (de 380 à 750 nm), en lumière colorée par réflexion sur un corps, ou par transmission ou diffusion.

Tableau 1. Principaux groupes chromophores et auxochromes, classés par Intensité.

Groupements chromophores		Groupements auxochromes	
Azo	-N=N-	Acétyle	-CCOH ₃
Azoxy	-N=N ⁺ -O ⁻	Acide	-COOH
Azoamino	-N=N-NH	Acide sulfonique	-SO ₃ H
Nitroso	-N=O	Amido	-CONH ₂
Carbonyle	>C=C<	Amino	-NRR
Ethenyle	>C=C<	Chloro	-Cl
Thio	>C=S	Hydroxyle	-OH
Nitro	-NO ₂	Méthoxyle	-OCH ₃
Azométhine	>C=NH	Cyano	-CN

I.3. Classification des colorants :

Il existe deux grandes classes de colorants, en l'occurrence les colorants naturels et les colorants synthétiques.

I.3.1 Les colorants naturels :

La majorité des colorants utilisés sont d'origine végétale, extraits des plantes, des arbres ou des lichens, ou bien d'origine animale, extraits des insectes comme le kermès et la cochenille ou des mollusques comme la pourpre, ou bien encore dans les micro-organismes [12].

- Le bleu est obtenu à partir de l'indigo, qui est une plante légumineuse
- Le rouge est obtenu à partir de la racine de garance.
- Le jaune est obtenu à partir du safran. [13].



Figure 1 : L'indigo



Figure 2 : Le kermès



Figure 3 : Le cochenille



Figure 4: Le safran



Figure 5: Les racines de granace

I.3.2 .Les colorants synthétiques :

Les colorants synthétiques sont classés selon leur structure chimique et leur méthode d'application aux différents substrats (textiles, papier, cuir, matières plastiques, etc.).

I.3.2.1 Classification chimique des colorants synthétiques :

Le classement des colorants selon leur structure chimique repose sur la nature du groupement chromophore [14].

A. Les colorants azoïques :

Les colorants azoïques sont caractérisés par la présence au sein de la molécule d'un groupement azoïque ($-N=N-$) reliant deux noyaux benzéniques.

Cette catégorie de colorant est actuellement la plus répandue sur le plan de l'application, puisqu'ils représentent plus de 50% de la production mondiale de matières colorantes [15].

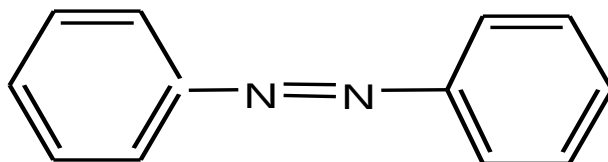


Figure 6: Structure de colorant azoïque

B. Les colorants triphénylméthanés :

Les colorants triphénylméthanés dérivent du triphénylméthane, qui est un hydrocarbure possédant trois cycles phényle liés à un carbone central. On retrouve cette structure de base dans un grand nombre de composés organiques colorés. Les colorants triphénylméthanés et leurs dérivés hétérocycliques constituent la plus ancienne classe de colorants synthétiques.

Actuellement bien moins importants que les colorants azoïques et anthraquinoniques, ils ont conservé une certaine valeur commerciale, car ils permettent de couvrir la totalité de la gamme de nuances. Les triphénylméthanés sont utilisés intensivement dans les industries papetières et textiles pour teindre le nylon, la laine, la soie et le coton. Leur utilisation ne se limite pas à l'industrie. On les retrouve également dans le domaine médical comme marqueur : biologique et comme agent antifongique chez les poissons et la volaille [16].

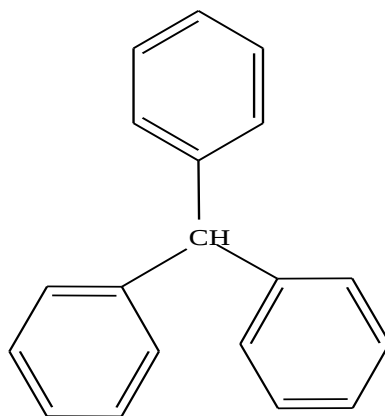


Figure 7: Structure des colorants triphénylméthanés

C. Les colorants anthraquinoniques :

Sont d'un point de vue commercial les plus importants après les colorants azoïques. Leurs formules générales dérivées de l'anthracène montrent que le chromophore est un noyau quinonique sur lequel peuvent s'attacher des groupes hydroxyles ou amino [16].

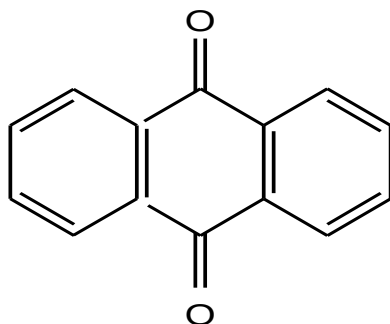


Figure 8: Structure de colorant anthraquinonique

D. Les colorants indigoïdes :

Les colorants indigoïdes tirent leur appellation de l'indigo dont ils dérivent. Ces colorants peuvent être utilisés comme additifs dans les produits pharmaceutiques ainsi que dans les diagnostics médicaux [17].

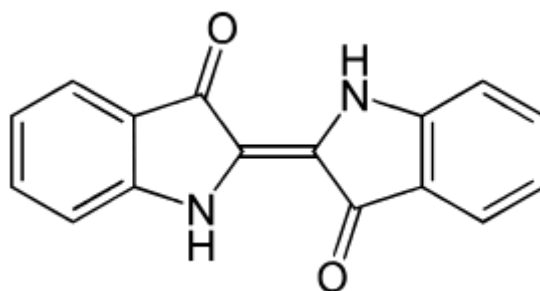


Figure 9 : Structure de colorant indigoïde

E. Les colorants xanthènes :

Sont des composés qui constituent les dérivés de la fluorescéine halogénée. Ils sont dotés d'une intense fluorescence. Leur propriété de marqueurs lors d'accident maritime ou de traceurs d'écoulement pour des rivières souterraines est malgré tout bien établie. Ils sont aussi utilisés comme colorant en alimentaire, cosmétique, textile et impression [18].

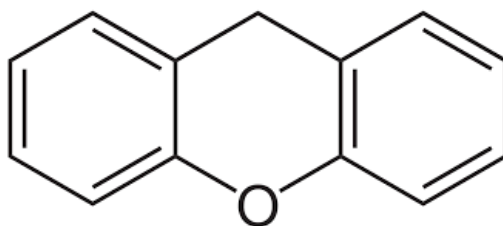


Figure 10 : Structure colorant xanthène

F. Les colorants nitrés et nitrosés :

Les colorants nitrés et nitrosés forment une classe de colorants très limitée en nombre et relativement ancienne. Ils sont actuellement encore utilisés, du fait de leur prix très modéré lié à la simplicité de leur structure moléculaire caractérisée par la présence d'un groupe nitro (-NO₂) en position ortho d'un groupement électrodonneur (hydroxyle ou groupes aminés) [19].

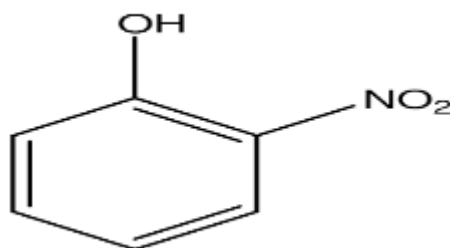


Figure 11 : Structure de colorant nitré

G. Les phtalocyanines :

Les phtalocyanines ont une structure complexe possédant un atome métallique central. Les colorants de ce groupe sont obtenus par réaction du dicyanobenzène en présence d'un halogénure métallique (Cu, Ni, Co, Pt, etc.) [20].

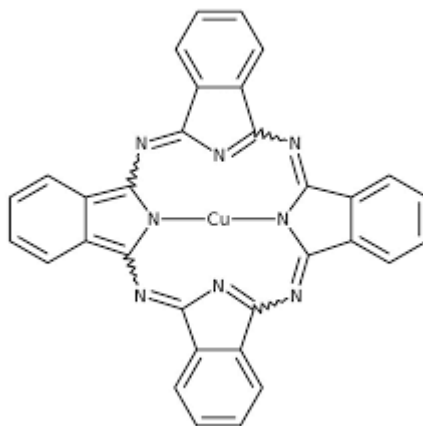


Figure 12 : Structure phtalocyanine

I.1.4 Application des colorants :

Les colorants présentent de nombreuses applications dans différents domaines, dont voici quelques-unes essentielles :

- Teinture et impression sur fibre et tissus de tous genres ;
- Teinture du bain de filage des fibres chimiques ;
- Teinture du cuir et des fourrures ;
- Teinture du papier et du parchemin ;
- Teinture des caoutchoucs, des feuilles et des matières plastiques ;
- Colorants pour toutes les techniques de la peinture ;
- Préparation des couleurs à la chaux pour les pré-colorations et enduits sur bâtiments ;
- Colorants pour l'impression des papiers peints ;
- Préparation des encres ;
- Colorations des denrées alimentaires ;
- Colorants pour les emplois médicaux et cosmétiques [21].

I.1.5 L'impact des colorants sur les eaux :

Un milieu aquatique est dit pollué lorsqu'on note la présence dans l'eau d'agents physiques, chimiques ou biologiques issues des activités humaines, qui la rendent impropre à son utilisation par l'homme et/ou perturbent les écosystèmes aquatiques [22].

L'une de ces activités est l'industrie textile, qui joue un rôle important dans la vie quotidienne de l'homme et notamment dans la coloration des tissus dans lesquels nous utilisons de l'eau. Ces dernières sont colorées par des couleurs, ce sont des produits chimiques. Les colorants sont des composés difficilement biodégradables par les micro-organismes, ils sont toxiques ou nocifs pour l'homme et les animaux [23].

I.1.6 Impact des colorants sur l'environnement et la santé :

L'utilisation des colorants peut entraîner des dangers soit sur l'environnement ou bien sur l'être humain.

I.1.6.1 Impacts environnementaux :

Les principales questions environnementales soulevées par les activités de l'industrie textile concernent essentiellement les rejets dans l'eau [3]. Beaucoup de colorants sont visibles dans l'eau même à de très faibles concentrations ($< 1 \text{ mg/L}$) [22].

Il existe un très grand nombre de substances chimiques parmi les produits utilisés pendant le processus, les impacts les plus importants sur l'environnement sont dus aux sels, détergents et aux acides organiques [24].

Ainsi, ils contribuent aux problèmes de pollution liés à la génération d'une quantité considérable d'eau usée contenant des colorants résiduels. Le rejet de ces eaux résiduaires dans l'écosystème est une source dramatique de pollution, d'eutrophisation et de perturbation non esthétique dans la vie aquatique et par conséquent présente un danger potentiel de bioaccumulation qui peut affecter l'homme par transport à travers la chaîne alimentaire [22].

I.1.6.2. Les impacts dangereux sur la santé :

Sont dus à certaines capacités de ces colorants qui peuvent :

- Être mutagènes.
- Être génotoxiques.
- Entraîner des cancers de la thyroïde.
- Entraîner des tumeurs des glandes surrénales.
- Contenir des substances cancérigènes.
- Avoir des actions sur le système nerveux central.
- Inhibition ou déficit de certaines enzymes.
- Augmentation de la perméabilité intestinale [25].

I.1.7. Définition de Rouge Congo :

Le rouge Congo est une molécule colorante (diazoïque). On utilise de moins en moins le rouge Congo dans l'industrie du textile car c'est un colorant toxique. Il sert désormais surtout d'indicateur de pH, c'est-à-dire d'indicateur de l'acidité d'un milieu. Sous sa forme basique, le rouge Congo est rouge. Quand le pH est compris entre 3.0 et 5.2, il devient rose. En présence d'une acidité supérieure, l'indicateur devient bleu. Le rouge Congo est très répandu également en histologie, c'est-à-dire l'étude des tissus biologiques, et en mycologie, c'est-à-dire l'étude des champignons [26].



Figure 13 : Le Rouge Congo

I .1.8.Structure du Rouge Congo :

Le rouge Congo est un colorant qui fait partie de la catégorie des polyazoïques parce qu'il possède deux chromophores (région de la molécule qui est principalement responsable de la teinte) de type azoïque, c'est-à-dire formés chacun de deux atomes d'azote doublement liés, et diversement substitués.

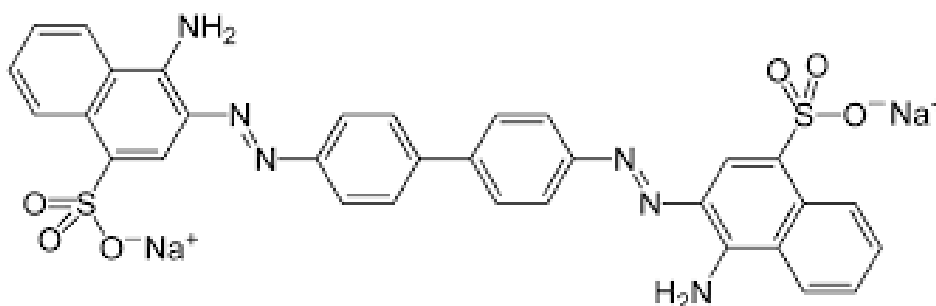


Figure 14 : Structure de Rouge Congo

References bibliographique

- [1]: Sudip Some , Rittick Mondal ,Debasismitra, Divya Jain, Devvretvirma, Samanwita Das, “**Microbial pollution of water with special reference to coliform bacteria and their nexus with environment,**”
- [2]:**H. Kelewou, M. Merzouki, and A. Lhassani**, (2014), “Biosorption of textile dyes Basic Yellow 2 (BY2) and Basic Green 4 (BG4) by the live yeast *Saccharomyces cerevisiae*,” *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 5, no. 2, pp. 633–640.
- [3]:**H. Aguedal, A. Iddou, A. Aziz, A. Shishkin, J. Ločs, and T. Juhna**, (2019), “Effect of thermal regeneration of diatomite adsorbent on its efficacy for removal of dye from water,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 1, doi: 10.1007/s13762-018-1647-5.
- [4]:**Y. Yang, G. Wang, B. Wang, Z. Li, X. Jia, Q. Zhou, Y. Zhao**, “Biosorption of Acid Black 172 and Congo Red from aqueous solution by nonviable *Penicillium YW 01*: Kinetic study, equilibrium isotherm and artificial neural network modeling,” *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 2, pp. 828– 834, 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2010.08.125.
- [5]: **C. Djilani, R. Zaghdoudib, F. Djazia, B. Bouchekima, A. Lallam, A. Modarressi, M. Rogalsk**, (2015), “Adsorption of dyes on activated carbon prepared from apricot stones and commercial activated carbon,” *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 53, pp. 112–121, doi: 10.1016/j.jtice.2015.02.025.
- [6]: **M. El Haddad, A. Regti, R. Slimani, and S. Lazar**, (2014), “Assessment of the biosorption kinetic and thermodynamic for the removal of safranin dye from aqueous solutions using calcined mussel shells,” *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 20, no. 2, pp. 717–724, doi: 10.1016/j.jiec.2013.05.038.
- [7]: **Sharma, A., J. Ahmad, and S.J.S. Flora**, Application of advanced oxidation processes and toxicity assessment of transformation products. *Environmental Research*, 2018. 167: p. 223- 233.
- [8]:**Rita-J. Adrosko**, *Natural Dyes in United-States*, Washington, Smithsonian Institution Press, 1968, p. 3.

[9] : Mary **W. Ballard et al.**, Important EarlySyntheticDyes : chemistry, constitution, date, proprieties, Washington, Conservation AnalyticalLaboratory, Smithsonian Institution, 1989, n.

[10] :**George F. Jaubert**, La Garance et l'indigo, Paris, Encyclopédie scientifique des aide-mémoire, n. d., p. 74.

[11] :**M. Dore**. Chimie des oxydants et traitement des eaux. Eddition 1989 Paris.

[12] : **KhaoulaSehailia& Fatma Talbi**, Etude d'adsorption du Rouge Congo en phase aqueuse sur les feuilles de palmier, Mémoire de master, Université KasdiMerbah Ouargla, 2019, page 4,6,16,17,19

[13] :**Mr BELHADJI Hicham & MOUMENI Ouassini**, Etude des performances épuratoires d'une station d'épuration des eaux usées de l'industrie textile : cas de la STEP de Sebdou, Mémoire de master, UNIVERSITE ABOU BAKER BELKAID TLEMCEN, 2016, page 11

[14] :**Medekhel Abdallah**, Adsorption du bleu méthylène par charbon actif, Mémoire de master, Université EchahidHamma Lakhdar -El Oued-, 2018, page 4, 5,12, 27,28

[15] :**CHEBLI Derradji**, Traitement des eaux usées industrielles : Dégradation des colorants azoïques par un procédé intégré couplant un procédé d'oxydation avancée et un traitement biologique, Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas, 2012, page 5

[16] :**Nour BOUANIMBA**, Etude comparative de la dégradation photochimique et photocatalytique de quatre colorants : Impact de la structure chimique et corrélation entre l'adsorption et l'activité photocatalytique de TiO₂, Thèse de doctorat, Université - Constantine 1, 2014, page 7, 9 ,12,13,17

[17] :**Samira Guendouz**,Biosorption des colorants textiles, Ecarlate Solophényle BNLE et Vert Cibacron par la biomasse sèche de lentilles d'eau, thèse de doctorat, Université de Badji Mokhtar Annaba, 2014, page 18

[18] :**Mr Lamri NAIDJA**, Elimination du colorant orange II en solution aqueuse, par voie photochimique et par adsorption, Magister en chimie, Université Mentouri de Constantine, 2010, page 9,10,11,26,27,29,31,32

[19] :**HALIMACHENINI**, Etude de la dégradation par voie photochimique de polluant organique « ORANGE G » en milieu aqueux homogène et hétérogène, Thèse de doctorat, Université Mentouri-Constantine, page 5,8

[20] :**Mr Lamri NAIDJA**, Elimination du colorant orange II en solution aqueuse, par voie photochimique et par adsorption, Magister en chimie, Université Mentouri de Constantine, 2010, page 9,10,11,26,27,29,31,32

[21]:**M. Satake,Y. Mido**,« Chemistry Of Colour cationic and related dyes. », Discovery Publishing House, INDIA, 1er Edition,1995.

[22] :**SAMIHA HAMMAMI**, Étude de dégradation des colorants de textile par les procédés d'oxydation avancée. Application à la dépollution des rejets industriels, thèse du doctorat, L'Université Paris-Est et Tunis El Manar,12 Décembre 2008, p10 ,15

[23] : **NAIT MERZOUG Nesrine**, APPLICATION DES TIGES DE DATTES DANS L'ADSORPTION DE POLLUANTS ORGANIQUES, MÉMOIRE de Magister, Université Mohamed Cherif Massaadia Souk-Ahras, 2013-2014, p12,14.

[24] :**NAIT MERZOUG Nesrine**, APPLICATION DES TIGES DE DATTES DANS L'ADSORPTION DE POLLUANTS ORGANIQUES, MÉMOIRE de Magister, Université Mohamed Cherif Massaadia Souk-Ahras, 2013-2014, p12,14.

[25] :**GHEDABNA DJIHED**, Elimination des colorants bleu de méthylène et jaune d'alizarine des eaux par adsorption sur un biomatériau, mémoire de master, Université Larbi Ben M'hidi (Oum el bouaghi), 2016, page 8,18,19

[26] :<https://www.theses-algerie.com>, 2 juin 2026 à 10 :00.

Chapitre II:
Les procédés d'oxydation avancés.

II.1. Définition :

Les POA font référence à une variété de procédés techniques avancées, qui produisent des radicaux OH à température ambiante pour oxyder suffisamment les eaux usées, les flux de polluants organiques et les effluents toxiques autrement dit les polluants organiques et inorganiques dans l'eau, l'air et les sols contaminés. Grâce à la mise en œuvre de telles procédures, le traitement (post) de ces effluents impliquent généralement l'utilisation d'un oxydant puissant et d'un catalyseur pour produire des radicaux hydroxyles hautement réactifs qui réagissent avec les polluants pour les décomposer en produits plus simples [1].

II. 2. Les différents types des POA :

Les POA peuvent être classés en six types :

1. Les procédés d'oxydation homogène : les radicaux sont générés par la réaction de Fenton, l'ozone à pH élevé ou O_3/H_2O_2

2. La photolyse homogène UV : ces procédés emploient la photolyse UV de H_2O_2 et/ou O_3 en solution homogène pour générer les radicaux $\bullet OH$

3. La photocatalyse hétérogène : une source lumineuse induit des réactions photoélectrochimiques à la surface du photocatalyseur semi-conducteur tel que TiO_2

4. La radiolyse : des espèces telles que $\bullet OH$ aq sont produites par irradiation de forte énergie (rayon- γ) des solutions à traiter.

5. Les procédés électrochimiques d'oxydation : les radicaux sont générés dans le milieu à partir de réactifs formés par électrochimie (Electro-Fenton) ou à partir du solvant aqueux (oxydation anodique de l'eau).

6. La sonolyse : elle s'appuie sur le phénomène de cavitation générée par des ondes ultrasonores et apparaît adaptée au traitement de la pollution organique [2].

II.3. Le radical hydroxyle ($\bullet OH$) :

Les POAs sont basés sur la génération in situ et l'utilisation d'un puissant oxydant qui est le radical hydroxyle ($\bullet OH$). Le radical hydroxyle ($\bullet OH$) est composé d'un atome d'oxygène et d'hydrogène possédant un électron non apparié (électron célibataire) sur son orbitale externe.

Les radicaux hydroxyles sont produits à partir d'une rupture homolytique d'une liaison covalente, qui veut dire que les deux électrons mis en jeu lors de cette liaison sont également partagés, un électron pour chaque atome. Cette caractéristique lui confère un caractère fortement polaire et non sélectif, après le fluor, le $\bullet OH$ est l'un des plus fort pouvoir oxydant avec un potentiel d'oxydation de 2,80 V, distingué par un temps de demi-vie de l'ordre de 10-9 sec [3].

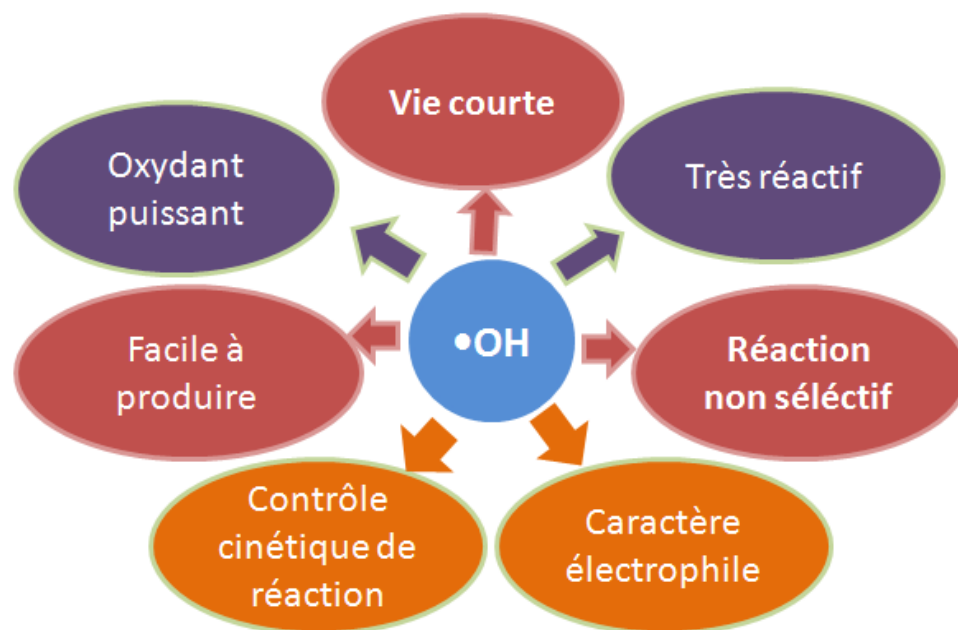


Figure .15: Caractéristiques du radical $\bullet\text{OH}$

II.4. Les avantages d'utilisation des POA :

Dans le traitement d'une pollution de l'eau sont [4]

- **Vitesses de réaction rapides** : En raison de son potentiel d'oxydation élevé et de sa nature non sélective, le radical $\bullet\text{OH}$ a des vitesses de réaction parmi les plus rapides de tous les agents oxydants utilisés pour le traitement de l'eau et des eaux usées. Ces réactions rapides se traduisent par des temps de rétention beaucoup plus courts qu'avec d'autres méthodes de traitement traditionnelles.

- **Minéralisation des matières organiques** : Les POA peuvent transformer les matières organiques présentes dans l'eau en composés inorganiques stables tels que l'eau, le dioxyde de carbone et les sels.

- **Peut traiter presque toutes les matières organiques et éliminer certains métaux lourds** : En raison de la grande réactivité de OH , ces molécules attaquent presque tous les matériaux organiques sans les discriminer et peuvent donc éliminer de nombreux types de contaminants dans une cuve de réacteur, y compris la réduction de certains métaux lourds.

- **Pas de production de boues comme dans les processus chimiques ou biologiques :** Un processus d'oxydation avancé ne traite pas l'eau et les eaux usées en transférant les polluants dans une autre phase. D'autres processus de traitement produisent des solides tels que des boues, qui doivent être filtrés et traités séparément.
- **Ne concentre pas les déchets pour un traitement ultérieur :** Les solutions de traitement telles que les membranes entraînent une augmentation des concentrations de contaminants des déchets, car elles ne font que séparer l'eau propre des composés polluants. Entre-temps, l'AOP réagit directement avec les polluants et les réduit en composés inoffensifs. Ce processus réduit donc leurs concentrations dans les eaux usées.

II.5. La photolyse :

La photolyse est une réaction chimique de décomposition chimique sous l'influence de la lumière avec scission d'une molécule d'eau en électrons, protons et oxygène dans le lumen des thylacoïdes. Par définition, une photolyse est une rupture des liaisons chimiques en raison de l'énergie rayonnante de la lumière [5].

II.6. Définition de l'adsorption :

L'adsorption est un phénomène de fixation de molécules d'un fluide sur la surface d'un solide, ce qui augmente la concentration des molécules de ce fluide sur la surface du solide sans modifier le volume de ce milieu poreux.

C'est un processus physique et ou chimique dans lequel une substance s'accumule à l'interface entre les phases, ce dernier peut être solide-liquide, liquide-liquide, gaz-liquide ou gaz-solide.

L'adsorbat étant la substance retirée de la phase liquide et l'adsorbant : la phase solide sur laquelle l'accumulation a lieu [6].

II.7. La photocatalyse hétérogène :

Selon le livre d'or de L'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC), la photocatalyse hétérogène est la « modification de la vitesse d'une réaction chimique ou son déclenchement sous l'action d'un rayonnement ultraviolet, visible ou infrarouge en présence d'une substance, le photocatalyseur qui absorbe la lumière et participe à la transformation chimique des partenaires de la réaction »[7].

Un photocatalyseur est défini comme un « catalyseur capable de produire, lors de l'absorption de la lumière, des transformations chimiques des partenaires de la réaction.

L'état excité du photocatalyseur interagit de manière répétée avec les partenaires de la réaction en formant des intermédiaires réactionnels et se régénère après chaque cycle de ces interactions ». Dans la photocatalyse hétérogène, le photocatalyseur est présent sous la forme d'un solide et les réactions ont lieu à l'interface entre les phases, c'est-à-dire solide-liquide ou solide-gaz.

D'après la figure 16 présente un schéma du mécanisme de base impliqué. Le semi-conducteur est excité par l'absorption d'un rayonnement électromagnétique dont l'énergie est égale ou supérieure à l'énergie de la bande interdite (E_g). Il en résulte l'excitation d'un électron (e^-) de la bande de valence à la bande de conduction, laissant un trou positif (h^+) dans la bande de valence. Les paires électron/trou (e^-/h^+) peuvent se recombiner, l'énergie étant réémise sous forme de chaleur ou de lumière, ou les porteurs de charge peuvent migrer vers la surface de la particule.

L'électron de la bande de conduction peut être transmis à un accepteur d'électrons dont le potentiel de réduction électrochimique est plus positif que le potentiel de bord de la bande de conduction. Le trou de la bande de valence peut accepter des électrons d'espèces donatrices dont le potentiel de réduction électrochimique est moins positif que le potentiel du bord de la bande de valence.

Globalement, ces processus aboutissent à la réduction d'une espèce acceptrice et à l'oxydation d'une espèce donneuse, les deux réactions étant entraînées par la différence de potentiel générée par l'absorption de rayonnement électromagnétique. La différence de potentiel générée est proche de l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur [8].

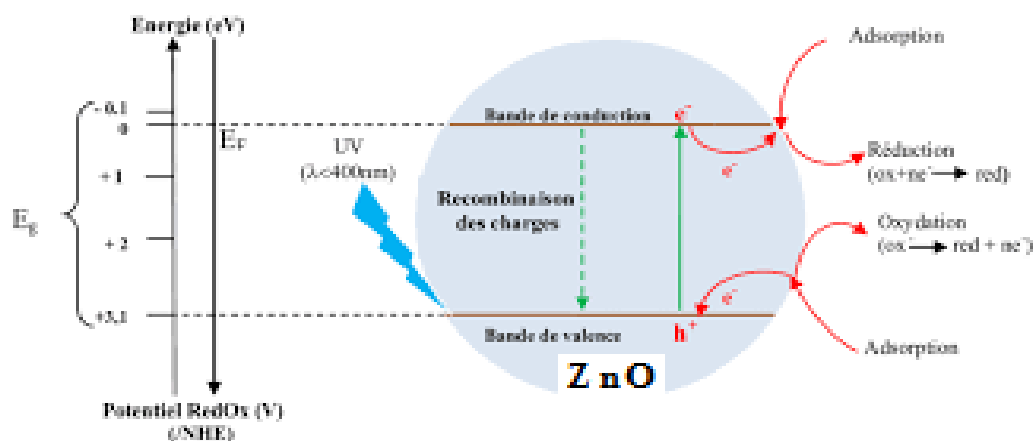


Figure 16 : Schéma montrant le mécanisme de base de la photocatalyse hétérogène (exemple de ZnO)

II.8. Les principaux facteurs influençant la photocatalyse hétérogène :

Au cours de la photocatalyse hétérogène, plusieurs paramètres opérationnels impactent l'efficacité de ce procédé, comme :

- Influence de la concentration initiale en polluant.
- Influence de la masse du catalyseur.
- Influence du pH.
- Influence de l'oxygène dissous.
- Influence de l'oxygène dissous.
- Influence de la température.
-

II.9. Applications de la photocatalyse :

La photocatalyse est également utilisée en chimie fine dans le but de synthétiser certaines molécules cibles en solution dans un solvant inerte. Les procédés d'oxydation sont les plus courants pour fonctionnaliser certains réactifs notamment les alcanes et leurs produits d'oxydation [9].

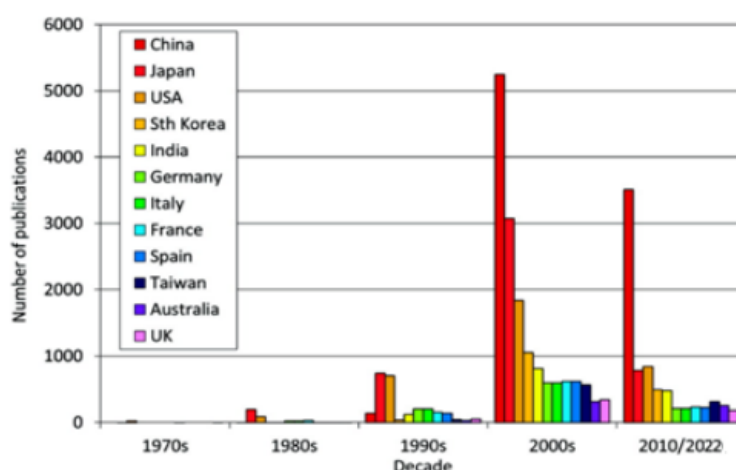
Cependant, sous certaines conditions (absence d'oxygène, source de proton, etc.) mais tout de même dans une moindre mesure, il est également possible de réaliser des réactions de réduction :

Mahdavi et al. ont ainsi mis en oeuvre la réduction de la nitrocoumarine en aminocoumarine par photocatalyse dans l'éthanol [10]. Certains auteurs ont même proposé la réduction du CO₂ en contact avec la vapeur d'eau en hydrocarbures gazeux : Tan et al. ont mis en évidence qu'en utilisant des grains de TiO₂ et un rayonnement UV-C (254 nm) il était alors possible de produire du méthane à pression et température ambiantes [11].

Enfin, on ne peut parler des applications de la photocatalyse sans évoquer le cas de la dégradation des polluants de l'eau. Le traitement des effluents par oxydation photocatalytique est effectivement aujourd'hui l'un des points forts du procédé puisque de nombreuses applications industrielles en découlent [12].

Tableau I.2 : exemples des applications de la photocatalyse dans le traitement de l'air et de l'eau.

Effluent	Pollution...	Applications
Eau	Industrielle	Dégradation des colorants, etc.
Eau	Agricole	Dégradation des pesticides, traitement des rejets agricoles (nettoyage des roues de tracteurs, etc.)
Eau	Chimique	Dégradation des composés chlorés issus des procédés actuels de décontamination de l'eau, hydrocarbures, phénol et dérivés, etc.

**Figure 17 : Nombre de publications sur la photocatalyse hétérogène par Pays.**

II .10. Les Oxydes :

II.10.1. Définition des oxydes :

Un oxyde est un composé chimique acide résultant de l'association d'un corps, avec au moins un atome d'oxygène et un atome d'un autre élément. Les oxydes sont des composés oxygénés d'un élément dans lequel il a le nombre d'oxydation -2. La plupart des oxydes se forment lorsque des substances inflammables réagissent avec l'oxygène (origine du mot oxydation) : lorsqu'elles sont oxydées, elles libèrent des électrons à l'oxygène oxydant, formant des oxydes [13].

II.10.2. Classification des oxydes selon leur composition chimique :

A. Oxydes basiques :

Ces oxydes sont des composés formés par un métal et de l'oxygène. Ils sont connus pour être des substances basiques, ce qui signifie que ils peuvent réagir avec les acides pour former des sels et de l'eau. Les oxydes basiques ont tendance à avoir une structure ionique et se dissolvent dans l'eau pour former des solutions alcalines.

B. Oxydes d'acide :

Également appelés anhydrides d'acide, ces oxydes contiennent de l'oxygène et un non-métal. Contrairement aux oxydes basiques, les oxydes acides sont des composés acides et peuvent réagir avec des bases pour former des sels et de l'eau. De plus, ces oxydes peuvent réagir avec l'eau pour produire des acides.

C. Oxydes amphotères :

Un oxyde amphotère est un oxyde métallique ou métalloïde qui peut agir à la fois comme un acide et comme une base selon le milieu dans lequel il se trouve. Cette catégorie d'oxydes comprend des composés qui présentent des propriétés à la fois basiques et acides. Par exemple, l'oxyde d'aluminium est un oxyde amphotère qui peut réagir avec des acides forts pour former des sels d'aluminium et de l'eau.

D. Oxydes mixtes :

Un oxyde mixte est un solide homogène qui contient plusieurs types de cations métalliques à des états d'oxydation différents, combinés avec des ions oxyde O^{2-} . Ces matériaux forment des structures cristallographiques bien définies (comme les spinelles ou les pérovskites) et possèdent des propriétés physico-chimiques uniques [14].

Tableau I.2 : Classification des oxydes selon leur composition chimique.

Type d'oxyde	Caractéristiques	Exemples
Oxydes Basiques	Formés par des métaux. Réagissent avec l'eau pour donner des bases (hydroxydes).	$Na_2O \rightarrow NaOH$ $CaO \rightarrow Ca(OH)_2$
Oxydes Acides	Formés par des non-métaux. Réagissent avec l'eau pour donner des acides	$CO_2 \rightarrow H_2CO_2$ $SO_2 \rightarrow H_2SO_4$
Oxydes Amphotères	Peuvent agir comme oxydes basiques ou acides selon le milieu.	Al_2O_3 , ZnO
Oxydes Mixtes	Combinaison de plusieurs oxydes simples dans une même structure.	Pb_3O_4 (oxyde de plomb rouge)

Références bibliographiques

- [1]: **Djebli Marwa, Dr. BOUKHEMKHEM ALI**, “Etude de la dégradation du Rouge Congo par le procédé Fenton,” mémoire de Master, UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL, p.3
- [2]: **Bouhadja Nadia, Benchabane Manel, Mr Guenfoud Fouad**, “Synthèse, caractérisations et activité photocatalytique d’un oxyde mixte à base de métaux de transition,” UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCEN, p.12
- [3] : **Mélane Sollin université**, du Québec à montréal, analyse quantitative de l’oxydation radicalaire de matériaux organiques: étude cinétique et théorique de l’oxydation des hydroperoxydes, mémoire par article présenté comme exigence partielle de la maîtrise en chimie, janvier 2021
- [4]: <https://fr.genesiswatertech.com/>, Le 4 juin 2026 à 11 :30
- [5] : <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/10383/photolyse>, Le 4 juin 2026 à 11 :30
- [6] : **KHOUDA Roumaissa, BENABDESSELAM Soulef**, “UTILISATION DES EPLUCHURES DE POMME DE TERRE COMME ADSORBANT POUR L'ELIMINATION DE ROUGE CONGO EN PHASE AQUESE,” Mémoire de master, p.5.
- [7]: **Nic, M., et al.**, IUPAC compendium of chemical terminology-the gold book. 2005: International Union of Pure and Applied Chemistry.
- [8]: **Bouhadja Nadia, Benchabane Manel, Mr Guenfoud Fouad**, “Synthèse, caractérisations et activité photocatalytique d’un oxyde mixte à base de métaux de transition,” UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCEN, p.14,15.
- [9]: **Didav Alixandre CAZOIR, Jean-Marc CHOVELON**, “Traitement d’eau huileuses par photocatalyse hétérogène : Application a la dépollution des eaux de cales,” Thèse de doctorat, L’université Claude Bernard Lyon 1, p.34.
- [10]: Carp et al., 2004 ; Hermann et al., 2007
- [11]: Mahdavi et al., 1993
- [12]: Tan et al., 2006
- [13]: <https://www.aquaportail.com/>
- [14]: <https://tecnobits.com/fr/>, Le 03 juin 2026 à 11 :00.

Partie Expérimentale

Le travail de ce mémoire est réalisé au sein du Laboratoire de Chimie Inorganique de l'Université de Dr. Moulay Tahar Saida. Cette partie donne une description des matériels utilisés ainsi que les méthodes et les démarches expérimentales adoptées lors de la réalisation de ce travail.

III.1. Matériels et produits utilisés :

III.1.1. Produits chimiques utilisés :

Acide Chlorhydrique : Concentré à 35% de Panreac de formule HCl présente une densité de 1,18 g/mL.

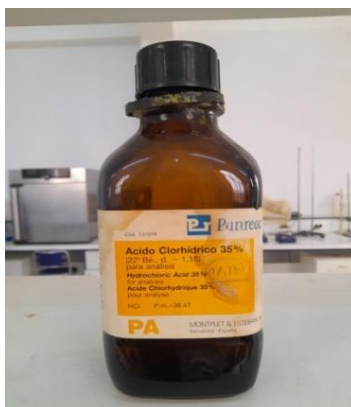


Figure 18 : L'acide Chlorhydrique utilisé.

Hydroxyde de Sodium : de BiochemChemopharma de formule NaOH de masse molaire 40 g/mol.

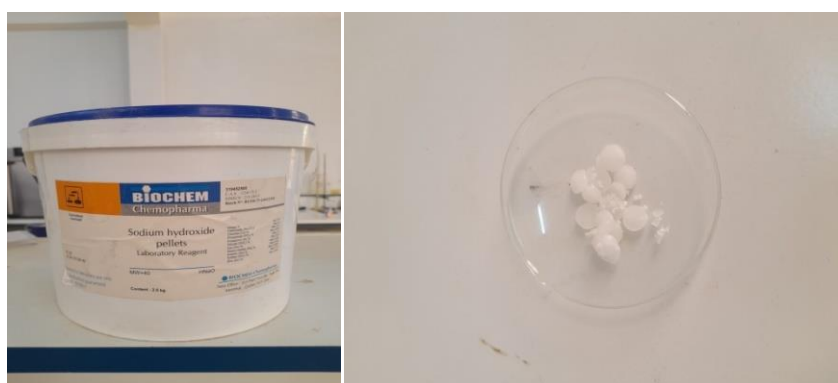


Figure 19 : L'hydroxyde de sodium (NaOH) utilisé.

Oxyde de Zinc : de Biochem Chemopharma de formule ZnO de masse molaire 81,38g/mol utilisé comme un catalyseur.

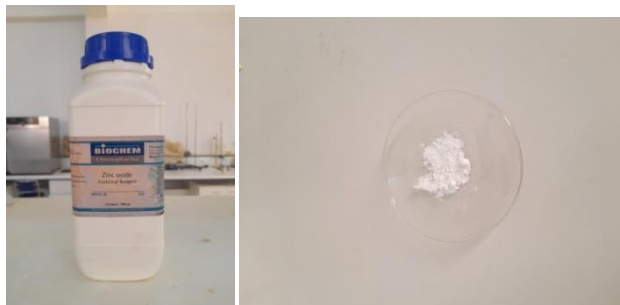


Figure 20: L'Oxyde de Zinc (ZnO) utilisé.

Rouge Congo : de VWR Chemicals de formule $\text{C}_{32}\text{H}_{22}\text{N}_6\text{Na}_2\text{O}_6\text{S}_2$ de masse molaire 696,663g/mol et d'apparence poudre rouge foncé.

Tableau 4 : Propriétés physico-chimiques de Rouge Congo.

Rouge Congo	
Structure chimique de rouge congo	
Nom systématique d'après UIPAC	Acide benzidinedizo-bis-1naphtylamine-4-sulfonique
Aspect physique	Poudre rouge foncé
Propriétés chimique	
Formule brute	$\text{C}_{32}\text{H}_{22}\text{N}_6\text{Na}_2\text{O}_6\text{S}_2$
Masse molaire	696,63g/mol
PKa	Environ 4
λ_{max}	496 nm
Propriétés physique	
Température de fusion	$>360^\circ\text{C}$
Pression d'ébullition	760 mmHg.
Solubilité	25g/L dans l'eau à 20°C Très soluble dans l'alcool
Précautions	Un danger de sensibilisation respiratoire rend SGH07 (pour signaler un danger de sensibilisation cutanée, d'irritation cutanée ou oculaire) facultatif.

III.1.2. Matériels utilisés :

Le matériel utilisé peut être cité comme suit :

Tableau 5 : Matériels utilisés.

Matériels	Description	Marque
Balance	Les pesées ont été réalisées sur une balance analytique de précision de 0,0001g.	DENVER INSTRUMENT 
pH-mètre	Les pH des solutions ont été mesurés à l'aide d'un pH-mètre à affichage numérique d'une électrode combinée en verre.	Adwa 
Plaque agitatrice chauffante	L'agitation dans le photo-réacteur a été assurée par une plaque agitatrice magnétique.	VELP SCIENTIFICA 
Thermomètre	La température des solutions a été mesurée à l'aide d'un thermomètre à affichage numérique.	HANNA INSTRUMENTS 

III.2. Colorimètre :

Les valeurs de l'absorbance ont été mesurées à l'aide d'un colorimètre JENWAY illustré dans la figure 1. Mesure l'absorbance ou la transmission de la lumière à une longueur d'onde spécifique pour déterminer la concentration d'un composé coloré (selon la loi de Beer-Lambert).

$$A = \log (I_0/I) = \epsilon . l . C$$

A: Absorbance sans unité.

I_0 : Intensité lumineuse incidente (avant interaction avec le soluté).

I: Intensité lumineuse transmise

ϵ : Coefficient d'extinction molaire (qui dépend de la longueur d'onde et de la température).

l : Longueur du trajet optique (en cm). C: la concentration du soluté.



Figure 21 : Colorimètre.

III .3.Préparation de la courbe d'étalonnage du Rouge Congo :

Afin de déterminer les concentrations résiduelles du Rouge Congo dans les différents échantillons aqueux du mélange réactionnel. Une courbe d'étalonnage est nécessaire pour convertir les absorbances obtenus en concentrations. Les concentrations des solutions étalons varient de 0 à 20 mg/L avec un pas de 2.5 mg/L.



Figure 22 : Les concentrations des solutions étalons.

Les solutions étalons du colorant ont été préparées à partir de la solution mère de concentration 25 mg/L. Cette dernière a été soigneusement préparée par la dissolution de 0.0025 g de la poudre du Rouge Congo dans 100 ml d'eau distillée. Les solutions étalons ont été préparées par la dilution d'un volume bien déterminé de la solution mère dans 100 ml d'eau distillée. Leurs concentrations finales sont: 0 ; 2.5; 5; 7.5; 10; 12.5; 15; 17,5 et enfin 20 mg/L. La mesure de l'absorbance de ces solutions a été réalisée à la longueur d'onde 490 nm.

III .4. Etude expérimentale de la dégradation du Rouge Congo :

Afin d'évaluer les performances de la photocatalyse par rapport à la photolyse (effet de la lumière) et l'adsorption du colorant sur le matériau utilisé (ZnO) et d'évaluer la contribution de chaque phénomène dans la dégradation du colorant. Une série d'expériences a été menée sur une solution du colorant de concentration initiale 25 mg/l et d'un volume de 100mL.

- ✓ Première série : Le solution a été exposée à la lumière visible uniquement, en l'absence de tout matériau photocatalytique.

- ✓ Deuxième série : La solution a été mise en contact avec 0,004 g du matériau photocatalytique, à l'obscurité.
- ✓ Troisième série : La solution a été mise en contact avec 0,004 g du matériau photocatalytique, sous éclairage lumineux.

III.4.1 Photolyse

A- Effet du temps d'irradiation :

Dans le but de déterminer le temps d'équilibre de la dégradation du colorant par photolyse, une étude expérimentale de l'évolution du rendement en fonction du temps d'exposition des rayons lumineux a été menée à différentes concentrations initiales du colorant. ($T = 25^{\circ}\text{C}$, $\text{pH} = 6.2$)

B- Effet de la concentration initial :

Les résultats de l'étude précédente ont été valorisés pour déduire l'évolution du rendement de la dégradation du colorant en fonction de la concentration initiale de la solution aqueuse.

III.4.2 Adsorption

- Effet du temps de contact :

Dans le but de déterminer le temps d'équilibre de la dégradation du colorant par adsorption, une étude expérimentale de l'évolution du rendement en fonction du temps d'agitation des deux phases adsorbant (oxyde zinc) et adsorbat (solution aqueuse en colorant), au fait cette étude a été menée en absence d'irradiations lumineuses afin que l'oxyde de zinc ne joue le rôle que d'adsorbant. ($T = 25^{\circ}\text{C}$, $\text{pH} = 6.8$, $C_0 = 20\text{mg/L}$)

III.4.3 Photocatalyse

Dans un photo-réacteur on a mis un volume de 40mL de la solution de Rouge Congo de concentration connue a été misé en contact avec une masse m de photo-catalyseur à la lumière avec un lampe de 5 watt et à la température ambiante.

Après un temps de contact du mélange égal au temps d'équilibre de l'adsorption du système.

La concentration C_t du Rouge Congo dans l'échantillon à l'instant t est ensuite déterminée par spectrophotométrie après la filtration de l'échantillon. Les concentrations du colorant utilisé dans ce test sont $C_0 = 10 ; 12,5; 15$ et 20 mg/l et les masses du matériau photocatalytique utilisé sont : $m = 20, 30, 40, 50$ et 60 mg . Le pH initial de la solution du colorant est de 6. La photo suivante montre le dispositif expérimental utilisé dans cette étude.



Figure 23 : Le montage utilisé pour le traitement et la réalisation d'étude.

A- Effet du temps d'irradiation :

Dans le but de déterminer expérimentalement le temps d'équilibre correspondant à un rendement maximal, une étude de l'évolution du rendement en fonction du temps d'irradiation en présence du ZnO comme catalyseur (photocatalyse) a été menée.

B- Effet de la concentration initiale :

Une étude expérimentale en suivant l'évolution du rendement de la dégradation du colorant en fonction de sa concentration initiale dans la phase aqueuse ceci dans le cas de la photocatalyse et en maintenant les autres paramètres constants à savoir le pH initial, le rapport m/V (quantité du catalyseur), le temps d'irradiation (temps d'équilibre) et la température ($t_{eq} = 20 \text{ min}$, $m/v = 1 \text{ g/L}$, $\text{pH} = 6.8$, $T = 25^\circ\text{C}$) .

C- Effet du rapport m/V :

Dans le but d'étudier l'effet de la quantité du catalyseur sur l'efficacité de la dégradation du colorant une étude expérimentale a été menée en suivant l'évolution du rendement en fonction du rapport m/V en maintenant les valeurs des autres paramètres constantes à savoir le temps d'irradiation (temps d'équilibre), la concentration initiale du colorant le pH initial et la température.

$$(\text{pH} = 6.8 ; C_0 = 20\text{mg/L} \quad \text{teq} = 20 \text{ min} ; T = 25^\circ\text{C})$$

D- Effet de la température :

Dans le but d'étudier l'effet de la température sur de la dégradation du colorant une étude expérimentale a été réalisée en suivant l'évolution du rendement en fonction de l'augmentation de la température et en maintenant les valeurs des autres paramètres constantes à savoir le temps d'irradiation (temps d'équilibre), la concentration initiale du colorant le pH initial et le rapport m/V.

$$(C_0 = 20\text{mg/L} ; \text{teq} = 20\text{min} , m/V = 1\text{g/L} , \text{pH} = 6.8)$$

E- Effet du pH initial de la phase aqueuse :

Dans le but de mettre en évidence l'effet du pH initial du milieu réactionnel sur le rendement de dégradation du colorant, une série d'expériences a été menée en faisant varier ce paramètre tout en maintenant constants le temps d'irradiation (temps d'équilibre), la concentration initiale du colorant, la température ainsi que le rapport m/V. Cette approche permet d'isoler l'influence du pH sur les performances du procédé d'élimination.

$$(C_0 = 20\text{mg/L} ; \text{teq} = 20\text{min}, m/V = 1\text{g/L} , T = 25^\circ\text{C})$$

Partie

Résultats et discussions

Introduction

Dans cette partie, les résultats expérimentaux relatifs à l'élimination du colorant organique dans différentes conditions opératoires sont présentés et discutés. Les trois procédés étudiés, à savoir la photolyse, l'adsorption sur ZnO et la photocatalyse assistée par ZnO, ont été évalués afin de suivre l'évolution du rendement de dégradation du colorant et d'établir une comparaison de leurs performances respectives.

I. Etablissement de la courbe d'étalonnage

Pour tracer la courbe d'étalonnage, on a mesuré l'absorbance des solutions aqueuses à des concentrations connues en colorant (Rouge Congo).

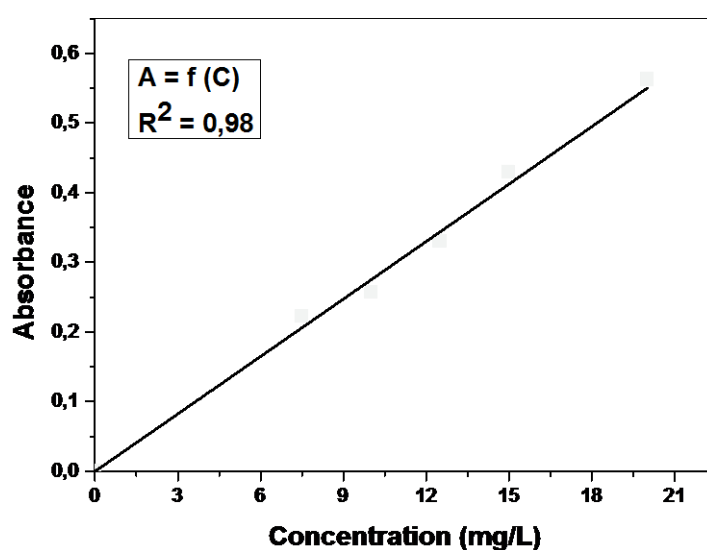


Figure24 : Courbe d'étalonnage

La courbe d'étalonnage, réalisée expérimentalement, est représentée dans la figure ci-dessus, c'est une droite qui passe par l'origine avec un facteur de corrélation ($R^2 = 0.98$), la relation entre l'absorbance et la concentration du colorant obéit alors à la loi de Beer-Lambert. La méthode de dosage choisie est donc validée.

II. Etude de la dégradation du colorant par le procédé photolyse :

II.1 Etude de l'effet du temps d'irradiation:

Dans le but de déterminer le temps d'équilibre de la dégradation du colorant par photolyse, une étude expérimentale de l'évolution du rendement en fonction du temps d'exposition des rayons lumineux a été menée à différentes concentrations initiales du colorant.

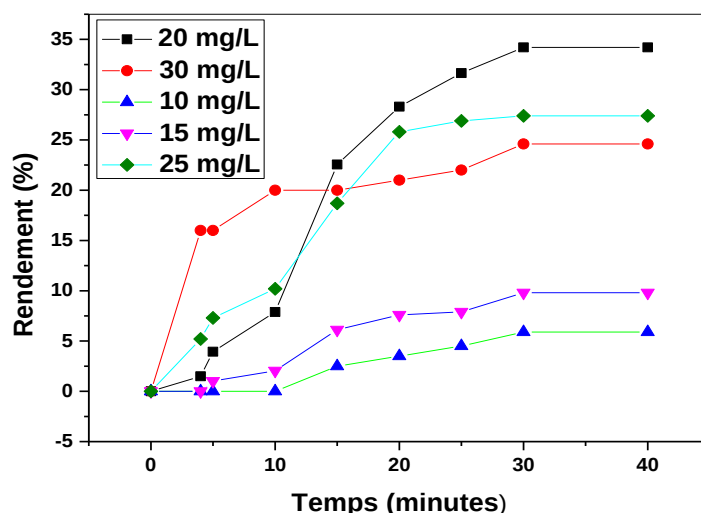


Figure 25 : Evolution du rendement en fonction du temps

$T = 25^{\circ}\text{C}$, $\text{pH} = 6.2$

Les résultats expérimentaux présentés dans la figure ci-dessus ont montré que le temps d'équilibre est de l'ordre de 30 minutes, le rendement maximal est égal à 34,2 % pour une concentration initiale égale à 20 mg/L. Les résultats ont montré aussi que la variation de la concentration initiale de la phase aqueuse n'a pas affecté la valeur du temps d'équilibre.

II.2 Etude de l'effet de la concentration initiale du colorant :

Les résultats de l'étude précédente ont été valorisés pour déduire l'évolution du rendement de la dégradation du colorant en fonction de la concentration initiale de la solution aqueuse.

Les résultats présentés dans la figure ci-dessous montrent que le rendement augmente avec l'augmentation de la concentration initiale mais au-delà de la valeur $C_0 = 20 \text{ mg/L}$ il diminue. Ceci peut être expliqué par le fait que l'augmentation de la concentration initiale du colorant entraîne d'abord une amélioration du rendement de photodégradation en raison de l'accroissement du nombre de molécules susceptibles d'interagir avec le rayonnement incident. Toutefois, au-delà d'une concentration optimale, le rendement diminue. Cette diminution peut être attribuée principalement à l'effet d'écran créé par les molécules du colorant, qui limite la pénétration de la lumière dans la solution, ainsi qu'à la réduction du rapport entre le nombre de photons disponibles et le nombre de molécules à dégrader. Par conséquent, l'efficacité de la photolyse devient plus faible aux fortes concentrations initiales.

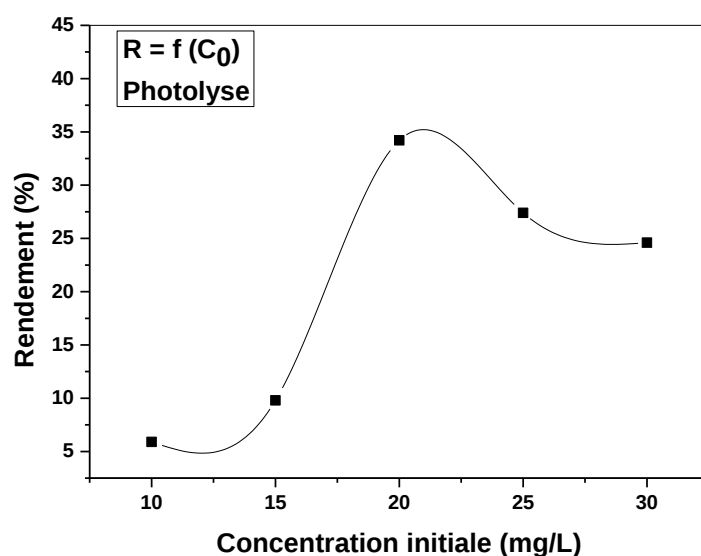


Figure 26 : Evolution du rendement en fonction de la concentration initiale

III Etude de la dégradation du colorant par adsorption :

Dans le but de déterminer le temps d'équilibre de la dégradation du colorant par adsorption, une étude expérimentale de l'évolution du rendement en fonction du temps d'agitation des deux phases adsorbant (oxyde zinc) et adsorbat (solution aqueuse en colorant), au fait cette étude a été menée en absence d'irradiations lumineuses afin que l'oxyde de zinc ne joue le rôle que d'adsorbant et afin de pouvoir comparer les résultats avec ceux lorsque il joue le rôle d'un catalyseur c'est-à-dire en présence d'irradiations lumineuses

Les résultats expérimentaux présentés dans la figure ci-dessous montrent :

- Une cinétique relativement rapide (équilibre atteint en 25 min) ;
- Un rendement intermédiaire (53 %).

Dans ce cas, le ZnO agit uniquement comme adsorbant. Les molécules du Rouge Congo sont transférées de la solution vers la surface du solide grâce aux interactions électrostatiques, aux forces de Van der Waals ou à d'autres interactions de surface.

Cela signifie que le ZnO possède une bonne affinité pour le Rouge Congo et dispose d'un nombre important de sites actifs permettant la fixation du colorant.

Cependant, l'adsorption ne détruit pas le polluant ; elle le concentre simplement à la surface du matériau. Une fois les sites actifs saturés, l'élimination cesse.

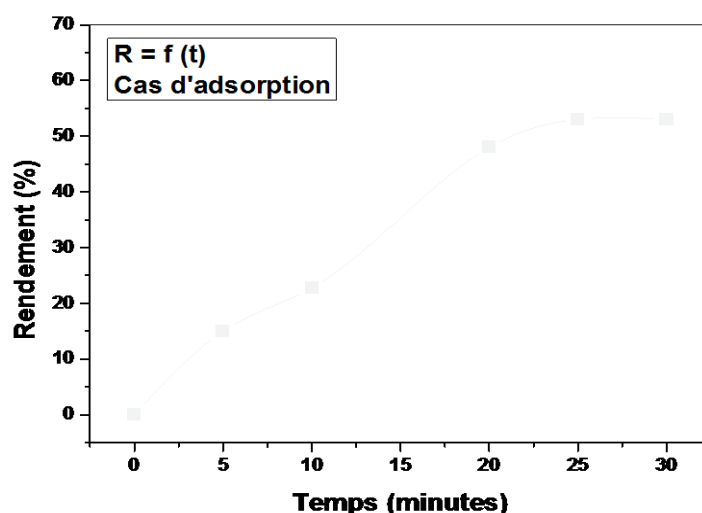


Figure 27 : Evolution du rendement en fonction du temps d'agitation des deux phases

$$T = 25^{\circ}\text{C}, \text{ pH} = 6.8, C_0 = 20\text{mg/L}$$

IV Etude de la dégradation du colorant par photocatalyse

IV.1 Etude cinétique

Dans le but de déterminer expérimentalement le temps d'équilibre correspondant à un rendement maximal, une étude de l'évolution du rendement en fonction du temps d'irradiation en présence du ZnO comme catalyseur (photocatalyse) a été menée.

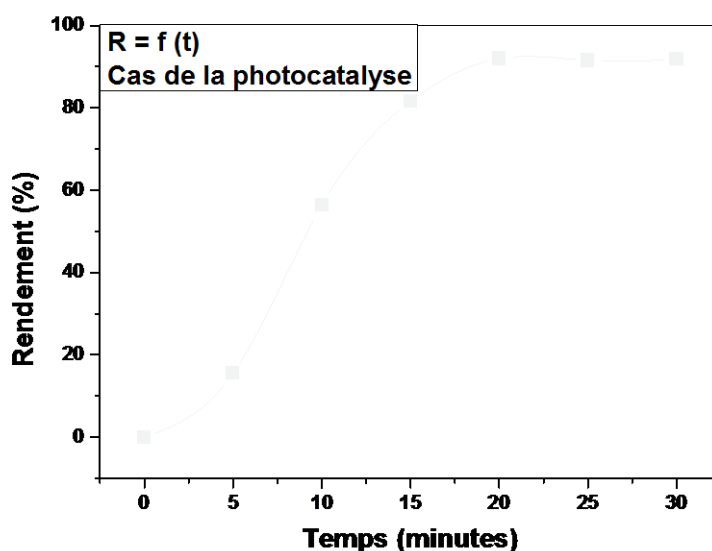


Figure 28 : Evolution du rendement en fonction du temps d'irradiation en présence du catalyseur ZnO

Les résultats expérimentaux présentés dans la figure ci-dessus ont montré que le rendement maximal est de l'ordre de 92% avec un temps d'équilibre de 20 minutes

La valeur élevée du rendement est expliquée par le fait que la photocatalyse combine deux phénomènes :

1. L'adsorption du colorant sur la surface du ZnO ;
2. Sa dégradation chimique sous irradiation.

Sous l'effet de la lumière, le ZnO conduit à la formation d'espèces oxydantes très réactives ($\bullet\text{OH}$, $\text{O}_2\bullet^-$, etc.). Ces radicaux attaquent les molécules adsorbées et les dégradent.

L'excellent rendement (92 %) et le temps le plus court (20 min) montrent que :

- l'adsorption rapproche les molécules du colorant des sites réactifs ;
- les espèces radicalaires accélèrent fortement la dégradation ;
- les sites de surface sont régénérés au fur et à mesure de la décomposition du colorant.

La photocatalyse est donc le procédé le plus performant.

IV.2 Etude de l'effet de la concentration initiale

Une étude expérimentale en suivant l'évolution du rendement de la dégradation du colorant en fonction de sa concentration initiale dans la phase aqueuse ceci dans le cas de la photocatalyse et en maintenant les autres paramètres constants à savoir le pH initial, le rapport m/V (quantité du catalyseur), le temps d'irradiation (temps d'équilibre) et la température.

Les résultats trouvés sont présentés dans la figure ci-dessous.

Les résultats présentés montrent que lorsque la concentration initiale du Rouge Congo augmente depuis de faibles valeurs, le rendement de dégradation s'améliore car davantage de molécules de colorant sont disponibles pour être adsorbées sur la surface du ZnO et réagir avec les espèces oxydantes générées sous irradiation (radicaux $\bullet\text{OH}$, $\text{O}_2\bullet^-$, etc.). Jusqu'à une certaine concentration, cette augmentation favorise donc la vitesse et le rendement de la photocatalyse.

En revanche, au-delà d'une **concentration optimale**, le rendement diminue pour plusieurs raisons :

- **Saturation des sites actifs du ZnO** : le nombre de sites disponibles à la surface du photocatalyseur est limité. À forte concentration, une partie des molécules de colorant ne peut plus s'adsorber efficacement et reste en solution.

- **Effet d'écran optique** : une solution plus concentrée absorbe davantage la lumière incidente, ce qui réduit la quantité de rayonnement atteignant la surface du ZnO et diminue la génération des paires électron-trou nécessaires à la photocatalyse.
- **Rapport insuffisant entre espèces réactives et colorant** : la quantité de radicaux produits pour une intensité lumineuse donnée devient insuffisante par rapport au nombre de molécules de colorant présentes.
- **Occupation de la surface par le colorant ou ses intermédiaires de dégradation** : ces espèces peuvent recouvrir les sites actifs et gêner la production ou l'action des espèces oxydantes.

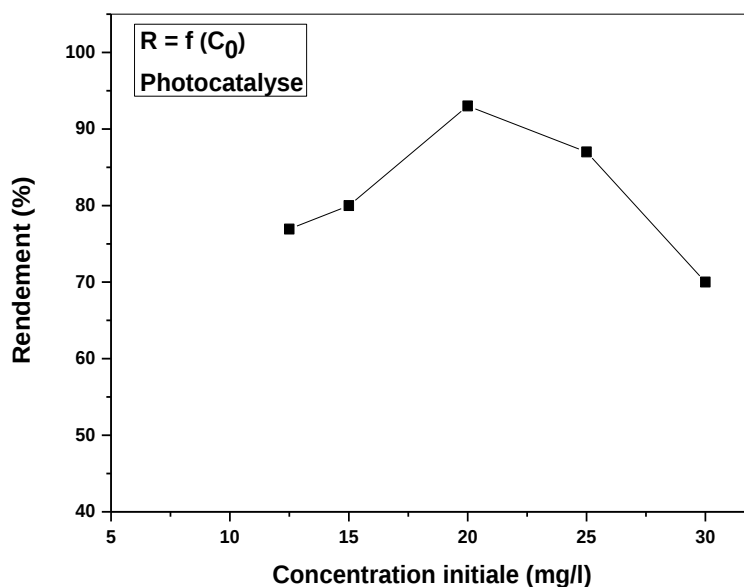


Figure 29 : Evolution du rendement en fonction de la concentration initiale du colorant - photocatalyse

teq= 20min , m/v=1g/L , pH=6.8 , T=25°C

L'augmentation de la concentration initiale du Rouge Congo conduit, dans un premier temps, à une amélioration du rendement de la photocatalyse sur ZnO grâce à l'augmentation du nombre de molécules adsorbées et disponibles pour la réaction. Toutefois, au-delà d'une concentration optimale, le rendement décroît en raison de la saturation des sites actifs du photocatalyseur, de l'effet d'écran qui limite la pénétration du rayonnement et de la diminution

relative des espèces oxydantes générées par rapport à la quantité de colorant présente.

Ces phénomènes réduisent l'efficacité globale du procédé photocatalytique.

IV.3 Etude de l'effet de la quantité du catalyseur, rapport m/V :

Dans le but d'étudier l'effet de la quantité du catalyseur sur l'efficacité de la dégradation du colorant une étude expérimentale a été menée en suivant l'évolution du rendement en fonction du rapport m/V en maintenant les valeurs des autres paramètres constantes à savoir le temps d'irradiation (temps d'équilibre), la concentration initiale du colorant le pH initial et la température.

Les résultats trouvés sont présentés dans la figure ci-dessous.

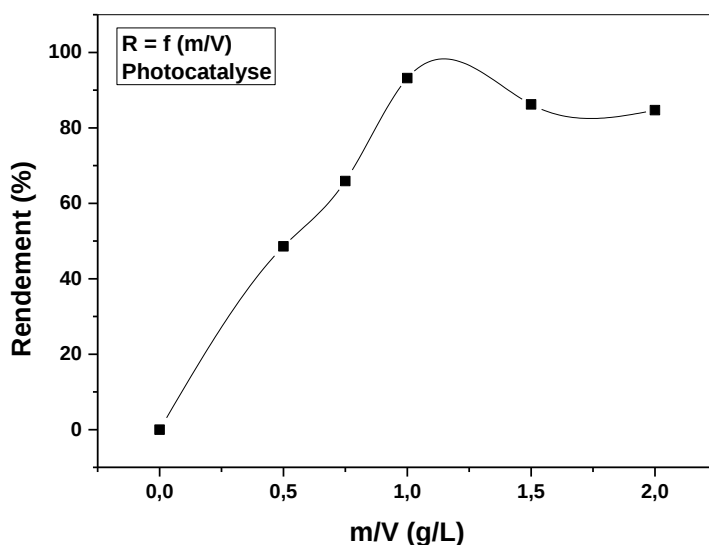


Figure 30 : Evolution du rendement en fonction du rapport m/V (quantité du catalyseur)

pH = 6.8 ; $C_0=20\text{mg/L}$ $t_{eq}= 20 \text{ min}$; $T = 25^\circ\text{C}$

Les résultats trouvés montrent que lorsque la masse de ZnO augmente, le nombre de sites actifs disponibles pour l'adsorption du Rouge Congo augmente également. De plus, une plus grande surface est exposée à la lumière, ce qui favorise la génération de paires électron-trou et d'espèces oxydantes réactives ($\bullet\text{OH}$, $\text{O}_2\bullet^-$). Le rendement de dégradation s'améliore donc progressivement. Au-delà d'une masse optimale : diminution du rendement

Lorsque la quantité de ZnO devient trop importante pour le volume de solution considéré, plusieurs effets défavorables apparaissent :

- **Effet d'écran et diffusion de la lumière** : une suspension très chargée en particules de ZnO devient plus opaque. Les particules absorbent et diffusent le rayonnement, ce

qui réduit la pénétration de la lumière dans le milieu et limite l'activation des particules situées en profondeur.

- **Agglomération des particules** : à forte concentration, les particules de ZnO peuvent s'agglomérer, ce qui diminue la surface spécifique réellement accessible et réduit le nombre de sites actifs efficaces.
- **Utilisation incomplète du catalyseur** : une partie du ZnO reste insuffisamment irradiée ou peu accessible au colorant, de sorte que l'ajout de catalyseur supplémentaire n'apporte plus de bénéfice et peut même diminuer les performances globales.

L'existence d'une masse optimale de ZnO traduit un compromis entre :

- Une **surface active suffisante** pour adsorber le colorant et produire des espèces réactives ;
- Une **bonne transmission de la lumière** dans la suspension.

Lorsque cette masse optimale est dépassée, les phénomènes d'opacification et d'agglomération l'emportent sur le gain apporté par l'augmentation de la surface catalytique, ce qui conduit à une baisse du rendement de dégradation.

À concentration initiale constante du Rouge Congo, l'augmentation de la quantité de ZnO entraîne d'abord une amélioration du rendement photocatalytique grâce à l'accroissement de la surface active et du nombre de sites disponibles pour l'adsorption et les réactions photo-induites. Toutefois, au-delà d'une valeur optimale, le rendement diminue en raison principalement de l'effet d'écran provoqué par l'excès de particules, de la diffusion accrue du rayonnement et de l'agglomération éventuelle du photocatalyseur, qui réduisent la pénétration de la lumière et l'efficacité des sites actifs. Ainsi, une quantité optimale de ZnO permet d'obtenir les meilleures performances photocatalytiques.

IV.4 Effet de la température :

Dans le but d'étudier l'effet de la température sur la dégradation du colorant une étude expérimentale a été réalisée en suivant l'évolution du rendement en fonction de l'augmentation de la température et en maintenant les valeurs des autres paramètres

constantes à savoir le temps d'irradiation (temps d'équilibre), la concentration initiale du colorant le pH initial et le rapport m/V.

Les résultats trouvés sont présentés dans la figure cidessous.

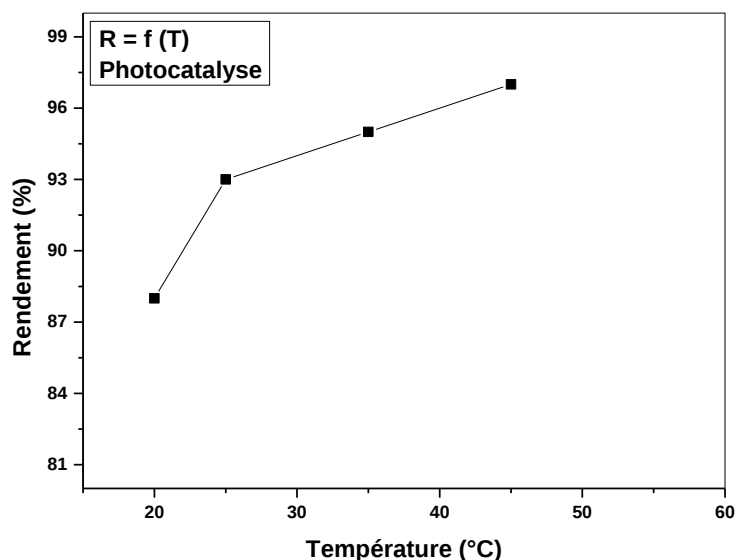


Figure 31 : Evolution du rendement en fonction de la température – Photocatalyse

$C_0 = 20\text{mg/L}$; $t_{eq} = 20\text{min}$, $m/V=1\text{g/L}$, $pH_i = 6.8$

Les résultats expérimentaux montrent que l'augmentation de la température entraîne une légère amélioration du rendement de la photocatalyse du Rouge Congo sur ZnO. Ce comportement suggère que le processus global est favorisé thermiquement dans les conditions étudiées et présente un caractère endothermique apparent. Cette amélioration peut être attribuée à une accélération des réactions de surface et des transferts de matière entre la solution et le photocatalyseur. Toutefois, l'influence de la température demeure limitée, la photoactivation du ZnO par le rayonnement constituant le facteur prédominant du procédé.

IV.5 Effet de pH initial de la phase aqueuse :

Dans le but de mettre en évidence l'effet du pH initial du milieu réactionnel sur le rendement de dégradation du colorant, une série d'expériences a été menée en faisant varier ce paramètre tout en maintenant constants le temps d'irradiation (temps d'équilibre), la concentration initiale du colorant, la température ainsi que le rapport m/V. Cette approche permet d'isoler l'influence du pH sur les performances du procédé d'élimination.

Les résultats trouvés sont présentés dans la figure ci-dessous.

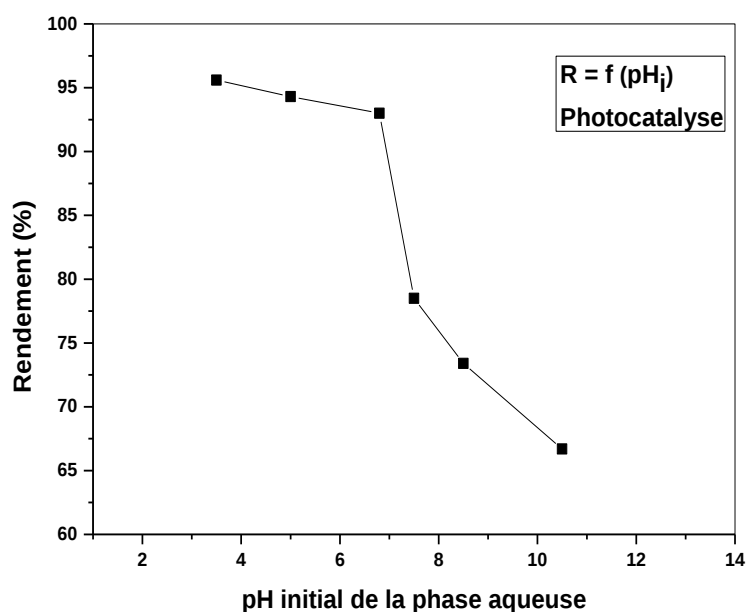


Figure 32 : Evolution du rendement en fonction du pH initial – Photocatalyse

$C_0 = 20\text{mg/L}$; $t_{eq} = 20\text{min}$, $m/V=1\text{g/L}$, $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Les résultats expérimentaux montrent que l'augmentation du pH entraîne une diminution du rendement de la photocatalyse du Rouge Congo sur ZnO. Ce comportement peut être attribué à la modification de la charge de surface du photocatalyseur et à la diminution de l'adsorption du colorant sur les sites actifs. De plus, les variations de pH influencent la formation et la réactivité des espèces oxydantes impliquées dans le mécanisme photocatalytique, ce qui peut conduire à une baisse de l'efficacité globale du procédé.

Dans cette étude, on a utilisé le Rouge Congo qui est un colorant anionique. En pratique, on observe souvent que

- **à pH acide**, la surface du ZnO est plus positivement chargée, ce qui favorise l'attraction électrostatique et l'adsorption du colorant anionique, améliorant ainsi la photocatalyse ;
- **lorsque le pH augmente**, la surface devient moins positive puis peut devenir négative. Il en résulte une **répulsion électrostatique** avec les ions du Rouge Congo, une adsorption plus faible et donc une diminution du rendement de dégradation.

V. Etude comparative

Dans ce travail, une étude expérimentale a été réalisée dans le but de comparer les performances de trois techniques de dégradation du colorant rouge congo : La photolyse , l'adsorption et la photocatalyse.

Les résultats ont montré clairement que les trois procédés n'agissent pas selon les mêmes mécanismes et n'ont pas la même efficacité.

- **Pour la photolyse**, le faible rendement (34.2 %) et le temps nécessaire (30 min) indiquent que le Rouge Congo est peu sensible à la dégradation directe par irradiation seule. La photolyse contribue donc à la décoloration, mais elle n'est pas suffisante pour assurer une élimination importante du polluant.

La photolyse repose uniquement sur l'action du rayonnement lumineux sur les molécules du colorant. L'énergie lumineuse provoque la rupture de certaines liaisons chimiques, mais ce processus reste généralement limité car :

- toutes les molécules n'absorbent pas efficacement la lumière incidente ;
- la vitesse de formation des espèces réactives est faible ;
- certains produits intermédiaires peuvent être relativement stables.

- **Pour l'adsorption**, les résultats ont montré :

- Une cinétique relativement rapide (équilibre atteint en 25 min) ;
- Un rendement intermédiaire (53 %).

Cela signifie que le ZnO possède une bonne affinité pour le Rouge Congo et dispose d'un nombre important de sites actifs permettant la fixation du colorant.

Cependant, l'adsorption ne détruit pas le polluant ; elle le concentre simplement à la surface du matériau.

- **Pour la photocatalyse**, l'excellent rendement (92 %) et le temps le plus court (20 min) montrent que :

- l'adsorption rapproche les molécules du colorant des sites réactifs ;
- les espèces radicalaires accélèrent fortement la dégradation ;
- les sites de surface sont régénérés au fur et à mesure de la décomposition du colorant.

Au fait la photocatalyse combine les deux phénomènes :

3. l'adsorption du colorant sur la surface du ZnO ;

4. sa dégradation chimique sous irradiation.

Sous l'effet de la lumière, le ZnO génère des paires électron-trou qui conduisent à la formation d'espèces oxydantes très réactives ($\bullet\text{OH}$, $\text{O}_2\bullet^-$, etc.). Ces radicaux attaquent les molécules adsorbées et les dégradent.

La photocatalyse est donc le procédé le plus performant.

Tableau 1. Comparaison globale

Procédé	Rendement (%)	Temps d'équilibre (min)	Interprétation
Photolyse	34	30	Dégradation directe faible et lente
Adsorption ZnO	53	25	Bonne fixation du colorant mais sans destruction
Photocatalyse ZnO	92	20	Dégradation rapide et très efficace grâce à l'action combinée adsorption + oxydation radicalaire

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, une étude expérimentale comparative a été menée afin d'évaluer les performances de trois procédés d'élimination du colorant Rouge Congo : la photolyse, l'adsorption sur ZnO et la photocatalyse assistée par ZnO. Les résultats obtenus montrent que ces procédés reposent sur des mécanismes différents et présentent des efficacités distinctes.

La photolyse a conduit à un rendement de dégradation relativement faible (34,2 %) avec un temps d'équilibre de 30 min, ce qui traduit la faible sensibilité du Rouge Congo à une irradiation directe en l'absence de catalyseur. L'adsorption sur ZnO a permis d'atteindre un rendement intermédiaire de 53 % en 25 min, mettant en évidence la bonne affinité du colorant pour la surface du matériau. Toutefois, ce procédé se limite au transfert du polluant de la phase liquide vers la phase solide sans le détruire.

En revanche, la photocatalyse s'est révélée être la méthode la plus performante, avec un rendement de dégradation de 92 % atteint en seulement 20 min. Cette efficacité élevée s'explique par l'action synergique de l'adsorption du colorant sur le ZnO et de sa dégradation par les espèces oxydantes générées sous irradiation lumineuse.

Les conditions optimales correspondantes sont les suivantes : $C_0 = 20\text{mg/L}$, $T = 25\text{ °C}$, $m/V = 1$ et $\text{pH} = 6.8$

Les résultats obtenus confirment ainsi l'intérêt de la photocatalyse sur ZnO comme technique prometteuse pour le traitement des eaux contaminées par les colorants organiques.