



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية



République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Supérieure Agronomique

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة

Département : Génie rural

القسم: الهندسة الريفية التخصص:

Spécialité : Science de l'eau

علوم المياه

Mémoire de Fin d'Etude

Pour l'obtention du diplôme Master

Thème

**Optimisation du procédé d'électrocoagulation pour le traitement
des eaux usées industrielles : Modélisation mathématique et
application sur un rejet agroalimentaire**

Présenté par : **BOUMAZOUZA Nada**

Soutenu publiquement le : 10/07/2025

Devant le jury composé de :

Mémoire dirigé par :

Mme HANK Dalila

Professeur à l'ENSA

Co-promotrice :

Mme BOULAHIA Nadjiba

Docteur, ENSA

Présidente :

Mme. CHEKIREB BOURAS Fatima Zohra

MCA, ENSA

Examinatrices :

Mme. LARFI Bouchra

MAA, ENSA

Mme. LOUNIS Amal

MAB, ENSA

Année universitaire 2024-2025

Table des matières

Introduction générale	1
Partie I : Synthèse bibliographique	5
Chapitre 1 : Généralités des eaux usées résiduaire.....	5
I.1.1. Définition des eaux usées	5
I.1.2. Classification des eaux usées	5
a. Les eaux usées domestiques.....	5
b. Les eaux usées industrielles.....	5
c. Les eaux usées agricoles.....	6
d. Eaux pluviales ou de ruissellement.....	6
I.1.3. Caractéristiques des eaux usées	6
I.1.4. Principes généraux du traitement des eaux usées.....	8
I.1.4.1. Objectifs du traitement.....	8
I.1.4.2. Étapes du traitement des eaux usées	8
a. Prétraitement	9
b. Traitement primaire.....	9
c. Traitement secondaire.....	9
Chapitre 2 : Traitement des eaux par coagulation et électrocoagulation.....	10
I.2.1. Introduction	10
I.2.2. Traitement des eaux par coagulation-floculation.....	10
I.2.2.1. Principe général de la coagulation-floculation.....	10
I.2.2.2. Facteurs influençant le procédé de coagulation-floculation	11
I.2.2.3. Travaux de recherche récents sur la coagulation-floculation	11
a. Optimisation du procédé de traitement.....	11
b. Utilisation des coagulants alternatifs	12
c. Application sur un rejet industriel (agroalimentaire et papeterie)	12
I.2.2.4. Avantage et inconvénient du procédé d'électrocoagulation.....	12
I.2.3. Traitement des eaux par électrocoagulation (EC).....	12
I.2.3.1. Fondements et fonctionnement du procédé d'électrocoagulation.....	12
I.2.3.2. Effet des paramètres opératoires sur l'électrocoagulation	14
I.2.3.3. Estimation de la consommation de l'énergie et la masse perdue par les électrodes	15
I.2.3.4. Domaines d'applications de l'électrocoagulation.....	15
I.2.3.5. Travaux de recherche publiés sur l'électrocoagulation	16
a. Comparaison entre la coagulation et l'électrocoagulation	16
b. Application de l'électrocoagulation sur des rejets industriels	16
c. Utilisation de l'électrocoagulation dans un procédé hybride	16
I.2.3.6. Les avantages et les inconvénients de l'électrocoagulation	16
I.2.4. Différences fondamentales entre coagulation classique et électrocoagulation.....	17

Chapitre 3 : Présentation des deux entreprises	19
I.3.1. Les eaux usées dans les industries agroalimentaires : enjeux et caractéristiques.....	19
I.3.1.1. Introduction.....	19
I.3.1.2. Composition des effluents agroalimentaires.....	19
I.3.1.3. Impacts environnementaux et contraintes réglementaires	19
I.3.1.4. Techniques de traitements utilisés.....	19
I.3.1.5. Destination finale des eaux usées traitées et la boue	20
I.3.2 Les industries agroalimentaires étudiées.....	20
I.3.2.1. SARL SOFAMAR : Société de Fabrication de Margarine	20
a. Composition globale des margarines	22
b. Fabrication des margarines	22
I.3.2.2 SPA Falait.....	23
a. Introduction	23
b. Le service qualité.....	25
c. Process de fabrication	26
Chapitre4 : méthodologie de plan d'expérience-plan fractionnaire.....	28
I.4.1. Introduction	28
I.4.2. Principe des plans d'expériences.....	28
I.4.3. Terminologie générale des plans d'expériences	29
I.4.4. Types de plans d'expériences	30
I.4.4.1. Plans factoriels complets (Full Factorial Design).....	31
I.4.4.2. Plans factoriels fractionnaires (Fractional Factorial Design).....	31
I.4.4.3. Plans de surface de réponse (Response Surface Methodology – RSM)	31
I.4.5. Le plan fractionnaire.....	32
I.4.5.1. Pourquoi un plan factoriel fractionnaire ?.....	32
I.4.5.2. Méthodologie de construction d'un plan factoriel fractionnaire	32
I.4.5.3. Modélisation Analyse statistique	33
I.4.5.4. Modèle mathématique du plan fractionnaire	34
I.4.5.5. Vérification de la validité de modèle.....	34
I.4.5.5.1. Le Coefficient de détermination R^2 , et R^2 ajusté.....	34
I.4.5.5.2. Analyse statistique des coefficients	35
I.4.6. Optimisation et fonction désirabilité.....	36
I.4.7. Logiciels pour les plans d'expérience	35
I.4.8. Avantages du plan fractionnaire.....	37
Partie II : Etude Expérimentale	39
Chapitre 1 : Matériel et Méthodes.....	39
II.1.1. Introduction	39
II.1.2. Matériel expérimental	39

II.1.2.1. Réacteur d'électrocoagulation	39
II.1.2.2. Électrodes	40
II.1.2.3. Source de courant.....	40
II.1.2.4. Réactifs utilisés	40
a. Chlorure de sodium (NaCl)	40
b. Sulfate d'aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)	41
c. Eau à traiter	41
II.1.3. Protocole expérimental	41
II.1.4. Analyse de l'eau.....	43
a. Mesure de pH	43
L'indice d'acidité a été mesuré par un pH-mètre.....	43
b. Mesure de la turbidité	43
c. Dosage de la demande chimique en oxygène DCO	44
Chapitre 2 : Résultats et discussion.....	46
II.2.1. Introduction	46
II.2.2. Effet des paramètres sur le rendement de l'électrocoagulation	46
II.2.2.1. <i>Effet de la concentration en NaCl</i>	46
II.2.2.2. Effet de la concentration en lait	46
II.2.2.3. Effet de la surface des électrodes	46
II.2.2.4. Effet de temps de décantation.....	47
II.2.2.5. Effet du volume de lactosérum	48
II.2.2.6. Effet du sulfate d'aluminium sur le rendement de l'électrocoagulation (sans lactosérum)	50
II.2.2.7. Effet du sulfate d'aluminium sur le rendement de l'électrocoagulation en présence de lactosérum	51
II.2.2.8. Effet de la tension appliquée.....	55
II.2.3. Estimation de l'énergie consommée et la masse perdue par les électrodes	56
II.2.4. Modélisation et Optimisation du rendement d'élimination de la turbidité par application d'un plan fractionnaire	57
II.2.4.1. Construction de la matrice d'expérience.....	57
II.2.4.2. Analyse statistique par le plan d'expériences	60
II.2.4.3. Modélisation mathématique.....	61
II.2.4.4. Statistique de la régression du modèle.....	63
a. Test de Student.....	63
b. Profil des d'interactions.....	63
c. Test de Fisher.....	64
II.2.4.5 Optimisation de la réponse par la fonction désirabilité	66
II.2.5. Application de procédé de traitement sur un rejet réel.....	67
Conclusion générale.....	71

Références Bibliographiques.....	74
Annexes.....	81

Résumé :

Ce travail porte sur l'étude du procédé d'électrocoagulation pour le traitement des eaux usées. Dans un premier temps, l'effet de différents paramètres (tel que la concentration en NaCl, la surface des électrodes et le temps de décantation) sur le rendement d'élimination de la turbidité d'une eau synthétique a été étudié. Un plan d'expériences a ensuite été mis en œuvre afin d'optimiser les conditions opératoires du procédé. Les conditions optimales obtenues ont été appliquées à deux types d'eaux usées réelles issues de l'industrie agroalimentaire. Les résultats ont montré une efficacité notable de l'électrocoagulation pour la réduction de la turbidité et de la matière organique dans ces effluents industriels.

Mots clés : Traitement des eaux, électrocoagulation, turbidité, plan d'expériences, rejets agroalimentaires.

Abstract :

This work focuses on the study of the electrocoagulation process for wastewater treatment. First, the effect of different parameters (such as NaCl concentration, electrode surface and settling time) on the turbidity removal efficiency of synthetic water was studied. An experimental design was then implemented to optimize the operating conditions of the process. The optimal conditions obtained were applied to two types of real wastewater from the agri-food industry. The results showed a significant efficiency of electrocoagulation for the reduction of turbidity and organic matter in these industrial effluents.

Key words : Water treatment, electrocoagulation, turbidity, experimental design, agri-food waste.

ملخص

يركز هذا العمل على دراسة عملية التخثر الكهربائي لمعالجة مياه الصرف. أولاً، تمت دراسة تأثير العوامل المختلفة (مثل تركيز كلوريد الصوديوم وسطح القطب وزمن الترسيب) على كفاءة إزالة تعكر المياه. وقد تم بعد ذلك تنفيذ المنهجية التجريبية لتحسين ظروف تشغيل العملية. تم تطبيق الظروف المثلى المتحصل عليها على نوعين من مياه الصرف الناتجة عن صناعة الأغذية. وأظهرت النتائج كفاءة ملحوظة للتخثر الكهربائي في تقليل التعكر والمواد العضوية.

الكلمات المفتاحية: معالجة المياه، التخثر الكهربائي، التعكر، المنهجية التجريبية، مخلفات الصناعة الغذائية.