

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ SALAH BOUBNIDER, CONSTANTINE 03
FACULTÉ DE GÉNIE DES PROCÉDÉS
DÉPARTEMENT DE GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT

N° d'ordre :.... ..

Série :.... ..

Mémoire

PRESENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER
EN GÉNIE DES PROCÉDÉS
OPTION : GÉNIE DES PROCÉDÉS DE L'ENVIRONNEMENT

Traitement D'une Solution Colorée Et D'un Rejet Alimentaire Par Les Procédés D'électro- Fenton Et D'électro- photo-fenton

Présenté par :

Ikhlef Salsabil

Kharief Safa Maya

Leulmi Lyna Malak

Dirigé par :

M. CHIKHI Mustapha

Grade : Pr

Année universitaire

2024-2025

Session : Juin

Table des matières

Chapitre I: Revue bibliographique	4
I.1. Introduction.....	4
I.2. Définition de la pollution de l'eau	4
I.2.1. Classification de la pollution de l'eau.....	4
I.2.1.1. Eaux souterraines	4
I.2.2. Les sources de la pollution.....	5
I.2.2.4. La pollution industrielle	6
I.2.3. Les principaux polluants des eaux	6
I.2.4. Impacts de la pollution de l'eau	8
I.3. Historique des colorants.....	9
I.4. Définition des colorants	9
I.4.1. Classification des colorants.....	10
I.4.1.2.2. Colorants basiques ou cationiques	13
I.4.1.2.3. Colorants développés ou azoïques insolubles.....	13
I.4.1.2.5. Colorants réactifs	13
I.4.2. Toxicité des colorants.....	14
I.4.3. Impacts environnementaux des colorants synthétiques	15
I.5. Procédés de traitements des colorants.....	16
I.5.1. Procédés classiques.....	16
I.5.2. Procédés chimiques.....	18
I.5.2.2. Procédés d'oxydation avancée (POA)	19
I.5.3. Traitements biologiques	19
I.6. Procédés d'oxydation avancées	20
I.6.1. Réactivité du radical hydroxyle	21
I.6.2. Procédé fenton ($\text{Fe}^{+2}/\text{H}_2\text{O}_2$)	23
I.6.3. Procédés électrochimiques.....	23
I.6.4. Procédé électro-fenton	25
I.6.5. Procédés photochimiques homogènes	28
Chapitre II: Modélisation par les plans d'expérience	32
II.1. Introduction	32
II.2. Les plan d'expériences	32
II.3. Méthodologie des plans d'expériences.....	32

II.4. Les types des plans d'expériences	33
II.4.1. Plans de criblage	33
II.4.2. Plans de modélisation	33
II.4.3. Plans de mélange	33
II.5. Variables codées ou variables centrées réduites	34
II.6. Principaux avantages des plans d'expériences	35
II.7. Plan factoriel 2^K	35
II.8. Matrice d'expérience	35
II.9. Plans de surface et la méthodologie des surfaces de réponse	36
II.10. Méthodologie des plans composites centrés	37
II.11. Méthodologie des plans de Box-Behnken	38
II.12. Analyse d'un plan de surface de réponse	39
II.12.1. Valeur de p – Modèle	39
II.12.2. L'écart type S	40
II.12.3. Coefficient de détermination (R^2)	40
II.12.4. Le R^2 ajusté	40
II.12.5. Le R^2 prévu	40
II.13. Analyse graphique des résultats	40
II.13.1. Courbes iso-réponse (graphique de contour)	41
II.13.2. Diagramme de surface en 3D	41
II.13.3. Diagramme d'optimisation (fonction de désirabilité)	41
II.14. Conclusion	42
Chapitre III: Matériels et Méthodes	43
III.1. Introduction	43
III.2. Réactifs et Produits chimiques	44
III.3. Préparation du catalyseur	44
III.3.1. Principe de la co-précipitation	45
III.3.2. Types de précipités	45
III.4. Caractéristique de polluant	45
III.4.1. Le colorant	45
III.4.2. Le rejet réel	46
III.5. Matériels utilisés	47
III.6. Préparation de la solution mère et les solution filles	48

III.6.1. Préparation de la solution mère	48
III.6.2. Préparation des solutions filles.....	48
III.7. Montage et procédure expérimentale	49
III.8. Méthodes d'analyse	50
III.8.1. Analyse de la matière organique	50
Chapitre IV: Résultats et Discussion	52
IV.1. Introduction	52
IV.2. Effet de quelques paramètres sur le procédé d'Electro-Fenton	52
IV.3. Analyse des résultats.....	52
IV.3.1. Analyse des résultats pour le colorant	52
IV.3.2. Histogramme de la DCO et du COT selon le temps.....	57
IV.3.3. Analyse des résultats pour le rejet alimentaire	58
IV.4. Modélisation mathématique et analyse de la variance	58
IV.4.1. Modélisation mathématique	58
IV.5. Optimisation des conditions opératoires du procédé Electro-Photo-Fenton	62
IV.6. Conclusion.....	63

Résumé

Ce travail de fin d'études s'inscrit dans le cadre de la lutte contre la pollution des eaux industrielles, en particulier celles contaminées par des colorants, qu'ils soient d'origine synthétique ou issus de rejets agroalimentaires. Ces substances sont généralement caractérisées par une stabilité chimique élevée, une faible biodégradabilité et une toxicité notable pour les milieux aquatiques, ce qui rend leur élimination par les procédés classiques difficile. Face à cette problématique, le recours à des procédés d'oxydation avancée, notamment les procédés électrochimiques, constitue une alternative prometteuse.

Dans ce contexte, deux approches complémentaires ont été étudiées. Le procédé électro-Fenton a été appliqué à une solution synthétique contenant le colorant Jaune Bezactiv. Une étude paramétrique a été menée pour évaluer l'influence de certains paramètres opératoires, à savoir la quantité de catalyseur, la concentration en électrolyte et la densité de courant. Les résultats ont révélé une efficacité remarquable du traitement : la demande chimique en oxygène (DCO) est passée de 150 mg/L à 12 mg/L, soit un rendement d'élimination de 92 %, tandis que le carbone organique total (TOC) a été réduit de 50 mg/L à 2 mg/L, représentant une minéralisation de 96 % de la matière organique initiale après 45 minutes de traitement.

Parallèlement, le procédé électro-photo-Fenton a été mis en œuvre pour le traitement d'un rejet réel provenant de l'unité de production de jus de l'entreprise BIFA à Constantine. Dans ce cas, une démarche d'optimisation basée sur un plan d'expériences de type Box-Behnken a permis de définir les conditions opératoires les plus efficaces pour maximiser la réduction de la DCO. Le modèle a identifié des conditions optimales correspondant à une concentration en catalyseur de 1,5 g/L, une concentration en NaCl de 4,76 g/L et une densité de courant de 11,97 mA/cm². Ces paramètres ont permis d'atteindre un taux de réduction de la DCO estimé à 50.10 %, proche de l'objectif fixé.

Les résultats obtenus confirment l'efficacité des deux procédés dans leurs contextes respectifs. Le procédé électro-Fenton s'est révélé particulièrement performant pour la dégradation poussée d'un colorant synthétique en milieu contrôlé, tandis que le procédé électro-photo-Fenton a permis une amélioration significative de la qualité d'un effluent réel agroalimentaire. Ces procédés apparaissent comme des solutions robustes, écologiques et adaptables, susceptibles de renforcer les stratégies de traitement des eaux colorées dans les secteurs industriel et environnemental.

Mots clés

Pollution de l'eau, électro-Fenton, électro-photo-Fenton, traitement des effluents, optimisation expérimentale, Box-Behnken, effluent synthétique, rejet agroalimentaire

Abstract

This final-year project is part of the fight against industrial water pollution, particularly wastewater contaminated with dyes, whether of synthetic origin or derived from agro-industrial discharges. These substances are generally characterized by high chemical stability, low biodegradability, and significant toxicity to aquatic environments, making their removal by conventional processes difficult. In response to this issue, advanced oxidation processes, particularly electrochemical methods, offer a promising alternative.

In this context, two complementary approaches were investigated. The Electro-Fenton process was applied to a synthetic solution containing the dye Bezactiv Yellow. A parametric study was conducted to assess the influence of certain operating parameters, namely the amount of catalyst, the electrolyte concentration, and the current density. The results revealed remarkable treatment efficiency: the chemical oxygen demand (COD) was reduced from 150 mg/L to 12 mg/L, corresponding to a 92% removal rate, while the total organic carbon (TOC) decreased from 50 mg/L to 2 mg/L, indicating a 96% mineralization of the initial organic matter after 45 minutes of treatment.

In parallel, the Electro-Photo-Fenton process was implemented for the treatment of real wastewater from the juice production unit of the BIFA company in Constantine. In this case, an optimization approach based on a Box-Behnken design of experiments was used to identify the most effective operating conditions for maximizing COD reduction. The model identified optimal conditions corresponding to a catalyst concentration of 1.5 g/L, NaCl concentration of 4.76 g/L, and a current density of 11.97 mA/cm². These parameters led to a COD reduction rate estimated at 50.10 %, close to the set objective.

The results obtained confirm the effectiveness of both processes in their respective contexts. The Electro-Fenton process proved particularly efficient for the advanced degradation of a synthetic dye in a controlled environment, while the Electro-Photo-Fenton process led to a significant improvement in the quality of real agro-industrial effluent. These processes appear to be robust, eco-friendly, and adaptable solutions capable of enhancing the treatment strategies for colored wastewater in both industrial and environmental sectors.

Keywords:

Water pollution, Electro-Fenton, Electro-Photo-Fenton, wastewater treatment, experimental optimization, Box-Behnken, synthetic effluent, agro-industrial discharge.

المخلص

يأتي هذا العمل ضمن إطار السعي للحد من تلوث المياه الصناعية، خصوصاً تلك الملوثة بالأصبغ، سواء كانت ذات منشأ صناعي أو ناتجة عن مخلفات قطاع الصناعات الغذائية. وتتميز هذه المواد بنبات كيميائي عالٍ، وقابلية ضعيفة للتحلل البيولوجي، بالإضافة إلى سميتها الملحوظة على الوسط المائي، مما يجعل من الصعب التخلص منها بواسطة الطرق التقليدية للمعالجة. وفي مواجهة هذه الإشكالية، تُعد تقنيات الأكسدة المتقدمة، وخاصة المعالجات الكهروكيميائية، بدائل واعدة وفعالة.

وفي هذا السياق، تم اعتماد منهجين تكمليين. حيث طُبّق عملية التحلل الكهرو-فنتون على محلول ملوث صناعي يحتوي على الصبغة الأصفر بيز أكتيف، وهي صبغة تركيبية مستعملة في الصناعات النسيجية. وقد أُجريت دراسة تجريبية لتحديد تأثير بعض المتغيرات التشغيلية، مثل كمية المحفز، تركيز الإلكتروليت، وكثافة التيار الكهربائي. وقد أظهرت النتائج فعالية عالية للعملية؛ حيث انخفض الطلب الكيميائي على الأوكسجين من 150 ملغ/ل إلى 12 ملغ/ل، أي بنسبة إزالة قدرها 92%، كما تم تقليص الكربون العضوي الكلي من 50 ملغ/ل إلى 2 ملغ/ل، بما يمثل معدل تمعدن يبلغ 96% من المادة العضوية الأصلية خلال 45 دقيقة فقط من المعالجة.

في المقابل، استُخدمت عملية التحلل الكهرو-ضوئي فنتون لمعالجة مياه صرف صناعية حقيقية مصدرها وحدة إنتاج العصائر التابعة لشركة غذائية محلية تقع بمدينة قسنطينة في الجزائر. وقد تم اعتماد منهجية تحسين تجريبي باستعمال تصميم بوكس-بنكن، وهو نوع من تصاميم التجارب الإحصائية متعددة العوامل، بهدف تحديد الشروط المثلى للتشغيل التي تؤدي إلى أفضل تخفيض ممكن للطلب الكيميائي على الأوكسجين. وقد أظهر النموذج التجريبي أن الشروط المثلى تتمثل في تركيز محفز يبلغ 1.5 غ/ل، وتركيز كلوريد الصوديوم يساوي 4.76 غ/ل، وكثافة تيار قدرها 11.97 ميلي أمبير/سم². هذه الظروف سمحت بتحقيق نسبة خفض في الطلب الكيميائي على الأوكسجين تصل إلى 50.10%، وهي نسبة قريبة من الهدف المنشود.

تُظهر النتائج المحصّلة فعالية كل من العمليتين في السياقات المختلفة. حيث أثبتت عملية التحلل الكهرو-فنتون جدواها العالية في إزالة صبغة صناعية في وسط ملوث اصطناعي مضبوط، بينما مكّنت عملية التحلل الكهرو-ضوئي فنتون من تحسين جودة مياه صرف غذائية حقيقية بشكل ملحوظ. وعليه، فإن هذه التقنيات تُعد خيارات بيئية فعالة، مرنة وقابلة للتطبيق، يمكن أن تساهم بشكل كبير في تعزيز استراتيجيات معالجة المياه الملوثة بالأصبغ في القطاعات الصناعية والبيئية.

الكلمات المفتاحية

تلوث المياه، التحلل الكهرو-فنتون، التحلل الكهرو-ضوئي فنتون، معالجة مياه الصرف، التحسين التجريبي، تصميم بوكس-بنكن، مياه صناعية تركيبية، نفايات صناعات غذائية، شركة محلية