



Département : Génie Chimique

Laboratoire de Valorisation des Énergies Fossiles

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Chimique

**Effet combiné de l'électrocoagulation et de
l'adsorption sur l'élimination d'un
polluant pharmaceutique en solution aqueuse.**

Salim GAOUA et Rayan DJEBROUNI

Sous la direction de : Mme Faroudja MOHELLEBI
Mme Leila BENSADALLAH

Pr (ENP)
MCB (ENP)

Présenté et soutenu publiquement le 03/07/2025

Composition du jury :

Président	Mr Rabah BOUARAB	Pr (ENP)
Promotrices	Mme Faroudja MOHELLEBI	Pr (ENP)
	Mme Leila BENSADALLAH	MCB (ENP)
Examinatrice	Mme Saliha HADDOUM	MCA (ENP)



Département : Génie Chimique

Laboratoire de Valorisation des Énergies Fossiles

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Chimique

**Effet combiné de l'électrocoagulation et de
l'adsorption sur l'élimination d'un
polluant pharmaceutique en solution aqueuse.**

Salim GAOUA et Rayan DJEBROUNI

Sous la direction de : Mme Faroudja MOHELLEBI, Pr (ENP)
Mme Leila BENSADALLAH, MCB (ENP)

Présenté et soutenu publiquement le 29/06/2025

Composition du jury :

Président	Mr Rabah BOUARAB	Pr (ENP)
Promotrices	Mme Faroudja MOHELLEBI	Pr (ENP)
	Mme Leila BENSADALLAH	MCB (ENP)
Examinatrice	Mme Saliha HADDOUM	MCA (ENP)

Dédicaces

À mes parents, pour tout ce que vous êtes et tout ce que vous avez fait pour moi. Votre présence, vos conseils, et vos sacrifices silencieux ont bâti les fondations de mon parcours. Rien n'aurait été possible sans votre amour et votre foi constante en moi.

À ma sœur, dont la présence m'a toujours apporté calme et équilibre. Ton soutien, souvent discret mais sincère, m'a porté dans plus de moments que tu ne l'imagines.

À mon grand-père et à ma grand-mère, mes repères et mes lumières. Vous êtes les flammes silencieuses qui m'ont guidé à travers chaque étape. Votre force, vos valeurs et vos prières m'ont accompagné même dans les instants les plus difficiles.

À Rayan, mon binôme mais bien plus encore, un véritable frère de cœur. Merci pour ton implication, ton énergie et ta loyauté. Chaque étape franchie ensemble témoigne de notre complémentarité, et ce n'est que le début et prière que cette amitié, elle, soit sans fin.

À Aniss, un ami comme on en croise peu. Le chemin ne fait que commencer. D'autres défis viendront, d'autres arcs s'enchaîneront, et je suis prêt à les accueillir avec tout ce que notre parcours nous a appris.

À mes amis Yacine, Mehdi, Ibrahim, Chemsou, Raouf et Fares. Merci pour les rires partagés, les débats passionnés, et les moments de relâche qui ont rendu ce parcours plus humain et plus léger. Votre amitié a été une vraie bouffée d'oxygène.

Enfin, un grand merci à toutes les personnes qui ont, de quelque manière que ce soit, contribué à ce travail. Votre aide a compté plus que vous ne l'imaginez.

Salim

Dédicaces

Ma chère mère, dont l'amour inconditionnel et les sacrifices silencieux ont toujours été ma plus grande source de discipline et d'inspiration. Tu es mon pilier et ma force et sans toi rien de cela n'aurait pu être possible

Mon père, pour son soutien discret mais constant, sa patience et sa confiance en moi. Merci pour tes encouragements et ta sagesse.

Mes deux sœurs, Kamelia et Sonia, et mon frère Sami et sa femme Lydia, pour leur amour fraternel et leur présence bienveillante. Merci pour vos mots d'encouragement et votre fierté qui m'ont poussé à aller plus loin et vous rendre fiers.

Ma grand-mère, une pensée particulière à elle dont la tendresse, les prières et la bonté d'âme m'ont accompagné sans faille.

Mon oncle Tahar et ma tante Dahbia, pour leur générosité, leur hospitalité et leur foi en mon avenir. Votre soutien familial m'a été fort précieux.

Mon petit neveu Malik, qui représente l'innocence, l'avenir et l'espoir. Ton sourire a souvent été une source de réconfort dans les moments difficiles.

Enfin, à mon frère de cœur Salim, pour sa loyauté sans faille, sa présence constante et son soutien sincère dans les bons comme dans les moments durs. Ton amitié dépasse les mots.

Et à mes amis Ryad, Mehdi, Ibrahim, Chemsou, Raouf, Fares, Halim, Bilal, des amis en or qui ont contribué chacun à sa manière de loin ou de près à cette réussite.

Enfin, toute ma gratitude va à celles et ceux qui ont, directement ou indirectement, participé à la concrétisation de ce projet. Votre appui a été d'une grande importance, et je vous en remercie du fond du cœur.

Rayan

Remerciements

Nous souhaitons tout d'abord exprimer notre profonde gratitude envers Dieu, le Tout-Puissant, pour Sa guidance constante et les innombrables bénédictions qu'il nous a accordées tout au long de notre parcours.

Ce Projet de Fin d'Études a été réalisé au sein du Laboratoire de Valorisation des Énergies Fossiles du département de Génie Chimique de l'École Nationale Polytechnique d'Alger, sous la direction du Professeur Faroudja Mohellebi et du Docteur Leila Bensadallah.

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à Mme F. Mohellebi et à Mme L. Bensadallah pour avoir accepté avec générosité de superviser notre travail. Leur accompagnement constant, leurs conseils avisés et leur bienveillance ont été d'un apport inestimable tout au long de la réalisation de ce projet, tant sur le plan expérimental que rédactionnel. C'est avec un profond respect que nous leur témoignons ici notre reconnaissance.

Nos remerciements vont également au Professeur Rabah Bouarab, que nous remercions chaleureusement pour l'honneur qu'il nous fait en présidant notre jury. Nous exprimons également notre vive gratitude au Docteur Saliha Haddoum pour le temps qu'elle a bien voulu consacrer à l'évaluation de notre travail.

Nous tenons aussi à remercier Professeur Nabil Mameri et Docteur Naima Djellouli pour leurs aides dans l'accomplissement de cette recherche.

Nous exprimons toute notre reconnaissance à l'ensemble des enseignants du département de Génie Chimique, dont la qualité de l'enseignement et le dévouement ont fortement contribué à notre formation et à notre développement académique.

Enfin, nous tenons à remercier nos familles et particulièrement nos parents, dont le soutien indéfectible, l'amour et les encouragements ont été une source essentielle de force et de motivation.

À toutes celles et ceux, nommés ou non, qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce projet, nous adressons nos remerciements les plus sincères. Votre aide, vos conseils et votre bienveillance ont marqué notre parcours et nous vous en sommes profondément reconnaissants.

ملخص: التأثير المشترك للتخثير الكهربائي والامتزاز على إزالة ملوث دوائي في محلول مائي

هدفت هذه الدراسة إلى إزالة الباراسيتامول من المحاليل المائية الاصطناعية باستخدام عملية هجينة تجمع بين التخثير الكهربائي وامتزاز الكربون المنشط. أُجريت الاختبارات بنظام الدفعات باستخدام أقطاب حديدية وتركيزات أولية من الباراسيتامول تراوحت بين 20 و 50 (2.98 إلى 11.11). لفهم مساهمة (pH) ملغ/لتر. دُرست تأثيرات كتلة الكربون المنشط (0.05 إلى 1 غرام) ودرجة الحموضة الأولية أو عن تآزر فعلي، كل عملية، وما إذا كان التحسن الملحوظ ناتجاً بشكل رئيسي عن إحدى التقنيتين (التخثير الكهربائي أو الامتزاز). أُجري الامتزاز على الكربون المنشط وحده. ويبدو أن إضافة الكربون المنشط تؤثر إيجاباً على كفاءة العملية الهجينة في نطاق قريب من الحياد. تكشف المقارنة بين معالجة الامتزاز وحدها والعملية المقترنة عن القيمة المضافة للتدخل الكهروكيميائي. في حين أن التحسن يظل معتدلاً بالنسبة للتركيزات المنخفضة (20 مجم/لتر⁻¹)، فإنه يصبح مثيراً للاهتمام عند 50 مجم/لتر⁻¹ حيث يحقق النظام الهجين إزالة بنسبة 97.60% مقارنة بـ 94.33% للامتصاص وحده.

الكلمات المفتاحية: الباراسيتامول، التخثير الكهربائي، الامتزاز، العملية الهجينة، أقطاب الحديد

Abstract: Combined Effect of Electrocoagulation and Adsorption on the Removal of a Pharmaceutical Pollutant in Aqueous Solution.

This study aims to remove paracetamol from synthetic aqueous solutions using a hybrid process combining electrocoagulation and adsorption onto activated carbon. Experiments were conducted in batch mode using iron electrodes with initial paracetamol concentrations of 20 and 50 mg. L⁻¹. The influence of activated carbon dosage (0.05 to 1 g) and initial pH (2.98 to 11.11) was investigated. To assess the contribution of each process and determine whether the observed improvement is mainly due to one technique (electrocoagulation or adsorption) or a true synergy, adsorption alone onto activated carbon was also tested. Results show that the addition of activated carbon positively affects the efficiency of the hybrid process in a near-neutral pH range. Comparing single adsorption treatment to the coupled process reveals the added value of the electrochemical intervention. While the improvement is moderate at low concentrations (20 mg. L⁻¹), it becomes significant at 50 mg. L⁻¹, where the hybrid system achieves 97.60% removal versus 94.33% for adsorption alone.

Keywords: Paracetamol, Electrocoagulation, Adsorption, Hybrid process, Iron electrodes.

Résumé : Effet combiné de l'électrocoagulation et de l'adsorption sur l'élimination d'un polluant pharmaceutique en solution aqueuse.

Cette étude a pour objectif l'élimination du paracétamol à partir de solutions aqueuses synthétiques, à l'aide d'un procédé hybride combinant électrocoagulation et adsorption sur charbon actif. Les essais ont été menés en mode batch avec des électrodes en fer et des concentrations initiales en paracétamol de 20 et 50 mg. L⁻¹. L'influence de la masse de charbon actif (0,05 à 1 g) et du pH initial (2,98 à 11,11) a été étudiée. Pour comprendre la contribution de chaque processus à savoir si l'amélioration observée est due principalement à l'une des techniques (électrocoagulation ou adsorption) ou à une synergie réelle, l'adsorption seule sur charbon actif a été effectuée. Il ressort que l'ajout de charbon actif impacte positivement l'efficacité du procédé hybride dans une zone proche de la neutralité. La confrontation entre le traitement par adsorption seule et procédé couplé révèle la plus-value de l'intervention électrochimique. Si l'amélioration demeure modérée pour les faibles concentrations (20 mg. L⁻¹), elle devient intéressante à 50 mg. L⁻¹ où le système hybride atteint une élimination de 97,60 % contre 94,33% pour l'adsorption seule.

Mots-clés : Paracétamol, Électrocoagulation, Adsorption, Procédé hybride, Électrodes en fer

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des symboles

Liste des abréviations

Liste des annexes

Introduction générale	14
Partie 1 : Revue bibliographique	
Chapitre 1 : Polluants émergents	1
1.1 Introduction	19
1.2 Substance/polluant émergent	19
1.3 Principe du polluant émergent	19
1.4 Problématique des résidus médicamenteux dans les milieux aquatiques	20
1.5 Impact des médicaments sur la santé et l'environnement	23
1.6 Le paracétamol	24
1.6.1 Définition	24
1.6.2 Toxicité du paracétamol	25
1.7 Conclusion	26
Chapitre 2 : Charbon actif	27
2.1 Définition	28
2.2 Origines et premières utilisations	28
2.3 Premiers travaux scientifiques et industrialisation	28
2.4 Types de charbon actif	29
2.4.1 Charbon actif en poudre	29
2.4.2 Charbon actif en granulé	29
2.4.3 Charbon actif extrudé	30
2.4.4 Fibres de carbone activé	30
2.4.5 Avantages et inconvénients du charbon en poudre et en grains	30
2.5 Production et matières premières	31
2.6 Processus d'activation	32
2.6.1 Activation physique ou thermique	32
2.6.2 Activation chimique	33
2.7 Structure	34
2.7.1 Structure cristalline	34
2.7.2 Structure chimique	35
2.8 Utilisations	36
2.9 Régénération	36
2.9.1 Régénération à la vapeur	37
2.9.2 Régénération thermique	37
2.9.3 Régénération chimique	37
2.9.4 Régénération électrochimique	37
Chapitre 3 : Adsorption	39
3.1 Introduction	40
3.2 Définition de l'adsorption	40
3.3 Mécanisme de l'adsorption	40
3.4 Facteurs physiques influençant l'adsorption	41
3.4.1 Temps de contact	41

3.4.2 Dose d'adsorbant	41
3.4.3 Température	42
3.4.4 pH	42
3.5 Types d'adsorption	42
3.5.1 Adsorption physique	42
3.5.2 Adsorption chimique	42
3.6 Isothermes d'adsorption	43
3.7 Conclusion	43
Chapitre 4 : Électrocoagulation	45
4.1 Introduction	46
4.2 Définition de l'électrocoagulation	47
4.2.1 Procédé d'électrocoagulation	47
4.2.2 Mode de connexion des électrodes	49
4.2.3 Mécanismes électrochimiques aux électrodes	50
4.2.4 Lois régissant l'électrolyse	50
4.2.5 Facteurs influençant l'électrocoagulation	51
4.2.6 Applications	53
4.2.7 Procédé combiné EC/AD	55
4.2.8 Applications du procédé combiné EC/AD	55
4.3 Conclusion	56
Partie 2 : Essais expérimentaux	
Chapitre 5 : Matériels et Méthodes	58
5.1 Introduction	59
5.2 Réactifs et solutions	59
5.3 Dispositif expérimental du procédé hybride simultané EC–AD	60
5.4 Protocole expérimental du procédé hybride simultané EC–AD	61
5.5 Méthode d'analyse	62
5.6 Conclusion	62
Chapitre 6 : Résultats et Discussion	64
6.1 Établissement de la courbe d'étalonnage	65
6.2 Étude de l'électrocoagulation couplée à l'adsorption sur charbon actif	66
6.2.1 Etude de l'influence de la masse de charbon actif	66
6.2.2 Etude de l'influence du pH initial de la solution	72
6.3 Essais de l'adsorption sur charbon actif seul	78
6.3.1 Effet du temps de contact	78
6.3.2 Etude de l'influence de la température	85
Conclusion générale	91
Références bibliographiques	94

Confidentiel