

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche
Scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université-Ain Temouchent-Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de technologie
Département génie mécanique



Projet de Fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de master en : Génie des procédés des matériaux

Domaine : Sciences et technologie

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie des procédés des matériaux

Thème

**Analyse comparative des techniques
d'élimination d'un colorant alimentaire**

Présentée Par :

Melle. BENDJEBBARA Chaima

Devant le jury composé de :

Pr. AZZI Hadjer

Pr UATBB (Ain Temouchent)

Président

Dr. BELKHADEM Fatima

MCA UATBB (Ain Temouchent)

Examineur

Dr. TABTI Affaf

MCA UATBB (Ain Temouchent)

Encadrent

Année Universitaire 2025/2026

Abstract

The main objective of this Master's thesis was to evaluate and compare the efficiency of two treatment methods for the removal of Patent Blue V (E131) dye extracted from a real pharmaceutical form, Biocalyptol syrup. The two studied techniques are adsorption on an eco-friendly activated carbon prepared from date pits (DPAC) and coagulation-flocculation using aluminum sulfate. UV-Visible spectrophotometric analyses performed at the maximum wavelength $\lambda_{\max} = 640$ nm demonstrated that both processes achieved high decolorization performances, exceeding 91%. Kinetic tracking of the adsorption showed an ultra-fast rate, capturing approximately 90% of the dye within the first 10 minutes. The data perfectly followed the pseudo-second-order model ($R^2 = 1$), confirming an irreversible chemisorption mechanism with zero desorption. At equilibrium, the modeling indicated an excellent fit with the Langmuir isotherm ($R^2 = 1$), validating a homogeneous monolayer coverage with a maximum adsorption capacity of 0.8396 mg/g. In parallel, coagulation-flocculation trials with aluminum sulfate confirmed an efficient and reproducible decolorization, dropping the residual absorbance to minimal values between 0.0187 and 0.0235 due to charge neutralization mechanisms. Although both methods exhibit very close decolorization performances, the adsorption technique on DPAC stands out as the most advantageous solution for this type of effluent. It valorizes an abundant local agricultural by-product in Algeria and constitutes a clean green engineering process that permanently traps the pollutant without requiring expensive industrial reagents and without generating complex secondary chemical sludge to treat.

Keywords: Date pits activated carbon, Coagulation-flocculation, Patent Blue V, Adsorption isotherms, Chemisorption.

RÉSUMÉ

L'objectif de ce travail de mémoire de Master est d'évaluer et de comparer l'efficacité de deux méthodes de traitement pour l'élimination du colorant Bleu Patenté V (E131) extrait d'une forme pharmaceutique réelle, le sirop Biocalyptol. Les deux techniques étudiées sont l'adsorption sur un charbon actif éco-responsable préparé à partir de noyaux de dattes (CAND) et la coagulation-floculation en utilisant le sulfate d'aluminium. Les analyses effectuées par spectrophotométrie UV-Visible à la longueur d'onde maximale $\lambda_{\max} = 640$ nm. Montrent que les deux procédés sont extrêmement performants et permettent d'atteindre des rendements de décoloration optimaux qui dépassent tous les deux la barre des 91 %. L'étude cinétique de l'adsorption montre que le processus est ultra-rapide, fixant environ 90 % du colorant dès les 10 premières minutes de contact. Les données suivent parfaitement le modèle du pseudo-second ordre ($R^2 = 1$), confirmant un mécanisme de chimisorption irréversible avec une désorption

nulle. À l'équilibre, la modélisation indique un excellent ajustement avec l'isotherme de Langmuir ($R^2 = 1$), ce qui valide une rétention en monocouche homogène avec une capacité maximale d'adsorption de 0,8396 mg/g. En parallèle, les essais de coagulation-floculation au sulfate d'aluminium confirment une décoloration efficace et très reproductible, faisant s'effondrer l'absorbance résiduelle à des valeurs infimes situées entre 0,0187 et 0,0235 grâce au mécanisme de neutralisation des charges électriques. Bien que les deux méthodes affichent des performances de décoloration très proches, la technique d'adsorption sur CAND s'impose comme la solution la plus avantageuse pour ce type d'effluent. Elle permet de valoriser un sous-produit agricole local abondant en Algérie et constitue un procédé d'ingénierie verte propre qui emprisonne définitivement le polluant sans nécessiter de réactifs industriels coûteux et sans générer de boues chimiques secondaires complexes à traiter.

Mots-clés : Charbon actif de dattes, Coagulation-floculation, Bleu Patenté V, Isothermes d'adsorption, Chimisorption.

الملخص

يهدف هذا العمل المنجز في إطار مذكرة الماستر إلى تقييم ومقارنة فعالية طريقتين لمعالجة وإزالة الملون الغذائي الأزرق بريفيتي (E131) المستخرج من شكل صيدلاني حقيقي وهو شراب بيوكالبيتول (Biocalyptol). تتمثل الطريقتان المدروستان في الامتزاز على الفحم النشط الصديق للبيئة المحضر من نوى التمر (CAND) والتخثير-التلبد باستعمال كبريتات الألومنيوم.

أظهرت التحاليل المنجزة بواسطة مطيافية الأشعة فوق البنفسجية والمرئية عند الطول الموجي الأعظمي $\lambda_{max} = 640$ نانومتر أن الطريقتين تتمتعان بفعالية عالية جداً، حيث تجاوزت مردودية إزالة اللون في كلتا الحالتين 91%. أوضحت الدراسة الحركية للامتزاز أن العملية سريعة جداً، إذ تم تثبيت حوالي 90% من الصبغة خلال أول 10 دقائق من زمن التلامس. كما أظهرت النتائج توافقاً تاماً مع نموذج الحركية من الرتبة الثانية الكاذبة ($R^2 = 1$) مما يؤكد أن آلية الامتزاز تتم وفق كيمياء الامتزاز (Chimisorption) غير العكوسة مع انعدام ظاهرة إزالة الامتزاز. وعند حالة التوازن، بينت النمذجة توافقاً ممتازاً مع متساوي حرارة Langmuir ($R^2 = 1$) مما يدل على تشكل طبقة أحادية متجانسة على سطح الماز، بسعة امتزاز قصوى بلغت 0.8396 ملغ/غ. بالتوازي مع ذلك، أكدت تجارب التخثير-التلبد باستعمال كبريتات الألومنيوم فعالية كبيرة وقابلية عالية للتكرار في إزالة اللون، حيث انخفضت قيم الامتصاصية المتبقية إلى مستويات منخفضة جداً تراوحت بين 0.0187 و 0.0235 بفضل آلية معادلة الشحنات الكهربائية.

ورغم أن الطريقتين أظهرتا أداءً متقارباً جداً في إزالة اللون، فإن تقنية الامتزاز باستعمال الفحم النشط المحضر من نوى التمر تبرز كأفضل حل لمعالجة هذا النوع من المياه الملوثة، إذ تسمح بتأمين نفايات زراعية محلية متوفرة بكثرة في الجزائر، كما تمثل تقنية نظيفة تدرج ضمن الهندسة الخضراء، قادرة على حجز الملوث بشكل دائم دون الحاجة إلى كواشف صناعية مكلفة أو إنتاج حمأة كيميائية ثانوية معقدة المعالجة.

الكلمات المفتاحية: الفحم النشط من نوى التمر، التخثير-التلبد، الأزرق بريفي تي V، متساويات حرارة الامتزاز، الامتزاز الميائي.

Remercîments

Avant tout, je remercie Dieu le tout-Puissant de m'avoir donné la volonté, la force et la patience nécessaires pour accomplir ce travail dans les meilleures conditions.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mon encadrante, Madame **Tabti Affaf**, pour son accompagnement précieux, sa disponibilité, ses orientations pertinentes ainsi que pour la confiance qu'elle nous a accordée tout au long de la réalisation de ce mémoire. Ses conseils avisés, son sérieux scientifique et son soutien constant ont été d'une grande valeur pour l'aboutissement de ce projet.

J'adresse également mes sincères remerciements à Madame **Belkhadem Fatima** pour avoir accepté d'examiner ce travail et pour l'intérêt porté à mon étude.

J'ai l'honneur de remercier chaleureusement Madame **Azzi Hadjer** d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

Mes remerciements s'étendent également à **Université Belhadj Bouchaib – Aïn Témouchent** ainsi qu'au département de **Génie Mécanique** pour les conditions de travail, les moyens pédagogiques et les connaissances acquises durant mon parcours universitaire.

Je remercie vivement le personnel du laboratoire de **Génie des Procédés** pour leur aide technique, leur disponibilité et leur précieuse collaboration durant la partie expérimentale.

Enfin, j'exprime ma profonde gratitude à mes parents, ma famille ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont soutenue de près ou de loin, par leurs encouragements, leur patience et leur présence tout au long de cette aventure universitaire.

À tous, j'adresse mes plus sincères remerciements.

À moi-même,

Je dédie ce travail à moi-même, en reconnaissance de ma patience, de ma persévérance et de ma détermination tout au long de ce parcours. Je me remercie pour tous les efforts fournis, les défis surmontés et la volonté qui m'a permis d'avancer malgré les difficultés. Je suis fière d'avoir atteint cette étape grâce à mon travail, mon courage et ma confiance en moi. Que cette réussite soit une source de motivation pour poursuivre mes ambitions et relever de nouveaux défis.

À mes parents, Bendjebbara Boucif et Sidi yakoub Sakina

Maman, Papa.... À vous, mes parents bien-aimés, qui m'avez donné la vie et qui n'avez jamais cessé de croire en moi.

Maman, Sakina

Merci pour ton amour infini, ta tendresse, ta patience et ton soutien inconditionnel. Tes sacrifices, tes encouragements et tes prières ont illuminé mon chemin et m'ont accompagnée à chaque étape de mon parcours.

Papa, Boucif ,

Merci d'avoir toujours été ma force et mon soutien. Par tes conseils, ta confiance et tes encouragements constants, tu m'as appris à avancer avec courage et à ne jamais abandonner face aux difficultés.

À vous deux, j'adresse ma profonde gratitude pour tout l'amour, les sacrifices et le soutien que vous m'avez offerts tout au long de ma vie.

Je dédie ce mémoire à ceux qui ont toujours été à mes côtés, avec tout l'amour, le respect et la reconnaissance d'une fille fière d'être la vôtre.

À mes frères, Abdelmoumen et Yacine

À mes frères, complices de ma vie, toujours présents dans les bons comme dans les mauvais moments, qui ont su m'encourager et me soutenir en silence comme en action.

À ma meilleure amie et collègue de toujours Anfel,

À ***Anfel***, ma meilleure amie et ma sœur de cœur, merci pour ta présence constante, ton écoute, ton soutien et tes encouragements. Tu as partagé avec moi les plus beaux moments comme les défis de ce parcours, et ton amitié a été pour moi une véritable source de force et de réconfort.

À la personne la plus chère à mon cœur, merci d'avoir été là ; à celle qui a toujours cru en moi, m'a soutenue, encouragée et rappelé ma force dans les moments difficiles. Ton amour est un refuge et une force... **Sun**

Chaïma

SOMMAIRE

Abstract	II
Remercîments	V
SOMMAIRE	VII
Liste de tableaux.....	XII
Liste des figures	XIII
Liste des abréviations.....	15
Introduction générale.....	1
Références bibliographiques	3
Chapitre 1 : Généralité sur les médicaments et les colorants.....	4
I.1 Introduction :	5
I.2 Généralités sur les eaux colorées :.....	5
I.2.1 Définition d'un colorant :	5
I.2.2 Historique d'un colorant :	6
I.2.3 Classification des colorants :	7
I.2.3.1 Les colorants naturels :	7
I.2.3.2 Les colorants synthétiques :	7
I.2.3.3 Classification chimique :	8
☐ Les colorants azoïques :	8
☐ Les colorants triphénylméthanes :	8
☐ Les colorants anthraquinoniques :	9
☐ Les colorants indigoïdes :	9
☐ Les colorants xanthènes :	9
☐ Les colorants phtalocyanines :	10
☐ Les colorants nitrés et nitrosés :	10
I.2.3.4 Classification tinctoriale :	10
☐ Les colorants acides ou anioniques :	11
☐ Les colorants basiques ou cationiques :	11
☐ Les colorants développés ou azoïques insolubles :	11

□ Les colorants de cuve :	12
□ Les colorants réactifs :	12
□ Les colorants directs :	13
□ Les colorants à mordants :	13
□ Les colorants dispersés :	13
I.2.4 Principaux usages des substances colorantes	14
I.2.5 Impact des colorants sur l'environnement et la santé :	14
I.2.5.1 L'environnement :	14
I.2.5.2 La santé :	15
I.3 Fondement théorique du médicament :	15
I.3.1 Choix du médicament utilisé dans notre étude :	15
I.3.2 Les colorants :	17
I.3.2.1 Bleu patenté V (E131) :	17
I.3.2.2 Jaune orangé S (E110) :	17
I.3.2.3 Jaune de quinoléine (E104) :	18
Références Bibliographiques :	19
<i>Chapitre 2 : Techniques d'élimination des colorants</i>	23
II. Introduction :	24
II.1 Méthodes Physiques :	24
II.1.1 Filtration :	24
II.1.1.1 Définition :	24
II.1.1.2 Principe :	25
II.1.1.3 Types de la filtration :	25
II.1.2 Centrifugation :	26
II.1.2.1 Définition :	26
II.1.2.2 Principe :	27
II.1.2.3 Types de la centrifugation :	27
II.1.3 Adsorption (charbon actif) :	28
II.1.3.1 Définition de l'adsorption :	28
II.1.3.2 Les adsorbants :	28

II.1.3.2.1	Composition chimique du noyau des dattes :.....	29
II.1.3.2.2	Valorisation des noyaux des dattes :.....	30
II.1.3.3	Charbon actif :.....	30
II.1.3.3.1	Définition de charbon actif :.....	30
II.1.3.3.2	Procédés de fabrication du charbon actif :	31
II.1.3.3.3	Les différentes formes du charbon actif :.....	32
II.2	Méthodes Chimiques :.....	33
II.2.1	Précipitation :	33
II.2.1.1	Définition :.....	33
II.2.1.2	Principe :	33
II.2.1.3	Types de la précipitation :.....	33
II.2.2	Coagulation-floculation :	34
II.2.2.1	Définition de la coagulation :.....	34
II.2.2.2	Types de coagulation :.....	34
II.2.2.3	Types de coagulant :	35
II.2.3	Définition de la floculation :	36
II.2.3.1	Types de floculation :	36
II.3	Méthodes physico-chimiques :.....	37
II.3.1	Ultrafiltration :	37
II.3.1.1	Définition :.....	37
II.3.1.2	Principe :	37
II.3.1.3	Types d'ultrafiltration :	37
II.3.2	Dialyse :	38
II.3.2.1	Définition :.....	38
II.3.2.2	Principe :	38
II.3.2.3	Types de la dialyse :.....	38
II.4	Méthodes avancées :	39
II.4.1	Techniques membranaires :	39
II.4.1.1	Définition :.....	39
II.4.1.2	Définition de la membrane :	39

II.4.1.3 Principe :	39
II.4.1.4 Types de membranaires :	40
II.4.2 Procédés d'oxydation avancées :	40
II.4.2.1 Définition :	40
II.4.2.2 Principe :	40
II.4.2.3 Types de procédés d'oxydation avancée :	41
Références Bibliographiques	42
<i>Chapitre 3 : Partie expérimentale</i>	47
III. Introduction	48
III.1 Le médicament et les appareils utilisés	48
III.1.1 Étude d'élimination du colorant du sirop Biocalyptol	49
III.1.2 Préparation de l'adsorbant (noyaux de dattes)	49
III.1.3 Préparation du coagulant (sulfate d'aluminium)	51
III.1.4 Analyse de la surface spécifique des matériaux adsorbants préparés	51
III.1.5 Détermination de la surface spécifique des adsorbants	51
III.1.6 Préparation des solutions de colorant (adsorbats)	52
III.1.7 Préparation de la solution mère du sirop	52
III.1.8 Préparation des solutions filles du colorant	52
III.1.9 Courbe d'étalonnage du colorant Bleu Patenté V	53
III.1.10 Détermination de la longueur d'onde maximale du colorant Bleu Patenté V	53
III.2 Calcul de la quantité adsorbée	54
III.3 Calcul du taux d'élimination du colorant	54
III.4 Résultats et discussion	55
III.4.1.1 Protocole expérimental d'adsorption sur le CAND	55
III.4.1.2 Protocole expérimental de coagulation-floculation au sulfate d'aluminium	55
III.4.1.3 Calcul de la quantité adsorbée et du rendement d'élimination du colorant	56

III.4.2	L'influence des différents paramètres physico-chimiques	57
III.4.2.1	Le temps de contact	57
III.4.2.2	Effet de la masse du matériau	58
III.4.2.3	Effet du pH	59
III.4.3	Étude de la cinétique de rétention	60
III.4.4	Modélisation des isothermes d'adsorption	63
III.4.5	Analyse des résultats de décoloration par coagulation-floculation	66
III.5	Comparaison générale entre les deux méthodes de traitement	67
III.6	Conclusion	68
Références Bibliographiques		69
Conclusion générale		72

Liste de tableaux

Chapitre I : Généralités sur les colorants

Tableau I.1 : Relation entre la fréquence absorbée et la couleur transmise [7]	6
Tableau I.2 : Principaux groupes chromophores et auxochromes, classés par intensité Croissante [10]	7
Tableau I.3 : Composition qualitative de la spécialité [48]	16
Tableau I.4: Identification de colorant Bleu patenté V (131) [50]	17
Tableau I.5: Identification de colorant Jaune orangé S (E110) [54]	18
Tableau I.6: Identification de colorant Jaune de quinoléine (E104) [57]	18

Chapitre II : Techniques d'élimination des colorants

Tableau II.1 : Types de filtrations [10].	25
Tableau II.2 : Les types de centrifugation et leurs caractéristiques [14]	27
Tableau II.3 : Composition chimique des noyaux des dattes de la variété deglet nour [22] [23]	29
Tableau II.4 : Principaux procédés de précipitation [46]	34
Tableau II.5 : Principaux coagulants métalliques et leurs réactions [58]	35

Chapitre III : Partie Expérimentale

Tableau III. 1: Les mesures du pH des solutions filles du sirop Biocalyptol.....	53
Tableau III. 2 : Les calculs des quantités adsorbées et du rendement d'élimination du colorant Bleu Patenté V par CAND pour une concentration initiale de 15 mg/L ($m = 125$ mg, $V = 10$ mL).	56
Tableau III. 3: Les calculs des quantités adsorbées et du rendement d'élimination du colorant Bleu Patenté V par CAND pour une concentration initiale de 20 mg/L ($m = 250$ mg, $V = 10$ mL).	56
Tableau III. 4: Les calculs des quantités adsorbées et du rendement d'élimination du colorant Bleu Patenté V par CAND pour une concentration initiale de 25 mg/L ($m = 250$ mg, $V = 10$ mL).	56
Tableau III. 5: Constantes d'adsorption cinétique des deux modèles pour l'élimination du colorant Bleu Patenté V en présence du charbon actif à base de noyaux de dattes.	62
Tableau III. 6: Les paramètres des isothermes d'adsorption du colorant Bleu Patenté V par CAND.....	64

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les colorants

Figure I.1: Structure du colorant azoïque. [15]	8
Figure I.2: Structure du colorant triphénylméthane. [17]	9
Figure I.3 : Structure du colorant anthraquinonique .[19]	9
Figure I.4: Structure du colorant indigoïde. [21]	9
Figure I.5 : Structure du colorant xanthènes.[23]	10
Figure I.6: Structure du colorant Phtalocyanine. [25].....	10
Figure I.7 : Structure des colorants nitrés et nitrosés .[27]	10
Figure I.8: Structure du colorant acide ou anionique. [30]	11
Figure I.9 : Structures des colorants basiques ou cationiques.[32]	11
Figure I.10 : Structure des colorants développés ou azoïques insolubles. [34]	12
Figure I.11 : Structure des colorants de cuve.[35]	12
Figure I.12 : Structures des colorants réactifs.[37]	13
Figure I.13 : Structures des colorants directs. [39]	13
Figure I.14 : Structure des colorants à mordants. [41]	13
Figure I.15 : Structures des colorants dispersés. [43]	14
Figure I.16 : Sirop biocapitol [47].....	16

Chapitre II : Techniques d'élimination des colorants

Figure II.1: Schéma d'un montage de filtration [5]	25
Figure II.2 : schéma d'une centrifugeuse [6].....	27
Figure II.3 : centrifugation prosses diagramme [13]	27
Figure II.4: Noyaux des dattes [21]	29
Figure II.5 : charbon actif [33].....	31
Figure II.6: Réactions types rencontrées lors l'activation physique [37]	31
Figure II.7: Type de charbons actifs à poudre CAP [40]	32
Figure II.8: Le Charbon Actif Extrudé [41]	32
Figure II.9 : Type de charbon actif granulaire CAG [40]	33
Figure II.10: Protocole de précipitation [45]	33
Figure II.11 : Essai de coagulation dans une usine de traitement [53]	35

Chapitre III : Partie Expérimentale

Figure III. 1: Le sirop Biocalyptol PHOLCODINE.	49
Figure III. 2 : Les appareils utilisés dans le laboratoire.....	49

Liste des figures

Figure III. 3: Les noyaux de dattes.	50
Figure III. 4: Noyaux de dattes séchés	50
Figure III. 5: Noyaux de dattes broyée	50
Figure III. 6: Le charbon actif produit à partir de noyaux de dattes (CAND).....	51
Figure III. 7: La solution mère contenant le sirop Biocalyptol	52
Figure III. 8: Les solutions filles du sirop.	53
Figure III. 9: Courbe d'étalonnage du sirop Biocalyptol PHOLCODINE.	53
Figure III. 10: Spectre d'absorption UV-Visible du colorant Bleu Patenté V (E131).	54
Figure III. 11 : Effet de la dose de sulfate d'aluminium (coagulant) sur coagulation-floculation	56
Figure III. 12 : Solutions filles à concentrations 15 mg/L, 20 mg/L et 25mg/L avec l'adsorbant	57
Figure III. 13 : Adsorption du bleu patenté V par le charbon actif issu de noyaux des dattes	57
Figure III. 14: Effet du temps sur l'adsorption du colorant Bleu Patenté V	58
Figure III. 15: Évolution du rendement d'élimination du colorant bleu patenté V.....	59
Figure III. 16: Effet du pH sur l'adsorption du colorant bleu patenté V	60
Figure III. 17: Modélisation de la cinétique d'adsorption du colorant bleu patenté V par CAND – modèle du pseudo- premier-ordre	61
Figure III. 18: Modélisation de la cinétique d'adsorption du colorant bleu patenté V par CAND – modèle du pseudo- deuxième ordre	61
Figure III. 19 : Modélisation de l'isotherme de Langmuir pour l'adsorption du colorant bleu patenté V par CAND	63
Figure III. 20: Modélisation de l'isotherme de Freundlich pour l'adsorption du colorant bleu patenté V par CAND	64
Figure III. 21: Modélisation de l'isotherme de Temkin pour l'adsorption du bleu patenté V par CAND.....	64
Figure III. 22 : Les spectres d'absorption obtenus pour les quatre essais de coagulation	66

Liste des abréviations

Abs : Absorbance.

n: Coefficient de Freundlich.

R²: Coefficient de corrélation.

R_L: Le facteur de séparation.

K_L : Constante d'affinité

K_F : Capacité d'adsorption

K_T : L'équilibre de l'adsorption

V : Volume de la solution (L).

pH : Potentiel Hydrogène.

λ_{max} : La longueur d'onde.

CAND : Charbon actif à base de noyaux de dattes

Introduction générale

Introduction générale

La contamination des ressources en eau constitue aujourd'hui l'un des problèmes environnementaux les plus préoccupants à l'échelle mondiale. Elle résulte principalement de l'utilisation intensive de nombreux polluants organiques et minéraux issus des activités agricoles, urbaines et industrielles. Parmi ces polluants figurent les colorants synthétiques, largement employés dans différents secteurs industriels. Leur présence dans les rejets liquides représente une source importante de pollution, car ces substances peuvent persister longtemps dans l'environnement et provoquer des effets néfastes sur les écosystèmes aquatiques et la santé humaine [1] .

Afin de réduire l'impact de ces polluants et d'améliorer la qualité des eaux rejetées dans l'environnement, différentes méthodes de traitement ont été développées. Les techniques conventionnelles reposent principalement sur des procédés physico-chimiques tels que l'adsorption sur des matériaux solides comme le charbon actif ou les argiles, ainsi que sur l'oxydation chimique utilisant des agents oxydants comme l'ozone ou le dioxyde de chlore. Toutefois, ces méthodes présentent certaines limites, notamment en raison de leur efficacité parfois insuffisante, de leurs coûts d'exploitation élevés ou encore de la formation de sous-produits secondaires, ce qui nécessite souvent des traitements complémentaires.

Par ailleurs, les colorants synthétiques sont également largement utilisés dans l'industrie alimentaire et pharmaceutique. Les colorants alimentaires synthétiques sont produits industriellement et présentent généralement une meilleure stabilité chimique et un coût plus faible que les colorants naturels, ce qui explique leur utilisation fréquente dans différents produits de consommation. Cependant, leur présence dans les produits et leur rejet dans l'environnement suscitent des préoccupations croissantes chez les chercheurs et les consommateurs [2].

La technique de l'adsorption est la méthode la plus favorable pour l'élimination des colorants est devenue une méthode analytique de choix, très efficace et simple dans son utilisation [3]. Le principe du traitement par adsorption est de piéger les colorants par un matériau solide appelé adsorbant. Il existe, dans la littérature, plusieurs matériaux solides (argiles, zéolites, alumines activées, boue, biomasses, résidus agricoles, sous-produits industriels et charbon actif...) pouvant être utilisés dans des procédés de décoloration des eaux [4].

L'objectif de ce travail est d'étudier l'élimination du médicament, le sirop Biocalyptol (PHOLCODINE) par deux procédés : l'adsorption sur un charbon actif préparé à partir de noyaux des dattes et la coagulation-floculation à l'aide du sulfate d'aluminium.

L'étude s'articule autour de trois étapes principales :

1. Préparation et caractérisation du charbon actif : Cette étape consiste à valoriser les noyaux de dattes en les transformant en charbon actif
2. Étude de l'adsorption du Biocalyptol (pholcodine) : Cette phase vise à évaluer l'efficacité du charbon actif préparé dans l'élimination du médicament à partir d'une solution aqueuse, en étudiant l'influence de différents paramètres expérimentaux.
3. Étude de la coagulation-floculation : Dans cette dernière étape, le sulfate d'aluminium est utilisé comme coagulant afin d'évaluer son efficacité dans l'élimination du Biocalyptol et de comparer les résultats obtenus avec ceux de l'adsorption.

Le manuscrit est divisé en trois parties :

Le premier chapitre comporte :

- Généralités sur les colorants et les colorants pharmaceutiques
- Le médicament utilisés dans cette étude

Dans le deuxième chapitre :

- Les techniques d'éliminations des colorants
- Généralités sur un déchet agricole étudiés (les noyaux de dattes).

Enfin, dans le troisième chapitre :

- Les produits, le matériel et les protocoles expérimentaux utilisés sont exposés.
- Les essais de coagulation-floculation par sulfate d'aluminium ainsi que les expériences d'adsorption sur les noyaux de dattes sont présentés.
- Les résultats expérimentaux obtenus sont ensuite analysés et discutés.
- Les cinétiques et les isothermes d'adsorption du Biocalyptol PHOLCODINE sont étudiées.
- Les isothermes d'adsorption sont traitées par différents modèles (Langmuir, Freundlich et Temkin) afin d'estimer la capacité d'adsorption du médicament et d'évaluer l'influence des paramètres étudiés sur cette capacité.

À partir des résultats expérimentaux, nous présentons une conclusion générale avec quelques perspectives à envisager.

Références bibliographiques

- [1] Tafer R., Photodégradation directe et industrie de micro-polluants organiques (cas d'un colorant azoïque). Thèse de Magister, Université Mentouri Constantine, ;2007.
- [2] Matougui A., Histoire des additifs alimentaires, Toxikoa ; 2011.
- [3] S.R. Shirsath , A.P. Patil , R. Patil , J. B. Naik , P.R. Gogate. S.H. Sonawane. Removal of Brilliant Green from wastewater using conventional and ultrasonically prepared poly (acrylic acid) hydrogel loaded with kaolin clay: A comparative study. Ultrasonics Sonochemistry ;2020.
- [4] Benamraoui Faouzia ; Elimination des colorants cationiques par des charbons actifs synthétisés à partir des résidus de l'agriculture., mémoire de magister ;UNIVERSITE FERHAT ABBAS SETIF ; 2014

***Chapitre 1 : Généralité sur les
médicaments et les colorants***

I.1 Introduction :

Depuis l'Antiquité, les colorants sont utilisés dans plusieurs domaines tels que la teinture, la peinture et le textile. Les premiers colorants étaient principalement d'origine naturelle, extraits de sources végétales, animales ou minérales [1]. Avec le développement de la chimie organique au XIX^e siècle, les colorants synthétiques ont progressivement remplacé les colorants naturels grâce à leur stabilité et à la diversité des couleurs obtenues. Ces composés, souvent aromatiques et contenant le groupe azo ($-N=N-$), découvert par Johann Griess, sont largement utilisés dans différents secteurs industriels [2].

Actuellement, les colorants trouvent de nombreuses applications dans les industries textile, alimentaire et pharmaceutique [3]. Dans le domaine pharmaceutique, ils servent principalement à améliorer l'aspect visuel et l'identification des médicaments. Cependant, certains colorants synthétiques peuvent présenter des effets nocifs sur la santé et l'environnement, ce qui suscite un intérêt croissant pour leur contrôle et leur traitement.

I.2 Généralités sur les eaux colorées :

Les eaux usées issues des activités industrielles présentent une composition très hétérogène selon le type d'industrie. Dans la majorité des procédés, des rejets polluants sont générés suite au contact de l'eau avec des solides, des liquides ou des gaz. Certaines filières, comme les industries alimentaire, chimique ou textile, produisent principalement une pollution dissoute, souvent biodégradable. Toutefois, certaines eaux de process contiennent également des substances toxiques susceptibles de masquer l'évaluation réelle de la charge biodégradable. C'est notamment le cas de l'industrie textile, où l'utilisation de colorants synthétiques entraîne une contamination importante des milieux aquatiques par des rejets fortement chargés en matières colorantes [4].

La production mondiale de colorants est estimée à environ 700 000 tonnes par an, dont près de 140 000 tonnes sont rejetées dans les effluents lors des différentes étapes de fabrication et d'utilisation. Ces rejets contiennent divers polluants tels que des tensioactifs, des biocides, des matières en suspension, des agents de dispersion et de mouillage, ainsi que des colorants et des traces de métaux. Dans la majorité des cas, ces substances présentent une toxicité pouvant affecter de nombreux organismes vivants [5].

I.2.1 Définition d'un colorant :

Les colorants sont des substances chimiques, d'origine naturelle ou synthétique, généralement organiques, qui possèdent la capacité de donner une coloration durable au support sur lequel ils sont appliqués, sous certaines conditions. Ils sont largement utilisés dans divers secteurs tels que le textile, les encres, les peintures, les vernis ou encore l'industrie alimentaire. Dans

Chapitre 1 : Généralité sur les médicaments et les colorants

le contexte industriel moderne, un colorant est considéré comme une formulation contenant le composé organique coloré associé à différents additifs et agents de couplage, permettant d'en faciliter l'application et l'utilisation [6].

Les matières colorantes ont la propriété d'absorber certaines radiations du spectre visible (380 à 750 nm), ce qui leur confère leur couleur. Cette transformation de la lumière blanche en lumière colorée, par réflexion, transmission ou diffusion, est due à l'absorption sélective de l'énergie par des groupements chimiques appelés chromophores. Le tableau I.1 présente la relation entre les longueurs d'onde absorbées et les couleurs observées en transmission des composés colorés [7].

Tableau I.1 : Relation entre la fréquence absorbée et la couleur transmise [7].

λ (Å) (longueur d'onde absorbée)	Couleur observée (transmise)
4000	Violet
4250	Bleu nuit
4500	Bleu
4900	Bleu-vert
5100	Vert
5300	Jaune-vert
5500	Jaune
5900	Orange

I.2.2 Historique d'un colorant :

C'est en 1876 que Witt a mis en évidence que les substances colorées contiennent des groupements spécifiques appelés chromophores, et que leur introduction dans un hydrocarbure incolore engendre l'apparition d'une coloration, formant ainsi un chromogène. Ces chromophores, constitués de systèmes insaturés à doubles liaisons, sont responsables de la couleur observée [8]. Lorsqu'un chromogène comporte en plus des groupements auxochromes, il devient un colorant ; ces derniers influencent à la fois l'intensité de la couleur et la capacité de fixation sur le substrat, notamment grâce à des fonctions comme NH_2 , OH ,

Chapitre 1 : Généralité sur les médicaments et les colorants

COOH ou SO₃H pouvant établir des liaisons ou des interactions avec le milieu [8]. Ainsi, les colorants sont généralement des composés organiques aromatiques insaturés dont la propriété colorante résulte de la présence de chromophores et de l'action des auxochromes favorisant leur adhésion durable aux supports [9]. Le tableau I.2 regroupe les principaux groupements chromophores et auxochromes responsables des propriétés colorantes des molécules organiques.

Tableau I.2 : Principaux groupes chromophores et auxochromes, classés par intensité Croissante [10].

Groupements chromophores	Groupements auxochromes
Azo (-N=N-)	Amine primaire (-NH ₂)
Nitroso (-N=O)	Amine secondaire (-NHR)
Carbonyl (=C=O)	Amine tertiaire (-NR ₂)
Vinyl (-CH=CH-)	Hydroxyl (-OH)
Nitro (-NO ₂)	Alkoxy (-OR)
Sulfure (>C=S)	Donneurs d'électrons (-Cl)

I.2.3 Classification des colorants :

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

I.2.3.1 Les colorants naturels :

Les colorants naturels désignent des composés colorés obtenus à partir de ressources naturelles, notamment les végétaux, les animaux, les minéraux ou encore certains micro-organismes. Leur capacité à teinter différents supports repose sur l'absorption sélective de la lumière dans le domaine du visible, compris approximativement entre 400 et 700 nm. En raison de leur caractère biodégradable et de l'intérêt croissant des consommateurs pour des produits plus sains et respectueux de l'environnement, ces colorants trouvent de nombreuses applications dans les secteurs alimentaire, textile et cosmétique [11-12].

- 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.

I.2.3.2 Les colorants synthétiques :

Aujourd'hui, les colorants synthétiques occupent une place prédominante sur le marché, en grande partie grâce à la possibilité d'ajuster précisément leurs propriétés selon les besoins

industriels. Ils sont généralement issus de dérivés pétrochimiques tels que le benzène et ses composés associés (toluène, naphthalène, xylène, anthracène). Leur synthèse relativement simple, leur production à grande échelle et la large palette de couleurs qu'ils offrent, comparativement aux colorants naturels, expliquent leur utilisation massive dans les domaines de la teinture et de la coloration industrielle.

Par ailleurs, les fabricants commercialisent ces colorants sous des appellations protégées sans toujours divulguer leur structure chimique. L'identification repose alors sur la couleur, le nom commercial et un code spécifique indiquant la teinte (par exemple : R pour rouge, Y pour jaune, G pour vert, B pour bleu, 2B pour une nuance plus bleutée) ou certaines propriétés particulières, comme la résistance à la lumière (L) [13].

I.2.3.3 Classification chimique :

Le classement des colorants selon leur structure chimique est basé sur la nature du groupe chromophore.

➤ Les colorants azoïques :

Les colorants azoïques, illustrés dans la figure [I.1], se caractérisent par la présence d'une liaison azoïque ($-N=N-$) qui relie deux noyaux benzéniques au sein de leur structure moléculaire. De nos jours, cette catégorie constitue la famille de colorants la plus répandue à l'échelle mondiale, représentant plus de la moitié de la production totale des matières colorantes [14].

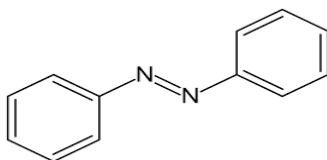


Figure I.1: Structure du colorant azoïque. [15]

➤ Les colorants triphénylméthanes :

Les colorants triphénylméthanes illustrés dans la figure [I.2] sont des composés organiques synthétiques dont la structure repose sur un carbone central lié à trois groupements phényles (aromatiques). Ils se distinguent par leurs couleurs intenses, notamment dans les nuances de bleu, de vert et de violet. Ces colorants trouvent de nombreuses applications, en particulier dans l'industrie textile, la fabrication d'encres, certains usages alimentaires, ainsi qu'en tant qu'indicateurs de pH ou colorants en biologie. Généralement de nature basique (cationique), ils offrent une forte capacité colorante, bien que leur stabilité vis-à-vis de la lumière et des agents chimiques reste limitée [16].

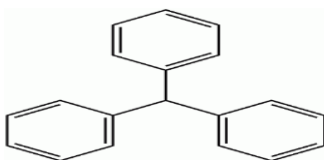


Figure I.2: Structure du colorant triphénylméthane. [17].

➤ **Les colorants anthraquinoniques :**

Sur le plan industriel, les colorants anthraquinoniques [figure I.3], occupent la seconde place après les colorants azoïques en termes d'importance. Leur structure générale, issue de l'anthracène, est caractérisée par la présence d'un noyau quinonique constituant le chromophore, auquel peuvent se fixer divers substituants tels que des groupements hydroxyles ou amines. Ces colorants sont principalement employés pour la teinture des fibres synthétiques, notamment le polyester, l'acétate et le triacétate de cellulose [18]. Leur structure est illustrée dans la figure suivante.

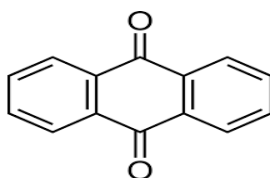


Figure I.3 : Structure du colorant anthraquinonique [19].

➤ **Les colorants indigoïdes :**

Les colorants indigoïdes, illustrés dans la figure [I.4], doivent leur appellation à l'indigo dont ils dérivent. Les différentes modifications de leur structure, notamment par substitution avec du sélénium, du soufre ou de l'oxygène, entraînent des effets hypochromes, donnant lieu à une gamme de teintes allant de l'orange au turquoise. Ces colorants sont employés dans divers domaines, en particulier dans l'industrie textile, mais aussi comme additifs dans certains produits pharmaceutiques, en confiserie et dans des applications de diagnostic médical [10,20].

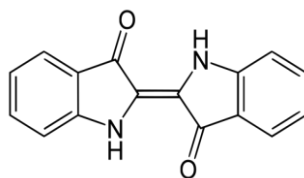


Figure I.4: Structure du colorant indigoïde [21].

➤ **Les colorants xanthènes :**

Les colorants xanthènes [figure I.5] sont des composés issus de dérivés halogénés de la fluorescéine, reconnus pour leur forte fluorescence. Cette caractéristique les rend particulièrement utiles comme traceurs, notamment pour repérer les pollutions en milieu marin ou suivre les écoulements dans les réseaux hydrogéologiques souterrains. En outre, ils sont

employés dans divers secteurs tels que l'industrie alimentaire, la cosmétique, le textile et l'imprimerie [21,22].

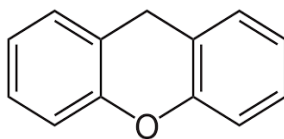


Figure I-5 : Structure du colorant xanthènes[23].

➤ Les colorants phtalocyanines :

Les colorants phtalocyanines [figure I.6] se distinguent par une structure moléculaire complexe organisée autour d'un atome métallique central, le plus souvent le cuivre. Ils sont généralement synthétisés par réaction du dicyanobenzène avec un halogénure métallique tel que le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le cobalt (Co) ou le platine (Pt) [24].

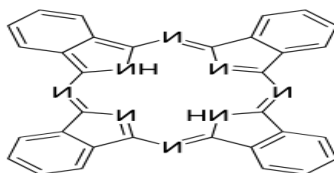


Figure I.6: Structure du colorant Phtalocyanine [25].

➤ Les colorants nitrés et nitrosés :

Les colorants nitrés et nitrosés représentent une famille relativement ancienne et peu étendue. Leur utilisation persiste néanmoins en raison de leur faible coût, attribué à la simplicité de leur structure chimique. Celle-ci se caractérise notamment par la présence d'un groupement nitro (-NO₂) situé en position ortho par rapport à un substituant électro-donneur, tel qu'un groupement hydroxyle ou amine [26]. La figure [I.7] illustre la structure de ces colorants.

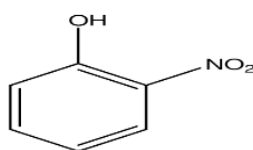


Figure I-7 : Structure des colorants nitrés et nitrosés [27].

I.2.3.4 Classification tinctoriale :

La classification tinctoriale regroupe les colorants en fonction de leurs domaines d'application plutôt que de leur structure chimique. Cette méthode est particulièrement pertinente pour les teinturiers, car elle apporte des indications pratiques sur la solubilité du colorant dans le bain de teinture, son affinité pour les différents types de fibres, ainsi que le mode d'interaction avec le substrat textile. Ces interactions peuvent être de nature ionique, hydrogène, de Van der Waals ou covalente, et jouent un rôle déterminant dans la solidité de la teinture ainsi que dans la fixation du colorant sur la fibre. Ainsi, plusieurs classes tinctoriales sont définies, également

influencées par la nature des auxochromes associés aux chromophores, lesquels modifient les propriétés d'application des colorants [28].

➤ Les colorants acides ou anioniques :

Ces colorants sont solubles dans l'eau grâce à la présence de groupes sulfonates ou carboxylates dans leur structure. Ils doivent leur appellation au fait qu'ils sont capables de teindre les fibres d'origine animale, telles que la laine et la soie, ainsi que certaines fibres synthétiques modifiées comme le nylon et le polyamide, généralement en milieu légèrement acide. Leur fixation sur la fibre repose principalement sur des interactions de type ionique entre les groupements sulfonates du colorant et les fonctions amines présentes dans les fibres textiles, comme l'illustre la figure [I.8], suivante [29].

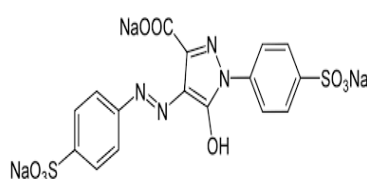


Figure I.8: Structure du colorant acide ou anionique [30].

➤ Les colorants basiques ou cationiques :

Les colorants basiques, également appelés colorants cationiques, sont des sels d'amines organiques qui leur confèrent une bonne solubilité dans l'eau. Leur mécanisme de fixation repose sur l'interaction entre leurs charges positives et les sites anioniques présents sur les fibres textiles. Bien qu'ils soient de moins en moins utilisés pour la teinture de la laine et de la soie, ils ont connu un développement important avec l'apparition des fibres acryliques, sur lesquelles ils permettent d'obtenir des couleurs vives et résistantes [31]. Leur structure est illustrée dans la figure [I.9].

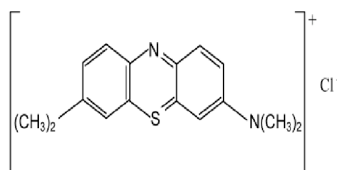


Figure I-9 : Structures des colorants basiques ou cationiques [32].

➤ Les colorants développés ou azoïques insolubles :

Les colorants azoïques insolubles sont formés in situ directement sur la fibre textile par réaction entre un composé diazoïque et un agent de couplage. Ils sont principalement utilisés pour la teinture des fibres cellulosiques, auxquelles ils confèrent des teintes vives et intenses. Un exemple de ce type de colorant est présenté dans [la figure I.10] [33].

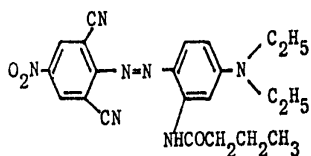


Figure I-10 : Structure des colorants développés ou azoïques insolubles [34].

➤ Les colorants de cuve :

Les colorants de cuve illustrés dans la figure [I.11], sont des composés insolubles dans l'eau, appliqués sur les fibres après transformation par réduction en milieu alcalin en une forme leuco, soluble. Une fois la teinture effectuée, une étape d'oxydation permet de régénérer la forme initiale insoluble du colorant fixée dans la fibre. Ces colorants sont particulièrement appréciés pour leur excellente tenue face aux agents de dégradation tels que le lavage et l'exposition à la lumière. Ils sont largement utilisés pour la coloration des fibres cellulosiques comme le coton, le lin et la rayonne, notamment dans la teinture du denim avec l'indigo. Sur le plan chimique, ils regroupent différentes familles telles que les anthraquinones, les colorants soufrés, les phthalocyanines et les indigoïdes [35].

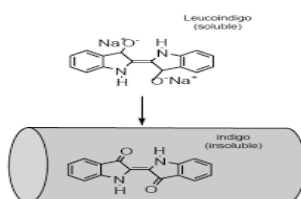


Figure I-11 : Structure des colorants de cuve [35].

➤ Les colorants réactifs :

Les colorants réactifs représentent la classe la plus récente de colorants introduite sur le marché. Ils sont largement utilisés, notamment dans le secteur de l'habillement, bien que leur résistance à la lumière soit souvent jugée suffisante principalement pour des applications en ameublement. Il s'agit de colorants de synthèse constitués d'une partie chromogène portant le groupe coloré, associée à un ou plusieurs groupements réactifs électrophiles capables de former des liaisons covalentes stables avec les fibres textiles. Ces liaisons se réalisent principalement avec les fonctions hydroxyles de la cellulose, les groupements NH_2 et NH des polyamides, et plus rarement avec les fonctions amines ou sulfures des protéines de la laine [36]. Les structures caractéristiques de ces colorants sont présentées dans La [figure I-12] suivante.

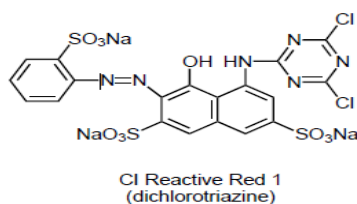


Figure I-12 : Structures des colorants réactifs [37].

➤ Les colorants directs :

Les colorants directs sont des colorants porteurs de charges électriques, positives ou négatives, qui leur permettent d'interagir par attraction électrostatique avec les charges présentes à la surface des fibres. Ils se distinguent par leur forte affinité pour les fibres cellulosiques, qu'ils peuvent teindre directement, sans recours à des mordants. Cette aptitude est essentiellement liée à la structure plane de leurs molécules, laquelle favorise une meilleure orientation et une interaction efficace avec la surface fibreuse [38]. Les structures caractéristiques de ces colorants sont présentées dans la [figure I-13] suivante

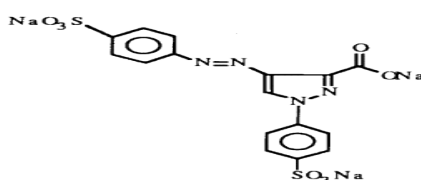


Figure I-13 : Structures des colorants directs [39].

• Les colorants à mordants :

Les colorants à mordants sont des composés qui possèdent en général un groupement fonctionnel capable d'interagir fortement avec des sels métalliques tels que ceux de l'aluminium, du chrome, du cobalt, du cuivre, du nickel ou du fer. Cette interaction conduit à la formation de complexes colorés stables au sein du textile, améliorant ainsi la fixation du colorant sur la fibre [40]. Les structures caractéristiques de ces colorants sont présentées dans La [figure I-14] suivante

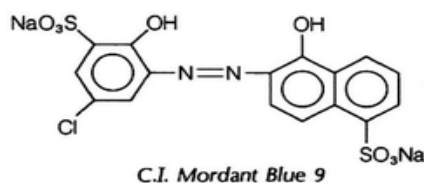


Figure I-14 : Structure des colorants à mordants [41].

• Les colorants dispersés :

Ces colorants présentent une très faible solubilité dans l'eau. Leur application ne repose donc pas sur une dissolution, mais sur leur dispersion sous forme de fines particules dans le bain de

teinture, ce qui justifie leur appellation. Les colorants dispersés appartiennent généralement à différentes familles chimiques, notamment les composés azoïques ou nitrosés (aux teintes jaune à rouge), les dérivés anthraquinoniques (bleu et vert) ainsi que les complexes métallifères couvrant une large gamme de couleurs [42]. La structure de ce type de colorant est illustrée dans [la figure I-15] suivante.

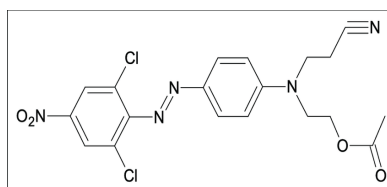


Figure I-15 : Structures des colorants dispersés [43].

I.2.4 Principaux usages des substances colorantes

Les colorants sont utilisés dans de nombreux secteurs industriels et présentent une large diversité d'applications. Parmi les principaux domaines d'utilisation, on peut citer [44] :

- Pigments dans l'industrie des matières plastiques.
- Encres et papier dans le domaine de l'imprimerie.
- Colorants alimentaires dans l'industrie agroalimentaire.
- Pigments pour peintures, matériaux de construction et céramiques dans le secteur du bâtiment.
- Colorants capillaires dans l'industrie cosmétique.
- Colorants et conservateurs dans l'industrie pharmaceutique.
- Additifs pour carburants et huiles dans l'industrie automobile et autres secteurs.
- Colorants textiles destinés à des usages vestimentaires, décoratifs, dans le bâtiment, le transport ainsi que dans le domaine médical.

I.2.5 Impact des colorants sur l'environnement et la santé :

L'utilisation des colorants peut engendrer des impacts négatifs, aussi bien sur l'environnement que sur la santé humaine.

I.2.5.1 L'environnement :

- Eutrophisation : Sous l'action des micro-organismes, les colorants peuvent se dégrader en libérant des ions nitrates et phosphates dans le milieu naturel. Lorsque ces composés minéraux sont présents en excès, ils deviennent toxiques pour la faune aquatique et peuvent compromettre la qualité de l'eau potable. Leur assimilation par les végétaux aquatiques favorise une croissance excessive et déséquilibrée, entraînant une diminution de l'oxygène dissous, notamment en profondeur, en perturbant les processus de photosynthèse dans les cours d'eau et les eaux stagnantes.

- Couleur, turbidité, odeur : L'accumulation de matières organiques dans les cours d'eau peut entraîner l'apparition de mauvaises odeurs, de goûts désagréables, une prolifération bactérienne ainsi que des colorations inhabituelles. Selon Willmott et al., une coloration devient perceptible par l'œil humain à partir d'une concentration de $5 \times 10^{-6} \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. Au-delà de l'aspect esthétique, les agents colorants peuvent également perturber la pénétration de la lumière dans l'eau, ce qui inhibe la photosynthèse des plantes aquatiques [17].

I.2.5.2 La santé :

Les colorants sont dangereux pour la santé humaine, ils peuvent être :

- Mutagènes.
- Génotoxiques.
- Entraîner des cancers de la thyroïde.
- Entraîner des tumeurs des glandes surrénales.
- Contenir des substances cancérogènes.
- Avoir des actions sur le système nerveux central.
- Inhibition ou déficit de certaines enzymes.
- Augmentation de la perméabilité intestinale [45].

I.3 Fondement théorique du médicament :

I.3.1 Choix du médicament utilisé dans notre étude :

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressés au médicament Biocalyptol®, un sirop indiqué pour le traitement des toux sèches et d'irritation, choisi comme source de polluant modèle. Il contient de la pholcodine, qui constitue le principe actif du médicament, et non un simple additif. Ce médicament renferme également des excipients, notamment un mélange de colorants (« colorant vert menthe ») composé du bleu patenté V (E131), du jaune orangé S (E110) et du jaune de quinoléine (E104), responsables de sa coloration. Parmi ces colorants, le bleu patenté V (E131) est un colorant synthétique connu pour pouvoir provoquer une pollution visuelle, ce qui justifie un intérêt particulier dans les études environnementales [46]. Ces composés seront utilisés comme molécules cibles afin d'évaluer l'efficacité des procédés de traitement appliqués à des substances pharmaceutiques actives, en particulier celles présentant un caractère coloré. La figure ci-dessous représente la boîte de ce médicament.



Figure I.16 : Sirop Biocalyptol [47].

Le Biocalyptol® est composé d'un principe actif et de plusieurs excipients, incluant l'eau purifiée, présentés dans le tableau suivant.

Tableau I .3 : Composition qualitative de la spécialité [48].

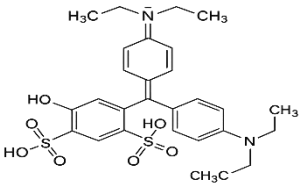
Composant	Forme (description)	Rôle principal
Pholcodine	Liquide (solution)	Principe actif antitussif (calme la toux sèche).
Éthanol 96% (alcool)	Liquide	Solvant / co-solvant, excipient à effet notoire.
Eau purifiée	Liquide	Solvant principal du sirop.
Saccharose (ou solution de saccharose)	Poudre blanche dissoute / solution	Agent édulcorant et liant.
Cinéole	Liquide (essence)	Excipient aromatique et fluidifiant des sécrétions.
Bleu patenté V (E131)	Poudre colorée (dissoute)	Colorant (bleu).
Jaune orangé S (E110)	Poudre colorée (dissoute)	Colorant (jaune), excipient à effet notoire.
Jaune de quinoléine (E104)	Poudre colorée (dissoute)	Colorant (jaune).
Chlorure de sodium (sodium)	Poudre cristalline (NaCl)	Stabilisant / ajustement de l'osmolarité / partie du système colorant vert menthe.

I.3.2 Les colorants :

I.3.2.1 Bleu patenté V (E131) :

Le bleu patenté V est un colorant alimentaire synthétique de teinte bleu foncé à bleu violacé, utilisable dans les produits halal, casher et végétariens. Il peut se présenter sous différentes formes, notamment sous forme de poudre, de granulés bleu foncé ou encore de solution aqueuse bleue. Ce colorant est également connu sous plusieurs appellations telles que CI Blue n°5, Acid Blue 3, L-Blau 3, C-Blau 20, Patent Blue V ou Sky Blue. Il possède une forte solubilité dans l'eau et peut parfois contenir de l'aluminium sous forme de laque aluminique, métal suspecté d'être impliqué dans certaines maladies neurodégénératives comme les maladies d'Alzheimer et de Parkinson. À l'état pur, cette substance peut présenter un danger en cas d'ingestion, d'inhalation ou de contact direct avec la peau [49]. Le tableau suivant représente certaines des propriétés de ce colorant bleu patenté V (131).

Tableau I.4: Identification de colorant Bleu patenté V (131) [50].

Formule moléculaire brute	Sel de sodium : $C_{27}H_{31}N_2NaO_7S_2$ Sel de calcium : $(C_{27}H_{31}N_2O_7S_2)_2Ca$
Nom IUPAC	Sel de calcium ou de sodium de l'hydroxyde de[4-[4-diéthylamino-2',4'-disulfo-benzhydrylidène]cyclohexa-2,5-diène-1-ylidène]diéthylammonium (sel interne).
. Type de molécule	Triarylméthane synthétique
.Structure chimique	
Masse molaire :	582,67 g/mol

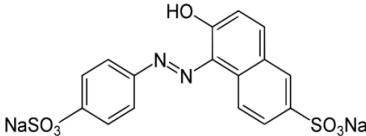
I.3.2.2 Jaune orangé S (E110) :

Le E110, appelé Sunset Yellow FCF (CI 15985), est un colorant azoïque synthétique de couleur jaune à orangée, utilisé pour intensifier ou rétablir l'aspect visuel des produits industriels [51]. Il se présente sous forme d'une poudre soluble dans l'eau et possède une structure chimique caractérisée par un groupement azo ($-N=N-$) lié à des noyaux aromatiques, typique de cette classe de colorants [52]. Synthétisé à partir d'amines aromatiques, il est largement employé dans les secteurs alimentaire, pharmaceutique et cosmétique. Néanmoins, une consommation

Chapitre 1 : Généralité sur les médicaments et les colorants

excessive peut engendrer des effets néfastes sur la santé [53]. Le tableau suivant représente certaines des propriétés de ce colorant jaune orangé S (E110).

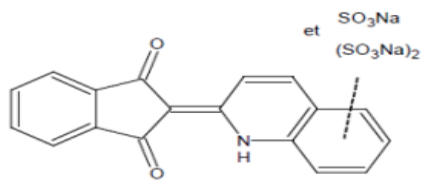
Tableau I.5: Identification de colorant Jaune orangé S (E110) [54].

Formule moléculaire brute	$C_{16}H_{10}N_2Na_2O_7S_2$
Nom IUPAC	Disodium 6-hydroxy-5-[(4-sulfophenyl)azo]-2-naphthalenesulfonate
. Type de molécule	Colorant Azoïque synthétique
.Structure chimique	
Masse molaire :	452,37 g/mol

I.3.2.3 Jaune de quinoléine (E104) :

Le jaune de quinoléine (E104) est un colorant alimentaire synthétique de couleur jaune intense, utilisé pour améliorer l'aspect visuel des produits industriels. Il s'agit d'un composé chimique obtenu par synthèse, appartenant à une famille de colorants organiques et constitué d'un mélange d'isomères [55]. Découvert en 1882, il est largement employé dans les boissons, les confiseries et certains médicaments. Toutefois, son utilisation est réglementée dans plusieurs pays en raison des risques potentiels pour la santé, notamment des réactions allergiques et des phénomènes d'hypersensibilité [56]. Le tableau suivant représente certaines des propriétés de ce colorant jaune de quinoléine (E104).

Tableau I.6: Identification de colorant Jaune de quinoléine (E104) [57].

Formule moléculaire brute	$C_{18}H_9NNa_2O_8S_2$
Nom IUPAC	2-(1,3-dioxindan-2-yl)quinoléine-6,8-disulfonate de sodium
. Type de molécule	Colorant Quinoléine synthétique
.Structure chimique	
Masse molaire :	477,38 g/mol

Références Bibliographiques :

- [1] Welham A. The theory of dyeing (and the secret of life). J Soc Dyers Colour ;2000.
- [2] Weaver MA, Shuttleworth L. Dyes and pigments. London: Butterworths; 1982.
- [3] Capon M, Valette C, Courilleau V. Chimie des couleurs et des odeurs. Cultures et Techniques ; 1993.
- [4] Sehailia K, Talbi F. Étude d'adsorption du Rouge Congo en phase aqueuse sur les feuilles de palmier [mémoire de master]. Ouargla: Université Kasdi Merbah Ouargla; 2019..
- [5] Belhadji H, Moumeni O. Étude des performances épuratoires d'une station d'épuration des eaux usées de l'industrie textile : cas de la STEP de Sebdou [mémoire de master]. Tlemcen: Université Abou Bekr Belkaid; 2016.
- [6] INRS. Dermatoses professionnelles aux colorants. Document pour le médecin du travail. Paris: INRS; 2004.
- [7] Medekhel A. Adsorption du bleu de méthylène par charbon actif [mémoire de master]. El Oued: Université Echahid Hamma Lakhdar; 2018.
- [8] Chebli D. 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]. Sétif: Université Ferhat Abbas; 2012
- [9] Robert D, Parra S, Pulgarin C, Krzton A, Weber JV. Appl Surf Sci ; 2000.
- [10] Zawlotzki Guivarch E. Traitement des polluants organiques en milieux aqueux par procédé électrochimique d'oxydation avancée « Electro-Fenton » : application à la minéralisation des colorants synthétiques [thèse de doctorat]. Marne-la-Vallée: Université de Marne-la-Vallée; 2004.
- [11] Nassau K. The fifteen causes of color: the physics and chemistry of color. Color Res Appl ; 1987.
- [12] Singh T, Pandey VK, Dash KK, Zanwar S, Singh R. Natural bio-colorant and pigments: sources and applications in food processing. J Agric Food Res ; 2023.
- [13] Bouafia S. Dégradation des colorants textiles par procédés d'oxydation avancée basée sur la réaction de Fenton : application à la dépollution des rejets industriels [thèse]. Paris: Université Paris-Est; 2010.
- [14] https://fr.wikipedia.org/wiki/Colorant_azo%C3%AFque
- [15] Khelloul N. Dégradation d'un mélange de colorants par plasma glidarc : étude de l'influence de différentes substances mémoire de master. Mostaganem: Université Abdelhamid Ibn Badis; 2012.

- [16] Hunger K. Colorants industriels : chimie, propriétés, applications. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2003.
- [17] Bouanimba N. Étude 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. Constantine: Université Constantine; 2014.
- [18] Larbi F. Contribution à la décoloration des eaux résiduaires textiles par des argiles naturelles thèse de magister. Oran: Université d'Oran Es-Senia; 2008.
- [19] <https://www.dyestuffscn.com/info/anthraquinone-dyes-38410287.html>
- [20] https://fr.wikipedia.org/wiki/Indigo_%28teinture%29
- [21] Bauer JP, Kalt A. J Photochem Photobiol A Chem ; 2001.
- [22] Stolte M, Vieth M. Removal of Indigo Carmine from aqueous solution by using activated carbon. Acta Endosc ; 2001.
- [23] Singh N. Xanthine scaffold: scope and potential in drug development ; 2018.
- [24] https://fr.wikipedia.org/wiki/Phtalocyanine_de_cuivre
- [25] Winnacker K, Küchler L. Chemical Technology: Organic Technology. New York: Hanser Publishers; 1986.
- [26] Merouni DJR. Traitements azoïque et anthraquinonique par procédés d'oxydation avancée (POA) thèse de doctorat. Mostaganem: Université Abdelhamid Ibn Badis; 2011.
- [27] Koheil A. Activation d'un précurseur naturel en vue de l'élimination des polluants organiques dans les solutions simples et binaires mémoire de master ; 2016.
- [28] Viallier P. La teinture : principes, procédés, applications. Paris: Tec & Doc; 1992.
- [29] Dieval F, Fafet JF. Colorants pour les matériaux textiles : définition et propriétés. Techniques de l'Ingénieur ;2022
<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/sciences-fondamentales-th8/constantes-chimiques-des-solvants-et-produits-42337210/colorants-pour-les-materiaux-textiles-k350/definition-et-proprietes-k350v2niv10001.html>.
- [30] Chouikret L, Laifa H. Étude de la dégradation du bleu de méthylène et de la production de l'énergie par le procédé Galvano-Fenton mémoire de master. Annaba: Université Badji Mokhtar; 2020.
- [31] Skychem Group. Cationic dyes for modified polyester: Chemistry and dyeing conditions ; 2026 : <https://skychemi.com/fr/cationic-dyes-for-modified-polyester/>
- [32]. Oberhammer H, Zeil W. On the molecular structure of (CH₃)₂NSO₂N(CH₃)₂ as studied by gas electron diffraction. J Mol Struct ; 1973

- [33] Ben Mansour H, Boughzala O, Dridi D, Barillier D, Chekir-Ghedira L, Mosrati R. Textile dyes as a source of wastewater contamination: screening of the toxicity and treatment methods. J Water Sci ; 2010.
- [34] Bühler U. Colorants azoïques insolubles dans l'eau, leur préparation et leur utilisation. In: Classification des colorants. Paris: Lavoisier; 1981.
- [35] Khetib KR. Bio-dépollution de l'eau contaminée par les polluants organiques mémoire de master. Blida (Algérie): Université Saad Dahlab Blida 1; 2020
- [36] Saidi FZ. Élimination du bleu de méthylène par des procédés d'oxydation avancée thèse de magister. Tlemcen: Université Abou Bekr Belkaid; 2013.
- [37] <https://textileschool4u.blogspot.com/2013/12/dichloro-s-triazine-dyes.html>
- [38] Zaki J, Eghbil A. Méthodes de traitement des eaux polluées par les colorants [mémoire de master]. M'sila: Université Mohamed Boudiaf; 2020.
- [39] Tiankun Chemical. What Is Direct Dyes And Its Characteristics? ;2023: <https://www.tiankunchemical.com/fr/What-Is-Direct-Dyes-And-Its-Characteristics-id68962407.html>
- [40] Ahtabi OCN. Extraction des colorants d'un aliment et leurs caractérisations [mémoire de licence]. Saïda: Université Dr Moulay Tahar; 2014.
- [41] Donzé JJ. Classes de colorants. In: Colorants textiles. Paris: Techniques de l'Ingénieur; 1988.
- [42] Dieval F, Fafet JF. Définition et propriétés des colorants pour les matériaux textiles ;2022.
- [43] Cardozo Filho L. Dyeing of polyethylene terephthalate fibers with a disperse dye in supercritical carbon dioxide ; 2014.
- [44] Salmi D, Slimani K. Application de l'électro-flottation et électrocoagulation pour l'élimination d'un colorant textile : cas du Bleu d'Indanthrène RS mémoire. Béjaïa: Université A Mira; 2014.
- [45] Ghedabna D. Élimination des colorants bleu de méthylène et jaune d'alizarine des eaux par adsorption sur un biomatériau mémoire de master. Oum El Bouaghi: Université Larbi Ben M'hidi; 2016.
- [46] <https://www.anism.sante.fr/>
- [47] <https://www.vidal.fr/>
- [48] : [Site officiel de l'ANSM.](#)
- [49] <https://www.avenir-bio.fr/additif%2CE131%2Cbleu-patente-v-food-blue-5-sulphan-blue.html>
- [50] <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>

[51] <https://www.doctissimo.fr/>

[52] Classen S, Olland S, Berger JM. Structure of the topoisomerase II ATPase region and its mechanism of inhibition by the chemotherapeutic agent ICRF-187. Proc Natl Acad Sci USA ;2003

[53] Zheng Y. Current status of electrochemical detection of sunset yellow based on bibliometrics. Food Chem Toxicol ;2022.

[54] Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). Sunset Yellow FCF. WHO Food Additives Series. Geneva: World Health Organization; 2011..

[55] <https://foodcom.pl/fr/term-e/e104/>

[56] Reynal B, Multon JL. Additifs et auxiliaires de fabrication dans les industries agroalimentaires. 4e éd. Paris: Lavoisier, Tec et Doc; 2009.

[57] Scientific Committee on Consumer Safety (SCCS). Opinion on Acid Yellow 3 ; 2021.

***Chapitre 2 : Techniques
d'élimination des colorants***

II. Introduction :

De nos jours, les colorants synthétiques sont largement utilisés dans plusieurs secteurs industriels, notamment dans l'industrie textile, ce qui engendre la production d'importantes quantités d'effluents contaminés. Une fraction significative de ces colorants est rejetée dans les eaux usées au cours des différentes étapes de fabrication et de teinture [1,2]. Contribuant ainsi à une pollution environnementale préoccupante. Ces composés se caractérisent par leur forte stabilité chimique, leur toxicité potentielle et leur résistance à la dégradation naturelle, ce qui les rend persistants dans les milieux aquatiques [3].

Les effluents issus de l'industrie textile présentent une composition complexe et variable, contenant des matières en suspension ainsi que des charges organiques élevées, généralement évaluées par la demande chimique en oxygène (DCO) et la demande biologique en oxygène sur cinq jours (DBO5). Cette complexité rend leur traitement particulièrement difficile et nécessite la mise en œuvre de procédés appropriés. Par ailleurs, le renforcement des réglementations environnementales impose aux industries de traiter efficacement leurs rejets avant leur déversement dans le milieu naturel.

Face à ces contraintes, il devient indispensable de recourir à différentes techniques de traitement. Aucune méthode unique ne permet d'éliminer complètement les colorants, ce qui justifie l'intérêt de combiner plusieurs approches complémentaires. Ainsi, les techniques d'élimination des colorants regroupent des méthodes physiques, chimiques, physico-chimiques ainsi que des procédés avancés, visant à améliorer la qualité des effluents et à réduire leur impact sur l'environnement.

Dans ce contexte, ce chapitre présente les principales méthodes utilisées pour l'élimination des colorants, en mettant l'accent sur leurs principes de fonctionnement, ainsi que leur efficacité dans le traitement des effluents industriels.

II.1 Méthodes Physiques :

Les méthodes de traitement physiques regroupent des procédés de séparation visant à éliminer les matières en suspension et certaines impuretés de l'eau, en reposant uniquement sur des mécanismes physiques, sans altérer la nature chimique des polluants [4].

II.1.1 Filtration :

II.1.1.1 Définition :

La filtration est un procédé de séparation physique qui permet de séparer un fluide (liquide ou gaz) des particules en suspension en le faisant circuler à travers un matériau poreux appelé

Chapitre 2 : Techniques d'élimination des colorants

milieu filtrant [5]. Ce dernier agit en retenant les particules solides selon leur taille, tandis que le fluide passe au travers et constitue le filtrat (ou perméat) [6]. Les substances retenues forment le résidu, aussi désigné sous le terme de retentât ou gâteau de filtration [7]. Cette méthode est couramment utilisée pour la clarification des liquides ou la récupération des solides dans divers domaines, notamment l'agroalimentaire, la pharmacie et les procédés industriels [8].

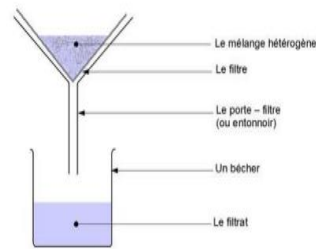


Figure II-1: Schéma d'un montage de filtration [5]

II.1.1.2 Principe :

La filtration est un procédé de séparation qui élimine les particules solides d'un liquide grâce à un milieu filtrant poreux. Sous l'effet d'une différence de pression, le liquide traverse le filtre tandis que les particules sont retenues. Au cours du fonctionnement, le colmatage du filtre entraîne une augmentation des pertes de charge, nécessitant un rétro lavage. La filtration permet également d'améliorer la qualité de l'eau en réduisant la turbidité, la couleur, les odeurs, les bactéries et certains composés tels que l'ammonium [9].

II.1.1.3 Types de la filtration :

- La filtration gravitaire (ou gravimétrique),
- La filtration sous vide,
- La filtration sous pression.

Ce tableau présente les principaux types de filtration, en mettant en évidence leurs principes ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Tableau II-1 : Types de filtrations [10].

Chapitre 2 : Techniques d'élimination des colorants

Types de filtration :	Principe :	Avantages :	Inconvénients :
Filtration gravitaire (gravimétrique)	Passage naturel du liquide à travers un milieu filtrant sous l'effet de la gravité. Les solides sont retenus (résidu) et le liquide récupéré constitue le filtrat	- Méthode simple et facile à mettre en œuvre - Faible coût - Ne nécessite pas d'équipement complexe	- Procédé lent - Faible efficacité pour les particules fines - Débit faible
Filtration sous vide	Utilisation d'une dépression pour accélérer la filtration et améliorer la séparation.	- Procédé rapide - Bonne efficacité de séparation - Adaptée aux particules fines - Meilleur rendement	- Nécessite un matériel spécifique - Coût plus élevé - Risque de colmatage du filtre
Filtration sous pression	Le liquide est forcé à travers le filtre sous pression élevée dans un système fermé.	- Très rapide - Haute efficacité - Fonctionnement continu possible - Distribution directe sous pression	- Installation complexe - Coût élevé - Maintenance difficile - Contrôle rigoureux nécessaire

II.1.2 Centrifugation :

II.1.2.1 Définition :

La centrifugation est une technique de séparation physique qui consiste à soumettre un mélange à une rotation à grande vitesse afin de générer une force centrifuge. Cette force provoque la séparation des constituants selon leur densité, en entraînant les éléments les plus denses vers l'extérieur du récipient, tandis que les plus légers restent au centre ou en surface. Elle permet ainsi de traiter différents types de mélanges, notamment liquide-liquide ou solide-liquide, de manière rapide et efficace.



Figure II-2 : schéma d'une centrifugeuse [6].

II.1.2.2 Principe :

Les particules en suspension dans un liquide subissent plusieurs forces : la gravité descendante, la poussée d'Archimède ascendante, la friction et surtout la force centrifuge $F_c = m \cdot r \cdot \omega^2$. Cette force, beaucoup plus intense que la gravité (jusqu'à 10 000 g), fait sédimenter les particules les plus denses vers l'extérieur, selon la loi de Stokes qui relie vitesse de sédimentation, densité, taille et viscosité du milieu. L'appareil utilisé est une centrifugeuse tournante à haute vitesse (2 000 à 10 000 tr/min) [11,12].



Figure II-3 : centrifugation processus diagramme [13]

II.1.2.3 Types de la centrifugation :

Les différents types de centrifugation sont utilisés selon le principe de séparation et l'objectif recherché. Le tableau suivant présente les principales méthodes ainsi que leurs caractéristiques.

Tableau II-2 : Les types de centrifugation et leurs caractéristiques [14].

Type de centrifugation	Principe de séparation	Caractéristiques principales
Centrifugation différentielle	Séparation par cycles successifs à vitesse croissante	Les grosses particules sédimentent en premier (faible vitesse), les petites à haute vitesse
Centrifugation en gradient de densité	Séparation selon la densité dans un gradient (ex : saccharose)	Les particules migrent jusqu'à atteindre une densité égale (isopycnie)

Chapitre 2 : Techniques d'élimination des colorants

Centrifugation analytique	Analyse des propriétés des particules	Permet de mesurer la sédimentation et la masse moléculaire sans récupération des fractions
----------------------------------	---------------------------------------	--

II.1.3 Adsorption (charbon actif) :

II.1.3.1 Définition de l'adsorption :

L'adsorption est un phénomène interfacial au cours duquel des molécules issues d'un gaz ou d'un liquide, appelées adsorbats (ou solutés), se fixent à la surface d'un solide appelé adsorbant. Ce mécanisme, spontané et exothermique, est lié aux interactions entre les molécules à l'interface solide-fluide.

Elle est couramment exploitée dans le traitement de l'eau et de l'air pour éliminer diverses substances indésirables, en particulier des composés organiques peu biodégradables, et constitue généralement une étape de purification ou de finition [15].

II.1.3.2 Les adsorbants :

Les adsorbants naturels sont des matériaux issus principalement de ressources végétales. Ils présentent plusieurs avantages, notamment leur abondance, leur coût réduit et leur caractère biodégradable. Leur efficacité repose en grande partie sur leur composition chimique, riche en constituants tels que la cellulose, l'hémicellulose et la lignine, ainsi que sur la présence de groupes fonctionnels (hydroxyles, carboxyles, phénoliques). Ces éléments favorisent les interactions avec différents types de contaminants, ce qui explique leur potentiel en adsorption [16].

Parmi ces matériaux, Les noyaux du palmier dattier sont des déchets de beaucoup d'industries de transformation des dattes, ils constituent un sous-produit très intéressant [17]. Ces derniers sont entourés d'un endocarpe parcheminé ; de forme allongée, plus ou moins volumineux, lisses ou pourvus de protubérances latérales en arêtes ou ailettes, avec un sillon ventral Figure II-4 [18], ayant une consistance dure, les dimensions de noyau de la datte sont très variables, de 0.5 à 3cm de longueur et d'un poids de 0.4 à 2 grammes, ils représentent une proportion de 6 à 15 % du poids total de la datte selon la variété et la qualité des dattes [19].

Leur couleur va du blanc jaunâtre au noir passant par les couleurs ambre, rouges, brunes plus en moins foncées [17]. Ils sont composés d'un albumen blanc, dur et corné protégé par une enveloppe cellulosique dont l'embryon est dorsal [20].



Figure II-4: Noyaux des dattes [21]

II.1.3.2.1 Composition chimique du noyau des dattes :

La composition chimique des noyaux de dattes varie selon les variétés, le tableau II.3 représente les différents composants chimiques et leurs teneurs dans un noyau de datte de la variété deglet nour [22,23].

Tableau II-3 : Composition chimique des noyaux des dattes de la variété deglet nour [22,23].

Composants chimique	Teneur
Protéine (%)	4.35
Eau (%)	10.21
MG (%)	8.74
Fibre (%)	71-94
Cendre (%)	1.24
Sucre (%)	5.65
Carbohydrates (%)	75.48
Minéraux (mg/100g)	
K	280.55
Ca	12.34
Mg	44.52
Na	10.17
Fe	0.51
Mn	0.35
Polyphénols totaux (mg/100g)	2983

Chapitre 2 : Techniques d'élimination des colorants

II.1.3.2 Valorisation des noyaux des dattes :

Les noyaux de dattes présentent des propriétés variées qui permettent leur valorisation dans plusieurs domaines. Ils suscitent un intérêt croissant dans des secteurs tels que l'agroalimentaire, la cosmétique et la pharmaceutique. En effet, ils contiennent des composés extractibles à forte valeur ajoutée et peuvent être exploités pour enrichir la qualité nutritionnelle de certains produits [24].

De nombreuses études se sont intéressées à la valorisation des noyaux de dattes, notamment par leur transformation en produits tels que l'acide acétique et le charbon actif [25], une crème cosmétique peut être formulée à partir de l'huile extraite des noyaux de dattes, reconnue pour ses propriétés nourrissantes et adoucissantes pour la peau [26].

Les noyaux de dattes peuvent également être valorisés en alimentation animale, où ils sont utilisés comme provende. Leur valeur nutritive est comparable à celle d'un kilogramme d'orge [27].

L'absence de gluten dans la farine issue des noyaux de dattes constitue un atout pour l'industrie agroalimentaire. Ces sous-produits représentent en effet une source économique de fibres et de sucres fermentescibles, des éléments recherchés dans certaines applications, notamment en panification [24].

Les noyaux de dattes sont également valorisés pour la production d'une huile riche en composés antioxydants. Ils peuvent servir à l'obtention d'extraits utilisés en cosmétique, notamment pour leurs effets anti-âge, et être exploités comme source d'énergie renouvelable, par exemple comme combustible dans le fonctionnement des fours [28].

II.1.3.3 Charbon actif :

II.1.3.3.1 Définition de charbon actif :

Le charbon actif est un matériau adsorbant très poreux, principalement constitué de carbone, reconnu pour sa grande surface spécifique et sa forte capacité à retenir diverses substances à sa surface [29]. Il est obtenu à partir de matières riches en carbone, d'origine végétale, minérale ou synthétique [30]. Soumises à des traitements thermiques de carbonisation suivis d'une activation physique ou chimique, permettant de développer un réseau étendu de micropores.

Grâce à sa structure et à sa surface généralement peu polaire, il est particulièrement efficace pour l'élimination des composés organiques, des polluants et des substances responsables de la coloration ou des odeurs, aussi bien en phase liquide que gazeuse [31]. Utilisé depuis l'Antiquité et largement exploité à l'échelle industrielle, le charbon actif se distingue par sa

Polyvalence, bien qu'il présente une sélectivité relativement limitée en raison de la diversité de ses pores [32].



Figure II-5 : charbon actif [33]

II.1.3.3.2 Procédés de fabrication du charbon actif :

La production industrielle du charbon actif repose généralement sur deux étapes principales : la carbonisation et l'activation.

- **Phase de carbonisation :**

La carbonisation est un procédé thermique qui consiste à chauffer des matières riches en carbone à des températures élevées (généralement entre 500 et 800 °C), en absence d'oxygène et sous atmosphère inerte. Cette étape permet d'éliminer les composés volatils et de concentrer le carbone, tout en formant une première structure poreuse. Cependant, cette porosité reste limitée et nécessite une étape d'activation ultérieure pour améliorer les propriétés adsorbantes du matériau [34].

- **Phase d'activation :**

L'activation consiste à améliorer la structure poreuse du matériau en éliminant les goudrons qui bloquent les pores, tout en formant des groupes fonctionnels de surface, généralement oxydés, responsables des interactions avec les espèces adsorbées. Elle peut être effectuée par voie physique ou chimique [35,36]

- **Une activation physique :**

Elle permet d'accroître une surface spécifique initialement faible (environ 5 à 6 m²/g) jusqu'à des valeurs élevées comprises entre 600 et 2000 m²/g. Ce procédé correspond à une oxydation effectuée à haute température (800 à 1000 °C), pendant 24 à 72 heures, en présence de vapeur d'eau, de CO₂ ou d'oxygène. Au cours de cette étape, les matières carbonées désorganisées obstruant les pores sont éliminées selon la réaction suivante.

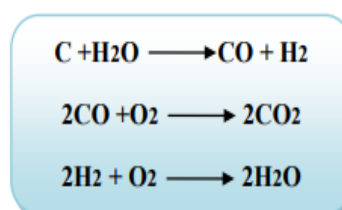


Figure II-6: Réactions types rencontrées lors l'activation physique [37]

➤ Une activation chimique :

Elle consiste à imprégner le précurseur carboné avec un agent chimique (tel que l'acide phosphorique H_3PO_4 ou l'hydroxyde de potassium KOH), suivi d'un traitement thermique à des températures modérées (de 400 à 700 °C). Ce procédé permet de développer une porosité élevée en une seule étape de pyrolyse [38].

II.1.3.3 Les différentes formes du charbon actif :

La qualité des charbons actifs dépend de leur capacité d'adsorption, et ils sont généralement classés selon la taille de leurs particules (poudre, granulés, extrudés).

- **Charbon actif en poudre (CAP) :**

Le charbon actif en poudre (CAP) se caractérise par une granulométrie très fine, généralement inférieure à 100 μm , avec un diamètre moyen compris entre 15 et 25 μm . Il présente une surface spécifique élevée, ce qui lui confère une cinétique d'adsorption très rapide. Ce type de charbon actif est particulièrement approprié pour les applications en phase liquide [39].



Figure II-7: Type de charbons actifs à poudre CAP [40]

- **Charbon actif extrudé (CAE):**

Le charbon actif extrudé se présente sous forme cylindrique, avec des diamètres variant de 0,8 à 5 mm. Il est principalement utilisé pour des applications en phase gazeuse en raison de sa faible perte de charge, de sa grande résistance mécanique et de sa faible teneur en poussières.



Figure II-8: Le Charbon Actif Extrudé [41]

- **Charbon actif en grain (CAG) :**

Les charbons actifs granulaires (CAG) se caractérisent par des particules de taille comprise entre 0,3 et 0,5 mm et une surface spécifique d'environ 550 m^2/g . Ils sont largement employés, notamment en phase gazeuse, pour des applications telles que la désodorisation, la récupération de solvants et le traitement des polluants [42].



Figure II-9 : Type de charbon actif granulaire CAG [40]

II.2 Méthodes Chimiques :

La méthode chimique d'élimination des colorants consiste à utiliser des réactifs pour dégrader ou transformer les molécules colorées en composés plus simples et moins visibles, en détruisant leurs groupements responsables de la couleur.

II.2.1 Précipitation :

II.2.1.1 Définition :

La précipitation est un procédé chimique qui consiste à générer un solide insoluble au sein d'une solution liquide, suite à une réaction entre des ions dissous. Cette technique est couramment employée en analyse chimique, dans le traitement des eaux ainsi que dans la fabrication de matériaux [43,44].

II.2.1.2 Principe :

La précipitation est un phénomène qui correspond à la formation d'une phase solide au sein d'un milieu liquide, créant ainsi un système hétérogène. Lorsqu'on souhaite vérifier la présence de certains ions en solution, on peut introduire un réactif approprié capable de réagir avec eux pour former un composé insoluble. Si ces ions sont présents, un solide apparaît, lequel peut ensuite être séparé par filtration et récupéré. Ainsi, la précipitation constitue une technique efficace de séparation des constituants d'un mélange [45].

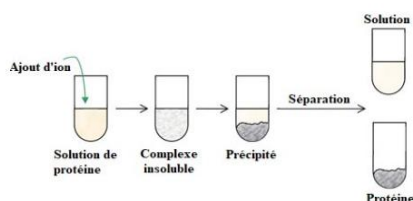


Figure II-10: Protocole de précipitation [45]

II.2.1.3 Types de la précipitation :

La précipitation est une technique couramment utilisée en chimie pour séparer des espèces dissoutes. Elle peut se faire selon plusieurs mécanismes, comme illustré ci-dessous.

Chapitre 2 : Techniques d'élimination des colorants

Tableau II-4 : Principaux procédés de précipitation [46]

Procédé	Description	Particularité
Double échange	Réaction entre deux solutions formant un solide insoluble	Formation rapide d'un précipité après échange d'ions
Relargage	Ajout d'un agent modifiant le milieu (pH, solvant...)	Provoque la déstabilisation de la solution
Précipitation sélective	Formation contrôlée de précipités selon leur solubilité	Permet de séparer les espèces progressivement

II.2.2 Coagulation-floculation :

La coagulation–floculation est une méthode chimique de traitement de l'eau visant à éliminer les particules colloïdales responsables de la turbidité [47]. Elle repose sur l'ajout d'un coagulant qui neutralise les charges électrostatiques des particules, suivi éventuellement d'un floculant favorisant leur agglomération en floccs volumineux et décantables [48,49].

II.2.2.1 Définition de la coagulation :

La coagulation correspond à l'introduction d'un coagulant visant à supprimer les forces de répulsion entre les particules colloïdales par neutralisation de leurs charges électriques [50]. Effectuée sous agitation intense, cette étape perturbe la stabilité des particules en suspension et initie leur déstabilisation [51,52].

II.2.2.2 Types de coagulation :

- **La coagulation chimique :**

La coagulation est une méthode chimique qui consiste à introduire dans l'eau des coagulants, généralement des sels de fer ou d'aluminium [53]. Ces composés, chargés positivement, neutralisent les charges négatives des particules en suspension, ce qui favorise leur regroupement en floccs.

Une fois formés, ces floccs deviennent plus lourds et se déposent au fond par sédimentation, permettant ainsi leur élimination.



Figure II-11 : Essai de coagulation dans une usine de traitement [53]

- **L'électrocoagulation :**

L'électrocoagulation est une méthode chimique de traitement de l'eau basée sur la production **in situ** de coagulants par dissolution d'une anode sous courant électrique [54]. Les ions formés neutralisent les particules colloïdales et favorisent leur agglomération en flocons, sans nécessiter d'agitation mécanique [55,56].

- **La bio-coagulation :**

La bio-coagulation est une technique récente permettant d'agglomérer des particules solides très fines, contrairement à d'autres procédés biologiques où les substances sont d'abord dissoutes puis adsorbées ou accumulées.

II.2.2.3 Types de coagulant :

Les coagulants métalliques sont largement utilisés dans le traitement des eaux pour éliminer les particules en suspension [57]. Le tableau suivant présente les principaux coagulants, leurs caractéristiques ainsi que leurs réactions chimiques.

Tableau II-5 : Principaux coagulants métalliques et leurs réactions [58]

Coagulant	Description	Équation chimique
Sels de fer	Coagulants formant des flocons denses	Formation générale de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (précipité)

Sulfate ferrique	Réagit avec les bicarbonates	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{CaSO}_4 + 6\text{CO}_2$
Chlorure ferrique	Produit des hydroxydes de fer insolubles	$2\text{FeCl}_3 + 3\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{CaCl}_2 + 6\text{CO}_2$
Sulfate d'aluminium	Neutralise les charges des particules	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow 2\text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{CaSO}_4 + 6\text{CO}_2$

II.2.3 Définition de la floculation :

La floculation désigne le processus durant lequel les particules en suspension se regroupent en floes plus gros et plus compacts. Cette transformation augmente leur cohésion, leur densité ainsi que leur aptitude à se déposer plus rapidement. Elle est assurée par l'ajout d'un floculant, qui agit en créant des liaisons entre les particules [50,59].

II.2.3.1 Types de floculation :

Des adjuvants peuvent être utilisés pour renforcer la coagulation-floculation en favorisant les interactions entre particules, tels que la silice activée, les polyélectrolytes, le charbon actif et la bentonite.

- **La Bentonite:**

L'argile est un adsorbant naturel performant, constitué principalement de silicates d'aluminium, capable de retenir différentes substances grâce à sa surface active. La bentonite, en particulier, est largement utilisée pour la clarification des liquides et comme adjuvant de floculation dans le traitement de l'eau afin d'améliorer la décantation.

Les suspensions argileuses sont également utilisées comme modèles pour étudier les mécanismes de coagulation. En Algérie, des gisements importants se trouvent dans l'ouest du pays. Grâce à sa capacité d'échange ionique et à son affinité pour divers polluants, la bentonite représente une solution prometteuse pour l'amélioration de la qualité des eaux [60].

- **Le charbon actif :**

Le charbon actif, obtenu à partir de matières carbonées, est un adsorbant très poreux, efficace pour éliminer les substances organiques et améliorer les qualités organoleptiques de l'eau. Sous forme pulvérulente, il est utilisé pendant la floculation sans nécessiter de modifications des installations, tandis qu'en granulés, il intervient en filtration tertiaire. Associé à l'ozone, il permet un traitement plus poussé. Le mélange des réactifs est assuré par des dispositifs de mélange rapides ou statiques garantissant une bonne homogénéisation [61].

II.3 Méthodes physico-chimiques :

C'est une méthode qui associe des phénomènes physiques de séparation (filtration, rétention) et des réactions chimiques (ajout de réactifs favorisant la coagulation) afin d'éliminer les colorants présents dans les eaux. À titre d'exemple, on peut citer l'ultrafiltration, basée sur l'utilisation d'une membrane, ou la dialyse, qui permet le passage sélectif des petites molécules. Ce procédé est généralement simple et efficace, mais il génère des résidus solides.

II.3.1 Ultrafiltration :

II.3.1.1 Définition :

L'ultrafiltration est un procédé de séparation basé sur l'utilisation de membranes microporeuses (0,5 à 0,002 μm) opérant sous une pression modérée. Elle assure l'élimination des particules en suspension, des colloïdes, des macromolécules (comme les protéines et les polymères) ainsi que des micro-organismes, y compris les virus. En revanche, les micropolluants organiques ne sont pas retenus sans l'ajout de charbon actif en poudre. Les membranes, généralement en polysulfone, exigent un entretien régulier afin de prévenir le colmatage. Cette technique est largement employée pour le traitement des eaux et la concentration de solutions riches en macromolécules [62].

II.3.1.2 Principe :

L'ultrafiltration est un procédé de séparation membranaire fonctionnant en écoulement tangentiel, limitant le colmatage et améliorant la qualité du filtrat. Elle repose sur une membrane caractérisée par sa perméabilité et son seuil de coupure, permettant de retenir les molécules de grande taille. Ce procédé est largement utilisé pour la purification et la récupération de différentes substances (huiles, particules, colorants) dans les eaux et les liquides industriels [63].

II.3.1.3 Types d'ultrafiltration :

- **Selon le mode d'écoulement :**

Deux modes de fonctionnement peuvent être distingués. Le premier est la filtration frontale, dans laquelle le fluide traverse directement la membrane, ce qui peut entraîner une accumulation rapide des particules à sa surface. Le second est la filtration tangentielle, où le fluide s'écoule parallèlement à la membrane, limitant ainsi le colmatage et améliorant la stabilité du procédé [64].

- **Selon la nature des membranes :**

Chapitre 2 : Techniques d'élimination des colorants

Les membranes utilisées en ultrafiltration sont le plus souvent d'origine polymérique, comme le polysulfone ou le polyéthersulfone, en raison de leur bonne perméabilité et de leur résistance chimique [65]. Des matériaux plus récents, tels que les membranes nanocomposites, ont été développés afin d'augmenter les performances et d'améliorer l'élimination des colorants [66].

- **Techniques associées :**

Parmi les techniques dérivées, l'ultrafiltration assistée par polymères (PEUF) consiste à ajouter des polymères capables de se lier aux colorants, formant ainsi des complexes de grande taille facilement retenus par la membrane [67].

II.3.2 Dialyse :

II.3.2.1 Définition :

La dialyse constitue un procédé physico-chimique de séparation par membrane, permettant de discriminer les espèces dissoutes en fonction de leurs caractéristiques. À l'instar de l'osmose inverse et de l'électrodialyse, elle met en jeu une membrane semi-perméable séparant deux phases liquides. Néanmoins, ces techniques diffèrent essentiellement par la nature de la force motrice responsable du transport des solutés à travers cette barrière [68].

II.3.2.2 Principe :

La dialyse est un procédé de séparation membranaire basé sur le phénomène de diffusion. Elle consiste en le passage des petites molécules à travers une membrane semi-perméable, sous l'effet d'une différence de concentration entre deux milieux [69]. Contrairement aux procédés sous pression comme l'ultrafiltration, la dialyse ne nécessite pas d'apport énergétique important, car le transfert des solutés se fait naturellement du milieu le plus concentré vers le moins concentré [70]. Les petites molécules (ions, sels) diffusent à travers la membrane, tandis que les grosses sont retenues ; le procédé reste lent et donc limité industriellement [71].

II.3.2.3 Types de la dialyse :

- Selon le mode de fonctionnement :

La dialyse peut être réalisée de manière statique, sans renouvellement du milieu extérieur, ce qui conduit à une diffusion progressive jusqu'à l'équilibre [69]. Elle peut également être effectuée en mode dynamique, avec un renouvellement continu du solvant, permettant ainsi d'améliorer le transfert de matière [70].

- Selon les domaines d'application :

En laboratoire, la dialyse est couramment utilisée pour purifier des solutions contenant des macromolécules en éliminant les petites impuretés [71]. Dans le domaine médical, elle est

Chapitre 2 : Techniques d'élimination des colorants

employée sous forme d'hémodialyse pour remplacer la fonction rénale chez certains patients [72]. Par ailleurs, l'électrodialyse constitue une variante dans laquelle un champ électrique est appliqué afin de favoriser le déplacement des ions à travers des membranes spécifiques [73].

II.4 Méthodes avancées :

Ce sont des procédés récents et efficaces utilisés pour éliminer les colorants résistants. Ils comprennent notamment les techniques membranaires ainsi que les procédés d'oxydation avancée (POA) utilisant des agents comme l'UV, l'ozone ou le peroxyde d'hydrogène pour générer des radicaux hydroxyles ($\bullet\text{OH}$). Ces techniques permettent une dégradation complète des polluants sans résidus significatifs.

II.4.1 Techniques membranaires :

II.4.1.1 Définition :

Les techniques membranaires constituent des procédés de séparation performants largement utilisés dans le traitement des eaux usées contenant des colorants. Elles reposent sur l'utilisation de membranes semi-perméables permettant de séparer sélectivement les molécules en fonction de leur taille, de leur charge et de leurs propriétés physicochimiques, sous l'action d'une différence de pression. Ces procédés offrent une efficacité élevée pour l'élimination des colorants et autres polluants organiques présents dans les effluents industriels. Les principales techniques membranaires utilisées sont la microfiltration, l'ultrafiltration, la nanofiltration et l'osmose inverse. Le choix de la membrane et des conditions opératoires dépend de la nature des colorants à éliminer ainsi que du degré de purification recherché [74].

II.4.1.2 Définition de la membrane :

Une membrane est une fine barrière matérielle qui assure une séparation sélective en retenant certaines espèces tout en laissant passer d'autres, sous l'action d'une force motrice de transfert. Cette séparation dépend de différents paramètres, en particulier la taille et la forme des particules, des molécules ou des ions [75].

II.4.1.3 Principe :

La séparation membranaire est un procédé utilisant une membrane sélective pour séparer les composés. Les membranes minérales sont formées d'un support à structure macroporeuse, souvent à base d'aluminium sous l'effet d'une différence de pression entre l'alimentation et le perméat. Elle est appliquée dans le traitement de l'eau à travers des techniques comme l'osmose inverse, la nanofiltration, l'ultrafiltration et la microfiltration. Ces méthodes représentent une alternative efficace aux procédés classiques et fonctionnent en filtration tangentielle pour limiter l'encrassement de la membrane [76,77].

II.4.1.4 Types de membranaires :

Les membranes peuvent être classées selon trois critères principaux : leur structure, leur nature chimique et leur géométrie.

- **Les membranes minérales (ou inorganiques) :**

Ou de carbone, recouvert de plusieurs couches d'oxydes inorganiques. Parmi les matériaux utilisés, on retrouve notamment l'alumine, le dioxyde de titane (TiO_2) et le dioxyde de zirconium (ZrO_2). Les couches superficielles, très fines, assurent la fonction de filtration en fonction de la taille des pores, tandis que le support joue un rôle essentiel en apportant la solidité mécanique à l'ensemble.

- **Les membranes organiques :**

Les membranes organiques sont généralement favorisées pour leur faible coût, malgré des performances moindres en termes de résistance thermique et chimique comparées aux membranes minérales. Elles sont produites à partir d'une variété de polymères, notamment le polysulfone (PSu), le polyéthersulfone (PES) ou le polyfluorure de vinylidène (PVDF) [78,79].

- **Les membranes composites**

Les membranes composites sont généralement élaborées à partir d'oxydes métalliques tels que Al_2O_3 , TiO_2 et ZrO_2 [80], parfois associés entre eux sous forme de mélanges. Leur utilisation s'explique par leur grande stabilité sur les plans structurel, chimique et thermique. Les membranes céramiques présentent souvent une architecture multicouche constituée d'un ou de plusieurs matériaux différents, appelée structure asymétrique [81].

II.4.2 Procédés d'oxydation avancées :

II.4.2.1 Définition :

Les procédés d'oxydation avancée (POA) rassemblent différentes approches de nature chimique, photochimique et électrochimique. Depuis près de trente ans, ces techniques suscitent un intérêt croissant. Elles visent à décomposer les molécules de colorants en composés minéraux tels que le dioxyde de carbone (CO_2) et l'eau (H_2O), grâce à l'action du rayonnement ultraviolet (UV) combiné au peroxyde d'hydrogène [82].

II.4.2.2 Principe :

Les procédés d'oxydation avancée (POA) sont basés sur la production de radicaux hydroxyles ($\bullet\text{OH}$), des espèces très réactives et peu sélectives. Ces radicaux dégradent les colorants textiles en attaquant leurs groupements responsables de la couleur. Les réactions chimiques provoquent la rupture des liaisons et la transformation des polluants [83]. Les composés sont ainsi convertis

en CO₂, H₂O et ions minéraux. Contrairement à l'adsorption, ces procédés permettent une élimination complète sans formation de produits toxiques.

II.4.2.3 Types de procédés d'oxydation avancée :

- **Procédé d'oxydation avancée chimique :**

L'utilisation du réactif de Fenton dans le domaine environnemental, notamment pour le traitement des eaux usées, a fait l'objet d'un intérêt croissant au cours des deux dernières décennies. Ce procédé repose sur l'activation du peroxyde d'hydrogène par des ions ferreux, formant ainsi un puissant agent oxydant. Il est particulièrement efficace pour le traitement des effluents contenant des colorants difficilement biodégradables ou présentant une toxicité pour les microorganismes [84].

- **Procédés d'oxydation avancée électrochimique :**

Le traitement électrochimique des effluents colorés apparaît comme une alternative particulièrement intéressante, en raison de ses performances à la fois techniques et économiques. En effet, les rejets obtenus en fin de traitement sont généralement peu nocifs pour les organismes vivants. De plus, ce procédé se caractérise par une utilisation très limitée, voire nulle, de réactifs chimiques [85].

- **Procédés d'oxydation avancée photochimique :**

La dégradation des colorants par voie photochimique peut se produire avec ou sans catalyseur, et en présence éventuelle d'agents oxydants tels que le peroxyde d'hydrogène ou l'ozone. Ce processus peut aboutir à une minéralisation totale des polluants. Il est principalement attribué à l'action des radicaux hydroxyles [82].

Chapitre 2 : Techniques d'élimination des colorants

Références Bibliographiques

- [1] Zollinger H. Colour chemistry: synthesis, properties of organic dyes and pigments. New York: VCH Publishers; 1987.
- [2] Cooper P. Colour in dyestuff effluent. Oxford: The Society of Dyers and Colourists; 1995.
- [3] Willmott NJ, Guthrie JT, Nelson G. J Soc Dyers Colour. 1998.
- [4] Benabbas K. Intensification de la sorption de colorants textiles par la biomasse sèche de lentilles d'eau: effet de prétraitements chimique et mécanique du biosorbant [thèse]. Annaba: Université Badji Mokhtar; 2020.
- [5] Boumethred T. Méthodes de séparation: cours et exercices. Tiaret: Université Ibn Khaldoun; 2019.
- [6] Maghchiche A. TD n°5: réaction de complexométrie. Batna: Université Batna 2; 2025.
- [7] Boudiaf K. Méthodes de désintégration cellulaire, extraction et fractionnement. Batna: Université Batna 2; 2022.
- [8] Bernard AS, Clède S, Emond M, Monin-Soyer H, Quérard J. Techniques expérimentales en chimie. Paris: Dunod; 2014.
- [9] Cardot C. Les traitements de l'eau: procédés physico-chimiques et biologiques. Paris: Ellipses; 2013.
- [10] Desjardins R. Le traitement des eaux. 2e éd. Montréal: Éditions de l'École Polytechnique de Montréal; 1990.
- [11] <https://planet-vie.ens.fr/content/centrifugation>
- [12] <https://www.legarrec.com/entreprise/centrifugation/>
- [13] Aquaportail. Centrifugation [Internet]. 2025 [cité 2026 avr].
- [14] https://elearning.univ-mila.dz/a2024/pluginfile.php/122289/mod_resource/content/0/2%20-Centrifugation.pdf
- [15] Nacib B. Élimination d'un colorant basique en solution aqueuse par une bentonite purifiée [mémoire de master]. Annaba: Université Badji Mokhtar; 2019.
- [16] Moussaoui M. Valorisation des déchets d'agrumes par la production de bio-arômes et de la pectine [mémoire de master]. Constantine: Université Frères Mentouri Constantine 1; 2023.
- [17] Djerbi M. Précis de phoeniciculture. Rome: FAO; 1994.
- [18] Dammak I, Ben Abdallah F, Boudaya S, Besbes S, Keskes L, El Gaied A, et al. Date seed oil limits oxidative injuries induced by hydrogen peroxide in human skin organ culture. BioFactors ;2007.

Chapitre 2 : Techniques d'élimination des colorants

- [19] Jassim SA, Naji MA. In vitro evaluation of the antiviral activity of an extract of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) pits on a *Pseudomonas* phage. *J Ethnopharmacol* ;2007.
- [20] Espiard É. Introduction à la transformation industrielle des fruits. Paris: Tec & Doc Lavoisier; 2002.
- [21] <https://www.agrididon-nature.com/>
- [22] Lecheb F. Extraction et caractérisation physico-chimique et biologique de la matière grasse du noyau des dattes: essai d'incorporation dans une crème cosmétique de soin [thèse de magister]. Boumerdès: Université M'Hamed Bougara; 2010.
- [23] Mistrello J, Sirisena SD, Ghavami A, Marshall RJ, Krishnamoorthy S. Determination of the antioxidant capacity, total phenolic and flavonoid contents of seeds from three commercial varieties of culinary dates. *Int J Food Stud* ; 2014.
- [24] Khaldi M, Boussena Z, Boutekrab L. Effet de l'incorporation de noyaux de dattes sur les caractéristiques technologiques et fonctionnelles de la farine de blé tendre. *Nature & Technology* ; 2014.
- [25] Cherifi M. Valorisation d'un résidu naturel lignocellulosique en charbon actif: exemple des noyaux de dattes. *Rev Energies Renouvelables* ; 2007.
- [26] Tafti GA, Dahdivan SN, Ardakani YS. Physicochemical properties and applications of date seed and its oil. *Int Food Res J* ;2017.
- [27] Al Dhaheri AS, Alhadrami GA, Aboalnaga N, Wasfi IA, El-Ridi MR. Chemical composition of date pits and reproductive hormonal effects. *Food Chem* ;2004.
- [28] Chaira N, Ferchichi A, Mrabet A, Sghairoun M. Chemical composition of the flesh and the pit of date palm fruit and radical scavenging activity of their extracts. *Pak J Biol Sci* ; 2007.
- [29] Gong J, Liu J, Wan D, Chen X, Wen X, Mijowska E, et al. Catalytic carbonization of polypropylene into carbon nanotubes. *Appl Catal A Gen.* ; 2012.
- [30] Bamba D, Dongui B, Trokourey A, Zoro GE, Athéba GP, Robert D, et al. Études comparées des méthodes de préparation du charbon actif; 2009.
- [31] Mays P. Charbon actif et dépollution. *Environ Tech*;.1999.
- [32] Ferreira d'Oliveira T. Étude d'un procédé de dépollution basé sur le couplage ozone/charbon actif [thèse de doctorat]. Orléans: Université d'Orléans; 2011.

Chapitre 2 : Techniques d'élimination des colorants

- [33] Avom J, Ketcha Mbadcam J, Matip MRL, Germain P. Afr J Sci Technol ; 2001.
- [34] Ayral C. Élimination de polluants aromatiques par oxydation catalytique sur charbon actif [thèse de doctorat]. Toulouse: Université de Toulouse; 2009.
- [35] Fernandez Ibañez E. Étude de la carbonisation et activation de précurseurs végétaux [thèse de doctorat]. Neuchâtel: Université de Neuchâtel; 2002.
- [36] Demirbas A. Agricultural based activated carbons for dye removal: a review. J Hazard Mater ;2009.
- [37] Arias M, Barral MT, Mejuto JC. Chemosphere ; 2002.
- [38] Manole Creanga C. Procédé AD-OX d'élimination de polluants organiques [thèse de doctorat]. Toulouse: Université de Toulouse; 2007.
- [39] Mekibes Z. Fixation de polluants émergents par supports lignocellulosiques [thèse de doctorat]. Mostaganem: Université de Mostaganem: Université Abdelhamid Ibn Badis; 2021.
- [40] Çeçen F, Aktaş Ö. Activated carbon for water and wastewater treatment. Weinheim: Wiley-VCH; 2012.
- [41] N'guessan JK. Procédé séquentiel AD-OX d'élimination de polluants organiques [thèse de doctorat]. Toulouse: Université de Toulouse; 2010.
- [42] Mve Mexent Z. Élimination des ions Mn(II) par adsorption sur charbon actif [mémoire de master]. 2012.
- [43] <https://www.studysmarter.fr/resumes/ingenierie/ingenierie-de-la-technologie-mini%C3%A8re/precipitation/>
- [44] Boeglin JC. Traitements de précipitation par voie chimique. Techniques de l'Ingénieur; 2002.
- [45] Bendia S. Techniques de séparation. Constantine: Université Frère Mentouri; 2019.
- [46] Perche A, Canciani S, Carlier M, Müller I, Rabine JP. Précipitation sélective. Lille: Université Lille 1; 2002.
- [47] Achour S. Optimisation des étapes de clarification au cours du traitement des eaux de surface algériennes. Tribune de l'Eau. ;1997
- [48] Tardat-Henry M, Beaury JP. Chimie des eaux. Canada: Le Griffon d'argile; 1984.
- [49] Ruthven DM. Principles of adsorption and adsorption processes. New York: Wiley; 1984.
- [50] Koller E. Génie chimique aide-mémoire. 2e éd. Paris: Dunod; 2004.
- [51] Sigg L, Behra P, Stumm W. Chimie des milieux aquatiques. Paris: Dunod; 2001.
- [52] Dupont A. Hydraulique urbaine. Tome 1: Hydrologie, captage et traitement des eaux. 5e éd. Paris: Eyrolles; 1981.

Chapitre 2 : Techniques d'élimination des colorants

-
- [53] Safe Drinking Water Foundation – Conventional Water Treatment: Coagulation and Filtration.
- [54] Matteson . 1995; Parga et al. 2005; Ofir . 2007.
- [55] Persin, Rumeau. 1989; Mollah . 2004.
- [56] Feuillade G, Bollinger JC. Élimination de l'arsenic par coagulation-floculation [thèse de doctorat]. Limoges: Université de Limoges; 2008.
- [57] Desjardins R. Le traitement des eaux. Montréal: École Polytechnique; 1997.
- [58] Dakkiche B. Élimination du cuivre par coagulation-floculation [mémoire de master]. Biskra: Université Mohamed Khider; 2018.
- [59] Cardot C. Les traitements de l'eau. Paris: Ellipses; 1999.
- [60] Meier M, Namjesnik K, Maurice P, Aiken GR. Fractionation of aquatic organic matter. Chem Geol. 1999.
- [61] Barrer RM. Zeolites and clay minerals as sorbents. Academic Press; 1978.
- [62] Cardot C. Techniques membranaires. In: Les traitements de l'eau : procédés physico-chimiques et biologiques. Paris: Ellipses; 1999.
- [63] https://elearning.univ-mila.dz/a2024/pluginfile.php/92656/mod_resource/content/2/cour%209%20Dialyse%20et%20filtration.pdf
- [64] Keskin B. Membrane filtration of dyes. Water Sci Technol ;2020.
- [65] Polymeric membranes for dye removal. Desalin Water Treat ; 2022.
- [66] Yue R. Nanocomposite UF membrane for dye removal. J Colloid Interface Sci ; 2021.
- [67] Oyarce E, et al. Polymer-enhanced ultrafiltration for dye removal. Polymers ;2021.
- [68] <https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-des-materiaux/chimie-des-surfaces/les-techniques-membranaires-differences-et>
- [69] Strathmann H. Membrane science and technology ;2011.
- [70] Geankoplis CJ. Transport processes ;2003.
- [71] Skoog DA, West DM, Holler FJ, Crouch SR. Fundamentals of analytical chemistry. 9th ed. Belmont (CA): Brooks/Cole Cengage Learning; 2014.
- [72] Daugirdas JT, Blake PG, Ing TS, editors. Handbook of dialysis. 5th ed. Philadelphia (PA): Wolters Kluwer; 2015.
- [73] Tanaka Y. Ion exchange membranes: fundamentals and applications. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier; 2007

Chapitre 2 : Techniques d'élimination des colorants

- [74] S.A. Avlonitis, I. Poulios, D. Sotiriou, M. Pappas, K. Moutesidis. Simulated cotton dye effluents treatment and reuse by nanofiltration. *Desalination* ;2008.
- [75] Audinos R, Isoard P. Glossaire des termes techniques des procédés à membrane. Société Française de Filtration; 1986.
- [76] Moulik S, Parakala S, Sridhar S. Tackling challenging industrial separation problems through membrane technology. *J Membrane Process* ; 2018.
- [77] Kong FX, Chen JF, Wang HM, Liu XN, Wenmao XX, Chen CM, et al. Application of coagulation-UF hybrid process for shale gas fracturing flowback water recycling: performance and fouling analysis. *J* ; 2017.
- [78] Aptel P, Buckley CA. Categories of membrane operations. In: Mallevalle J, Odendaal PE, Wiesner MR, editors. *Water treatment membrane processes*. New York: McGraw-Hill; 1996.
- [79] Maurel A. Techniques séparatives à membranes: considérations théoriques. *Tech Ing* ; 1998.
- [80] Raaijmakers MJT, Benes NE. Current trends in interfacial polymerization chemistry. *Prog Polym Sci* ; 2016.
- [81] Bouchard C, Kouadio P, Ellis D, Rahmi ML, Lebrun RE. Les procédés à membranes et leurs applications en production d'eau potable. *Vecteur Environnement* ; 2000.
- [82] Joseph O. Étude du potentiel d'utilisation de résidus agricoles haïtiens pour le traitement par biosorption d'effluents pollués [thèse de doctorat]. Lyon: Université de Lyon; 2009.
- [83] Khenchelaoui S. Élimination des colorants par procédé d'oxydation avancé UV/H₂O₂ [mémoire de master] Alger: École Nationale Polytechnique; 2012
- [84] Slokar YM, Le Marechal AM. Methods of decoloration of textile wastewaters. *Dyes Pigments* ;1998.
- [85] Robinson T, McMullan G, Marchant R, Nigam P. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review. *Bioresour Technol* ;2001.

Chapitre 3 : Partie expérimentale

III. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une étude expérimentale portant sur l'élimination d'un colorant utilisé dans l'industrie pharmaceutique : le Bleu Patenté V. Ce colorant, de la famille des triarylméthanes synthétiques, est contenu dans le sirop Biocalyptol produit par PHOLCODINE.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer et de comparer l'efficacité de deux méthodes de traitement pour éliminer ce colorant présent en solution aqueuse : l'adsorption sur un charbon actif préparé à partir de noyaux de dattes et la coagulation-floculation par le sulfate d'aluminium.

Le matériau utilisé comme adsorbant a été soumis à une activation thermique afin d'améliorer ses propriétés de fixation, puis il a été caractérisé par différentes méthodes physico-chimiques. En parallèle, des essais de coagulation-floculation ont été réalisés à l'aide du sulfate d'aluminium afin d'évaluer son efficacité dans l'élimination du colorant étudié. Cette étude comprend également la préparation des solutions à traiter ainsi que l'optimisation de plusieurs paramètres opératoires importants, tels que le pH, la masse de l'adsorbant ou du coagulant, le temps de contact et la concentration initiale du colorant.

Enfin, une comparaison entre ces deux méthodes a été réalisée afin de déterminer la technique la plus efficace pour la décoloration du sirop étudié. L'adsorption au cours du temps (la cinétique) a été suivie, et l'adsorption à l'équilibre a été étudiée à l'aide des modèles d'isothermes de Langmuir, Freundlich et Temkin afin de mieux comprendre le mécanisme de fixation du colorant sur le charbon actif préparé à partir des noyaux de dattes.

III.1 Le médicament et les appareils utilisés

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'efficacité de deux méthodes de traitement, à savoir l'adsorption sur un charbon actif préparé à partir de noyaux de dattes et la coagulation-floculation par le sulfate d'aluminium, dans l'élimination du colorant utilisé dans le médicament (le sirop Biocalyptol) : le Bleu Patenté V (E131), présenté dans la figure III.1.

Les expériences d'élimination ont été réalisées à l'aide de différents appareils de laboratoire, présenté dans la figure III.2.



Figure III. 1: Le sirop Biocalyptol PHOLCODINE.

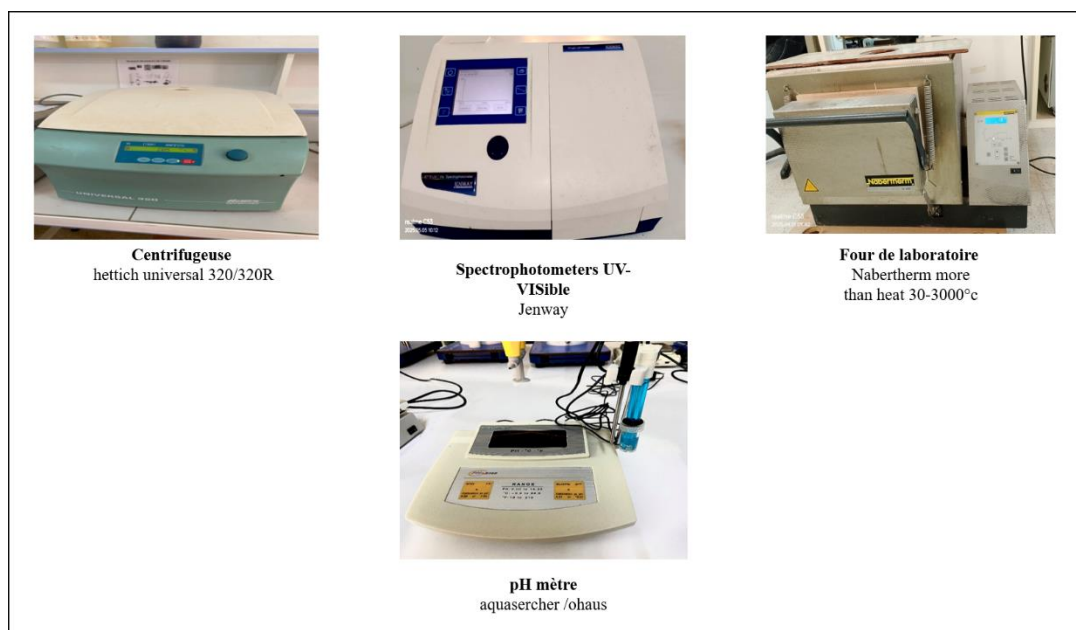


Figure III. 2 : Les appareils utilisés dans le laboratoire

III.1.1 Étude d'élimination du colorant du sirop Biocalyptol

Dans le cadre de ce travail, nous avons étudié l'élimination de la couleur verte du sirop Biocalyptol, qui provient de la présence du colorant Bleu Patenté V (E131).

Deux méthodes de traitement ont été utilisées pour cette étude : l'adsorption sur un charbon actif à base de noyaux de dattes et la coagulation-floculation par le sulfate d'aluminium.

III.1.2 Préparation de l'adsorbant (noyaux de dattes)

La pulpe des dattes a d'abord été séparée du noyau manuellement à la main.

- **Nettoyage des noyaux de dattes :**

Après avoir retiré les noyaux des dattes, les échantillons ont été soigneusement nettoyés à l'eau distillée afin d'enlever toutes les traces de pulpe restantes.



Figure III. 3: Les noyaux de dattes.

- **Séchage:**

Après le lavage, les noyaux ont d'abord été séchés à l'air libre. Ils ont ensuite été placés dans un four à 180 °C pendant 3 heures afin d'éliminer complètement l'humidité.



Figure III. 4: Noyaux de dattes séchés

- **Broyage:**

Les noyaux de dattes séchés ont été broyés à l'aide d'un broyeur électrique afin d'obtenir une poudre fine et homogène.



Figure III. 5: Noyaux de dattes broyée

Activation thermique :

Nous avons ensuite placé la poudre de noyaux broyés dans un four à 400 °C pendant 2 heures afin de réaliser l'activation thermique et d'obtenir le charbon actif. Le produit final obtenu a été conservé dans des flacons fermés hermétiquement.



Figure III. 6: Le charbon actif produit à partir de noyaux de dattes (CAND).

III.1.3 Préparation du coagulant (sulfate d'aluminium)

La solution mère du coagulant a été préparée par la dissolution de 100 mg de sulfate d'aluminium dans 100 mL d'eau distillée. La concentration finale de la solution obtenue est ainsi de 1 mg/mL.

III.1.4 Analyse de la surface spécifique des matériaux adsorbants préparés

La surface spécifique du charbon actif a été déterminée selon la méthode d'adsorption du bleu de méthylène, décrite par Heidarinejad et al [1]. Dans cette méthode, une solution de bleu de méthylène à une concentration de $6,25 \times 10^{-6}$ mol/L est mise en contact avec 0,05 g de charbon actif. La suspension est agitée à différentes durées (10, 20, 30, 40, 50 et 60 minutes), puis les concentrations résiduelles du colorant sont mesurées par spectrophotométrie UV-Visible.

L'ajustement des données d'adsorption au modèle d'isotherme de Langmuir permet d'estimer la capacité maximale d'adsorption Q_m . La surface spécifique du charbon est ensuite calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$S_L = Q_m \times N_A \times S_{BM} \quad (\text{III.1})$$

où :

- S_L est la surface spécifique (en m^2/g),
- Q_m est la capacité maximale d'adsorption (mg/g),
- N_A est le nombre d'Avogadro ($6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$),
- S_{BM} est la surface occupée par une molécule de bleu de méthylène ($175 \times 10^{-20} \text{ m}^2$).

III.1.5 Détermination de la surface spécifique des adsorbants

La surface spécifique de notre charbon actif a été mesurée par la méthode d'adsorption du bleu de méthylène. Les études menées dans la littérature sur les charbons actifs issus de ce déchet agroalimentaire (très abondant en Algérie) montrent d'excellentes performances pour l'élimination des polluants, tels que les colorants organiques ou les ions métalliques.

Chapitre 3 : Partie Expérimentale

En particulier, le charbon actif préparé à partir de nos noyaux de dattes présente une surface spécifique de 90,20 m²/g. Cette valeur indique que le matériau possède une porosité modérée, ce qui est tout à fait caractéristique des charbons actifs obtenus par simple activation thermique directe, sans traitement chimique préalable lourd. Cette surface reste néanmoins largement suffisante pour offrir un grand nombre de sites actifs et capter efficacement de grosses molécules de colorant comme le Bleu Patenté V [2].

III.1.6 Préparation des solutions de colorant (adsorbats)

Dans cette partie, nous décrivons la préparation de la solution mère du composant utilisé dans cette étude : le Bleu Patenté V (E131) contenu dans le médicament (le sirop Biocalyptol PHOLCODINE), ainsi que la préparation des solutions filles à différentes concentrations.

III.1.7 Préparation de la solution mère du sirop

Une masse de 40 grammes de sirop Biocalyptol PHOLCODINE, contenant le colorant, a été diluée dans 1 litre d'eau distillée. La solution obtenue a été agitée à l'aide d'un agitateur magnétique pendant 30 minutes afin d'assurer sa parfaite homogénéisation.



Figure III. 7: La solution mère contenant le sirop Biocalyptol

III.1.8 Préparation des solutions filles du colorant

À partir de la solution mère du sirop Biocalyptol PHOLCODINE contenant le Bleu Patenté V, des solutions filles ont été préparées par dilution avec de l'eau distillée pour obtenir un volume de 100 mL aux concentrations souhaitées (5, 10, 15, 20, 25 et 30 mg/L).

Pour chaque solution fille, un échantillon de 5 mL a été prélevé afin de mesurer son pH initial. Les résultats de ces mesures sont rassemblés dans le tableau III.1.



Figure III. 8: Les solutions filles du sirop.

Tableau III. 1: Les mesures du pH des solutions filles du sirop Biocalyptol

V (ml)	1.25	2.5	3.75	5	6.25	7.5
C (g/ml)	05	10	15	20	25	30
PH	6.95	6.75	6.55	6.30	6.25	6.20

III.1.9 Courbe d'étalonnage du colorant Bleu Patenté V

La courbe d'étalonnage du Bleu Patenté V, colorant triarylméthane synthétique extrait du sirop Biocalyptol PHOLCODINE, a été obtenue en mesurant l'absorbance de nos différentes solutions filles à des concentrations allant de 5 à 30 mg/L. La courbe obtenue montre une très bonne linéarité entre la concentration et l'absorbance, avec un coefficient de corrélation de $R^2 = 0,991$.

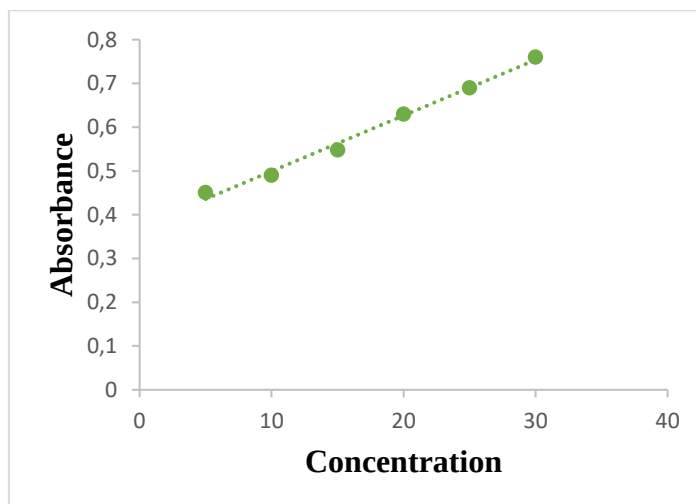


Figure III. 9: Courbe d'étalonnage du sirop Biocalyptol PHOLCODINE.

III.1.10 Détermination de la longueur d'onde maximale du colorant Bleu Patenté V

Une solution fille à une concentration de 20 mg/L de Bleu Patenté V a été analysée par spectrophotométrie UV-Visible. Le balayage spectral effectué entre 400 et 700 nm a révélé un maximum d'absorption à une longueur d'onde de $\lambda_{\text{max}} = 640 \text{ nm}$ [3.4].

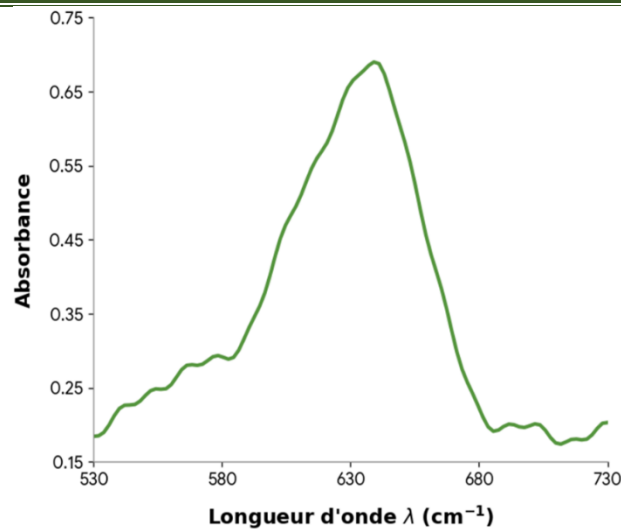


Figure III. 10: Spectre d'absorption UV-Visible du colorant Bleu Patenté V (E131).

III.2 Calcul de la quantité adsorbée

La quantité de polluant adsorbée peut être déterminée à partir d'un calcul simple. Elle correspond à la masse de soluté retenue par unité de masse d'adsorbant et s'exprime en milligrammes de soluté par gramme de solide adsorbant (mg/g). Cette quantité est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) \cdot v}{m} \quad (\text{III.2})$$

- **q_t (mg/g)** : Quantité de polluant par unité de masse de l'adsorbant à l'instant t ,
- **C_0 (mg/l)** : Concentration initiale,
- **C_t (mg)** : Concentration à l'instant t ,
- **V (L)** : Volume de l'adsorbat,
- **m (g)** : Masse de l'adsorbat.

III.3 Calcul du taux d'élimination du colorant

Le taux d'élimination représente le rendement du processus d'adsorption. Il correspond au rapport entre la quantité de colorant adsorbée à un instant donné t et la quantité initialement présente dans la solution aqueuse. Ce paramètre, généralement exprimé en pourcentage (%), permet d'évaluer l'efficacité de l'adsorbant vis-à-vis de l'élimination du colorant. Il est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$R\% = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \cdot 100 \quad (\text{III.3})$$

- **C_0 (mg/l)** : Concentration initiale de la solution en colorant,
- **C_t (mg)** : Concentration de la solution colorant à l'instant t .

III.4 Résultats et discussion

III.4.1.1 Protocole expérimental d'adsorption sur le CAND

Le protocole expérimental d'adsorption du composé coloré (le sirop Biocalyptol) a été réalisé de la manière suivante : trois solutions filles de 100 mL ont été préparées à partir de la forme pharmaceutique, à des concentrations initiales de 15 mg/L, 20 mg/L et 25 mg/L.

Le biosorbant utilisé est le charbon actif élaboré à partir de noyaux de dattes (CAND). Celui-ci a été ajouté aux solutions à raison de :

- **0,125 g** pour la solution à la concentration de 15 mg/L.
- **0,250 g** pour la solution à la concentration de 20 mg/L.
- **0,250 g** pour la solution à la concentration de 25 mg/L.

Chaque mélange a été mis sous agitation magnétique pendant une durée totale de 1 heure (60 minutes). Durant cette heure, un prélèvement a été effectué toutes les 10 minutes (aux temps 10, 20, 30, 40, 50 et 60 minutes) pour mesurer l'absorbance et suivre la cinétique. Après filtration, les échantillons ont été introduits dans une centrifugeuse réglée à **3000 tr/min** pendant une durée de 10 minutes afin d'éliminer totalement les microparticules de charbon actif avant l'analyse au spectrophotomètre.

III.4.1.2 Protocole expérimental de coagulation-floculation au sulfate d'aluminium

Pour les essais de coagulation-floculation, quatre béchers contenant chacun 100 mL de la solution fille à une concentration fixe de 15 mg/L ont été préparés. Des volumes croissants de la solution mère de sulfate d'aluminium ont ensuite été ajoutés dans ces différents béchers : 1 mL dans le premier, 2 mL dans le deuxième, 3 mL dans le troisième et 4 mL dans le quatrième. Après l'ajout du coagulant, les mélanges ont été soumis à une agitation rapide pendant 2 minutes (étape de coagulation), suivie d'une agitation lente pendant 15 minutes (étape de Floculation) afin de favoriser la croissance des floes. Les solutions ont ensuite été laissées au repos pendant une durée de 2 à 3 heures pour permettre la décantation complète des floes formés au fond des béchers sont présentés dans la figure III.11



Chapitre 3 : Partie Expérimentale

Figure III. 11 : Effet de la dose de sulfate d'aluminium (coagulant) sur coagulation-floculation

III.4.1.3 Calcul de la quantité adsorbée et du rendement d'élimination du colorant

Les résultats du calcul de la quantité adsorbée (q_t) et du rendement d'élimination (R%) du Bleu Patenté V par le charbon actif à base de noyaux de dattes (CAND), pour les différentes concentrations initiales étudiées, sont regroupés dans **les tableaux III.2, III.3 et III.4**.

Tableau III. 2 : Les calculs des quantités adsorbées et du rendement d'élimination du colorant Bleu Patenté V par CAND pour une concentration initiale de 15 mg/L ($m = 125$ mg, $V = 10$ mL).

T(min)	10	20	30	40	50	60
Absorbance	0.0651	0.0647	0.0644	0.0639	0.0631	0.0625
C_t (mg/l)	2.1961	2.1646	2.1409	2.1016	2.0386	1.9913
q_t (mg//g)	1.0243	1.0268	1.0287	1.0319	1.0369	1.0407
R%	85.36	85.57	85.73	85.99	86.41	86.72

Tableau III. 3 : Les calculs des quantités adsorbées et du rendement d'élimination du colorant Bleu Patenté V par CAND pour une concentration initiale de 20 mg/L ($m = 250$ mg, $V = 10$ mL).

T(min)	10	20	30	40	50	60
Absorbance	0.0527	0.0521	0.0514	0.0509	0.0501	0.0492
C_t (mg/l)	2.1961	2.1646	2.1409	2.1016	2.0386	1.9913
q_t (mg//g)	0.7122	0.7134	0.7144	0.7159	0.7185	0.7203
R%	89.02	89.18	89.30	89.49	89.81	90.04

Tableau III. 4 : Les calculs des quantités adsorbées et du rendement d'élimination du colorant Bleu Patenté V par CAND pour une concentration initiale de 25 mg/L ($m = 250$ mg, $V = 10$ mL).

T(min)	10	20	30	40	50	60
--------	----	----	----	----	----	----

Chapitre 3 : Partie Expérimentale

Absorbance	0.0680	0.0674	0.0666	0.0660	0.0592	0.0584
C_t (mg/l)	2.1961	2.1646	2.1409	2.1016	2.0386	1.9913
q_t (mg//g)	0.9122	0.9134	0.9144	0.9159	0.9185	0.9203
R%	91.22	91.34	91.44	91.59	91.85	92.03

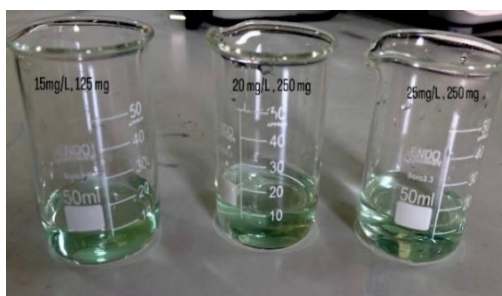


Figure III. 12 :Solutions filles à concentrations 15 mg/L, 20 mg/L et 25mg/L avec l'adsorbant



Figure III. 13 :Adsorption du bleu patenté V par le charbon actif issu de noyaux des dattes

III.4.2 L'influence des différents paramètres physico-chimiques

III.4.2.1 Le temps de contact

Afin de déterminer le temps requis pour l'établissement de l'équilibre d'adsorption du colorant, nous avons choisi d'étudier l'influence du temps de contact comme premier paramètre. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure III.14.

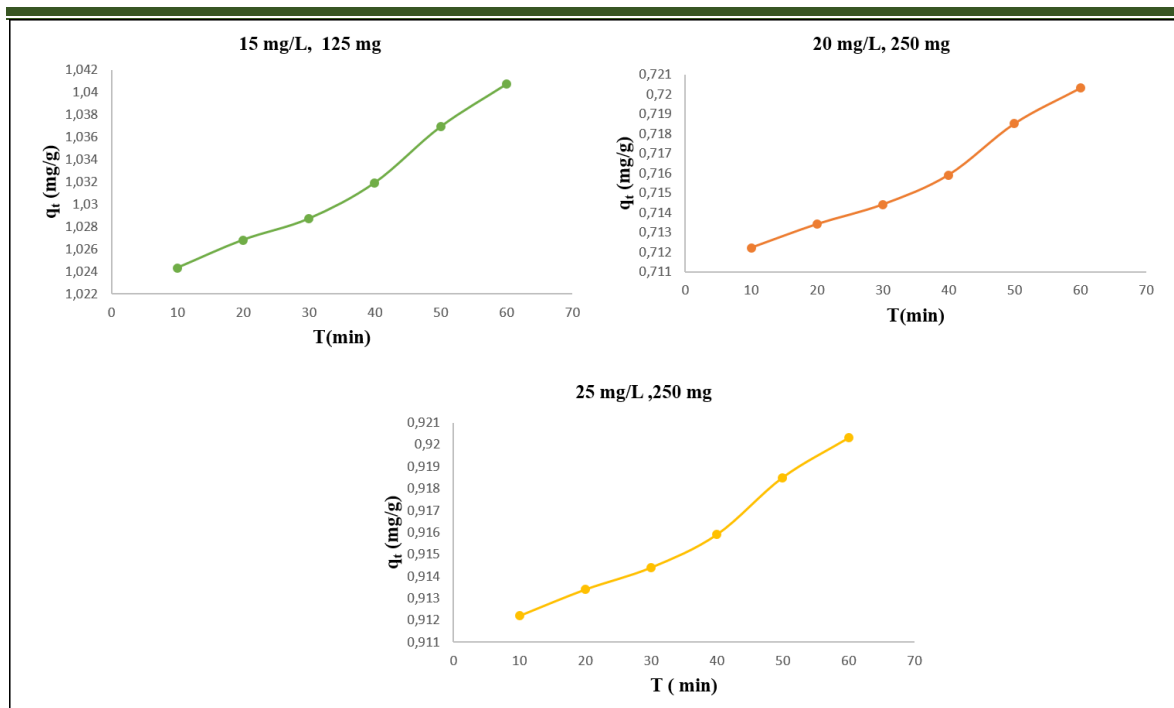


Figure III. 14: Effet du temps sur l'adsorption du colorant Bleu Patenté V

Selon la figure III.14, il est évident que la quantité de Bleu Patenté V adsorbée augmente avec le temps, atteignant un maximum au temps enregistré à 60 minutes. Pour notre colorant, lorsque nous avons utilisé le charbon actif de dattes (CAND) avec une concentration initiale de 15 mg/L et une masse de 125 mg, on a enregistré la quantité adsorbée à l'équilibre qui correspond à 1,0407 mg/g.

D'après, il est clair que la quantité de colorant adsorbée croît avec le temps, atteignant son maximum à 60 minutes. Pour cette deuxième condition, avec une concentration de 20 mg/L et une masse de 250 mg, la quantité adsorbée à l'équilibre était de 0,7203 mg/g.

Enfin, nous remarquons également que la quantité adsorbée augmente avec le temps pour atteindre son maximum à 60 minutes. Pour ce troisième essai, avec une concentration de 25 mg/L et une masse de 250 mg, la quantité adsorbée obtenue correspond à 0,9203 mg/g.

III.4.2.2 Effet de la masse du matériau

L'évolution du rendement d'élimination du colorant en fonction de la masse de l'adsorbant a été évaluée en comparant une masse de 125 mg et de 250 mg. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures III.15.

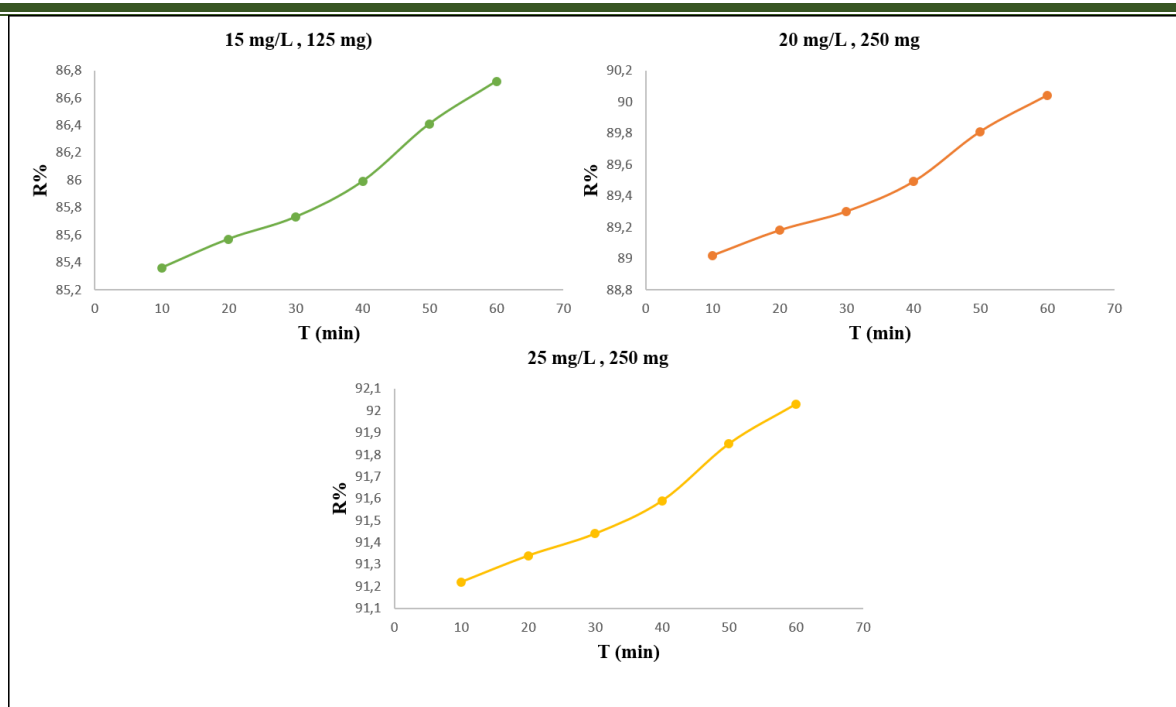


Figure III. 15: Évolution du rendement d'élimination du colorant bleu patenté V

Les résultats obtenus montrent que le rendement augmente avec le temps, et le meilleur résultat a été enregistré à 60 minutes. Selon les figures III.15, le taux de rendement final augmente avec la masse du catalyseur, passant de 86,72 % (125 mg) à 90,04 % (250 mg, 20 mg/L) et atteignant 92,03 % (pour 25 mg/L). Ces résultats démontrent l'impact positif de l'augmentation de la masse de l'adsorbant sur le rendement de l'essai. Ces résultats indiquent clairement que l'augmentation de la masse utilisée permet d'obtenir un meilleur rendement pour éliminer le colorant. Ce comportement est en parfait accord avec les conclusions [5] confirmant que l'apport de matière multiplie la surface et le nombre de places disponibles (sites d'accueil chimiques) pour fixer le colorant.

Cependant, la quantité adsorbée par gramme (q_t) diminue légèrement quand la masse est forte [6], cela arrive parce que les particules de charbon actif se collent entre elles (effet d'écran ou agglomération), ce qui cache une partie des petits trous (pores) disponibles.

III.4.2.3 Effet du pH

Afin d'évaluer l'effet du pH sur le processus d'adsorption du Bleu patenté V, des essais ont été réalisés avec différentes masses de CAND. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure.III.16.

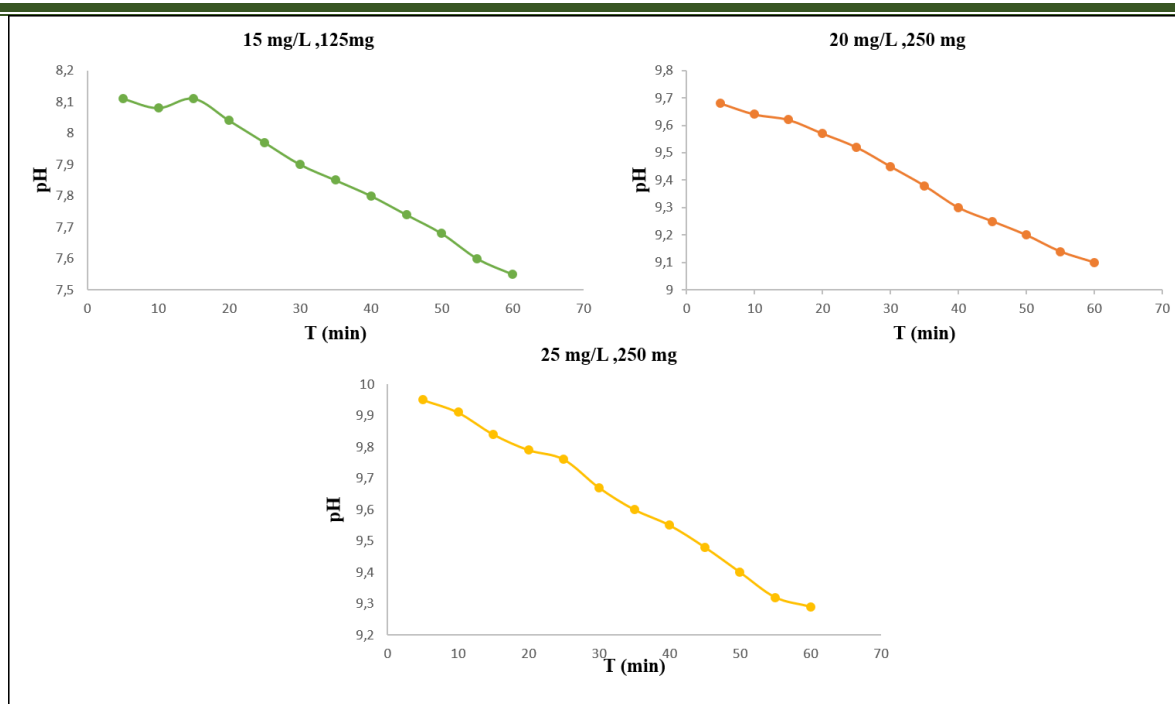


Figure III. 16: Effet du pH sur l'adsorption du colorant bleu patenté V

Les résultats de la figure III.16 montrent une diminution progressive du pH au cours du temps pour toutes les concentrations étudiées. Cette baisse est plus marquée après 20 à 30 minutes de contact, indiquant l'interaction entre les molécules du Bleu Patenté V et les sites actifs présents à la surface du charbon actif préparé à partir des noyaux de dattes.

La diminution du pH peut être attribuée à la présence de fonctions carboniques à la surface du charbon actif, ainsi qu'aux échanges ioniques se produisant lors du processus d'adsorption. Malgré cette diminution, le milieu reste basique durant toute l'expérience, ce qui favorise l'adsorption du colorant.

Les résultats obtenus montrent également que les solutions les plus concentrées (20 et 25 mg/L) présentent des valeurs de pH plus élevées que la solution à 15 mg/L. Cependant, la même tendance de diminution progressive du pH avec le temps est observée dans tous les cas. Ces observations confirment que le pH constitue un paramètre important influençant le mécanisme d'adsorption du Bleu Patenté V sur le charbon actif.

III.4.3 Étude de la cinétique de rétention

Pour déterminer la nature de la cinétique d'adsorption du système étudié, des modèles cinétiques ont été utilisés : la cinétique du pseudo-premier ordre (Lagergren) et la cinétique du pseudo-deuxième ordre [7]. Les résultats obtenus pour le pseudo-premier ordre sont présentés dans la figure III.17, et ceux du pseudo-deuxième ordre dans la figure III.18. Les calculs des paramètres des deux modèles cinétiques sont présentés dans le tableau III.5.

Chapitre 3 : Partie Expérimentale

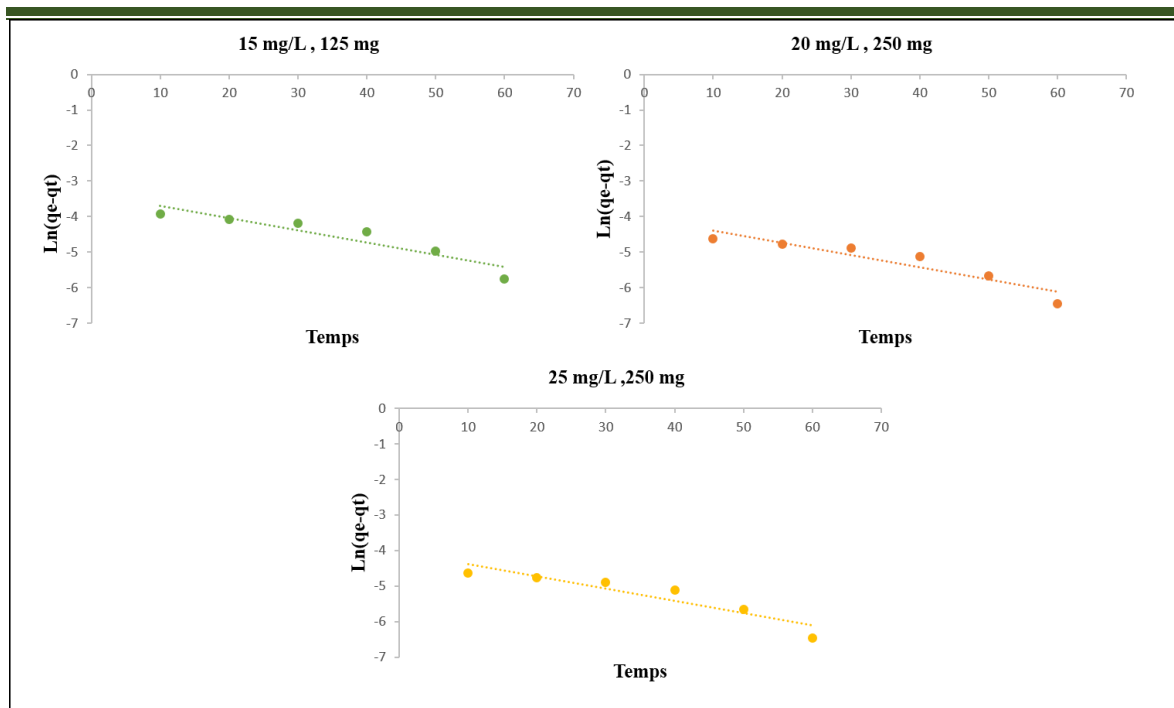


Figure III. 17: Modélisation de la cinétique d'adsorption du colorant **bleu patenté V** par **CAND** – modèle du pseudo-premier ordre.

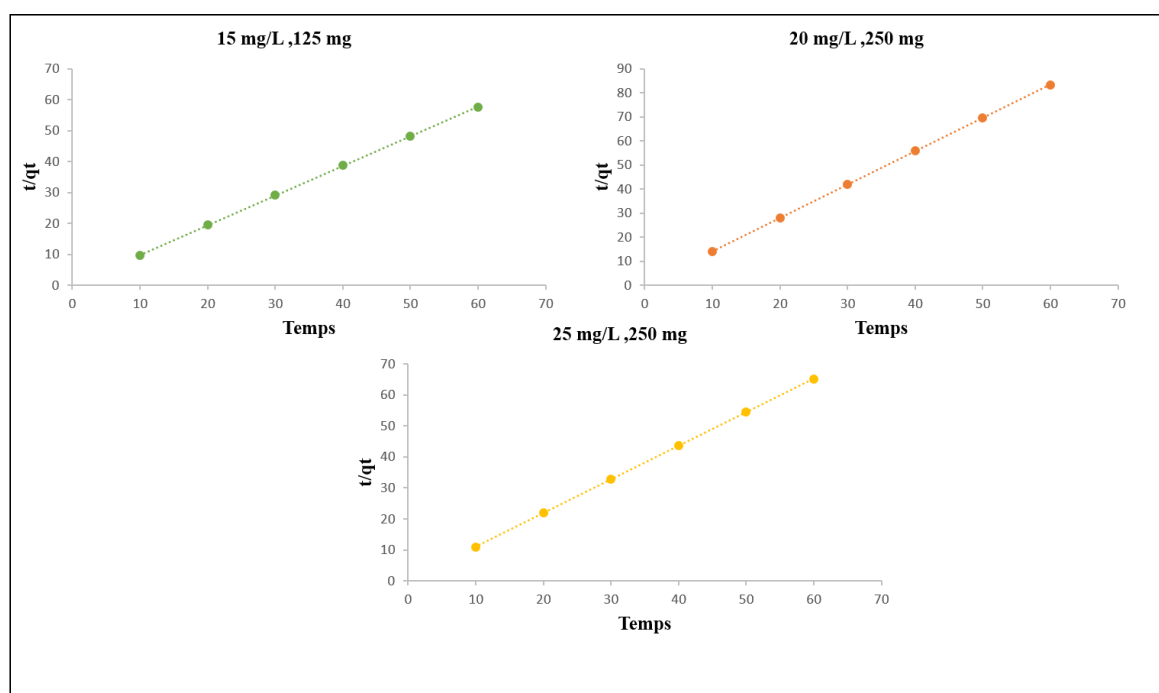


Figure III. 18: Modélisation de la cinétique d'adsorption du colorant **bleu patenté V** par **CAND** – modèle du pseudo- deuxième ordre

Chapitre 3 : Partie Expérimentale

Tableau III. 5: Constantes d'adsorption cinétique des deux modèles pour l'élimination du colorant Bleu Patenté V en présence du charbon actif à base de noyaux de dattes.

Modèles cinétiques	Paramètres extraits	Essai 1 (15 mg/L ; 125 mg)	Essai 2 (20 mg/L ; 250 mg)	Essai 3 (25 mg/L ; 250 mg)
Capacité expérimentale	$q_{e,exp}$ (mg/g)	1.0407	0.7203	0.9203
Pseudo-premier ordre (Lagergren)	$q_{e,cal}$ (mg/g)	1.0439	0.7219	0.9219
	k_1 (min ⁻¹)	0.0304	0.0315	0.0321
	R^2	0.8812	0.8845	0.8860
Pseudo-second ordre (Ho & McKay)	$q_{e,cal}$ (mg/g)	1.0439	0.7219	0.9219
	k_2 (g/mg·min)	2.9411	5.9264	5.9453
	R^2	0.9999	1.0000	1.0000

En observant les résultats de la modélisation, nous pouvons constater que pour le modèle du pseudo-premier ordre (figure III.17), les valeurs de ($q_{e,cal}$) sont très inférieures en comparaison avec ($q_{e,exp}$), et les coefficients de corrélation restent faibles ($R^2 \approx 0.88$). Par contre, le modèle du pseudo-deuxième ordre (figure III.18) a produit un très bon ajustement avec des valeurs du coefficient de corrélation ($R^2 = 1$) pour les trois masses et concentrations.

De plus, la capacité d'adsorption à l'équilibre calculée ($q_{e,cal}$) avec l'équation de pseudo-deuxième ordre s'approche rigoureusement de la capacité d'adsorption à l'équilibre expérimentale ($q_{e,exp}$) [7] .

Ainsi, selon (pour 125 mg et 15 mg/L), la capacité expérimentale $q_{e,exp}$ est de 1,0407 mg/g tandis que la valeur calculée $q_{e,cal}$ est de 1,0439 mg/g. D'après (pour 250 mg et 20 mg/L), la quantité $q_{e,exp}$ est de 0,7203 mg/g contre 0,7219 mg/g pour $q_{e,cal}$. Enfin, selon (pour 250 mg et 25 mg/L), $q_{e,exp}$ est égale à 0,9203 mg/g et $q_{e,cal}$ atteint 0,9219 mg/g.

À l'analyse de ces données, les ($q_{e,cal}$) fournies par ce modèle sont presque similaires à celles de (q_e) expérimentale. Donc ce modèle est le plus crédible pour déterminer l'ordre de la cinétique d'adsorption du Bleu Patenté V. Cela prouve que le mécanisme principal est une chimisorption, impliquant des liaisons chimiques fortes [6,8]. De plus, la concentration ne remontant jamais au cours du temps, on peut conclure qu'il n'y a pas de phénomène de désorption dans nos conditions opératoires : le colorant reste définitivement piégé [8].

III.4.4 Modélisation des isothermes d'adsorption

L'étude expérimentale de l'adsorption de notre polluant à l'équilibre a été traitée à l'aide de trois modèles linéaires classiques. Les résultats obtenus pour la modélisation selon Langmuir sont présentés dans la figure III.19. Ceux obtenus selon l'isotherme de Freundlich sont illustrés dans la figure III.20, tandis que les graphiques correspondants au modèle de Temkin sont regroupés dans la figure III.21. Le tableau III.6 rassemble toutes les constantes et les coefficients de corrélation (R^2) extraits pour les trois isothermes (Langmuir, Freundlich et Temkin) sur les trois essais.

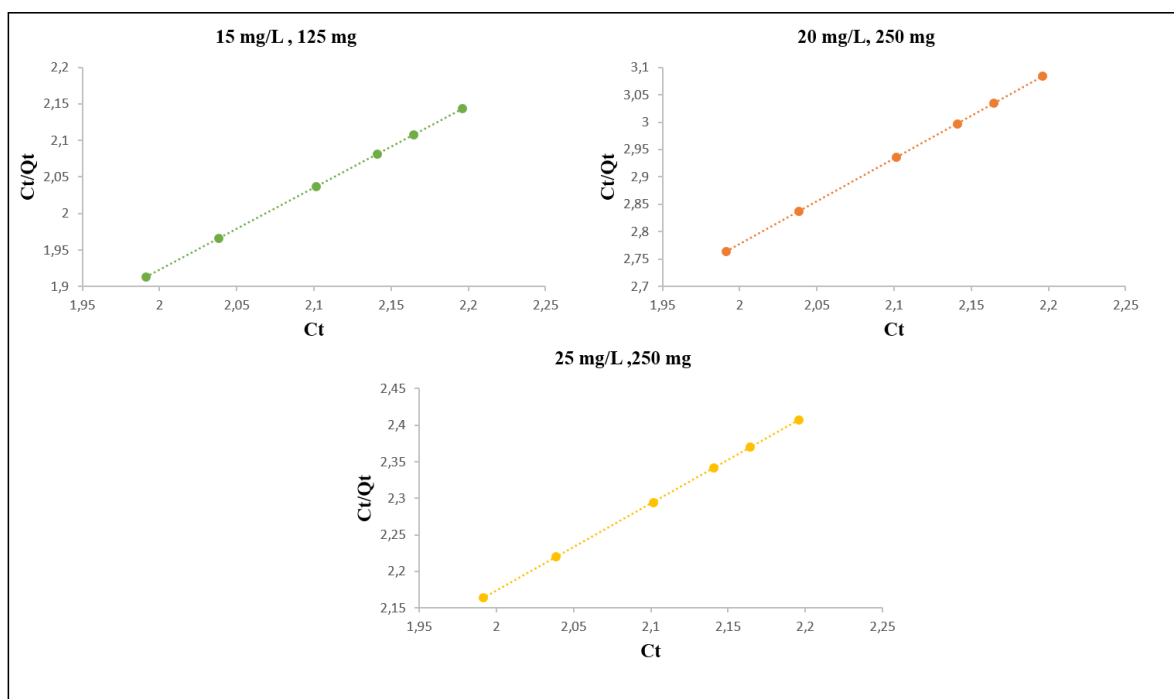


Figure III. 19 : Modélisation de l'isotherme de Langmuir pour l'adsorption du colorant bleu patenté V par CAND

Chapitre 3 : Partie Expérimentale

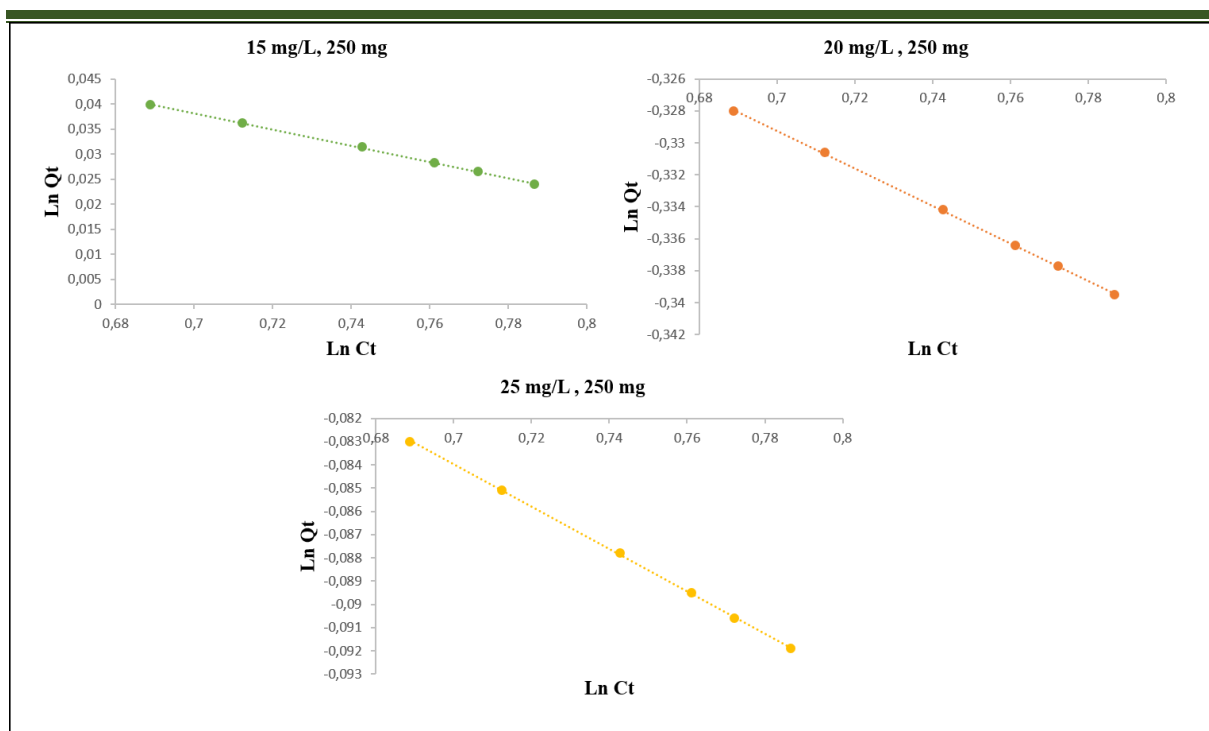


Figure III. 20: Modélisation de l'isotherme de Freundlich pour l'adsorption du colorant bleu patenté V par CAND

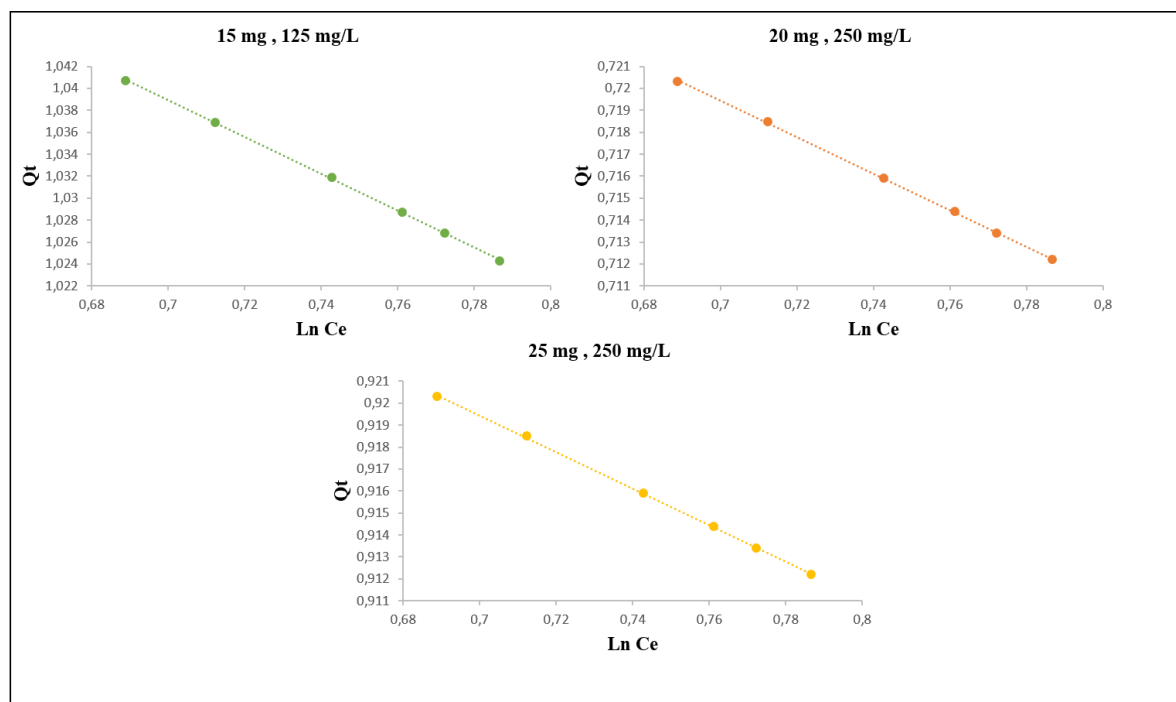


Figure III. 21: Modélisation de l'isotherme de Temkin pour l'adsorption du bleu patenté V par CAND

Tableau III. 6: Les paramètres des isothermes d'adsorption du colorant Bleu Patenté V par CAND.

Chapitre 3 : Partie Expérimentale

Modèles d'isothermes	Paramètres extraits	Essai 1 (15 mg/L ; 125 mg)	Essai 2 (20 mg/L ; 250 mg)	Essai 3 (25 mg/L ; 250 mg)
Langmuir	$q_{\max}(\text{mg/g})$	0.8885	0.6413	0.8396
	$K_L(\text{L/mg})$	-3.4296	-4.5730	-5.7163
	R^2	0.9999	0.9999	1.0000
Freundlich	$K_F(\text{mg/g})$	1.1637	0.7807	0.9801
	n	-6.1737	-8.5652	-10.9567
	R^2	0.9997	0.9997	0.9998
Temkin	B	-0.1673	-0.0836	-0.0836
	$A_T(\text{L/mg})$	$1,00 \times 10^{-3}$	$9,12 \times 10^{-5}$	$8,34 \times 10^{-6}$
	R^2	0.9998	0.9998	0.9998

D'après les résultats obtenus sur ces graphiques, on remarque que l'isotherme de Langmuir a produit un très bon ajustement avec des valeurs du coefficient de corrélation (R^2) proches ou égales à 1 (0,9999 ; 0,9999 et 1,0000), correspondant respectivement au figure III.19. De plus, la quantité maximale adsorbée ($q_{\max}$) prédite à partir de l'isotherme de Langmuir était plutôt similaire à la quantité adsorbée ($q_{\max}$) réelle expérimentale. Cela indique que la surface adsorbante peut servir de monocouche pour la liaison des molécules de colorant, et que l'adsorption s'effectue sur une surface homogène [9].

Concernant les paramètres calculés à partir de ces droites, l'apparition de valeurs négatives pour la constante (K_L) et le facteur de séparation (R_L) est un artefact purement mathématique lié à la méthode de linéarisation. Comme le souligne une revue méthodologique publiée dans le journal *Langmuir* (2024), l'utilisation des formes linéarisées classiques sur logiciel (comme l'équation $(C_e/q_e=f(C_e))$) modifie profondément la distribution géométrique des points lorsque le matériau est hyper-efficace [10]. Comme notre charbon de dattes est extrêmement performant, la concentration résiduelle (C_e) chute brutalement dès le début de l'expérience et stagne à une valeur infime (environ 2 mg/L). Sur le graphique, les points se retrouvent tous empilés au même endroit, cela implique simplement que le processus d'adsorption est hautement favorable et tend vers un mécanisme irréversible.

En ce qui concerne le modèle de Freundlich, les données expérimentales illustrent également des valeurs de R^2 élevées ($R^2 \geq 0,9997$), ce qui implique que cette isotherme est

parfaitement applicable pour étudier le processus d'adsorption de notre adsorbant [11]. Ce modèle nous donne une mesure du caractère favorable de l'adsorption. Bien que l'artéfact de linéarisation donne ici un paramètre négatif, sa valeur absolue élevée montre une excellente intensité de fixation. Cela confirme, que notre charbon actif possède une structure interne poreuse hétérogène (composée de micropores et de mésopores) capable de retenir solidement de grosses molécules de colorant [12,13].

Enfin, le modèle de Temkin s'adapte aussi aux données expérimentales avec un très bon ajustement, en donnant des valeurs du coefficient de corrélation élevées ($R^2 = 0,9998$) pour les trois essais. La valeur du paramètre B proche de zéro indique que l'énergie d'adsorption diminue linéairement avec le recouvrement de la surface, prouvant que le colorant occupe d'abord les pores les plus énergétiques du charbon de dattes. Cette performance globale confirme l'intérêt de la valorisation des déchets de palmiers dattiers [14].

III.4.5 Analyse des résultats de décoloration par coagulation-floculation

Afin de déterminer l'efficacité du sulfate d'aluminium dans l'élimination du Bleu Patenté V, les solutions traitées après décantation ont été analysées par spectrophotométrie UV-Visible. Les spectres d'absorption obtenus pour les quatre essais de coagulation sont présentés dans la figure III.22 (correspondant aux données Data 11, 12, 13 et 14).

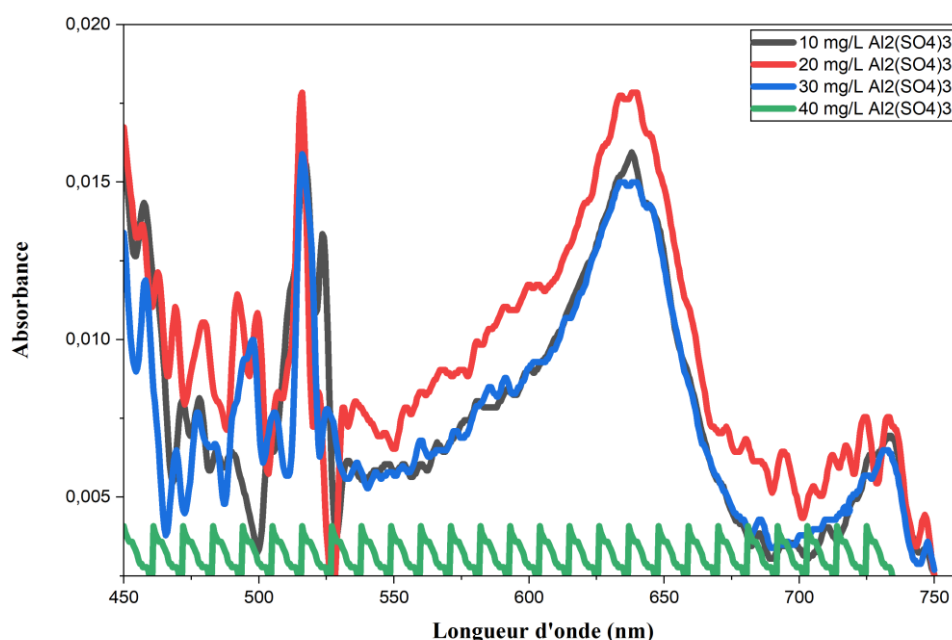


Figure III. 22 : Les spectres d'absorption obtenus pour les quatre essais de coagulation. Selon ces graphiques, il est évident que l'intensité de la couleur verte résiduelle dans les béchers chute de manière remarquable après le traitement par coagulation-floculation. À la longueur

Chapitre 3 : Partie Expérimentale

d'onde maximale du colorant $\lambda_{\max} = 640$ nm, l'absorbance résiduelle s'effondre pour atteindre des valeurs infimes comprises entre 0,0187 et 0,0235 (soit 0,0194 pour 10 mg/L $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, 0,0235 pour 20 mg/L $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, 0,0187 pour 30 mg/L $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ et 0,0217 pour 40 mg/L $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$).

À l'analyse de ces données, nous remarquons que les valeurs d'absorbance obtenues lors des quatre essais successifs sont extrêmement basses et presque similaires, ce qui montre que ce procédé est hautement efficace et reproductible pour décolorer le sirop pharmaceutique étudié. Cette performance s'explique par le fait que les ions aluminium (Al^{3+}) apportés par le coagulant éliminent la barrière d'énergie et neutralisent les charges électriques du colorant en solution. Comme le démontrent les travaux publiés [15], sur l'élimination de composés organique dans la matrice des eaux algériennes, cette neutralisation permet aux molécules de Bleu Patenté V de se rassembler et de s'agglomérer entre elles pour former des floccs lourds. Ces floccs tombent ensuite au fond du bécher p lors de la décantation. L'absorbance résiduelle très proche de zéro confirme ainsi que la quasi-totalité de la couleur verte du sirop a été éliminée avec un grand succès par cette méthode chimique

III.5 Comparaison générale entre les deux méthodes de traitement

D'une manière générale, l'analyse comparative des rendements montre que l'adsorption sur le charbon actif de noyaux de dattes (CAND) et la coagulation-floculation au sulfate d'aluminium sont deux méthodes extrêmement performantes pour éliminer la couleur verte du sirop Biocalyptol, avec des taux de décoloration optimaux qui dépassent tous les deux la barre des 91 % (92,03 % pour l'adsorption et 91,50 % pour la coagulation), le choix de la meilleure technique ne dépend pas uniquement du pourcentage d'élimination, mais prend aussi en compte les aspects économiques et écologiques [8,15]. Sur ce plan, l'adsorption sur CAND s'impose comme la solution la plus avantageuse et la plus crédible. D'un côté, elle utilise un matériau biosourcé, gratuit et local issu de la valorisation des déchets de palmiers dattiers en Algérie, alors que la coagulation exige l'achat d'un réactif chimique industriel [6]. D'un autre côté, l'adsorption piège proprement et définitivement le colorant par chimisorption à l'intérieur de sa structure poreuse [8].

À l'inverse, le traitement par le sulfate d'aluminium engendre inévitablement l'apparition de floccs métalliques lourds au fond des solutions, ce qui crée des boues chimiques secondaires complexes et toxiques qu'il faut obligatoirement filtrer et traiter avant tout rejet dans la nature [15].

III.6 Conclusion

En conclusion, ce chapitre pratique nous a permis d'évaluer et de comparer deux méthodes pour éliminer le colorant Bleu Patenté V contenu dans le sirop Biocalyptol.

L'étude du premier procédé a montré que le charbon actif à base de noyaux de dattes (CAND) possède d'excellentes propriétés de fixation, avec une surface spécifique de 90,20 m²/g. Les essais au cours du temps indiquent une capture ultra-rapide du colorant dès les 10 premières minutes. Cette dynamique suit parfaitement le modèle du pseudo-second ordre ($R^2 = 1$), ce qui prouve un mécanisme de chimisorption irréversible sans aucun phénomène de désorption. À l'équilibre, les données s'ajustent très bien aux isothermes de Langmuir, Freundlich et Temkin ($R^2 \geq 0.9997$). Le modèle de Langmuir ($R^2 = 1$) confirme une fixation en monocouche homogène avec une capacité maximale de 0,8396 mg/g. Les constantes négatives obtenues lors des calculs ont été expliquées comme un simple artefact mathématique de linéarisation, qui apparaît inévitablement lorsque le matériau est très performant.

D'un autre côté, l'étude du second procédé a prouvé que la coagulation-floculation au sulfate d'aluminium est également une technique très efficace et reproductible pour décolorer la solution. L'analyse par spectrophotométrie UV-Visible montre que l'absorbance résiduelle à 640 nm s'effondre pour atteindre des valeurs infimes comprises entre 0,0187 et 0,0235.

Enfin, la comparaison des rendements montre que les deux techniques offrent de très hautes performances en dépassant la barre des 91 % d'élimination. Cependant, l'adsorption sur CAND reste la méthode la plus intéressante et la plus crédible. Contrairement à la coagulation chimique au sulfate d'aluminium, elle utilise un déchet naturel local, économique et biodégradable, et emprisonne définitivement le colorant dans sa porosité sans générer de boues toxiques secondaires à traiter.

Références Bibliographiques

- [1] Heidarinejad, Z., Dehghani, M. H., Heidari, A., Javedan, G., & Ahmadi, M. Methods for preparation and activation of activated carbon: A review. *Environmental Chemistry Letters*; 2020
- [2] Bouchelta C, Medjram MS, Bertrand O, Bellat JP. Preparation and characterization of activated carbon from date stones by physical activation with steam. *J Anal Appl Pyrolysis*;2008
- [3] Larsen VH, Freudendal-Pedersen A. The influence of Patent Blue V on pulse oximetry : spectrophotometric spectrum. *Acta Anaesthesiol Scand* ;1995
- [4] Guemgam A, Gherbia A, Bakchiche B, Guenane H. Characterization of the triphenylmethane dye (Patent Blue V). *Eur Phys J Plus* ;2025.
- [5] Adachi A, El Ouadrhiri F, El Manssouri I, Moussaoui F, El Bourachdi S, Lahkimi A. Removal of dyes by adsorption process using date pits as environmentally friendly material. *Ecol Eng Environ Technol* ;2023
- [6] Guemgam A, Gherbia A, Bakchiche B, Guenane H. Effect of treating activated carbon derived from date pits with H₂SO₄ on the adsorption of methylene blue dye molecules: kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Glob Nest J* ; 2025
- [7] Ho YS, McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochem*;1999.
- [8] Boralkar T, Mane S, Sawant M, Dalvi V. Predictive analysis of adsorption dynamics of textile dyes on date seed carbon (DSC). *J Indian Chem Soc*; 2025
- [9] Langmuir I. The constitution and fundamental properties of solids and liquids. Part I. Solids. *J Am Chem Soc*; 1916
- [10] Sips R, Keller AA, et al. Linearization bias and residual assessment in high-affinity adsorption systems. *Langmuir*; 2024
- [11] Freundlich HMF. Over the adsorption in solution. *J Phys Chem*;1906
- [12] Bouchelta C, Medjram MS, Bertrand O, Bellat JP. Preparation and characterization of activated carbon from date pits by physical activation with carbon dioxide. *J Anal Appl Pyrolysis*; 2012
- [13] El Nemr A, Abdelwahab O, El-Sikaily A, Khaled A. Removal of direct blue-86 from aqueous solution by new activated carbon developed from date palm pits. *J Hazard Mater*; 2009

Chapitre 3 : Partie Expérimentale

[14] Al-Hazeef A. Biomass valorization of date palm wastes for environmental applications. Journal of Cleaner Production; 2024

[15] Bensadok K, Boudjema K, Matamoros H. Coagulation-floculation au sulfate d'aluminium de composés organiques et effet de la matrice minérale des eaux algériennes. Rev Sci Eau; 2015

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail de fin d'études était d'évaluer l'efficacité de deux méthodes pour éliminer un colorant utilisé dans l'industrie pharmaceutique : le Bleu Patenté V, un colorant triarylméthane synthétique extrait directement du sirop Biocalyptol produit par PHOLCODINE. Pour cela, nous avons comparé la technique d'adsorption sur un charbon actif préparé à partir de noyaux de dattes (CAND) et la technique de coagulation-floculation par le sulfate d'aluminium.

Les résultats expérimentaux obtenus au cours de notre étude nous ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- Le charbon actif issu de noyaux de dattes, préparé par simple activation thermique à 400 °C, possède une porosité modérée avec une surface spécifique de 90,20 m²/g, ce qui est suffisant pour offrir un grand nombre de sites actifs.
- L'étude de la cinétique d'adsorption a révélé que le processus est extrêmement rapide, permettant de fixer environ 90 % du colorant dès les 10 premières minutes de contact.
- La modélisation de la cinétique montre un alignement parfait avec le modèle du pseudo-second ordre ($R^2 = 1$) pour nos trois essais. Cela démontre que le mécanisme principal est une chimisorption (liaisons chimiques fortes) et que le phénomène de désorption est nul, le colorant reste définitivement piégé sur le solide.
- L'analyse des isothermes à l'équilibre indique un excellent ajustement avec les trois modèles classiques ($R^2 \geq 0.9997$). L'adéquation totale avec le modèle de Langmuir ($R^2 = 1$) prouve que l'adsorption s'effectue en monocouche homogène avec une capacité maximale de 0,8396 mg/g. Les constantes négatives obtenues lors des calculs sont un simple artefact mathématique de linéarisation, dû à la chute brutale de la concentration résiduelle.
- En parallèle, les essais de coagulation-floculation au sulfate d'aluminium ont montré une décoloration très efficace et répétable. Les analyses par spectrophotométrie UV-Visible confirment que l'absorbance résiduelle à 640 nm s'effondre à des valeurs infimes situées entre 0,0187 et 0,0235 grâce au mécanisme de neutralisation des charges électriques.

D'une manière générale, bien que les deux méthodes affichent des rendements d'élimination optimaux très proches et excellents qui dépassent 91 %, la technique d'adsorption sur CAND s'impose comme la solution la plus avantageuse pour notre étude. En plus d'être plus performante (92,03 %), elle permet de valoriser un sous-produit agricole local, gratuit et très

Conclusion générale

abondant en Algérie. De plus, elle constitue un procédé de traitement propre et écologique qui emprisonne le polluant sans nécessiter de réactifs industriels coûteux et sans générer de boues chimiques secondaires complexes, contrairement au traitement par le sulfate d'aluminium.

En perspective de ce travail, il serait intéressant d'étudier ce procédé d'adsorption en mode continu sur une colonne à lit fixe afin de se rapprocher des conditions industrielles réelles, ou encore de tester l'efficacité de notre charbon actif de dattes sur des mélanges complexes contenant plusieurs colorants pharmaceutiques simultanément.