



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Ecole Nationale Polytechnique

Département génie des procédés et de l'environnement

Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement



LABORATOIRE DES SCIENCES ET
TECHNIQUES DE L'ENVIRONNEMENT

Thèse de Doctorat LMD

Filière : Science et Génie de l'environnement

Spécialité : Ingénierie et gestion de l'eau

Sur le thème

**Elimination des polluants émergents dans les eaux (modélisation
et optimisation)**

Réalisé par :

ZAHY Salah Eddine

Présentée et soutenue publiquement le (18/06/2025 à 13 :00)

Devant la composition du jury :

Président	NAMANE Abdelkader	Professeur	ENP Alger
Directeur de thèse	KERCHICH Yacine	Professeur	ENP Alger
Co-Directrice de these	TCHEKIKEN Chahinez	MCB	ENP Alger
Examineur	LAIDI Maamar	Professeur	Université de Médéa
Examineur	RAHAL Soufiane	Professeur	Université de Médéa
Invité	OUAZENE Naima	MCA	U. Boumerdès
Invité	HANINI Salah	Professeur	Université de Médéa

الملخص

يتناول هذا العمل تخليق وتطبيق محفز جديد قائم على الحديد للتحلل الفعال لصبغة رودامين ب (RhB)، بهدف تطوير تقنيات الأكسدة لمعالجة المياه. تم تصنيع المحفز بواسطة عملية حرارية مائية بمساعدة الميكروويف، وقد أكد توصيفها الشامل بتقنيات مختلفة خصائصها المورفولوجية والسطحية والبنوية لفهم نشاطها بشكل أفضل في عمليات تحلل الصبغة. في الاختبارات الضوئية، أظهر المحفز نشاطاً ضوئياً عالياً على دفعات تصنيع متعددة، مما يسلط الضوء على إمكانية إعادة إنتاج الطريقة وموثوقيتها. بغض النظر عن النشاط الضوئي الجوهري لـ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ المدمج في المحفز، فمن المقترح أن وجود أيونات بنوية، مثل الكبريتات والهيدروكسيل والكلوريدات، سهل بشكل أكبر تحلل RhB مما يشير إلى تكوين جذور كبريتات ($\text{SO}_4\cdot^-$) وهيدروكسيل ($\text{OH}\cdot$) وكلوريد ($\text{Cl}\cdot^-$) إضافية تنفذ العمليات الضوئية. من خلال Fenton غير المتجانس وPhoto-Fenton، أدى دمج المحفز مع H_2O_2 في كل من الظروف المظلمة والمضاءة إلى تلون كامل لـ RhB في غضون دقيقة واحدة، ربما بسبب زيادة الجذور المؤكسدة، وبالتالي توسيع فائدة المحفز لبيئات الإضاءة المختلفة. تُظهر النتائج الاستخدام الفعال للمحفز المُصنَّع في العمليات الضوئية المحفزة، والغير متجانسة من نوع Fenton، وغير المتجانسة من نوع Photo-Fenton.

الكلمات المفتاحية: عمليات الأكسدة المتقدمة، التحفيز الضوئي، معالجة مياه الصرف الصحي، عملية فينتون، تحلل الصبغة، الذكاء الاصطناعي.

Abstract:

This thesis presents the development and application of a novel iron-based catalyst, synthesized via a microwave-assisted hydrothermal method, for the effective degradation of Rhodamine B (RhB) in water treatment. Characterization confirmed its favorable morphological and structural properties. The catalyst demonstrated high photocatalytic activity and reproducibility across synthesis batches. Enhanced degradation was attributed not only to the intrinsic activity of $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ but also to the presence of structural ions (sulphate, hydroxyl, and chloride), which likely generated additional reactive radicals. In both dark and illuminated conditions, combining the catalyst with H_2O_2 enabled complete RhB discoloration within one minute, indicating its strong potential in heterogeneous Fenton and photo-Fenton processes under various lighting conditions.

Key words: Advanced Oxidation Processes, Photocatalysis, Wastewater treatment, Fenton process, Dye degradation, Artificial intelligence.

Résumé :

Cette thèse présente le développement et l'application d'un nouveau catalyseur à base de fer, synthétisé par une méthode hydrothermale assistée par micro-ondes, pour la dégradation efficace de la rhodamine B (RhB) dans le traitement de l'eau. La caractérisation a confirmé ses propriétés morphologiques et structurales favorables. Le catalyseur a démontré une activité photocatalytique élevée et une reproductibilité sur plusieurs lots de synthèse. Cette dégradation accrue a été attribuée non seulement à l'activité intrinsèque de l' $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, mais aussi à la présence d'ions structuraux, qui ont probablement généré des radicaux réactifs supplémentaires. À la fois dans l'obscurité et à la lumière, la combinaison du catalyseur avec H_2O_2 a permis une décoloration complète de la RhB en une minute, ce qui témoigne de son fort potentiel dans les processus hétérogènes de Fenton et de photo-Fenton sous diverses conditions d'éclairage.

Mots clés : Procédés d'oxydation avancés, Photocatalyse, Traitement des eaux usées, Procédé Fenton, Dégradation des colorants, Intelligence artificielle.

Sommaire

Introduction générale.....	16
----------------------------	----

CHPITRE 1 : LES POLLUANTS ÉMERGENTS DANS LES EAUX

1. Introduction.....	20
1.1 Les polluants émergents (PE).....	20
1.1.1 Les types des polluants émergents dans les eaux.....	20
1.2 Méthodes classiques des traitements des PE	20
1.2.1 Flocculation-Coagulation.....	20
1.2.2 Adsorption.....	28
1.3 Procédés oxydation avancée (POA)	31
1.3.1 Principe.....	31
1.3.2 Procédés oxydation chimique homogène	32
1.3.3 Procédés électrochimiques	33
1.3.4 Procédés sono-chimiques	34
1.3.5 Procédés photo-catalytiques homogène	35
1.3.6 Procédés Photo-catalytiques hétérogène	37
1.4 Conclusion.....	37

CHAPITRE 2 : PROCÉDÉS FENTON HOMOGÈNE ET HÉTÉROGEN

2 Introduction.....	41
2.1 Procède Fenton homogène ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$)	41
2.1.1 Radicaux (organique et hydroxyles) et complexes hydrox ferriques	42
2.1.2 Influence des paramètres opératoires sur le PF homogène	44
2.1.3 Effets synergiques de l'oxydation, de la coagulation et de l'adsorption dans le PF homogène.....	46
2.1.4 Procédé Photo-Fenton homogène ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$).....	47
2.1.5 Procédé électro-Fenton.....	49
2.2 Procédé Fenton hétérogène.....	50
2.2.1 Hématite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) et maghémite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$).....	50

2.2.2	Méthodes de fabrication de matériaux à base de Fe_2O_3	50
2.2.3	Application et mécanismes de Fe_2O_3	52
2.3	Conclusion	55
3	Introduction	57

CHAPITER 3 : MATRÉIELS ET MÉTHODES

3.1	Le choix des polluants	57
3.2	Méthodes	58
3.2.1	Méthodes de synthèse de l'oxyde de Fer Fe(III)/Fe(II)	58
3.2.2	Méthodes de caractérisation d'oxyde de fer synthétise	60
3.2.3	Méthode d'analyse physicochimique (Suivi de dégradation des polluants)	60
3.2.4	Procédés d'oxydation Fenton homogène ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$)	62
3.2.5	Photo-peroxydase ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$), Photocatalyse ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{UV}$), Fenton hétérogène ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$) et Photo-Fenton hétérogène ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$)	63
3.2.6	Plan de surface (Box-Behnken)	64
3.2.7	L'intelligence Artificielle	67
3.3	Conclusion	76

CHAPITER 4 : FENTON HOMOGEN : MINÉRALISATION ET MODELISATION

4	Introduction	78
4.1	Analyse des variances (Plan BB)	80
4.2	Analyse de minéralisation	83
4.3	Modèles AA pour prédire le procédé Fenton homogène	85
4.4	Conclusion	89

CHAPITRE 5 : FENTON HETEROGENE : APPLICATION D'UN NOUVEAU CATALYSEUR D'OXYDE DE FER

5	Introduction	92
5.1	Caractérisation de catalyseur $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-pH}=1\text{-(1w)}$	92
5.2	Etude de stabilité du catalyseur $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-pH}=1\text{-(1w)}$ /Photocatalyse ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{UV}$)	97
5.3	Photo-peroxydase ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$)	97

5.4	Etude comparative Photo-peroxydase ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$), Photo-catalyse ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{UV}$) , Fenton hétérogène ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$) et Photo-Fenton hétérogène ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2//\text{UV}$).....	101
5.5	Évaluation des modèles d'apprentissage automatique ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ Application)	109
5.5.1	Analyse de SHAP	114
5.5.2	Discussion	116
5.6	Conclusion.....	117
	Conclusion générale	119
	Bibliographies	121
	Annexes.....	149

confidentielle