



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ DE 20 AOÛT 1955 - SKIKDA

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE DES PROCÉDÉS

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de :

Master

Filière : Génie des Procédés
Spécialité : Génie de l'environnement

Étude expérimentale de l'adsorption d'un adsorbant biosourcé pour le traitement des eaux colorées

Réalisé par :

- **ABDENNOURI MANEL**

- **BEN ACHOUR ABIR**

Soutenu le 04/07/2026, devant le jury suivant :

N°	Nom et Prénom	Grade	Établissement d'affiliation	Qualité
1	CETTAH .W	MCB	Université de 20 Août 1955 - Skikda	Encadrante
2	BOUHADIBA. A	Professeur	Université de 20 Août 1955 - Skikda	Président
3	RAHIM .M	MCA	Université de 20 Août 1955 - Skikda	Examineur
4	CHEKROUD. H	MCA	Université de 20 Août 1955 - Skikda	Examinatrice

Année Universitaire **2025- 2026.**

Remerciement

Avant toute chose, nous rendons grâce à Dieu Tout-Puissant et Le remercions de nous avoir accordé la réussite et la persévérance nécessaires pour mener ce travail à son terme.

*En premier lieu, nous adressons nos plus sincères remerciements à notre encadrante, « **Dr. Chettah Wissame** », pour ses précieux conseils, son accompagnement constant, le temps qu'elle nous a consacré, ainsi que pour tous les moyens mis à notre disposition. Sa disponibilité et son suivi tout au long de la réalisation de ce mémoire ont largement contribué à l'aboutissement de ce travail. Ainsi que « **Dr. Mecibah Wahiba** » pour sa aide et ses précieux conseils*

Nous exprimons également notre profonde gratitude aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter d'examiner et d'évaluer ce travail.

Nous tenons aussi à remercier tout particulièrement la responsable des laboratoires pour sa contribution à la réussite de ce travail.

Nos remerciements s'adressent également aux membres de la Faculté de Technologie ainsi qu'aux enseignants et responsables du Département de Génie des Procédés pour leur aide et leur soutien, apportés de manière directe ou indirecte.

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce modeste travail.



Dédicace

Avant tout, je rends grâce à « Allah », le Tout-Puissant, pour m'avoir donné la force et la patience d'achever ce travail.

*Je dédie ce modeste travail à **mes chers parents**, pour leur amour, leurs sacrifices et leur soutien indéfectible.*

À mes frères : « Saif Eddine, Houssam Eddine et Abdelrazak », ainsi qu'à ma sœur « Retaj ».

À toute ma famille.

À mes chères amies : « Faten, Hidayat, Malek et Maria ».

À tous, j'exprime ma profonde gratitude et mon affection.

Abir





Dédicace

Je remercie « Allah » pour la grâce et de m'avoir la force d'achever cette recherche et atteindre ce moment

À ma chère famille, mon soutien et la source de mon bonheur : C'est par la grâce d'Allah, puis par votre appui inconditionnel et vos multiples formes de soutien, que j'ai pu atteindre ce succès et cet instant tant attendu, l'aboutissement de mon parcours étudiant, le cœur serein et fier du chemin parcouru.

À mon cher père : Mon roc sur lequel je m'appuie, la source de ma fierté et de mon orgueil, je te dédie cette joie et cette réussite.

À ma chère mère : Le secret de mon bonheur, La tendre chaleur de mon cœur et le réconfort de mon âme, je te dédie ce succès et ce bonheur.

À mes chers parents : Merci beaucoup. Aucun mot ne saurait exprimer mon amour et ma gratitude envers vous. Pour vos nuits blanches, votre soutien, vos joies partagées, vos prières incessantes.

À mes chères frères « Walid, Bilel, Djalel », à mes chères sœurs « Rania, Sarah » : Merci pour votre soutien et je partage avec vous cette joie et ce succès, qui sont aussi les vôtres.

À mon chère amie « Abir », qui m'a accompagnée dans ce projet, à mon chère amie d'enfance « Tahira », qui m'a accompagnée et soutenue tout au long de mon parcours scolaire, et à tous mes collègues qui m'ont soutenue, je vous remercie infiniment.

Merci, du plus profond de moi, à vous tous.

Manel



Résumé

Cette étude s'inscrit dans une démarche de **valorisation** des **biomasses naturelles** dans le traitement des eaux colorées. Elle évalue les performances d'un biomatériau (**BO**), caractérisé physicochimiquement, pour l'élimination du méthyle violet. Les essais d'adsorption en mode batch ont permis d'étudier l'influence des principaux paramètres opératoires (**pH, masse de l'adsorbant, température, concentration initiale** et **temps de contact**). Dans les conditions optimales, on a atteint un rendement d'élimination d'environ **92 %**. L'étude cinétique montre que le processus suit principalement un modèle du **pseudo-deuxième ordre**, indiquant une adsorption dominée par des interactions de nature chimique. L'étude des isothermes d'adsorption révèle que le modèle de **Freundlich** décrit le mieux le comportement du système, mettant en évidence une surface hétérogène et une adsorption en multicouches. Les essais de **régénération** ont confirmé la réutilisabilité du biomatériau. Les données thermodynamiques révèlent une adsorption **endothermique**, et l'exposition à lumière solaire a permis la dégradation quasi-totale du colorant résiduel après adsorption, soulignant le potentiel de ce matériau pour le traitement **durable** des eaux colorées.

Mots clés : Valorisation, Biomasses Naturelles, Méthyle Violet, Adsorption, Régénération, Dépollution Durable.

Abstract

This study is part of an approach to **valorize natural biomasses** in the treatment of colored waters. It evaluates the performance of a biomaterial (**BO**), characterized physicochemically, for the removal of methyl violet. Batch adsorption tests allowed for the study of the influence of the main operational parameters (**pH, adsorbent mass, temperature, initial concentration, and contact time**). Under optimal conditions, an elimination efficiency of approximately **92 %** was achieved. The kinetic study shows that the process mainly follows a **pseudo-second-order** model, indicating adsorption dominated by chemical interactions. The study of adsorption isotherms reveals that the **Freundlich** model best describes the behavior of the system, highlighting a heterogeneous surface and multilayer adsorption. The **regeneration** tests confirmed the reusability of the biomaterial. Thermodynamic data reveal an **endothermic** adsorption, and exposure to sunlight allowed for the nearly complete degradation of the residual dye after adsorption, highlighting the potential of this material for the **sustainable** treatment of colored waters.

Keywords: Valorization, Natural Biomasses, Methyl Violet, Adsorption, Regeneration, Sustainable Depollution.

ملخص

تُعدّ هذه الدراسة جزءًا من مبادرة تهدف إلى **تثمين الكتلة الحيوية الطبيعية** في معالجة المياه الملونة. تم تقييم كفاءة المادة الحيوية (BO) مُحددة الخصائص الفيزيائية والكيميائية لإزالة صبغة الميثيل البنفسجية. كما أُجريت اختبارات امتزاز متقطعة لدراسة تأثير أهم عوامل التشغيل الرئيسية (الأس الهيدروجيني، كتلة المادة المازة، درجة الحرارة، التركيز الابتدائي و زمن التلامس). في ظل الظروف المثلى، تم تحقيق كفاءة إزالة تقارب **92%**.

تُظهر الدراسة الحركية أن العملية تتبع في المقام الأول نموذج **شبه الرتبة الثانية**، مما يشير إلى أن الامتزاز يهيمن عليه التفاعلات الكيميائية. كما تكشف دراسة منحنيات الامتزاز أن نموذج **فرونديش** هو الأنسب لوصف سلوك النظام، مُبررًا سطحًا غير متجانس وامتزازًا متعدد الطبقات. و أكدت اختبارات **التجديد** إمكانية إعادة استخدام المادة الحيوية. كذلك تكشف البيانات الديناميكية الحرارية عن امتزاز **ماص للحرارة**، وقد أدى التعرض لأشعة الشمس إلى تحلل شبه كامل للصبغة المتبقية بعد الامتزاز، مما يُبرز إمكانية استخدام هذه المادة في **المعالجة المستدامة للمياه الملونة**.

الكلمات المفتاحية: تثمين، الكتلة الحيوية الطبيعية، البنفسجي الميثيلي، الامتزاز، التجديد، المعالجة المستدامة للمياه الملوثة.

List des abréviations

Symbole	Signification
pH	Potentiel d'hydrogène
R²	Coefficient de corrélation
L'IUPAC	Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée
BO	Biomatériau
MV	Méthyle violet
ΔG°	Variation de l'énergie libre de Gibbs
ΔH°	Variation de l'enthalpie
ΔS°	Variation de l'entropie
UV-visible	Spectrophotométrie ultraviolet visible
DRX	Analyse par diffraction des rayons X
H (%)	Le taux d'humidité
D	La densité absolue
m₀	La masse initiale de l'échantillon
A	L'absorbance de la solution
I₀	L'intensité du rayonnement incident
I	L'intensité du rayonnement transmis
ϵ	Coefficient d'absorption molaire (sa valeur dépend de la longueur d'onde).
C₀	La concentration initiale de la solution
L	La longueur du trajet optique (cuve)(cm)
R	Le pourcentage d'adsorbat éliminé
Q_e	Capacité d'adsorption à l'équilibre
Q_m	Capacité maximale d'adsorption
KL	Constante de Langmuir

List des abréviations

n	Facteur d'intensité de l'adsorption du modèle de Freundlich
K1	Constante de vitesse d'adsorption du modèle pseudo-premier ordre
K2	La constante de vitesse du modèle cinétique du pseudo-second ordre
V	Volume du solution
Ce	Concentration à l'équilibre dans la solution



List des figures

Chapitre I

Figure I. 1 : Pollution de l'eau par les effluents industriels.	9
Figure I. 2 : Pollution de l'eau par les colorants.	12
Figure I. 3 : Pollution des rivières par les colorants.	13
Figure I. 4 : La structure chimique d'un colorant anthraquinonique.	14
Figure I. 5 : La structure chimique d'un colorant azoïque.	15
Figure I. 6 : La structure chimique d'un colorant indigoïde.	15
Figure I. 7 : La structure chimique d'un colorant xanthène.	16
Figure I. 8 : La structure chimique d'un colorant triphénylméthane.	17
Figure I. 9 : La structure chimique d'un colorant nitrés.	17
Figure I. 10 : La structure chimique d'un colorant phtalocyanine.	18
Figure I. 11 : Structure chimique d'un colorant acide anthraquinonique	19
Figure I. 12 : Structure chimique du colorant rouge basique	19
Figure I. 13 : La Structure chimique du MV2B.	23
Figure I. 14 : Cristaux violet.	24
Figure I. 15 : Schéma du procédé de précipitation chimique.	26
Figure I. 16 : Principe du traitement par échange d'ions – Déminéralisation.	28
Figure I. 17 : Schéma du mécanisme d'adsorption du Pb(II) sur MOMC-NP.	29
Figure I. 18 : Schéma du principe de coagulation-floculation.	30
Figure I. 19 : Schéma du procédé boues activées : aération et clarification.	30
Figure I. 20 : Schéma de principe d'un lit bactérien pour le traitement des eaux usées.	31
Figure I. 21 : Schéma de principe d'un biodisque (contacteur biologique rotatif).	32
Figure I. 22 : Schéma de principe d'un réacteur UASB.	34
Figure I. 23 : Schéma représenter la différence entre le physisorption et le chimisorption ...	38
Figure I. 24 : Schéma de mécanisme de l'adsorption	41
Figure I. 25 : Classification des isothermes d'adsorption selon Giles et al 1974	45
Figure I. 26 : Représentation des argiles activées.	52
Figure I. 27 : Représentation de la zéolithe.	53
Figure I. 28 : Charbon actif en poudre.	53
Figure I. 29 : Représentation d'alumines activées.	54
Figure I. 30 : Représentation de gels de silice.	55
Figure I. 31 : Types courants de bio-adsorbants.	55

Figure I. 32 : Les pelures d'oignon.	56
Figure I. 33 : Structures chimiques des principaux composés organosulfurés et phénoliques de l'oignon.....	60

Chapitre II

Figure II. 1 : Localisation géographique du site de collecte de BO.	73
Figure II. 2 : Le matériau étudié noté BO.....	74
Figure II. 3 : Broyeur électrique.....	74
Figure II. 4 : l'opération de tamisage par les tamis.....	75
Figure II. 5 : L'étape de lavage avec ébullition.	76
Figure II. 6 : Une étuve.....	76
Figure II. 7 : Pycnomètre.	78
Figure II. 8 : Mesure du pH du bio-adsorbant étudié.	78
Figure II. 9 : Schéma de principe d'un spectrophotomètre à double faisceau	79
Figure II. 10 : Méthyle violet.....	80
Figure II. 11 : La solution mère de méthyle violet 1000 mg/l.	81
Figure II. 12 : La solution fille de méthyle violet (10 ppm).	82
Figure II. 13 : Courbe d'étalonnage du méthyle violet.....	83
Figure II. 14 : Essai d'adsorption.....	84
Figure II. 15 : Ajustement du pH de la solution.....	86
Figure II. 16 : Ultrasons.....	88
Figure II. 17 : L'effet d'irradiation solaire.....	88
Figure II. 18 : Cendres obtenues après calcination à 600 °C.....	90
Figure II. 19 : Cendres obtenues après calcination à 450 °C.....	90
Figure II. 20 : Un matériau prêt à être régénéré après un essai d'adsorption.	91

Chapitre III

Figure III. 1 : Détermination du pH _{pcz}	96
Figure III. 2 : Diffraction des rayons X de biomatériau BO.....	97
Figure III. 3 : UV-Visible de biomatériau.....	98
Figure III. 4 : Spectrophotométrie UV-visible d'adsorption de méthyle violet.....	99
Figure III. 5 : Effet de la taille des particules du biomatériau étudié sur l'élimination du MV (V = 200 ml ; C = 10 ppm ; v= 230 tr.min ⁻¹ ; pH = pH _{libre} ; T = ± 21°C).....	100
Figure III. 6 : Effet de la masse de biomatériau étudié sur l'élimination du MV. (V = 200 ml ; C = 10 ppm ; v= 230 tr.min ⁻¹ ; pH = pH _{libre} ; T = ± 21°C).....	101
Figure III. 7 : Effet du temps de contact sur l'élimination de MV sur le biomatériau étudié. (V= 200 ml ; v=230 tr. min ⁻¹ ; pH= pH _{libre} ; m=0.3 g ; T= ±21°C).	102
Figure III. 8 : Effet de la concentration initiale du MV sur biomatériau étudié. (V= 200 ml ; v=230 tr. min ⁻¹ ; m=0.3g ; pH= pH _{libre} ; T= ±21°C).....	103
Figure III. 9 : Effet de la température sur l'élimination du MV, (V= 200 ml ; C ₀ =10 ppm v=230 tr. min ⁻¹ ; m=0.3g ; pH= pH _{libre}).....	104
Figure III. 10 : Effet du pH sur l'élimination du MV. (V = 200 ml ; C ₀ = 10 ppm v = 230 tr. min ⁻¹ ; m = 0.3g ; T = ±21°C).....	105
Figure III. 11 : Effet de la calcination sur l'élimination du MV.....	106
Figure III. 12 : Effet de la vitesse d'agitation.....	107
Figure III. 13: Effet de la force ionique sur le rendement d'élimination du MV.	108
Figure III. 14 : Rendement d'élimination du MV en fonction des cycles.....	109
Figure III. 15 : Isotherme d'adsorption de MV sur le biomatériau. (V= 200 ml ; teq=40 min, v = 230 tr. min ⁻¹ ; m = 0.3g ; Ph = 6 ; T= ±21°C).	110
Figure III. 16 : Isothermes d'adsorption selon le modèle de Langmuir.	111
Figure III. 17 : Isotherme d'adsorption selon le modèle de Freundlich.	111
Figure III. 18 : Cinétique d'adsorption du pseudo premier ordre du VM sur biomatériau. .	113
Figure III. 19 : Cinétique d'adsorption du pseudo second ordre du VM sur biomatériau. ..	113
Figure III. 20 : Variation de la constante de distribution avec la température d'élimination VM sur biomatériau.	115
Figure III. 21 : Rendement d'élimination du MV par le procédé combiné adsorption–photolyse solaire.	117



List des tableaux

Chapitre I

Tableau I. 1: Classification des groupes chromophores et auxochromes selon leur intensité croissante	13
Tableau I. 2: Classement de la toxicité selon le type de colorant	22
Tableau I. 3: Propriétés physicochimiques du méthyle violet (MV).	23
Tableau I. 4 : Avantages et inconvénients de diverses technologies de traitement des eaux Colorées.....	33
Tableau I. 5: Comparaison entre chimisorption et physisorption.	37
Tableau I. 6 : Composition des déchets d'oignon (base matière sèche)	55
Tableau I. 7 : Teneur en minéraux dans la peau d'oignon	56
Tableau I. 8 : Composés phytochimiques dans la peau d'oignon	56
Tableau I. 9 : Composition des écailles extérieures de l'oignon	57
Tableau I. 10 : Teneur en flavonoïdes selon la variété d'oignon (mg/g)	57
Tableau I. 11 : Profil des acides gras des écailles extérieures de l'oignon	58

Chapitre II

Tableau II. 1: la granulométrie des échantillons.....	75
Tableau II. 2: Résultats de l'étalonnage du méthyle violet. 83	

Chapitre III

Tableau III. 1: Le taux d'humidité de biomatériau.....	94
Tableau III. 2: La teneur en cendres.	95
Tableau III. 3: Le pH de biomatériau.....	97
Tableau III. 4 : Les paramètres d'adsorption de Freundlich et de Langmuir.	112
Tableau III. 5 : Paramètres obtenus pour les deux modèles cinétiques étudiés.....	114
Tableau III. 6 : Paramètres thermodynamiques de l'adsorption de MV sur BO ₁	115

A decorative scroll graphic with the word "Sommaire" written on it. The scroll is light green with a darker green outline and features a shadow effect. The word "Sommaire" is written in a white, serif font with a green outline and a shadow. The scroll has a vertical bar on the left side and a small circular detail on the top right corner.

Sommaire

Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Abstract	
ملخص.....	
Liste des abriviations	
Liste des figures.....	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	1
Les references bibliographiques.....	3

Chapitre I: adsorption et depollution des eaux

I.1. Introduction	7
I.2. Généralité sur l'eau	7
I.2.1. Les ressources en eau	7
I.2.2. Usages de l'eau	7
I.2.2.1. Usages agricoles.....	7
I.2.2.2. Usages domestiques	8
I.2.2.3. Usages industriels.....	8
I.2.2.4. Usages énergétiques (énergie hydraulique)	8
I.2.3. Origines de la pollution de la ressource en eau	8
I.2.3.1. La pollution industrielle	9
I.2.3.2. La pollution agricole	9
I.2.3.3. La pollution domestique	9
I.2.3.4. La pollution accidentelle	9

I.2.4. Les types des polluants.....	10
I.2.4.1 Les matières en suspension MES.....	10
I.2.4.2. Les sels minéraux.....	10
I.2.4.3. Les matières organiques	10
I.2.4.4. Les métaux lourds (ETM).....	10
I.2.4.5. Les pesticides	10
I.2.5. Les impacts de la pollution de l'eau	10
I.2.5.1. Impacts sur l'écosystème	10
I.2.5.2. Impacts sur la santé humaine	11
I.2.6. Les colorants.....	12
I.2.6.1. Généralités sur les colorants	12
I.2.6.2. Définition des colorants.....	12
I.2.6.3. Origine des colorants.....	13
I.2.6.4. Classification des colorants	14
I.2.6.4.1. Classification chimique	14
I.2.6.4.2. Classification tinctoriale	18
I.2.6.5. Applications des colorants.....	21
I.2.6.6. La toxicité des colorant	22
I.2.6.7. Choix du soluté étudié.....	23
I.2.6.7.1. Définition de méthyle violet	23
I.2.6.7.2. Propriétés physicochimiques du méthyle violet.....	23
I.2.6.7.3. Utilisations du méthyle violet	24
I.2.6.7.4. Toxicité du méthyl violet 2B	25
I.2.7. Procédés d'élimination des colorants.....	25
I.2.7.1. Les techniques chimiques	25

I.2.7.2. Les techniques physico-chimiques.....	27
I.2.7.3. Les techniques biologiques.....	29
I.3. Le phénomène d'adsorption.....	35
I.3.1. Définition de l'adsorption	35
I.3.2. Le principe d'adsorption	36
I.3.3. Les types d'adsorption.....	36
I.3.3.1. Adsorption chimique (Chimisorption)	36
I.3.3.2. Adsorption physique (physisorption)	36
I.3.4. Facteurs influençant l'adsorption.....	37
I.3.4.1. La surface spécifique.....	38
I.3.4.2. Le pH.....	38
I.3.4.3. La température	38
I.3.4.4. La masse de l'adsorbant	38
I.3.4.5. La concentration initiale	38
I.3.4.6. Structure de l'adsorbant.....	38
I.3.4.7. Influence de l'adsorbat	39
I.3.4.8. La polarité.....	39
I.3.5. Description du mécanisme d'adsorption.....	39
I.3.6. Cinétique d'adsorption	40
I.3.6.1. Modèles cinétiques de l'adsorption.....	40
I.3.6.1.1. Modèle de pseudo-premier ordre	40
I.3.6.1.2. Modèle de pseudo-second ordre.....	41
I.3.6.1.3. Modèle de diffusion intra-particulaire	41
I.3.6.2. Capacité d'adsorption.....	42
I.3.6.3. Coefficient de corrélation (R^2).....	43

I.3.7. Isothermes d'adsorption	43
I.3.7.1. Classification des isothermes d'adsorption	44
I.3.7.1.1. Classification de Brunauer, Emmet et Teller (BET) (1938)	44
I.3.7.1.2. Les différents modèles des isothermes d'adsorption.....	45
I.3.8. Etude des paramètres thermodynamique d'adsorption	48
I.4. Les adsorbants	49
I.4.1. Définition d'un adsorbant.....	49
I.4.2. Critères de choix d'un adsorbant	49
I.4.3. Caractéristiques générales des adsorbants.....	50
I.4.3.1. Structure poreuse.....	50
I.4.3.2. Surface spécifique	51
I.4.4. Types d'adsorbants	51
I.4.4.1. Argiles activée	51
I.4.4.2. Zéolithes	51
I.4.4.3. Charbon actif.....	52
I.4.4.4. Les alumines actives.....	52
I.4.4.5. Les gels de silice	53
I.5. Les bio-adsorbants.....	53
I.5.1. Définition des bio-adsorbants.....	53
I.5.2. Bioadsorbant d'origine végétale (les pelures d'oignon)	54
I.5.2.1. L'origine de l'oignon	54
I.5.2.2. Définition des pelures d'oignon.....	54
I.5.2.3. Composition chimique et bioactive des pelures d'oignon.....	55
I.5.2.3.1. Composition nutritionnel des pelures d'oignon.....	55
I.5.2.3.2. Types de composés bioactifs.....	58

I.5.2.4. Utilisation des pelures d'oignon	60
I.5.2.4.1. Colorant naturel.....	60
I.5.2.4.2. Produits de boulangerie	60
I.5.2.4.3. Sécurité	60
I.6. Conclusion.....	60
Les references bibliographiques.....	62

Chapitre II: Méthodologie expérimentale

II.1. Introduction	72
II.2. Matériels utilisés.....	72
II.3. Produits utilisés	72
II.3.1. Produits végétaux	72
II.3.2. Produits chimiques	73
II.4. Dispositif et protocole expérimentaux.....	73
II.4.1. Matériel d'étude (Biomatériau).....	73
II.4.2. Les étapes de préparation de biomatériau	73
II.4.2.1. L'étape de collection et tri.....	73
II.4.2.2. L'étape de broyage.....	74
II.4.2.3. L'étape de tamisage	74
II.4.2.4. L'étape s lavage	75
II.4.2.5. L'étape de séchage	76
II.5. Caractérisation physico-chimique et structurale du bio-adsorbant.....	77
II.5.1. Le taux d'humidité	77
II.5.2. La densité absolue	77
II.5.3. Le pH du bio-adsorbant	78
II.5.4. Analyse UV-Visible.....	79

II.5.5. Analyse par diffraction des rayons X (DRX).....	79
II.5.6. La teneur en cendres	80
II.6. Polluant modèle.....	80
II.6.1. Préparation des solutions	80
II.6.2. Préparation de solution fille	81
II.6.3. Protocole de dosage et d'étalonnage du méthyle violet	82
II.7. Essai d'adsorption.....	83
II.7.1. Étude des facteurs influençant le rendement d'adsorption	84
II.7.1.1. L'effet de la masse de l'adsorbant	84
II.7.1.2. L'effet du temps d'équilibre d'adsorption	85
II.7.1.3. L'effet de la température	85
II.7.1.4. L'effet du pH	86
II.7.1.5. L'effet de la concentration initiale en colorant sur l'adsorption	86
II.7.1.6. L'effet d'ultrasons.....	87
II.7.1.7. L'effet de l'irradiation solaire.....	88
II.7.1.8 L'effet de la vitesse d'agitation	89
II.7.1.9 Détermination du point de charge nulle	89
II.7.1.10. L'effet de la calcination.....	89
II.7.1.11. L'effet de régénération de la bio-adsorbant.....	90
II.7.2. Tracé des isotherme et modélisation d'adsorption.....	92
II.8. Conclusion	92

Chapitre III : Présentation et discussion des résultats

III.1. Introduction	94
III.2. Évaluation des propriétés physico-chimiques du biomatériau	94
III.2.1. Mesure du taux d'humidité	94

III.2.2. La teneur en cendres	95
III.2.3. La densité absolue	95
III.2.4. Le pH de point de charge nulle (pH _{pzc}).....	96
III.2.5. Le pH	96
III.2.6 Analyse diffraction des rayons X.....	97
III.2.7. Analyse UV-Visible	98
III.3. Évaluation des performances d'adsorption du biomatériau.....	99
III.3.1. Détection spectroscopique du colorant de méthyle violet	99
III.3.2. Essai d'adsorption du méthyle violet	100
III.3.2.1. Effet de la taille des particules	100
III.3.2.2. Effet de la masse de biomatériau.....	101
III.3.2.3. Effet du temps de contact.....	101
III.3.2.4. Effet de la concentration initiale.....	101
III.3.2.5. Effet de la température.....	103
III.3.2.6. Effet du pH.....	104
III.3.2.7. Effet de calcination sur l'élimination du colorant	105
III.3.2.8. Effet de la vitesse d'agitation	106
III.3.2.9. Effet de la force ionique.....	107
III.3.3. Évaluation de la réutilisabilité de matériau.....	108
III.4 Modélisation de l'équilibre d'adsorption.....	109
III.4.1 Tace l'isotherme d'adsorption	109
III.4.2 Modélisation des isothermes d'adsorption	110
III.4.3 Étude cinétique de l'adsorption du MV sur BO ₁	112
III.5 Les paramètres thermodynamiques.....	114
III.6 Traitement complémentaire par irradiation solaire	116

III.6.1. Étude de la photolyse solaire du Méthyle Violet	116
III.6.2 Élimination du Violet de Méthyle par le procédé combiné adsorption–photolyse solaire.	116
III.7 Conclusion	117
Les references bibliographiques	118
Conclusion générale	121

A decorative graphic featuring a central white rectangular box with rounded corners and a green border. The box is flanked by two green-outlined shapes that resemble folded pages or banners. The text "Introduction générale" is centered within the white box in a green, italicized serif font. The entire graphic is set against a white background.

Introduction générale

Aujourd'hui, la pollution de l'eau est reconnue comme un enjeu environnemental majeur qui exige des solutions efficaces. [1]. À l'échelle mondiale, les colorants synthétiques sont largement utilisés dans les industries du textile, du papier, de l'imprimerie, des plastiques, du cuir, de l'agroalimentaire et des cosmétiques [2]. Les industries textiles génèrent ainsi d'importantes quantités d'eaux usées contenant divers contaminants, notamment des colorants. L'élimination de ces derniers des effluents industriels constitue un enjeu environnemental important, car leur persistance dans le milieu aquatique engendre des impacts environnementaux significatifs. En particulier une dégradation de la qualité des eaux et une perturbation des organismes vivants. Par ailleurs, certains colorants possèdent un caractère toxique susceptible d'affecter la santé humaine [3-5]. Le colorant méthyle violet est couramment employé dans de nombreuses industries. Sa stabilité chimique, sa faible biodégradabilité et sa toxicité potentielle en font un polluant préoccupant, ce qui exige le développement de procédés efficaces pour son élimination des eaux usées [6,7]. Plusieurs méthodes conventionnelles, telles que les techniques chimiques et biologiques, peuvent être utilisées pour éliminer les colorants [8]. L'adsorption constitue l'une des techniques les plus efficaces pour le traitement avancé des eaux usées, notamment grâce à l'utilisation de biomatériaux issus de biomasses végétales [9,10]. En raison de leurs performances, de leur faible coût et de leur caractère renouvelable, les bioadsorbants sont largement étudiés et recommandés pour l'élimination des colorants textiles synthétiques des effluents industriels [11,12]. Dans le cadre de la recherche des matériaux performants et accessibles, de nombreuses biomasses végétales ont été étudiées en tant que bioadsorbants [13]. Ces ressources renouvelables, qu'elles soient utilisées à l'état naturel ou après modification, sont une alternative économique et respectueuse de l'environnement pour le traitement des eaux usées et elles contribuent à la gestion des déchets.

Cette étude vise l'évaluation des performances de pelures d'oignon comme biomatériaux pour l'élimination du méthyle viole à partir de solutions aqueuses par adsorption. Cette étude ouvre des perspectives pour la valorisation de biomatériau dans le traitement durable des effluents.

Le présent manuscrit est divisé en deux parties principales :

L'une est dédiée au **premier chapitre** est consacré à **l'approche conceptuelle** de l'étude. Il traite successivement des eaux colorées et de leurs impacts environnementaux, des caractéristiques des colorants, des principes de l'adsorption appliquée au traitement des eaux,

ainsi que des adsorbants naturels en tant qu'alternatives durables pour l'élimination des polluants.

L'autre partie est consacrée à l'approche expérimentale. Elle comprend deux chapitres : le premier porte sur l'évaluation des performances de biomatériau étudié pour l'élimination du méthyle violet en solution aqueuse. Elle commence par la présentation de la méthodologie expérimentale, avec les matériels, les réactifs et les protocoles utilisés, ainsi que la caractérisation physicochimique du matériau. Alors que le second chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats expérimentaux, où on en discute l'influence des principaux paramètres opératoires, en modélisant les isothermes d'adsorption, en menant des études cinétiques et thermodynamiques, et en réalisant des essais de régénération du biomatériau étudié.

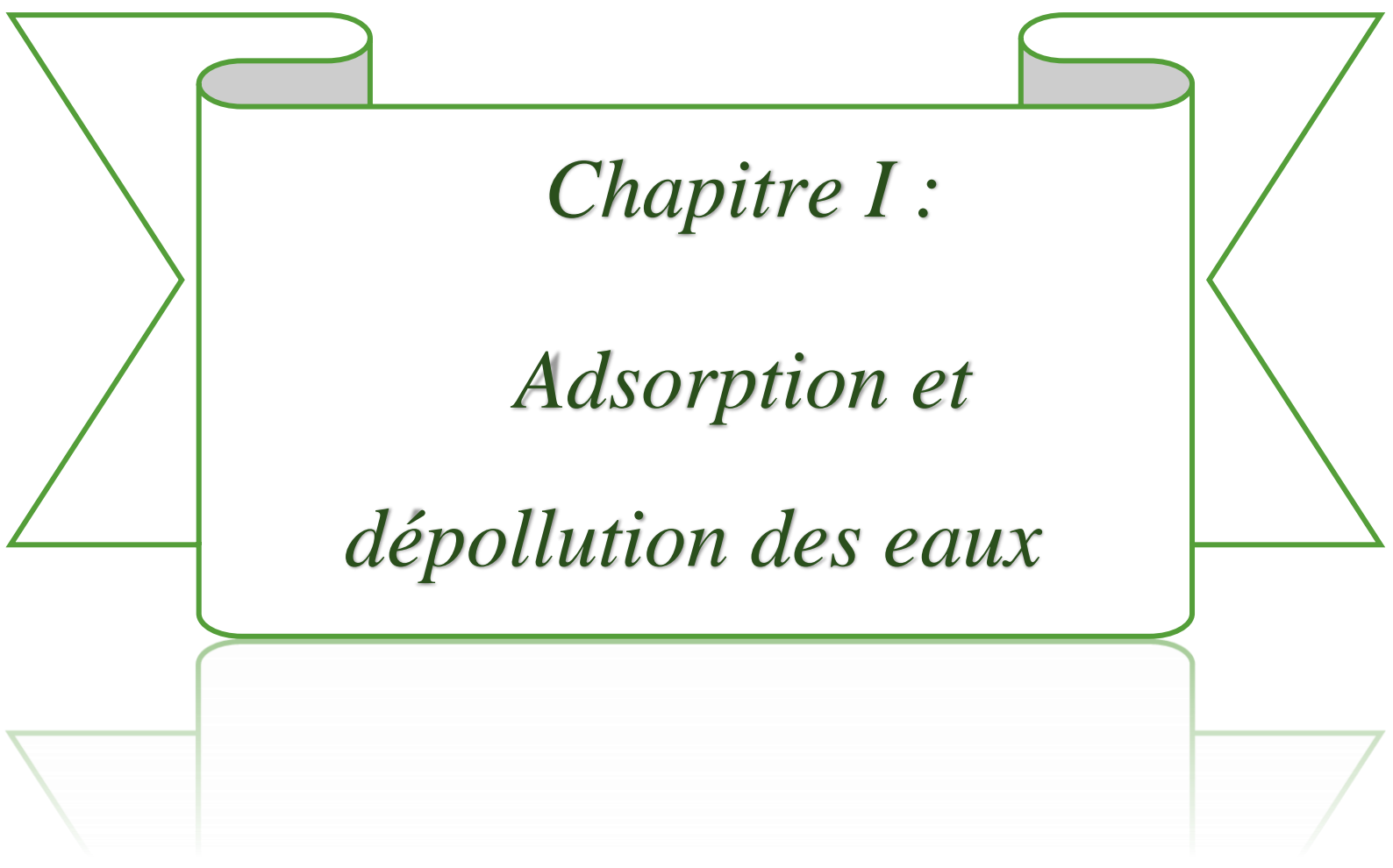
Le manuscrit se termine par une conclusion générale résumant les principaux résultats et les perspectives de cette étude.

References bibliographiques

- [1] Baechler, L. (2024). L'accès à l'eau : Un enjeu majeur du développement durable. De Boeck Supérieur.
- [2] Hadj-Otmane, C. (2024). Synthèse des charbons à base d'un biomatériau local : Caractérisation et propriétés d'adsorption des colorants synthétiques en milieux aqueux (Thèse de doctorat). Faculté des sciences et technologie.
- [3] Benkaddour, B. (2018). Contribution à l'étude de la contamination des eaux et des sédiments de l'Oued Chélif (Algérie) (Thèse de doctorat). Université de Perpignan & Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem.
- [4] Douibi, S., & Simohamed, I. (2025). Étude de l'élimination du colorant Rouge Congo par le procédé d'électrocoagulation (Thèse de doctorat). Faculté des sciences et de la technologie.
- [5] Fenek, L., & Fernane, S. (2025). Étude de la biodégradation des colorants textiles par les actinobactéries (Thèse de doctorat). Université Mouloud Mammeri.
- [6] Labed, M. L., & Ben Hadjira, I. (2025). Étude d'optimisation de la dégradation du Crystal Violet en milieu aqueux par procédé d'oxydation avancée : La photocatalyse hétérogène, comparaison avec le procédé Fenton (Thèse de doctorat). Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [7] Boudia, C., & Makkeb, A. (2022). Étude de l'effet de l'application du glyphosate et de sa biodégradation par la densité bactérienne d'un sol oasien : Cas du sol de l'exploitation de l'Université de Ouargla (Thèse de doctorat). Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [8] Ben Salah, S. (2025). Traitement des eaux usées textiles par adsorbants et techniques membranaires (Thèse de doctorat). Université de Montpellier & Université de Sfax.
- [9] Benlekhdim, H., Ben Abdelkader, N., & Daoud, M. (2025). Élaboration d'un biomatériau adsorbant à partir de résidus végétaux pour le traitement de l'eau (Thèse de doctorat). Université de Ghardaïa.
- [10] Djellouli Della, K. (2025). Application d'un procédé adsorption–électrochimique d'oxydation avancée au traitement des polluants complexes (Thèse de doctorat).
- [11] Hameurlaine, S. (2025). Préparation d'un adsorbant innovant comme solution durable dans l'élimination des colorants des eaux industrielles textiles (Thèse de doctorat).
- [12] Makhoulf, M. R. (2025). Bio-adsorbants : Élaboration, caractérisation et applications pour le traitement des eaux usées (Thèse de doctorat).

[13] Issaoui, H. (2021). *Élaboration et caractérisation de matériaux poreux biosourcés* (Thèse de doctorat). Université de Pau et des Pays de l'Adour.

Approche conceptuelle



Chapitre I :
Adsorption et
dépollution des eaux

I.1. Introduction

Le traitement des eaux usées contenant des colorants constitue l'un des principaux défis environnementaux, en raison de la toxicité élevée et de la grande stabilité chimique de ces composés, qui les rendent persistants dans les milieux aquatiques et susceptibles d'affecter les écosystèmes ainsi que la santé humaine. Plusieurs procédés ont été développés pour éliminer ces polluants, mais l'adsorption s'est imposée comme l'une des techniques les plus performantes grâce à son efficacité et à son intérêt économique. Ce chapitre présente une vue d'ensemble des colorants, de leurs sources et de leurs impacts environnementaux, ainsi que des principales méthodes mises en œuvre pour leur élimination, en accordant une attention particulière au procédé d'adsorption, considéré comme l'une des approches les plus prometteuses. Enfin, ce chapitre décrit le matériau adsorbant utilisé dans cette étude, à savoir Les biomasses résiduelles, tout en mettant en évidence ses principales caractéristiques et son potentiel pour l'élimination des colorants en milieu aqueux.

I.2. Généralité sur l'eau

I.2.1. Les ressources en eau

L'eau recouvre à peu près les trois quarts de la surface de la Terre. On la trouve dans les océans, les rivières, les lacs, mais aussi dans l'air et sous la terre. Presque toute l'eau douce, plus de 99 %, se trouve soit sous forme de glace, soit dans les nappes souterraines.

- ✓ **L'eau de surface** : Elle se trouve sur terre, dans les ruisseaux, les lacs ou les zones humides. Elle est également facile à exploiter.
- ✓ **Les eaux souterraines** : Elles se trouvent dans le sous-sol dans les interstices des particules de roches et de sol, ou dans les crevasses et fissures des roches.
- ✓ **L'eau atmosphérique** : présente dans l'atmosphère soit en tant que solide (ex : neige), liquide (pluie) ou gaz (brouillard) [1].

I.2.2. Usages de l'eau

Les usages en sont multiples. Nous énumérerons ici les plus notables:

I.2.2.1. Usages agricoles

Environ 70 % de l'eau douce est utilisée pour l'agriculture, mais ce pourcentage diminue dans certains pays et peut atteindre près de 50 %. Les méthodes isotopiques et

nucléaires fournissent des informations sur l'utilisation de l'eau, notamment les pertes dues à l'évaporation du sol, et contribuent à améliorer les plans d'irrigation tout en augmentant l'efficacité de son utilisation [2].

I.2.2.2. Usages domestiques

Selon l'article R. 1321-1-1 du code de la santé publique, les usages domestiques de l'eau comprennent le nettoyage intérieur et extérieur des locaux et véhicules, le lavage du linge, l'arrosage des jardins et espaces verts privés, ainsi que l'alimentation des fontaines, bassins et l'évacuation des eaux usées [3].

I.2.2.3. Usages industriels

L'eau joue un rôle central dans l'industrie, qui correspond à 22 % de la consommation globale, avec des applications variées : dans les raffineries de minerai et de pétrole, elle est intégrée aux processus de fabrication, sert au nettoyage et à l'évacuation des déchets, assure le refroidissement des équipements et alimente les chaudières et au solvant et aux réactifs chimiques. La part la plus importante de cette consommation est attribuée au refroidissement des installations industrielles [8].

I.2.2.4. Usages énergétiques (énergie hydraulique)

L'hydroélectricité contribue à hauteur d'environ 16 % à la production mondiale d'électricité. C'est une source d'énergie renouvelable, obtenue en détournant le cours naturel de l'eau d'un niveau élevé vers un niveau bas. Il existe différentes infrastructures pour cette source d'énergie, notamment les des centrales éclusées ou au fil de l'eau de centrales dans le courant et les barrages...etc [4].

I.2.3. Origines de la pollution de la ressource en eau

La pollution de la ressource en eau se caractérise par la présence de micro-organismes, de substances chimiques ou encore de déchets industriels. Elle peut concerner les cours d'eau, les nappes d'eau, les eaux saumâtres mais également l'eau de pluie, la rosée, la neige et la glace polaire.

Cette pollution peut avoir des origines diverses :

I.2.3.1. La pollution industrielle

Avec les rejets de produits chimiques comme les hydrocarbures ou le PCB rejetés par les industries ainsi que les eaux évacuées par les usines [5].



Figure I. 1: Pollution de l'eau par les effluents industriels.

I.2.3.2. La pollution agricole

Les polluants agricoles atteignent les eaux souterraines ou de surface soit par lessivage du sol, soit par ruissellement. Ces polluants sont variés et comprennent notamment les déjections animales, les engrais, les produits phytosanitaires et les pesticides (dont les herbicides, les insecticides et les fongicides) [5].

I.2.3.3. La pollution domestique

Les eaux usées comprennent trois grandes catégories : premièrement, les déchets des toilettes (d'origine biologique) ; deuxièmement, les produits cosmétiques et ménagers tels que les savons et les détergents ; et troisièmement, les déchets chimiques tels que les peintures, les solvants, l'huile moteur et les hydrocarbures [5].

I.2.3.4. La pollution accidentelle

Avec le déversement accidentel de produits toxiques dans le milieu naturel et qui viennent perturber l'écosystème [5].

I.2.4. Les types des polluants

I.2.4.1 Les matières en suspension MES

Toutes les matières minérales ou organiques qui ne se solubilisent pas dans l'eau. Troublent l'eau, réduisent la lumière et freinent la photosynthèse, ce qui peut mener à l'eutrophisation [6].

I.2.4.2. Les sels minéraux

Ils Présentent naturellement dans l'eau en faible quantité, les sels minéraux comme chlorures ou sulfates de calcium, de magnésium...etc. Peuvent voir leur concentration s'élever à la suite de rejets industriels [6].

I.2.4.3. Les matières organiques

Ce sont tous les déchets carbonés (comme les hydrocarbures, la cellulose produite par les papeteries...etc.). Ces matières constituent une nourriture de choix pour les micro-organismes de l'eau et provoquent leur prolifération. Les micro-organismes appauvrissent le milieu en O₂, constituant une grave menace pour la vie aquatique [6].

I.2.4.4. Les métaux lourds (ETM)

Les métaux lourds sont des polluants naturellement existent et ne se dégradent pas dans notre environnement, et largement utilisés dans l'industrie. Ils s'accumulent dans les organismes vivants, certains métaux lourds sont toxiques comme le cadmium (Cd), le mercure (Hg), le plomb (Pb)...etc [6].

I.2.4.5. Les pesticides

Les pesticides sont considérés comme une cause majeure de pollution de l'eau. Lorsqu'ils sont pulvérisés, ils sont absorbés par le sol, provoquant la contamination des eaux souterraines et la détérioration de leur qualité [7].

I.2.5. Les impacts de la pollution de l'eau

I.2.5.1. Impacts sur l'écosystème

- ✓ **Détérioration des écosystèmes aquatiques**

La dégradation de la biomasse végétale dans les écosystèmes aquatiques, résultant de la pollution, entraîne un enrichissement en nutriments (eutrophisation) qui appauvrit la faune et la flore. Cette situation favorise la prolifération excessive des végétaux aquatiques et perturbe le fonctionnement physiologique des ressources halieutiques, réduisant ainsi la capacité de régénération des écosystèmes aquatiques [29].

✓ **L'eutrophisation**

L'eutrophisation est l'enrichissement excessif des eaux en nutriments principalement à cause des rejets d'eaux usées, des activités agricoles (engrais), de l'aquaculture et des effluents côtiers.

Cet excès de nutriments entraîne une augmentation rapide des algues et du phytoplancton, modifie le fonctionnement biologique des écosystèmes aquatiques et perturbe les réseaux trophiques [30].

✓ **Bioaccumulation et biomagnification**

La bioaccumulation correspond à l'accumulation progressive du mercure (THg et MeHg) dans un organisme vivant par absorption à partir de l'eau et de l'alimentation.

La biomagnification correspond à l'augmentation de la concentration du mercure le long de la chaîne trophique, des organismes de base vers les niveaux trophiques supérieurs [31].

I.2.5.2. Impacts sur la santé humaine

La pollution de l'eau a un impact considérable sur la santé humaine car l'eau est un élément essentiel à la vie ; sa pollution provoque des maladies qui peuvent être mortelles, notamment :

- ✓ Irritation de la peau.
- ✓ Problèmes respiratoires.
- ✓ Problèmes cardiovasculaires.
- ✓ Dommages au foie et aux reins.
- ✓ Cancer, cholerae...act [32].

I.2.6. Les colorants

I.2.6.1. Généralités sur les colorants

Les colorants sont largement utilisés dans de nombreux domaines de la vie quotidienne, notamment dans la teinture et l'impression des fibres textiles, la coloration des produits alimentaires, ainsi que dans les secteurs médical et cosmétique. Ils peuvent être d'origine naturelle, obtenus par synthèse chimique ou produits artificiellement. Toutefois, ces composés se caractérisent généralement par une faible biodégradabilité et présentent des effets toxiques susceptibles d'affecter l'être humain et les animaux [9].



Figure I. 2 : Pollution de l'eau par les colorants.

I.2.6.2. Définition des colorants

Un colorant est un composé organique caractérisé par sa capacité à absorber sélectivement une partie du spectre lumineux visible (380–750 nm). La couleur observée correspond à la fraction de lumière non absorbée qui est réfléchiée ou transmise. Les molécules colorantes renferment généralement des structures aromatiques associées à différents groupements chromophores et auxochromes, leur conférant leurs propriétés colorantes. Dans les applications textiles, les colorants se fixent à la surface ou à l'intérieur des fibres par divers mécanismes d'interaction physicochimique [10].

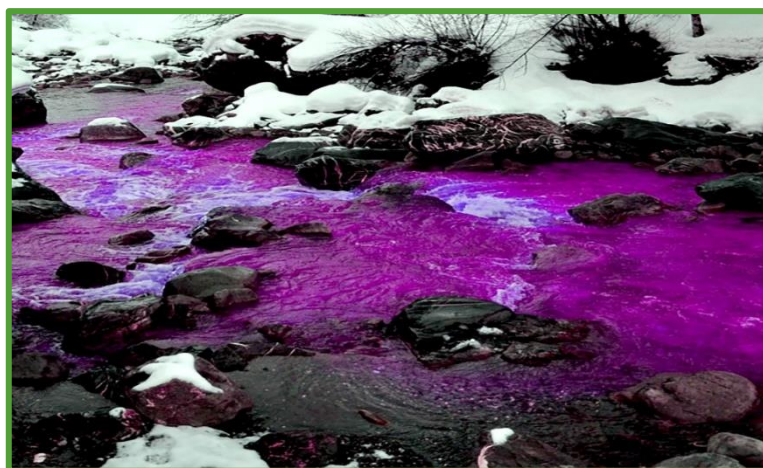


Figure I. 3 : Pollution des révièrs par les colorants.

Tableau I. 1: Classification des groupes chromophores et auxochromes selon leur intensité croissante [11].

Groupes chromo-phores	Groupes auxo-chromes
Azo (-N=N-)	Amino (-NH ₂)
Nitroso (-NO ou -N-OH)	Méthyl-amino (-NHCH ₃)
Carbonyl (=C=O)	Diméthyl-amino ((-N(CH ₃) ₂))
Vinyl (-C=C-)	Hydroxyl (-HO)
Nitro (-NO ₂ ou =NO-OH)	Alkoxy (-OR)
Sulphure (>C=S)	Groupes donneurs d'électrons

I.2.6.3. Origine des colorants

Les colorants sont présents dans diverses espèces végétales et animales et peuvent être isolés à l'aide de méthodes d'extraction conventionnelles, notamment l'extraction par solvant.

Ils peuvent également être obtenus par synthèse chimique, cette dernière permettant la production de colorants naturels ainsi que de colorants artificiels, inexistant dans la nature [12].

I.2.6.4. Classification des colorants

Les colorants sont classés selon leur structure chimique ou leur mode d'application sur les différents substrats [11].

I.2.6.4.1. Classification chimique

a) Les colorants anthraquinoniques

Les colorants anthraquinoniques sont des dérivés de l'anthracène dont le chromophore est constitué d'un noyau quinonique portant des groupements hydroxyles ou amines. Ils sont principalement utilisés pour la teinture des fibres de polyester, d'acétate et de triacétate de cellulose. Cette famille de colorants se distingue par sa grande stabilité à la lumière et aux agents chimiques. Leur structure de base repose sur l'anthraquinone, caractérisée par la présence du groupement chromophore carbonyle ($>C=O$) associé à un noyau quinonique [13].

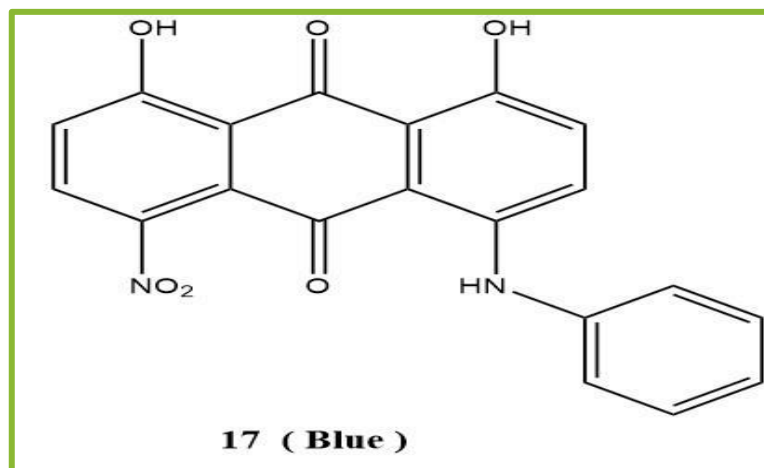


Figure I. 4 : La structure chimique d'un colorant anthraquinonique.

b) Les colorants azoïques

Les colorants azoïques sont caractérisés par la présence d'un groupement azo ($-N=N-$) reliant deux groupements alkyles ou aryles, identiques ou différents. Leur structure repose

généralement sur un noyau azobenzénique formant un système aromatique, dans lequel le groupement azo constitue le principal chromophore responsable de la coloration [14].

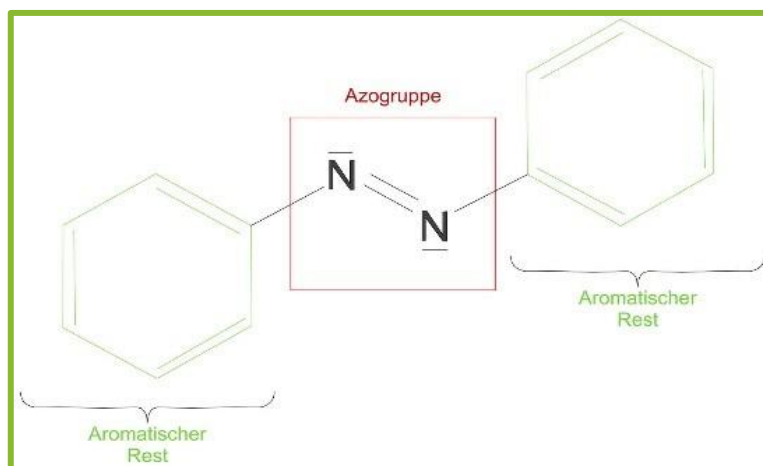


Figure I. 5 : La structure chimique d'un colorant azoïque.

c) Les colorants indigoïdes

Les colorants indigoïdes constituent une famille de colorants dérivés de l'indigo. Les modifications structurales de la molécule du bleu indigo, notamment par l'incorporation d'atomes de soufre, d'oxygène ou de sélénium, entraînent des variations de teinte pouvant s'étendre de l'orange au turquoise [14].

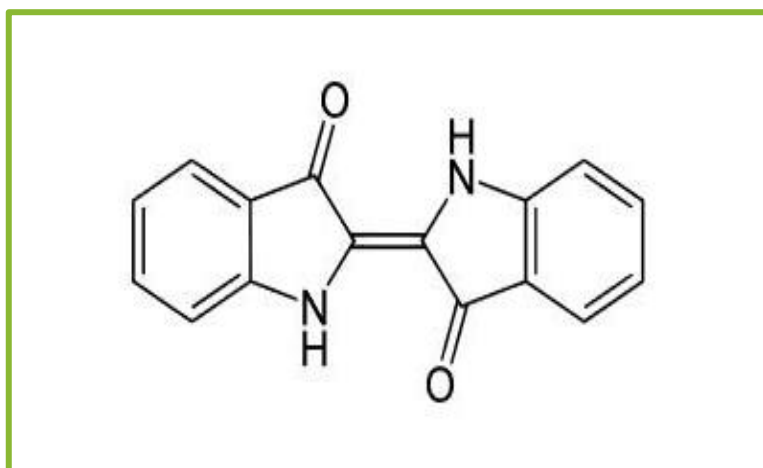


Figure I. 6 : La structure chimique d'un colorant indigoïde.

d) Les colorants xanthènes

Les colorants xanthènes regroupent des dérivés de la fluorescéine halogénée caractérisés par une forte fluorescence. Ils sont utilisés comme marqueurs lors d'accidents maritimes et comme traceurs pour l'étude des écoulements des eaux souterraines. Ils trouvent également des applications dans les domaines alimentaire, cosmétique, textile et de l'impression [13].

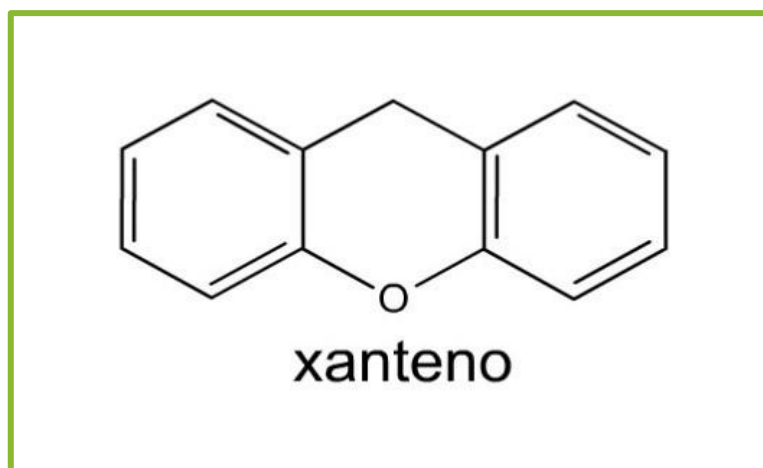


Figure I. 7 : La structure chimique d'un colorant xanthène.

e) Les colorants triphénylméthanés

Les colorants triphénylméthanés sont des dérivés du méthane dans lesquels trois atomes d'hydrogène sont substitués par des noyaux phényles reliés à un carbone central. Ils représentent l'une des plus anciennes familles de colorants synthétiques et sont largement employés dans les industries textile et papetière pour la teinture du nylon, de la laine, de la soie et du coton. En outre, ces colorants trouvent des applications dans le domaine médical en tant que marqueurs biologiques ainsi que comme agents antifongiques utilisés en pisciculture et en aviculture [13].



Figure I. 8 : La structure chimique d'un colorant triphénylméthane.

f) Les colorants nitrés et nitrosés

Les colorants nitrés et nitrosés sont des composés dont la structure moléculaire est caractérisée par la présence d'un groupement nitro ($-\text{NO}_2$) ou nitroso, généralement associé à un groupement donneur d'électrons tel qu'un hydroxyle ou une amine en position ortho. Cette famille de colorants demeure peu répandue et présente un intérêt industriel relativement limité [15].

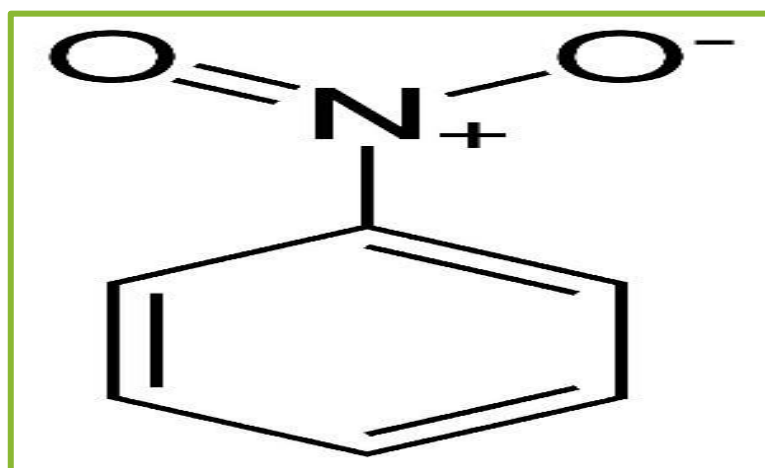


Figure I. 9 : La structure chimique d'un colorant nitré.

g) Les colorant phtalocyanine

Les phtalocyanines sont des molécules complexes contenant un atome métallique central, généralement du cuivre. Les colorants de ce groupe sont obtenus par réaction du dicyanobenzène avec divers halogénures métalliques, tels que Cu, Ni, Co, Pt, etc [16].

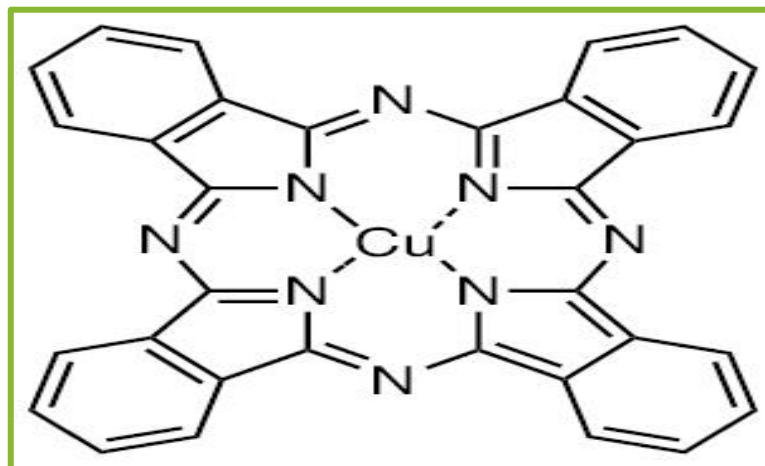


Figure I. 10 : La structure chimique d'un colorant phtalocyanine.

I.2.6.4.2. Classification tinctoriale

La classification tinctoriale repose sur le domaine d'application des colorants et permet d'évaluer leur solubilité, leur affinité vis-à-vis des différentes fibres textiles ainsi que les mécanismes de leur fixation sur les substrats [15].

a) Les colorants acides ou anioniques

Les colorants acides ou anioniques sont des composés dont la structure moléculaire renferme une ou plusieurs fonctions acides, notamment les groupements sulfoniques ($-\text{SO}_3\text{H}$) et carboxyliques ($-\text{COOH}$). La présence de ces fonctions leur confère une bonne solubilité dans l'eau ainsi qu'une affinité élevée pour les fibres contenant des groupements basiques, telles que les fibres polyamides [17].

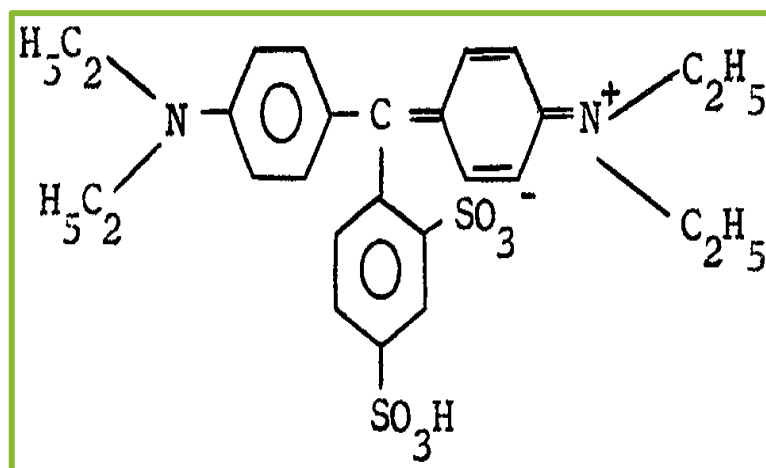


Figure I. 11 : Structure chimique d'un colorant acide anthraquinonique [18].

b) Les colorants basiques ou cationiques

Les colorants basiques (cationiques) sont des composés caractérisés par une bonne solubilité dans l'eau, favorisant leur application sur les substrats textiles. Leur fixation repose sur des interactions électrostatiques entre les groupements cationiques du colorant et les sites anioniques présents à la surface des fibres. Ils sont largement utilisés pour la teinture de divers matériaux textiles en raison de leur capacité à produire des colorations intenses et durables. Toutefois, leur utilisation nécessite une attention particulière en raison de leurs impacts potentiels sur la santé humaine et l'environnement [19].

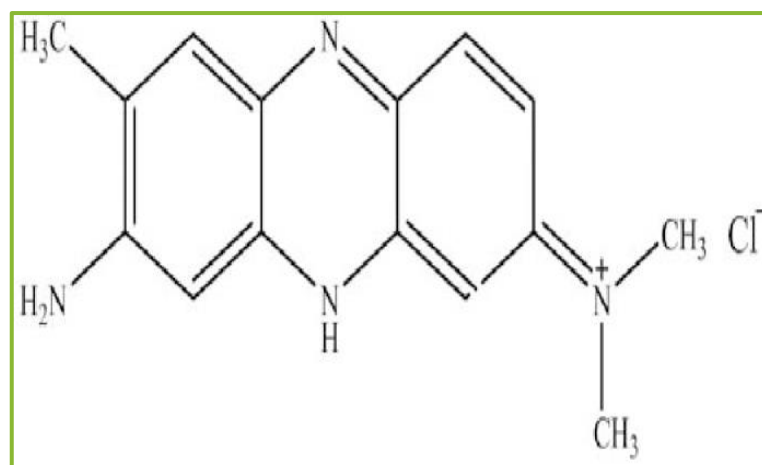


Figure I. 12 : Structure chimique du colorant rouge basique [20].

c) Les colorants développés ou azoïques insolubles

Les colorants développés ou azoïques insolubles, également appelés colorants naphthol, sont formés directement au sein de la fibre textile par une réaction de copulation. Le procédé consiste d'abord à imprégner la fibre avec une solution contenant un naphthol ou un copulant, dont les précurseurs de faible taille moléculaire peuvent diffuser à travers les pores du matériau. La fibre est ensuite traitée par une solution de sel de diazonium, entraînant la formation in situ du colorant azoïque insoluble. En raison de l'utilisation d'un composé phénolique dissous en milieu basique, ces colorants sont principalement destinés à la teinture des fibres cellulosiques [17].

d) Les colorants réactifs

Les colorants réactifs se distinguent par leur capacité à établir des liaisons covalentes avec les fibres textiles grâce à la présence de groupements réactifs spécifiques dans leur structure moléculaire. Cette fixation chimique assure une excellente solidité des teintures vis-à-vis du lavage, de la lumière et des agents chimiques. Ces colorants sont utilisés pour la teinture de diverses fibres, notamment les fibres naturelles telles que le coton, le lin et la soie, ainsi que certaines fibres artificielles comme la viscose et le nylon [19].

e) Les colorants directs

Les colorants directs, également appelés colorants substantifs, sont des colorants capables de former des espèces chargées positivement ou négativement, attirées électrostatiquement par les charges présentes à la surface des fibres. Ils permettent ainsi la teinture directe des fibres d'origines diverses [21].

f) Les colorants à mordant

Les colorants à mordant constituent une classe de colorants dont la fixation sur les fibres textiles nécessite un traitement préalable appelé mordantage. Ce procédé consiste à incorporer dans les fibres des oxydes métalliques, notamment ceux de l'aluminium, du fer, du cobalt ou du chrome, afin de permettre la formation de complexes insolubles fortement liés au substrat textile. Le chrome étant le métal le plus couramment utilisé, ces colorants sont également désignés sous les appellations de colorants au chrome ou colorants chromatables. Ce sont des colorants solubles capables de former des complexes avec les ions métalliques,

notamment grâce à la présence de groupes hydroxyles voisins dans leur structure moléculaire [22].

g) Les colorants de cuve

Les colorants de cuve sont des colorants insolubles qui nécessitent une réduction en milieu alcalin afin d'être convertis en leucodérivés solubles. Après leur fixation sur la fibre, ils sont réoxydés in situ pour retrouver leur forme insoluble initiale. Grâce à leur excellente résistance aux agents de dégradation, ils demeurent largement utilisés dans l'industrie textile, notamment l'indigo pour la teinture des tissus jean ou denim [22].

h) Les colorants dispersés

Les colorants dispersés, également appelés colorants plastosolubles, se caractérisent par leur faible solubilité dans l'eau. Leur fixation sur les fibres textiles repose principalement sur des interactions moléculaires. Ils sont principalement utilisés pour la teinture des fibres synthétiques et de certaines fibres artificielles. Leur bonne résistance au lavage et à la lumière contribue à leur large utilisation dans la fabrication des textiles destinés à un usage courant [19].

I.2.6.5. Applications des colorants

Les colorants trouvent leurs principales applications dans divers secteurs industriels, notamment :

- L'industrie textile et des matériaux connexes tels que la fourrure et le cuir, couvrant les textiles vestimentaires, décoratifs, de construction, de transport ainsi que les textiles à usage médical ;
- L'industrie des matières plastiques, où ils sont utilisés sous forme de pigments ;
- L'industrie du bâtiment, notamment dans les peintures et revêtements ;
- L'industrie pharmaceutique ;
- L'industrie cosmétique ;
- L'industrie agroalimentaire, sous forme de colorants alimentaires ;
- Diverses industries impliquant les carburants et les huiles ;
- L'industrie de l'imprimerie, notamment pour les encres et le papier [22].

I.2.6.6. La toxicité des colorant

Tableau I. 2: Classement de la toxicité selon le type de colorant [23].

Type de colorant	Toxicité et effets
Colorants azoïques	Présentent une toxicité et des effets cancérogènes liés à l'exposition prolongée. Certains composés et leurs dérivés amines sont génotoxiques. La toxicité augmente avec la présence de groupes nitro et halogènes. Une limite de 3,1 µg/L est recommandée dans l'eau potable en raison du risque cancérigène.
Colorants triphénylméthanes	Reconnu comme génotoxiques pour les cellules bactériennes et mammifères. Le vert malachite est cytotoxique et devient plus toxique après transformation en métabolites. Le méthyle violet peut produire des composés mutagènes après dégradation. Le traitement biologique peut augmenter la toxicité.
Colorants indigoïdes	Très toxiques, pouvant provoquer irritations cutanées et oculaires ainsi que des effets cancérogènes et neurotoxiques. Ils peuvent induire des tumeurs au site d'exposition et des effets cardiovasculaires et digestifs selon la dose et la voie d'exposition.
Colorants xanthènes	Toxiques pour plusieurs organismes, notamment les insectes et parasites. Effet phototoxique lié à la photo-oxydation. Certains composés présentent une activité cytotoxique et antivirale.

I.2.6.7. Choix du soluté étudié

Afin d'évaluer l'efficacité des deux bio-adsorbants dans le traitement des eaux usées industrielles, le colorant basique méthyle violet a été sélectionné comme polluant modèle [24].

I.2.6.7.1. Définition de méthyle violet

Le méthyle violet 2B, dont la molécule contient quatre groupements méthyle, est également appelé violet de méthyle. Il s'agit d'un colorant de teinte violette, dont l'intensité augmente avec le nombre de groupements méthyle. Il est principalement utilisé en microbiologie, notamment dans la coloration de Gram, ainsi que dans certains milieux sélectifs, par exemple la gélose de Drigalski, où il agit comme inhibiteur des bactéries à Gram positif [24].

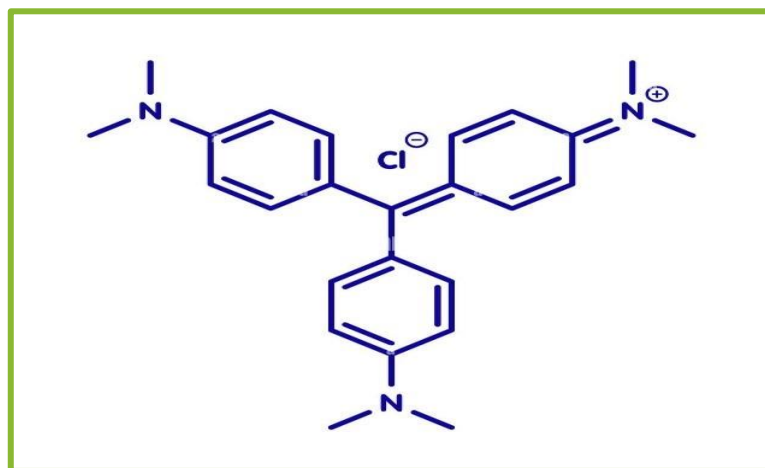


Figure I. 13 : La Structure chimique du MV2B.

I.2.6.7.2. Propriétés physicochimiques du méthyle violet

Tableau I. 3: Propriétés physicochimiques du méthyle violet (MV).

Nom commercial	Formule brute	Masse molaire	Type	λ_{\max}
méthyle violet	$C_{24}H_{28}N_3Cl$	$394 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$	Colorant cationique	584

Le méthyle violet est soluble dans l'eau et l'éthanol, mais insoluble dans le xylène.

Informations de sécurité :

Mentions de danger : H302, H351, H400.

Conseils de prudence : P273, P301 + P312 + P330, P391.

Équipements de protection individuelle : masque anti-poussière de type N95 et gants de protection [25].



Figure I. 14 : Cristaux violet.

I.2.6.7.3. Utilisations du méthyle violet

- ❖ Teinture du nylon, du polyacrylonitrile modifié, de la laine, de la soie et du coton dans l'industrie textile.
- ❖ Traitement des infections fongiques et parasitaires chez les poissons.
- ❖ Traitement topique des infections cutanées et oculaires chez le bétail.
- ❖ Utilisation comme additif dans les aliments pour volailles afin de prévenir la croissance des moisissures et des champignons.
- ❖ Utilisation comme teinture capillaire chez l'homme.
- ❖ Traitement de certains parasites intestinaux.
- ❖ Traitement topique des infections fongiques chez l'homme.
- ❖ Traitement du sang destiné aux transfusions pour prévenir la transmission de la maladie de Chagas.

- ❖ Utilisation comme agent antiviral topique.
- ❖ Utilisation dans les industries du bois, du cuir, de la soie, du nylon, du papier et des rubans.
- ❖ Utilisation comme colorant biologique en laboratoire [26].

I.2.6.7.4. Toxicité du méthyl violet 2B

Le méthyl violet 2B (MV2B) peut présenter une toxicité pour l'homme, se manifestant par de fortes irritations cutanées, respiratoires, gastro-intestinales ainsi que des irritations oculaires. Des études toxicologiques ont mis en évidence une forte toxicité aiguë pour certains organismes aquatiques, avec une LC50 de 0,047 mg·L⁻¹ pour pimephales promelas [27].

Par ailleurs, les colorants de la famille des triphénylméthanés peuvent présenter un potentiel cancérigène, notamment via leurs métabolites issus de la dégradation biologique. Certains produits de transformation peuvent évoluer en composés à caractère mutagène et cancérigène, ce qui rend le traitement biologique susceptible d'augmenter la toxicité des effluents [27].

I.2.7. Procédés d'élimination des colorants

Diverses techniques de traitement des effluents contaminés par des colorants ont été développées au cours des dernières années [28]. Dans le cadre de ce travail, l'accent est mis sur un procédé principal, à savoir l'adsorption, pour l'élimination des colorants.

I.2.7.1. Les techniques chimiques

a) La précipitation chimique

La précipitation chimique est l'un des procédés les plus utilisés dans l'industrie en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de son faible coût d'exploitation. Ce procédé repose sur des réactions chimiques entre les ions de métaux lourds et des agents précipitants, conduisant à la formation de précipités insolubles, qui sont ensuite éliminés par filtration [42].

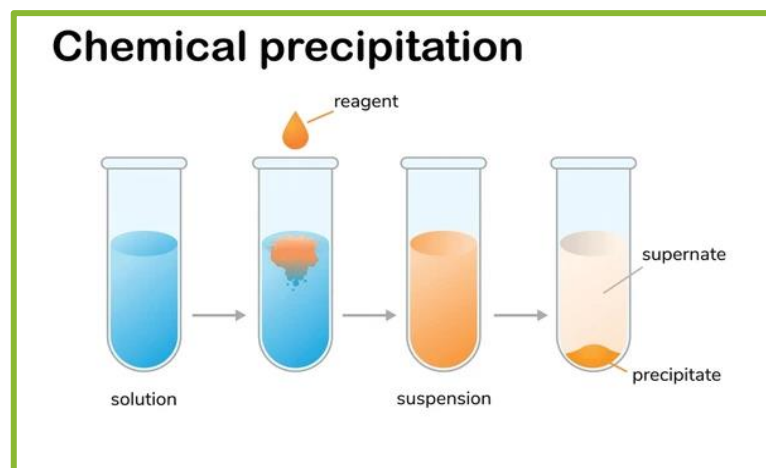


Figure I. 15 : Schéma du procédé de précipitation chimique.

b) Oxydation chimique

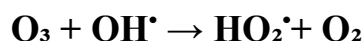
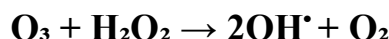
L'oxydation chimique est une technique largement utilisée dans le traitement des eaux usées. Elle est principalement appliquée pour l'élimination des polluants organiques présents à de faibles concentrations, le prétraitement avant les procédés biologiques afin de réduire la charge polluante, ainsi que le post-traitement visant à diminuer la toxicité des effluents. Les oxydants les plus couramment employés sont l'ozone et le chlore. Parmi eux, l'ozone se distingue par son fort pouvoir oxydant, ce qui en fait un réactif particulièrement efficace pour la dégradation des polluants organiques et inorganiques [43].

c) Désinfection chimique

La désinfection est un traitement visant à éliminer les micro-organismes pathogènes, à l'exclusion généralement des formes résistantes comme les spores bactériennes, ce qui la distingue de la stérilisation, qui requiert la destruction de toutes les formes de vie microbienne dans un milieu donné. Cette opération est généralement réalisée par l'ajout à l'eau de produits chimiques dotés de propriétés germicides (désinfectants), dont l'efficacité dépend de plusieurs facteurs tels que la concentration utilisée, le temps de contact, la température et le pH. Parmi les principaux produits figurent : le chlore, le dioxyde de chlore, l'ozone, le brome ou l'iode...etc. [33].

d) Ozonation couplée aux UV

L'ozonation est l'une des techniques les plus utilisées pour le traitement des eaux, notamment pour la décoloration des effluents. Cette méthode repose sur l'utilisation de l'ozone comme alternative au chlore, en raison de sa plus grande efficacité pour la désinfection et de l'absence de formation de sous-produits toxiques. L'ozone est également très efficace pour l'élimination des polluants organiques et microbiologiques. L'irradiation par des rayons UV ($\lambda < 300$ nm) en présence d'ozone entraîne la formation de peroxyde d'hydrogène, qui se décompose ensuite en radicaux hydroxyles ($\bullet\text{OH}$), selon les réactions suivantes [44] :

**e) Les procédés Fenton et photo-Fenton**

Les procédés Fenton et photo-Fenton reposent sur l'utilisation du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et des ions ferreux (Fe^{2+}), avec ou sans irradiation UV. Dans le procédé photo-Fenton, l'irradiation UV favorise la régénération des ions Fe^{2+} et la production des radicaux hydroxyles ($\bullet\text{OH}$) [45].

I.2.7.2. Les techniques physico-chimiques**a) Échange d'ions**

L'échange d'ions constitue une technique applicable à l'élimination des colorants cationiques et anioniques. Son efficacité a été démontrée pour l'élimination du colorant Orange Acide 7 à l'aide d'une résine basique de type Amberlite IRA-958. Par ailleurs, une résine synthétique d'échange cationique a été utilisée avec succès pour la décoloration du colorant azoïque Bleu Acide 113 [46].

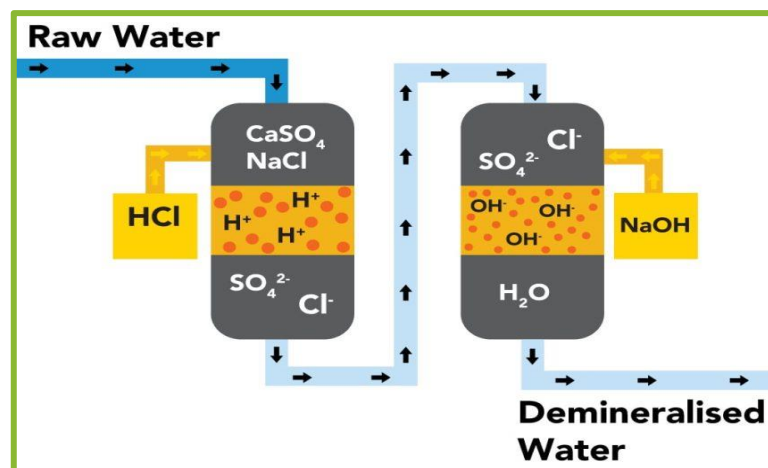


Figure I. 16 : Principe du traitement par échange d'ions – Déminéralisation.

b) Adsorption

L'adsorption est un phénomène physique au cours duquel des molécules ou des ions présents dans une phase liquide ou gazeuse se fixent à la surface d'un solide, appelé adsorbant. Ce processus est réversible, puisque les espèces adsorbées ne pénètrent pas dans la structure interne de l'adsorbant, mais demeurent retenues à sa surface. Les procédés d'adsorption suscitent un intérêt particulier en raison de leur efficacité dans la décoloration des eaux usées, notamment celles renfermant différents types de colorants. Toutefois, cette méthode présente certaines limites, notamment le coût élevé des charbons actifs commerciaux ainsi que la production de boues [47].

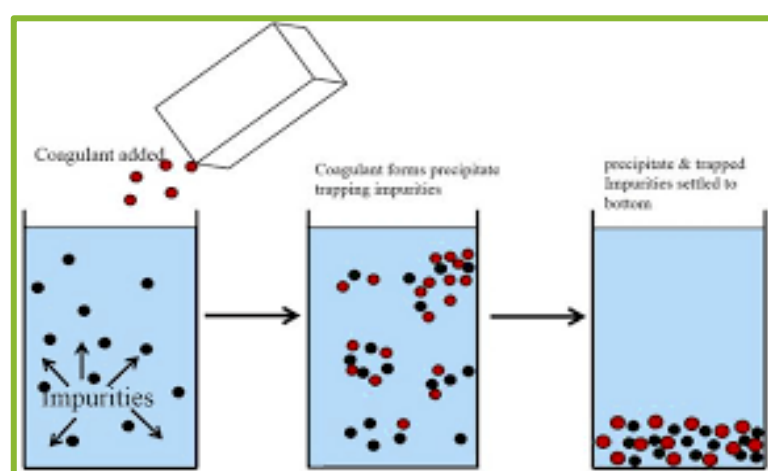


Figure I. 17 : Schéma du mécanisme d'adsorption du Pb(II) sur MOMC-NP.

c) Coagulation-floculation

La coagulation-floculation est un procédé physico-chimique largement utilisé dans le traitement primaire (et parfois tertiaire) des eaux usées industrielles et des eaux potables. Pour obtenir de grands fragments de flocons facilement précipitables, le processus se déroule en deux étapes : premièrement, la coagulation, qui se produit en ajoutant un réactif chimique qui neutralise les charges électrostatiques répulsives entre les molécules, les déstabilisant et leur permettant d'entrer en contact ; deuxièmement, la floculation, au cours de laquelle ces molécules instables s'agglutinent, formant des fragments de flocons fins puis plus grands [34].

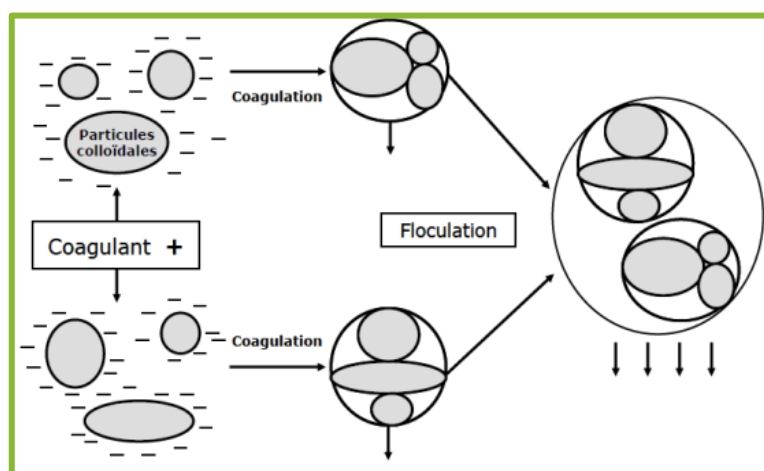


Figure I. 18 : Schéma du le principe de coagulation-floculation.

I.2.7.3. Les techniques biologiques

a) Procédés aérobies (en présence d'oxygène (O₂))

✓ Boues actives

En pratique, le procédé consiste à faire circuler en continu l'eau à traiter (après prétraitement et décantation) dans un bassin d'aération équipé d'un système de brassage et d'une injection d'air répartie uniformément dans le volume. Dans ce bassin, les bactéries aérobies, maintenues sous oxygénation prolongée, absorbent et dégradent la matière organique. Elles s'agrègent pour former des flocs biologiques (bioflocs) qui décantent spontanément, constituant ainsi des boues activées [35].

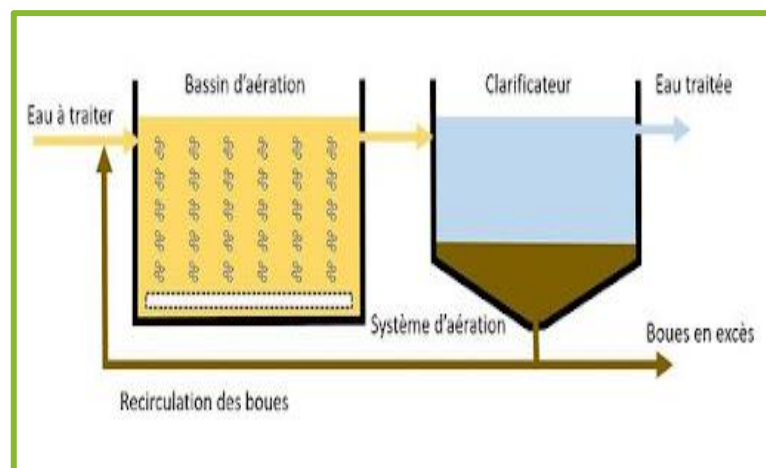


Figure I. 19 : Schéma du procédé de boues activées: aération et clarification.

✓ Le lit bactérien

Le lit bactérien se présente comme une colonne circulaire d'une hauteur de 4 à 5 mètres, remplie d'un matériau support (pouzzolane ou matière plastique). L'effluent à traiter est réparti en surface et ruisselle à travers les interstices du support, sur lequel se développe un biofilm dense contenant une forte concentration de bactéries et de champignons. Ces micro-organismes absorbent et dégradent la matière organique, qui s'épuise progressivement au fil du parcours de l'eau. L'oxygène nécessaire à la biomasse est fourni naturellement par la ventilation assurée par la structure ouverte du filtre [35].

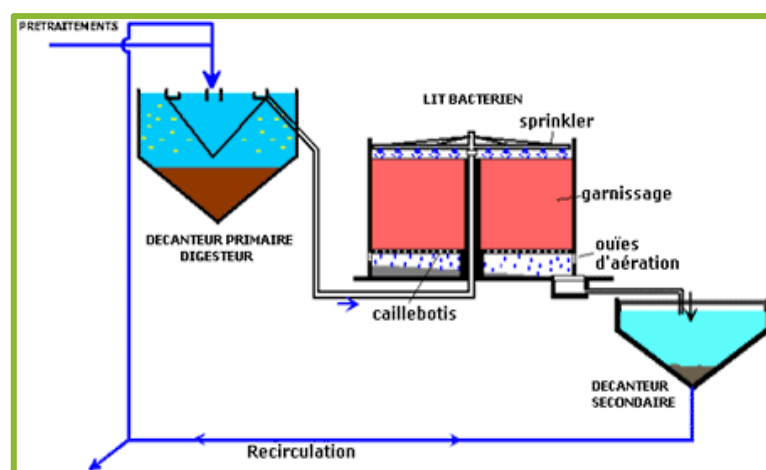


Figure I. 20 : Schéma de principe d'un lit bactérien pour le traitement des eaux usées.

✓ Disques biologiques (RBC)

Ce procédé repose sur des cultures microbiennes fixées sur des disques biologiques en rotation. Les micro-organismes se développent à la surface des disques pour y former un biofilm assurant l'épuration. Les disques sont partiellement immergés dans l'effluent à traiter ; leur rotation permet d'alterner l'immersion et l'exposition à l'air, assurant ainsi l'oxygénation de la biomasse fixée [39].

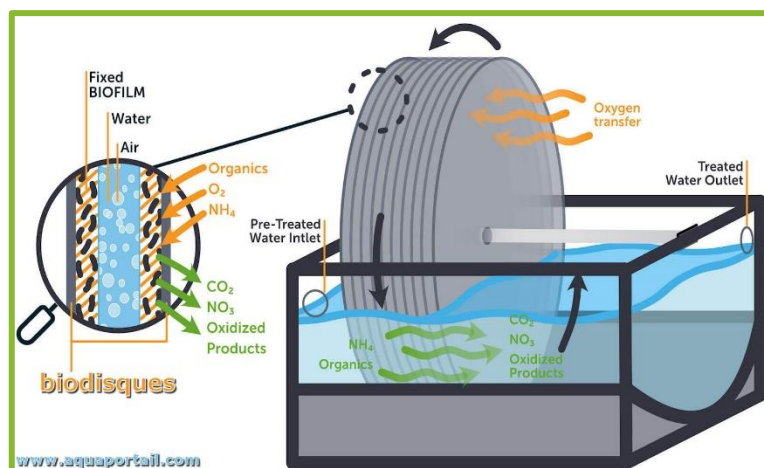


Figure I. 21 : Schéma de principe d'un biodisque (contacteur biologique rotatif).

✓ Biofiltres

Le principe des biofiltres repose sur la circulation des eaux usées à travers une cuve remplie d'un matériau filtrant immergé, qui sert de support à la fixation du biofilm. L'effluent est simultanément débarrassé des matières en suspension et des polluants dissous, grâce à l'action combinée de mécanismes physico-chimiques (filtration, adsorption) et biologiques (dégradation par le biofilm). L'oxygène nécessaire aux micro-organismes est apporté par insufflation d'air (air procédé) [37].

✓ Lagunage aéré

Le lagunage aéré est un procédé biologique à cultures libres fonctionnant en conditions aérobies. Contrairement au procédé des boues activées, il ne comporte pas de recirculation des boues, ce qui permet d'établir un équilibre entre la biomasse bactérienne et la matière organique (substrat carboné).

Cette particularité entraîne deux effets principaux. D'une part, la concentration en biomasse reste relativement faible, ce qui nécessite un temps de séjour plus long pour assurer une bonne élimination de la pollution dissoute. D'autre part, la floculation étant peu développée, la séparation des matières en suspension se fait lentement, imposant l'utilisation d'une lagune de décantation de grande superficie.

Ainsi, une station de lagunage aéré est généralement constituée de deux bassins successifs : une lagune aérée équipée d'aérateurs de surface, suivie d'une lagune de décantation destinée à la clarification de l'eau [38].

b) Procédés anaérobies (sans oxygène (O₂))

✓ Digestion anaérobie

La digestion anaérobie est un processus biologique se déroulant en l'absence d'oxygène, au cours duquel les micro-organismes transforment la matière organique en biogaz. Ce gaz est principalement composé de méthane (CH₄) (plus de 50 %) et de dioxyde de carbone (CO₂) et dans un degré moindre d'hydrogène (H₂). Le méthane (CH₄) peut être valorisé comme source d'énergie. Cette technique se caractérise par des économies d'énergie (grâce à la production de méthane et à l'absence de besoin en oxygène) ainsi que par une faible production de boues résiduelles [39].

✓ Réacteur UASB

(Up-flow Anaerobic Sludge Blanket). Son fonctionnement repose sur un lit de boues dense traversé par un flux ascendant, ce qui optimise le contact entre l'effluent et la biomasse. Cette configuration permet d'appliquer des charges organiques élevées tout en générant une quantité importante de biogaz. L'efficacité du procédé est étroitement liée à la qualité des granules de boues, qui maintiennent les consortiums microbiens et assurent une méthanogenèse performante [40].

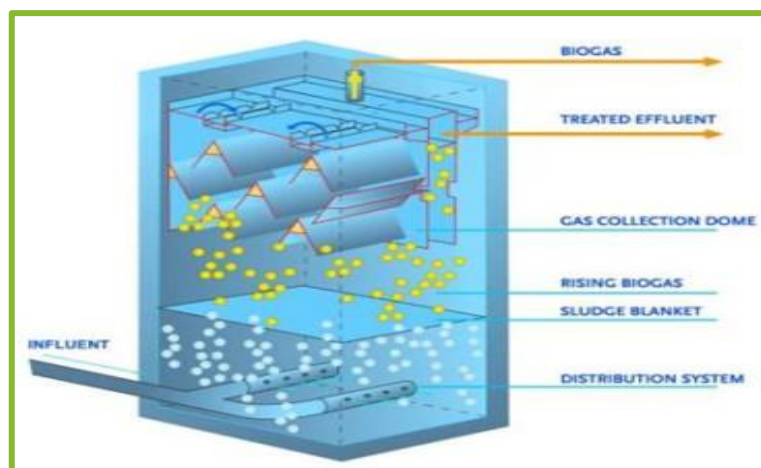


Figure I. 22 : Schéma de principe d'un réacteur UASB.

✓ **Lagune anaérobie**

La lagune anaérobie est une solution de traitement applicable aux effluents urbains comme industriels. Dans le cas des eaux usées domestiques, la fraction décantable de la pollution sédimente et forme des boues qui sont progressivement digérées en l'absence d'oxygène, avec minéralisation de la matière organique et production de dioxyde de carbone (CO₂), de méthane (CH₄) et d'hydrogène sulfuré (H₂S). Ce type d'ouvrage est généralement utilisé en traitement primaire pour éliminer la matière organique particulaire des effluents urbains, ainsi que la pollution organique soluble facilement biodégradable des effluents industriels, en particulier ceux des industries agroalimentaires [41].

Tableau I. 4 : Avantages et inconvénients de diverses technologies de traitement des eaux Colorées [44].

Technologies	Avantages	Inconvénients
Oxydation avancée	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Les colorants sont dégradés efficacement à pression et à température normale ; les contaminants organiques sont transformés en CO₂. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Coûts élevés d'exploitation et de maintenance ; rigidité.

<p>Précipitation Chimique</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Est un processus physico-chimique intégré ; il est simple, d'un prix raisonnable, capable de traiter des degrés élevés de pollution ; facile à utiliser. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Contient une grande quantité de produits chimiques et génère beaucoup de boues.
<p>Echange d'ions</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Absence de boue ; temps de traitement plus court ; production d'eau avec des degrés de pureté plus élevés ; méthode de décoloration efficace ; pas de perte d'adsorbant pendant la régénération. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Le pH a un effet significatif sur le rendement ; ne convient pas à toutes les couleurs ; coûteux en termes de recharge et de la formation de boue.
<p>Électrochimique</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Les produits chimiques sont inutiles ou limités ; le processus est rapide ; convient à la fois aux colorants insolubles et solubles. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Coûts de fonctionnement élevés ; coûts d'électricité croissants ; formation de boues ; pollution par les composés organiques chlorés et contamination par les métaux lourds due à l'oxydation indirecte.
<p>Oxidation</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ La dégradation du colorant est complète, et le temps de la réaction est court. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Maintien du pH ; catalyseur requis pour un traitement optimal ; coût élevé.
<p>Ozonation</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ L'équipement et la désinfection sont efficaces et rapides ; installation simple ; pas d'expansion du volume de la phase gazeuse. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Processus coûteux ; sous-produits et intermédiaires de fabrication dangereux ; demi-vie très courte ; contrôle rigoureux du pH des effluents.
<p>Coagulation-Flocculation</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ De nombreuses méthodes physico-chimiques sont utilisées pour l'élimination des couleurs ; l'agent coagulant élimine totalement les colorants des eaux usées ayant fait l'objet d'une dépollution ; efficace et facile à appliquer ; la décoloration est complète. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Formation d'un grand volume de boues ; coûts d'exploitation plus élevés ; n'est pas écologique.

Ultrafiltration et Nanofiltration	✓ Efficace avec tous les types de colorants.	✓ Coûteux ; formation de boues ; courte durée de vie.
Osmose inverse	✓ Élimination maximale des sels ; technologie de décoloration et de dessalement la plus efficace ; eau de haute qualité.	✓ L'obstruction de la membrane ; les coûts de fonctionnement élevés.
Techniques biologiques (aérobie et anaérobie)	✓ Non-dangereux ; faible coût ; écologique.	✓ La biodégradabilité des colorants plus faibles ; nécessite une grande superficie de terrain et plus de temps pour éliminer la couleur.
Adsorption	✓ Efficacité élevée ; facile ; simple et adaptable à une grande variété de polluants ; excellente capacité pour éliminer une grande variété d'impuretés ; économique ; les adsorbants peuvent être fabriqués à partir de déchets ; régénération potentielle des adsorbants.	

Parmi les différentes techniques d'élimination des colorants, l'adsorption est considérée comme l'une des méthodes les plus efficaces en raison de sa simplicité, de son faible coût et de sa grande efficacité. C'est pourquoi cette technique a été retenue dans le cadre de cette étude.

I.3. Le phénomène d'adsorption

I.3.1. Définition de l'adsorption

L'adsorption est un phénomène physico-chimique de surface par lequel des molécules d'un fluide (liquide ou solide) reposent sur des forces d'attraction afin de fixer le soluté (la substance adsorbée) à la surface de l'adsorbant [48]. Cette interface peut être classée en quatre

types : liquide-liquide, liquide-solide, liquide-gaz et gaz-solide. L'adsorption liquide-solide est la plus couramment utilisée dans le traitement de l'eau et des eaux usées [51]. Une fois que l'équilibre est atteint, aucune adsorption nette supplémentaire n'a lieu. Lorsque la concentration de la substance adsorbée à la surface de l'adsorbant est égale à celle du milieu environnant, le processus cesse.

I.3.2. Le principe d'adsorption

L'adsorption est le phénomène de fixation de molécules à la surface d'un solide. Ce phénomène est utilisé pour extraire des molécules liquides indésirables (gaz ou liquides) dispersées dans un solvant. Cette fixation résulte de la formation de forces de Van Der Waals (faibles forces électrostatiques dont l'énergie de réaction se situe entre 5 et 40 kJ/mol) entre le solide et les molécules [49].

I.3.3. Les types d'adsorption

L'adsorption se divise en deux types : physique et chimique. La différence entre les deux types d'adsorption réside dans la nature des forces en jeu : l'adsorption physique est due à une attraction électrostatique faible et à courte portée (forces de van der Waals) résultant du moment dipolaire, alors que l'adsorption chimique implique la formation de liaisons directes entre l'adsorbant et l'absorbant [48].

I.3.3.1. Adsorption chimique (Chimisorption)

La chimisorption est un type d'adsorption qui implique une réaction chimique entre la surface et l'adsorbat [52]. Elle est privilégiée à haute température et se caractérise par un temps de rétention long. Ses énergies élevées (40–400 kJ/mol) reflètent la fixation forte et irréversible entre l'adsorbant et des sites d'adsorption très spécifiques [50].

I.3.3.2. Adsorption physique (physisorption)

La physisorption résulte de l'interaction des molécules avec la surface solide par des forces d'attraction électrostatiques faibles et à courte portée résultant du moment dipolaire (van der Waals). Ce type d'adsorption est réversible avec une faible enthalpie, de l'ordre de 20 kJ/mol. Du fait de la faiblesse des liaisons formées, les molécules adsorbées peuvent se déplacer facilement à la surface de l'adsorbant [51].

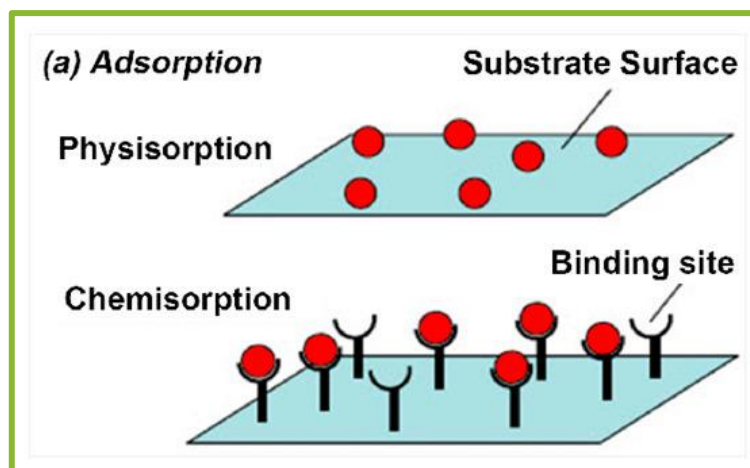


Figure I. 23 : Schéma représenter la différence entre le physisorption et le chimisorption [56].

Tableau I. 5: Comparaison entre chimisorption et physisorption [52].

Chimisorption	Physisorption
Irréversible et lente	Réversible et rapide
Liaison forte à courte portée	Liaison faible et à longue portée
Adsorption monocouche	Adsorption multicouche
L'isotherme de Langmuir	L'isotherme BET
La réaction de surface peut se produire : dissociation, reconstruction, catalyse	Aucune réaction de surface
Surface spécifique	Non spécifique à la surface

I.3.4. Facteurs influençant l'adsorption

Plusieurs facteurs peuvent affecter le processus d'adsorption, son efficacité et son rendement, notamment :

I.3.4.1. La surface spécifique

La surface spécifique d'un adsorbant est définie comme le rapport surface/masse exprimé en m^2/g . Le rendement d'adsorption augmente avec la surface spécifique du matériau adsorbant. Cette surface est déterminée par la géométrie du matériau, la présence de fissures et de pores, et dépend également de la taille des particules, plus la taille des particules est petite, plus la surface disponible pour l'adsorption est importante [55].

I.3.4.2. Le pH

Le pH est un facteur très important dans toute étude d'adsorption, car il peut influencer à la structure de l'adsorbant et de l'adsorbat, ainsi que le mécanisme d'adsorption [54].

I.3.4.3. La température

La chimisorption est un phénomène endothermique où l'augmentation de la température entraîne une diminution de l'adsorption. Par contre, la physisorption est un phénomène exothermique qui s'effectue à de basses températures [53].

I.3.4.4. La masse de l'adsorbant

La capacité d'adsorption augmente avec la masse d'adsorbant en solution. Compte tenu du coût élevé des adsorbants, il est conseillé de choisir un rapport liquide/solide optimal [55].

I.3.4.5. La concentration initiale

La capacité d'adsorption croît avec l'augmentation de la concentration d'une substance en solution. Cependant, cette relation n'est pas linéaire car elle est lente. Une adsorption efficace requiert également une compatibilité ou une affinité entre le solide et le soluté [57].

I.3.4.6. Structure de l'adsorbant

La structure de l'adsorbant joue un rôle essentiel dans la fixation des substances indésirables. La porosité, la taille des pores, la surface spécifique et la perméabilité constituent les principaux paramètres influençant le processus d'adsorption et les performances du matériau [23].

I.3.4.7. Influence de l'adsorbat

Les propriétés physicochimiques de l'adsorbat, notamment sa structure moléculaire, influencent directement sa fixation sur les sites actifs. Plus la taille moléculaire est élevée, plus l'adsorption devient difficile. La présence simultanée de plusieurs espèces dans la solution peut également engendrer une compétition pour l'occupation des sites actifs, en particulier pour des molécules de structures similaires [70].

I.3.4.8. La polarité

Une bonne adsorption nécessite une affinité entre le solide et le soluté. En général, les solides polaires adsorbent préférentiellement des espèces polaires, tandis que les solides non polaires adsorbent des composés non polaires. De plus, si la taille des pores de l'adsorbant est inférieure au diamètre des molécules de l'adsorbat, l'adsorption ne peut pas se produire, même en présence d'une forte affinité [71].

I.3.5. Description du mécanisme d'adsorption

L'adsorption correspond à la diminution de la concentration des molécules présentes dans la phase liquide (adsorbat). La fixation de ces molécules sur les sites actifs de l'adsorbant s'effectue à travers plusieurs étapes successives. Comme illustré dans la figure ci-dessous [70]:

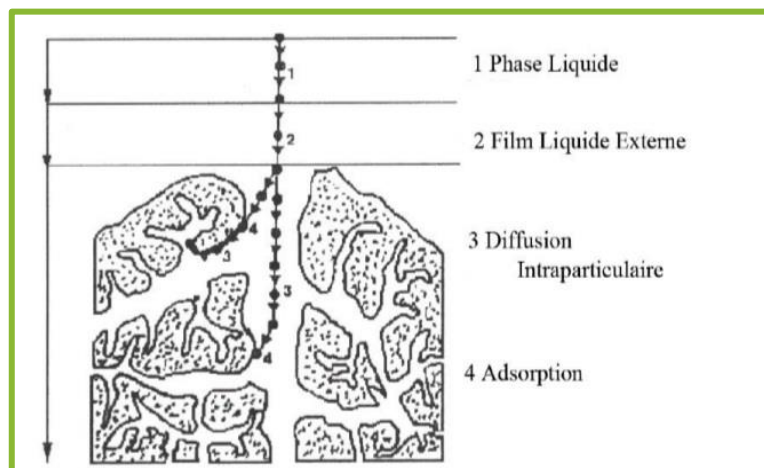


Figure I. 24 : Schéma de mécanisme de l'adsorption [72].

- ✓ Diffusion des molécules de l'adsorbat depuis la phase liquide vers la proximité de la surface du solide.
- ✓ Transfert des molécules de l'adsorbat vers la surface de l'adsorbant.

- ✓ Diffusion extra-granulaire de la matière à travers la phase liquide jusqu'à la surface des particules.
- ✓ Diffusion intra-granulaire des molécules à l'intérieur des pores des particules vers les sites actifs.
- ✓ Interaction entre les molécules de l'adsorbat et les sites actifs de l'adsorbant, conduisant à leur fixation.

I.3.6. Cinétique d'adsorption

I.3.6.1. Modèles cinétiques de l'adsorption

Les modèles cinétiques de l'adsorption décrivent l'évolution de la quantité adsorbée en fonction du temps et permettent d'évaluer la vitesse ainsi que les mécanismes impliqués dans le processus d'adsorption. Parmi les modèles les plus couramment utilisés figurent les modèles de pseudo-premier ordre, de pseudo-deuxième ordre et de diffusion intra-particulaire [58].

I.3.6.1.1. Modèle de pseudo-premier ordre

Le modèle de pseudo-premier ordre, également connu sous le nom de modèle de Lagergren, est largement utilisé pour décrire la cinétique d'adsorption en milieu aqueux. Il repose sur l'hypothèse que la vitesse d'adsorption est proportionnelle à la différence entre la quantité adsorbée à l'équilibre et celle adsorbée à un instant donné. Ce modèle est exprimé par la relation suivante :

$$\frac{dQ}{dt} = K_1(Q_e - Q) \quad (I.1)$$

La forme linéarisée de ce modèle est exprimée par l'équation suivante [59]:

$$\ln(Q_e - Qt) = \ln(Q_e) - K_1 t \quad (I.2)$$

Où

Qt : quantité d'adsorbat adsorbée au temps (t) en (mg/g) ;

Qe : quantité d'adsorbat adsorbée à l'équilibre en (mg/g) ;

K₁ : constante de vitesse du modèle de pseudo-premier ordre en (min⁻¹) ;

t : correspond au temps de contact (min) ;

I.3.6.1.2. Modèle de pseudo-second ordre

Le modèle cinétique de pseudo-second ordre est largement utilisé pour décrire les processus d'adsorption dans lesquels la vitesse d'adsorption est liée à la capacité d'adsorption de l'adsorbant. Il repose sur l'hypothèse que la vitesse de fixation de l'adsorbat est proportionnelle au carré du nombre de sites actifs disponibles à la surface de l'adsorbant. Ce modèle est fréquemment appliqué à l'étude des mécanismes d'adsorption impliquant des interactions chimiques entre l'adsorbant et l'adsorbat [60].

Il est représenté par la formule suivante:

$$\frac{dQ_t}{dt} = K_2(Q_e - Q_t)^2 \quad (I.3)$$

Sa forme linéaire est exprimée par l'équation suivante :

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{K_2 Q_e^2} + \frac{1}{Q_e} t \quad (I.4)$$

Où :

Q_t : (mg/g) représente la quantité de soluté adsorbée à l'instant (t) ;

Q_e : (mg/g) représente la quantité de soluté adsorbée à l'équilibre ;

K_2 : (g.mg⁻¹.min⁻¹) désigne la constante de vitesse du modèle de pseudo-second ordre ;

t : (min) correspond au temps de contact ;

I.3.6.1.3. Modèle de diffusion intra-particulaire

Les molécules du BM sont susceptibles d'être transportées à l'intérieur des particules d'adsorbant par diffusion intra-particulaire en raison de la porosité des charbons actifs. Généralement, le processus d'adsorption sur un adsorbant poreux se déroule en trois étapes principales [61] :

➤ Le transfert des molécules de la solution vers la surface externe de l'adsorbant (diffusion externe).

➤ La diffusion des molécules à travers les pores de l'adsorbant (diffusion intra-particulaire).

Le modèle de Weber et Morris [61] est donné par :

$$Q_t = K_i t^{\frac{1}{2}} + C \quad (I.5)$$

Où

K_i : est le coefficient de diffusion intra-particulaire ($\text{mg/g} \cdot \text{min}^{1/2}$) ;

t : le temps (min) ;

C : une constante représentant l'épaisseur de la couche limite ou les effets de la diffusion externe ;

I.3.6.2. Capacité d'adsorption

La capacité d'adsorption correspond à la quantité de soluté adsorbée par unité de masse de l'adsorbant à un instant donné Q_t (mg/g) ou à l'équilibre Q_e (mg/g). Elle dépend des conditions opératoires ainsi que des caractéristiques de l'adsorbant utilisé. Ce paramètre constitue un indicateur fondamental pour évaluer les performances du processus d'adsorption et quantifier la quantité de soluté retenue par l'adsorbant. La capacité d'adsorption est déterminée à partir de l'équation de bilan de matière suivante [62]:

A l'instant (t):

$$Q_t = [(C_0 - C_t) \times V/m] \quad (I.6)$$

A l'équilibre:

$$Q_e = [(C_0 - C_e) \times V/m] \quad (I.7)$$

Ainsi, le pourcentage d'élimination d'adsorbat est calculé selon l'équation suivante [62]:

$$R(\%) = [(C_0 - C_e)/C_0] \times 100 \quad (I.8)$$

I.3.6.3. Coefficient de corrélation (R^2)

Le coefficient de corrélation R^2 est un indicateur statistique permettant d'évaluer le degré de variabilité de la variable dépendante en fonction des variables indépendantes. Il varie entre 0 et 1 ($0 < R^2 < 1$). Une valeur de R^2 proche de 1 traduit un ajustement optimal du modèle aux données expérimentales. L'expression du coefficient de corrélation R^2 est donnée comme suit [62].

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{e_{cal}} - \overline{Q_{e_{exp}}})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{e_{cal}} - \overline{Q_{e_{exp}}})^2 + \sum_{i=1}^n (Q_{e_{cal}} - Q_{e_{exp}})^2} \quad (I.9)$$

Avec:

n : Nombre de mesures expérimentales ;

$Q_{e_{cal}}$: Capacité d'adsorption calculée à partir du modèle d'isotherme considéré ;

$Q_{e_{exp}}$: Capacité d'adsorption déterminée expérimentalement ;

I.3.7. Isothermes d'adsorption

Les isothermes d'adsorption constituent un outil essentiel pour l'étude des interactions entre l'adsorbat et l'adsorbant ainsi que pour l'évaluation de la capacité d'adsorption d'un matériau. Elles décrivent la relation entre la quantité de soluté adsorbée par l'adsorbant et la concentration du soluté restant en solution à l'équilibre, pour une température donnée. Les différents types d'isothermes d'adsorption permettent de caractériser le comportement du processus d'adsorption et les propriétés de la surface adsorbante [59].

I.3.7.1. Classification des isothermes d'adsorption

I.3.7.1.1. Classification de Brunauer, Emmet et Teller (BET) (1938)

La forme de la courbe isotherme dépend du couple adsorbat–adsorbant étudié. Gilles et ses collaborateurs ont classé les isothermes d'adsorption des solutés à solubilité limitée en plusieurs types [61].

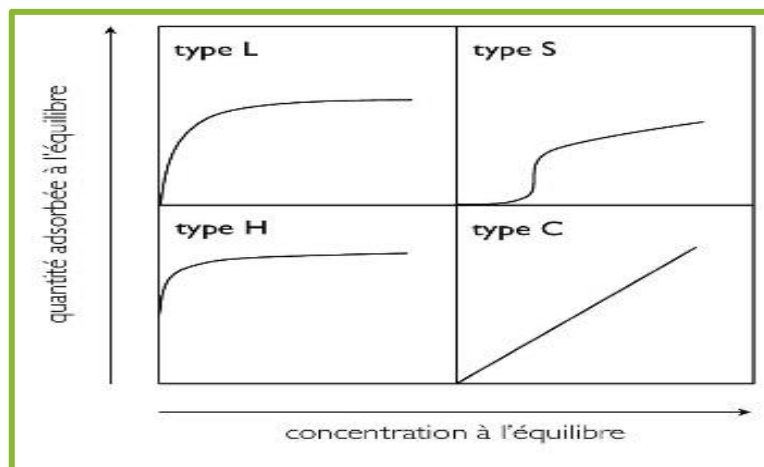


Figure I. 25 : Classification des isothermes d'adsorption selon Giles et al 1974 [63].

a) Les isothermes de type C

Les isothermes de type C se caractérisent par une répartition constante de l'adsorbat entre la phase liquide et la phase adsorbante jusqu'à atteindre un palier. Leur allure linéaire traduit le maintien d'un nombre pratiquement constant de sites d'adsorption disponibles au cours du processus [64].

b) Les isothermes de type L

Egalement appelées isothermes de Langmuir, sont fréquemment observées dans les processus d'adsorption. Elles se caractérisent par une courbe concave à faibles concentrations d'adsorbat, traduisant une diminution progressive des sites d'adsorption disponibles, liée à des interactions faibles entre les molécules adsorbées. Lorsque la concentration à l'équilibre augmente, la disponibilité des sites vacants diminue, rendant l'adsorption progressive de plus en plus limitée jusqu'à l'atteinte de la saturation de la surface, matérialisée par un plateau sur l'isotherme. Ce comportement se manifeste par une diminution continue de l'efficacité d'adsorption avec l'augmentation de la concentration [65].

c) Les isothermes de type H (Haute affinité)

L'isotherme de la classe « H » se distingue par une pente initiale très élevée, traduisant une forte affinité entre l'adsorbat et l'adsorbant résultant d'interactions intenses entre les deux phases. Elle est considérée comme un cas particulier de l'isotherme de type « L » et est fréquemment observée lors de l'adsorption de polluants organiques sur des matériaux adsorbants, notamment dans les phénomènes de chimisorption ainsi que dans certains processus d'échange ionique. Ce comportement est attribué à la présence de sites actifs à la surface de l'adsorbant favorisant la pénétration et la fixation des molécules de soluté [66].

d) Les isothermes de type S

Les isothermes de type S présentent une allure sigmoïdale caractérisée par la présence d'un point d'inflexion, indiquant l'intervention d'au moins deux mécanismes d'adsorption. Ce comportement correspond généralement à une adsorption initiale d'une première couche de soluté, suivie d'une adsorption facilitée de couches supplémentaires par un phénomène de coopération entre les molécules adsorbées. Cette évolution est attribuée aux interactions attractives de type Van der Waals entre les molécules de soluté, favorisant leur regroupement en agrégats à la surface de l'adsorbant [64].

I.3.7.1.2. Les différents modèles des isothermes d'adsorption

Dans cette section, quelques modèles majeurs décrivant les phénomènes d'adsorption sont brièvement présentés. Ils établissent une relation entre la quantité de gaz adsorbé et la pression à température constante, sur la base d'hypothèses physiques et chimiques relatives à la surface et aux mécanismes d'interaction. Aucun modèle ne permet de représenter l'ensemble des données expérimentales, mais leur utilisation facilite l'interprétation des résultats et la compréhension des mécanismes d'adsorption [67].

a) Modèle de Freundlich

Le modèle d'isotherme de Freundlich décrit l'adsorption sur des surfaces hétérogènes et suppose une répartition non uniforme des sites d'adsorption. Il permet de représenter l'adsorption en monocouche ainsi que l'adsorption multicouche, contrairement au modèle de Langmuir qui est limité à la formation d'une monocouche [68].

Le modèle de Freundlich constitue une extension empirique de la loi de Henry pour décrire le comportement de l'adsorption au-delà de la région linéaire des faibles concentrations. Son expression est donnée par [68]:

$$Q_e = K_f \times C_e^{1/n} \quad (\text{I.10})$$

Avec $0 < 1/n < 1$

Sa forme linéaire est exprimée par l'équation suivante :

$$\ln(Q_e) = \ln(K_f) + \frac{1}{n} \ln(C_e) \quad (\text{I.11})$$

Avec:

Q_e: quantité d'adsorbat adsorbée à l'équilibre (mg/g) ;

K_f : constante du modèle de Freundlich ;

C_e: concentration de l'adsorbat à l'équilibre (mg/l) ;

n : intensité d'adsorption ;

b) Modèle de Langmuir

Le modèle de Langmuir, issu de considérations thermodynamiques et cinétiques, repose sur l'hypothèse de l'existence de sites actifs libres à la surface de l'adsorbant, sur lesquels l'adsorption du soluté s'effectue. Ce modèle suppose une adsorption réversible, de type monocouche, ainsi qu'une énergie d'adsorption identique pour tous les sites, indépendamment de la présence d'autres molécules voisines. Il considère également que chaque site est homogène et ne peut être occupé que par une seule molécule de soluté [69].

Ce modèle est exprimé par la relation suivante :

$$Q_e = \frac{Q_m \times K_L \times C_e}{1 + K_L \times C_e} \quad (\text{I.12})$$

Sa forme linéaire est exprimée par l'équation suivante :

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{KL \times Q_m} + \frac{C_e}{Q_m} \quad (\text{I.13})$$

Avec :

Q_e : quantité adsorbée à l'équilibre par l'adsorbant (mg·g⁻¹) ;

C_e : concentration à l'équilibre (mg·L⁻¹) ;

Q_m : capacité maximale de saturation de l'adsorbant (mg·g⁻¹) ;

K : constante d'équilibre de l'adsorption (l·mg⁻¹) ;

c) Isotherme de Temkin

Le modèle de Temkin permet de préciser les conditions thermodynamiques associées au processus d'adsorption. Il suppose une diminution linéaire de la chaleur d'adsorption en fonction du taux de recouvrement, ce qui peut s'expliquer par des interactions entre les molécules adsorbées sur une surface homogène, ou par la superposition avec les effets d'hétérogénéité de surface. Ce modèle est généralement applicable à l'adsorption chimique et est exprimé par l'équation [73] :

$$Q_e = B \ln(KT) + B \ln(C_e) \quad (\text{I.14})$$

$$\text{Avec } B = RT / b \quad (\text{I.15})$$

Où

b: est la constante d'énergie de Temkin (J/mol) ;

KT: représente un facteur lié aux interactions adsorbat–adsorbant ;

Le tracé de Q_e en fonction de C_e permet de déterminer les constantes isothermes b, B et KT.

R: est la constante des gaz parfaits (8,314 J/mol·K°) ;

T: la température (K°) ;

I.3.8. Etude des paramètres thermodynamique d'adsorption

L'adsorption peut entraîner une variation de l'énergie de surface du matériau. L'étude thermodynamique permet d'évaluer la faisabilité et le caractère spontané du processus à travers les paramètres ΔH° , ΔS° et ΔG° . Ces paramètres sont déterminés à partir des constantes d'équilibre à différentes températures. ΔH° et ΔS° sont obtenus à partir de la relation [75]:

$$\ln(Kd) = (\Delta S^\circ/R) - (\Delta H^\circ/RT) \quad (I.16)$$

Où :

R : est la constante des gaz parfaits ($8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) ;

T: la température (K) ;

Kd : le coefficient de distribution ($Kd = Q_e/C_e$) ;

La variation d'énergie libre standard est donnée par:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln(Kd) \quad (I.17)$$

ΔS° : Variation de l'entropie ($\text{kJ}/\text{mol}\cdot\text{K}$) ;

ΔH° : variation de l'enthalpie ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) ;

ΔG° : variation de l'énergie libre de Gibbs ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) ;

Le tracé de la courbe de ($\ln Kd$) en fonction de ($1/T$) permet de déterminer ΔH° , ΔS° et ΔG° . Il convient de préciser que lorsque la variation de l'enthalpie ΔH° est comprise entre 0 et $40 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, le processus d'adsorption est généralement considéré comme une physisorption. En revanche, lorsque ΔH° dépasse $40 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, l'adsorption est considérée comme une chimisorption. La valeur de l'enthalpie standard indique si le processus d'adsorption est exothermique ($\Delta H^\circ < 0$) ou endothermique ($\Delta H^\circ > 0$) [74].

La valeur de l'entropie standard (ΔS°) renseigne sur le degré de désordre à l'interface solide-liquide lors de l'adsorption. Une entropie positive ($\Delta S^\circ > 0$) traduit une augmentation du désordre, souvent liée à une diffusion plus libre ou à une distribution moins ordonnée de l'adsorbat. À l'inverse, une entropie négative ($\Delta S^\circ < 0$) indique une diminution du désordre, suggérant un état plus structuré de l'adsorbat. Ces variations reflètent les changements d'organisation moléculaire et le comportement du système au cours du processus d'adsorption. De plus, pour que l'adsorption soit favorable, l'énergie libre de Gibbs doit être négative [74].

I.4. Les adsorbants

I.4.1. Définition d'un adsorbant

Les adsorbants sont des matériaux solides présentant une grande surface spécifique, de l'ordre de 100 à 1000 m²/g, ce qui leur confère une forte capacité d'absorption des polluants. Ils sont classés selon la taille de leurs pores en matériaux microporeux (diamètre inférieur à 2 nm) et matériaux moyennement poreux (diamètre compris entre 2 et 50 nm). Leur efficacité dépend également de leur surface spécifique, de leur polarité et de la distribution de leurs pores [76].

I.4.2. Critères de choix d'un adsorbant

a) La capacité

La capacité d'adsorption représente la quantité de polluants qu'un biomatériau adsorbant peut fixer dans certaines conditions opératoires, et c'est le principal critère pour mesurer l'efficacité d'un adsorbant. Elle est exprimée en (mg) ou (mmol/g) [77]. Plus la capacité est importante, plus la productivité sera élevée et moins les coûts d'investissement seront chers [76].

b) Sélectivité

La sélectivité est la capacité relative des composants à absorber d'autres composants par rapport à d'autres composants [77]. Plus la sélectivité est grande, plus la séparation est facile et plus les processus sont efficaces en termes de rendement, de consommation d'énergie et de productivité [76].

c) Régénérabilité

Dans les procédés à régénération in situ, la facilité de régénération du matériau adsorbant est une caractéristique essentielle [77].

d) Résistance mécanique, chimique et thermique

Pour garantir une durée de vie suffisante, les matériaux adsorbants doivent pouvoir résister à l'attraction, aux variations des conditions de fonctionnement et aux effets des impuretés et des dommages [77].

e) Coûts de fabrication

Dans certains procédés de traitement de l'eau, le coût des matériaux adsorbants représente une part importante de l'investissement global, ce qui en fait un facteur clé dans le choix du procédé [77].

I.4.3. Caractéristiques générales des adsorbants**I.4.3.1. Structure poreuse**

Nous pouvons les classer en trois types selon l'IUPAC :

- ✓ **Micropores** $d_{\text{pore}} < 2 \text{ nm}$;
- ✓ **Mésopores** $2 \text{ nm} < d_{\text{pore}} < 50 \text{ nm}$;
- ✓ **Macropores** $d_{\text{pore}} > 50 \text{ nm}$ [78] ;

Avec:

d_{pores} : le diamètre de pore ;

I.4.3.2. Surface spécifique

La surface spécifique d'un adsorbant est une surface par unité de masse [78]. Cette surface est indépendante de la granulométrie du matériau et dépend plutôt de sa porosité. [79]. Elle comprend la surface externe et la surface interne d'un adsorbant, alors la surface interne diffère de la surface externe par une énergie d'adsorption plus élevée au sein des micropores, potentiellement le double de celle de la surface externe. Ceci s'explique par la proximité des parois des pores, entraînant un effet simultané des deux parois sur la molécule adsorbée [76].

I.4.4. Types des adsorbants

I.4.4.1. Argiles activées

L'argile activée est un matériau aluminosilicate dont la formule chimique est similaire à celle de la zéolite, mais qui diffère par sa structure cristalline et est souvent utilisé dans les procédés de séchage [80].



Figure I. 26 : Représentation des argiles activées.

I.4.4.2. Zéolithes

Les zéolithes sont définies comme des silicates d'aluminium cristallins à micropores, de formule générale $(AlO_2M, nSiO_2)$, où M est généralement un élément alcalin ou alcalino-terreux et $n \geq 1$. Les zéolithes se déclinent en plus d'une centaine de types en fonction de la différence dans leur structure cristalline et de la valeur de n [80].

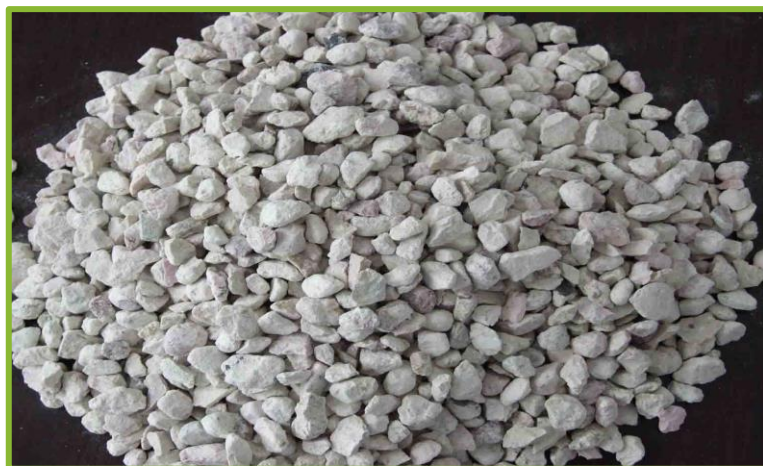


Figure I. 27 : Représentation de la zéolithe.

I.4.4.3. Charbon actif

Le charbon actif est un matériau carboné très poreux doté d'une grande surface spécifique, ce qui lui confère une forte capacité d'adsorption, en plus de sa nature non polaire et hydrophobe. Il est extrait de matières organiques d'origine végétale, animale et minérale [81].



Figure I. 28 : Charbon actif en poudre.

I.4.4.4. Les alumines actives

L'alumine activée est produite à partir d'alumine hydratée, $Al_2O_3 \cdot nH_2O$, où $n = 1$ ou 3 , par déshydratation (calcination) dans des conditions rigoureusement contrôlées pour obtenir $n \geq 0,5$ [82]. Ce matériau est caractérisé par une surface riche en groupes $Al-OH$, où l'adsorption se produit principalement par liaisons hydrogène ; il est amorphe, moyennement polaire et hydrophile [80].

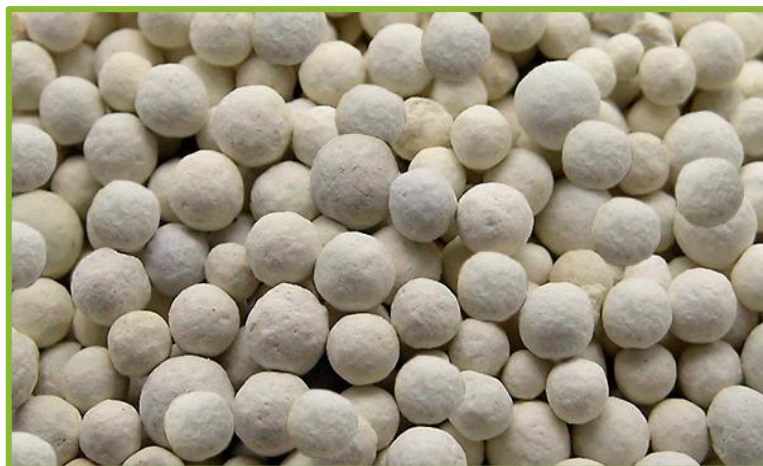


Figure I. 29 : Représentation d'alumines activées.

I.4.4.5. Les gels de silice

Le gel de silice est un matériau translucide et granuleux composé de dioxyde de silicium. Sa porosité élevée lui confère une forte capacité d'absorption de l'humidité. Il peut être produit à partir de silice colloïdale ou par hydrolyse d'alcoxysilane [76].



Figure I. 30 : Représentation des gels de silice.

I.5. Les bio-adsorbants

I.5.1. Définition des bio-adsorbants

Les bio-adsorbants sont principalement composés de déchets agricoles ou industriels possédant des propriétés leur permettant d'absorber les polluants. Ils se divisent en deux

catégories : les bio-absorbants aqueux et les bio-absorbants agroalimentaires. Ces derniers comprennent des matériaux d'origine végétale riches en tanins. Grâce à leurs groupes polyhydroxy-polyphénols, ces tanins sont très efficaces pour la rétention des polluants. Ces propriétés sont attribuées à leurs composants polymères, principalement la cellulose, l'hémicellulose, la pectine, la lignine et les protéines [77].

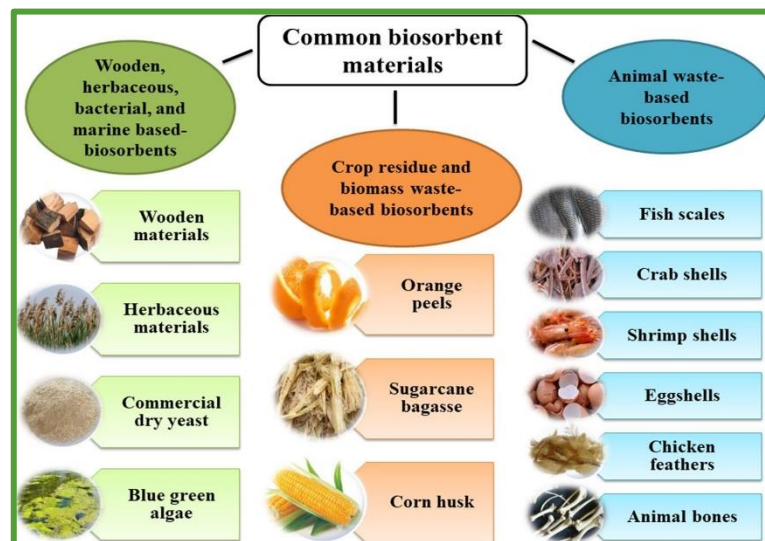


Figure I. 31 : Types courants de bio-adsorbants.

I.5.2. Bioadsorbant d'origine végétale (les pelures d'oignon)

I.5.2.1. L'origine de l'oignon

À l'origine, l'oignon provient d'une espèce sauvage aujourd'hui disparue. Il s'agit d'une plante potagère qui n'existe actuellement qu'à l'état cultivé. Originaire d'Asie centrale et de la Palestine, l'oignon figure parmi les premiers légumes domestiqués par l'homme depuis environ 5000 ans, étant utilisé à la fois comme aliment et comme condiment [83].

En Algérie, l'oignon se classe au troisième rang des cultures légumières, après la pomme de terre et la tomate. Il occupe une place importante dans l'alimentation, étant consommé soit à l'état frais (récolté en vert), soit sous forme conservée (bulbe). La production nationale d'oignon sec est estimée entre 11 et 13 millions de quintaux par an [83].

I.5.2.2. Définition des pelures d'oignon

Les pelures d'oignon sont les couches externes sèches du bulbe d'*Allium cepa* L., générées principalement lors du traitement industriel de l'oignon. Elles sont généralement

considérées comme un déchet agricole, bien qu'elles soient riches en composés bioactifs tels que les flavonoïdes et les acides phénoliques, présentant des propriétés antioxydantes et antimicrobiennes importantes [84].



Figure I. 32 : Les pelures d'oignon.

I.5.2.3. Composition chimique et bioactive des pelures d'oignon

Les pelures d'oignon (*Allium Cepa* L.) se caractérisent par une richesse remarquable en composés bioactifs, principalement appartenant aux familles des composés phénoliques et des flavonoïdes. L'analyse chimique réalisée par UHPLC-DAD-ESI/MS a permis d'identifier plusieurs classes de molécules présentes dans les extraits de pelures [84].

I.5.2.3.1. Composition nutritionnel des pelures d'oignon

Tableau I. 6 : Composition des déchets d'oignon (base matière sèche) [85].

Composant	Valeurs (%) ou mg/g (en matière sèche)
Protéines	8,3–15,6 %
Glucides	88,56 %
Fibres alimentaires	169–750 mg/g

Tableau I. 7 : Teneur en minéraux dans la peau d'oignon [85].

Minéral	Plage
Calcium	1,8–16,5 mg/g
Potassium	11,1–15,9 mg/g
Zinc	0,0162–0,0538 mg/g
Magnésium	0,6–1,5 mg/g
Manganèse	0,0065–0,0288 µg/g
Fer	0,0196–0,8889 mg/g
Sélénium	0,00003–0,00093 µg/g

Tableau I. 8 : Composés phytochimiques dans la peau d'oignon [85].

Composé	Plage (mg/g matière sèche)
Phénoliques totaux	9,4–52,7 mg GAE/g
Flavonoïdes	Rouge : 20,22 mg/g, Perle : 19,64 mg/g, Blanc : 0,08 mg/g

Tableau I. 9 : Composition des écailles extérieures de l'oignon [85].

Composant	Pourcentage
Fibres brutes	26,84 %
Matières grasses brutes	15.13%
Protéines brutes	2.64%
Cendres	8.06%
Humidité	8,02 %

Tableau I. 10 : Teneur en flavonoïdes selon la variété d'oignon (mg/g) [85].

Variété d'oignon	Teneur en flavonoïdes (mg/g)
Oignon rouge	20.22
Oignon perlé	19.64
Oignon blanc	0.08

Tableau I. 11 : Profil des acides gras des écailles extérieures de l'oignon [85].

Acide gras	Pourcentage
Acide laurique	0.94%
Acide myristique	1.28%
Acide palmitoléique	2.84%
Acide stéarique	8.81%
Acide linoléique	52,87%
Acide arachidonique	0,59%
Acide érucique	0,63%
Acide lignocérique	0,54%
Acide behénique	1,23%
Acide linoléinique	2,88%
Acide oléique	17,57%
Acide palmitique	9,8%
Acides gras saturés (AGS)	21,42 %
Acides gras insaturés (AGMI)	76,79 %

I.5.2.3.2. Types de composés bioactifs

a) Thiosulfates et composés organosulfurés

L'oignon constitue une des sources principales d'OSCs aromatiques, incluant les thiosulfates. L'enzyme alliinase génère des thiosulfates grâce à son activité catalytique, ce qui engendre des composés provoquant les larmes et la saveur caractéristique de l'oignon. La quantité totale de thiosulfate peut fluctuer en fonction de la variété d'oignons colorés [86].

b) Phénols et flavonoïdes**➤ Les phénols**

L'oignon contient des composés phénoliques issus des acides cinnamique et benzoïque, influençant sa couleur, son goût, son amertume et son arôme. Parmi ces composés, les acides hydroxycinnamiques (HC), qui sont des phénylpropanoïdes monocycliques de type C6-C3, incluent des acides tels que férulique, sinapique, p-coumarique et caféique. Dans l'oignon, les HC se retrouvent sous forme d'acide protocatéchique, d'acide férulique, de 1-O- β -D-glucoside, d'acide p-coumarique et d'acide vanillique, disponibles en version libre ou conjuguée [87].

➤ Les flavonoïdes

Représentent la fraction majoritaire des composés identifiés. Parmi eux, la quercétine est le composé prédominant, présente sous forme libre (aglycone) ainsi que sous forme de mono- et diglycosides, tels que la quercétine-4'-O-glucoside. D'autres flavonoïdes ont également été détectés, notamment le kaempférol, l'isorhamnétine et leurs dérivés glycosylés [83].

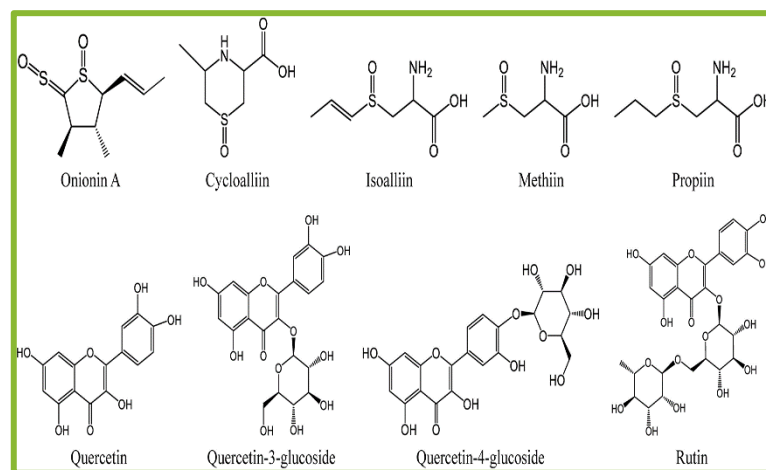


Figure I. 33: Structures chimiques des principaux composés organosulfurés et phénoliques de l'oignon [88].

I.5.2.4. Utilisation des pelures d'oignon

I.5.2.4.1. Colorant naturel

Les pelures d'oignon constituent un excellent colorant naturel. Elles peuvent être utilisées pour teindre les aliments ainsi que les textiles. Les pelures d'oignon jaune produisent une couleur orange tirant sur le brun, tandis que les pelures d'oignon rouge donnent des teintes allant du brun rougeâtre au vert kaki [89].

I.5.2.4.2. Produits de boulangerie

La provenance des matériaux diététiques et d'autres matériaux bénéfiques pour les produits sans gluten est principalement issue des dérivés de la fabrication de fruits et légumes, ce qui les rend économiques. Une étude a montré que l'infusion de déchets d'oignon dans le pain sans gluten ne se limite pas à réduire les coûts, mais elle peut également augmenter les bienfaits thérapeutiques potentiels tout en maintenant une acceptation sensorielle satisfaisante chez les consommateurs [85].

I.5.2.4.3. Sécurité

L'acrylamide (AA) est un cancérigène présent dans divers aliments soumis à un traitement thermique, notamment les frites. Il induit une cytotoxicité et une immunotoxicité dans les cellules hépatiques. L'utilisation de l'OPP comme additif alimentaire naturel permet de réduire ces effets indésirables. L'efficacité de l'OPP dans la diminution de la cytotoxicité et de l'immunotoxicité est proportionnelle à sa concentration. Une supplémentation en OPP riche en polyphénols peut atténuer les effets immunotoxiques et cytotoxiques dus à l'AA grâce à sa capacité à piéger les espèces réactives de l'oxygène (ROS) [85].

I.6. Conclusion

Au terme de ce chapitre, il ressort que les colorants présents dans les eaux usées représentent une source importante de pollution en raison de leur persistance, de leur toxicité et de leurs effets néfastes sur les écosystèmes aquatiques et la santé humaine. L'analyse des différentes techniques de traitement a montré que l'adsorption constitue l'une des méthodes les plus efficaces et les plus adaptées pour l'élimination de ces polluants, grâce à sa simplicité de mise en œuvre, son rendement élevé et son coût relativement faible. Par ailleurs, la présentation du biomatériau adsorbant, élaboré à partir de déchets agricoles, a mis en évidence ses propriétés

prometteuses en tant qu'adsorbant durable et performant pour le traitement des eaux contaminées par les colorants. Les éléments développés dans ce chapitre constituent ainsi la base théorique nécessaire à l'étude expérimentale présentée dans le chapitre suivant, consacrée à l'évaluation des performances d'adsorption du biomatériau vis-à-vis des colorants en milieu aqueux.

LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Léandre, C. (2022). Pollution et biodiversité [PDF]. Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité. Gestion de l'eau en agriculture. (2018, March 29). <http://www.iaea.org/fr/themes/gestion-de-leau-en-agriculture>
- [2] Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). (s. d.). Gestion de l'eau en agriculture.
- [3] C.I.eau. (2017, 9 février; mis à jour 4 juillet 2024). Connaissez-vous les usages non domestiques de l'eau ? Centre d'information sur l'eau <https://www.cieau.com/le-metier-de-leau/ressource-en-eau-eau-potable-eaux-usees/connaissez-vous-les-usages-non-domestiques-de-leau/>
- [4] C.I.eau. (s. d.). Les usages de l'eau comme source énergie. Centre d'information sur l'eau. <https://www.cieau.com/blog/les-usages-de-leau-comme-source-energie/>
- [5] Les causes de la pollution de la ressource en eau | Centre d'information sur l'eau. (2019, May 2). <https://www.cieau.com/connaitre-leau/la-pollution-de-leau/pollution-ressource-eau-comment-reduire/>
- [6] Kara, K. (2019). La pollution de l'eau [PDF]. Université Mentouri-Constantine 1
- [7] Syndicat des Eaux et de l'Assainissement d'Alsace-Moselle (SDEA). (s. d.). La pollution des eaux par les pesticides. <https://www.sdea.fr/index.php/fr/l-eau/la-ressource-en-eau/la-pollution-des-eaux-par-les-pesticides>
- [8] Hossain, M. F. (2019). Water. In Sustainable design and build: Building, energy, roads, bridges, water and sewer systems (pp. 301–418). Butterworth-Heinemann.
- [9] Hameurlaine, S. (2025). Préparation d'un adsorbant innovant comme solution durable dans l'élimination des colorants dans les eaux industrielles textiles.
- [10] BENNEKROUF, F. Z. (2026). Valorisation des déchets hospitaliers dans le traitement des eaux (Doctoral dissertation).
- [11] Tayeb, B. K. (2026). Doctorat de 3ème cycle (Doctoral dissertation, Université de M'Sila).
- [12] Benammar, H. S. (2023). Effets synergiques et pouvoir adsorbant du charbon actif dans l'élimination de deux colorants azoïques (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider Biskra).
- [13] BENNEKROUF, F. Z. (2026). Valorisation des déchets hospitaliers dans le traitement des eaux (Doctoral dissertation).

- [14] Ouagued, I. (2026). Etude d'un Système De Dépollution d'effluents De l'industrie Textile Par Un Procédé Couplant Adsorption Et Electrocatalyse Hétérogène (Doctoral Dissertation, Abderrahmane Djafer/Marc Cretin).
- [15] Lahmar, A. (2022). Valorisation des bioadsorbants à faible coût pour l'élimination des polluants présents dans les effluents aqueux (Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie).
- [16] Djelloul, C. (2014). Expérimentation, modélisation et optimisation de l'adsorption des effluents textiles [Thèse de doctorat en sciences, Chimie industrielle]. Université Mohamed Khider de Biskra.
- [17] Mennas, N. (2025). Développement de nouveaux adsorbants : polymère conducteur renforcé par des supports inorganiques pour application dans l'élimination des polluants organiques (Thèse de doctorat, Université Mustapha Stambouli de Mascara, Algérie).
- [18] Breda, A. (1981). Colorants anioniques facilement dispersables dans l'eau, leur fabrication et leurs applications (Brevet français No. FR2473052A1). Produits Chimiques Uguine Kuhlmann.
- [19] Ferdenache, H. (2025). Formulation d'une émulsion : étude de la stabilité, caractérisation et application (Thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma).
- [20] Belaid, K.D., & Kacha, S. (2011). Étude cinétique et thermodynamique de l'adsorption d'un colorant basique sur la sciure de bois. *Journal of Water Science*, 24, 131-144.
- [21] Guendouz, A., Sayoud, N. E., & Darnane, C. (2025). Élimination d'un colorant textile en solution aqueuse par adsorption sur résine macroporeuse (Doctoral dissertation, Université de Jijel).
- [22] KHELLOUL, N. (2012). Dégradation d'un mélange de colorants par plasma Glidarc : étude de l'influence de différentes substances (Mémoire de magister, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie des Procédés).
- [23] FERNANE, G. (2017). Toxicité des colorants et différentes techniques de traitement des effluents (Mémoire de Master, École Nationale Polytechnique, Département de Génie Chimique).
- [24] BACHA, F. (2014). Étude de l'élimination du méthyle violet par deux biosorbants végétaux *Ammi visnaga* et *Ammodaucus leucotrichus* (Mémoire de Master, Université de Blida 1, Faculté de Technologie, Département de Génie des Procédés).
- [25] Djebli, S., & Saifi, M. (2020). Elimination d'un polluant organique (colorant méthyle violet) par zéolithe synthétique de type ZSM-5.

- [26] BEKAKRIA, H. (2021). Étude de l'élimination de la pollution des composés récalcitrants d'un milieu réactionnel en appliquant les procédés d'oxydation avancée (PAO) (Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, Faculté des Sciences, Département de Chimie).
- [27] Amina, M. B. (2019). THÈSE LMD (Doctoral dissertation, UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID-TLEMCEN).
- [28] Tayeb, B. K. (2026). Doctorat de 3ème cycle (Doctoral dissertation, Université de M'Sila).
- [29] Hounkpe, J. B., Kelome, N. C., Lawani, R. A. N., & Adechina, A. R. M. A. (2017). Etat des lieux de la pollution des écosystèmes aquatiques au Bénin (Afrique de l'ouest). *Larhyss Journal*, 14(2), 149-171.
- [30] Chynel, M. (2023). Impact de l'eutrophisation sur la capacité des mangroves à stocker du carbone bleu (Doctoral dissertation, Museum national d'histoire naturelle-MNHN PARIS).
- [31] MONTIGNY, C. (2023). Javier-Angel TESÁN ONRUBIA (Doctoral dissertation, Aix-Marseille Université).
- [32] Medicover Hospitals. (23 juillet 2024). Effets de la pollution de l'eau sur la santé humaine : risques et conséquences.
- [33] Bessedik, M. (s. d.). Traitement de l'eau (TTE L3). Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Département d'Hydraulique.
- [34] Lounnas, A. (2009). Amélioration des procédés de clarification des eaux de la station Hamadi-Kroma de Skikda (Mémoire de magister). Université 20 Août 1955 Skikda.
- [35] Bessedik, M. (s. d.). Traitement et caractérisation biologique des eaux usées (TPCBEU) [Polycopié de cours]. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf (USTO-MB).
- [36] Lერიკიერი, F. (2017). Évaluation et comparaison des performances de quatre procédés de traitement conventionnel (boues activées, disques biologiques, filtres plantés à écoulement vertical et lagunage naturel) en territoire ultramarin.
- [37] Bali, M. (2024). Traitement des eaux usées. Institut Supérieur des Sciences et Techniques des Eaux, Université de Gabès.
- [38] EPNAC. (2023). Réhabilitation des lagunes (Rapport technique). Office français de la biodiversité (OFB).
- [39] Benyahia, B. (2012). Modélisation et observation des bioprocédés à membranes: application à la digestion anaérobie (Doctoral dissertation, Université Montpellier 2 (Sciences et Techniques); Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen).

- [40] Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540–555.
- [41] BOUBAKEUR, B., & AKRAM, C. (2025). Analyse des performances actuelles de la station lagunage de la commune de Bir Aïssa Wilaya de Bordj Bou Arreridj (Doctoral dissertation, Faculté des sciences et de la technologie UNIV-BBA).
- [42] Hameurlaine, S. (2025). Préparation d'un adsorbant innovant comme solution durable dans l'élimination des colorants dans les eaux industrielles textiles (Mémoire de master, Université de Tissemsilt, Institut des Sciences de la Nature et de la Vie).
- [43] Goudjil, S. (2023). Possibilité d'élimination des colorants par coagulation-floculation : Effet des paramètres réactionnels (Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie).
- [44] BENABBAS, K. (2020). Intensification de la sorption de colorants textiles par la biomasse sèche de lentilles d'eau : Effet de prétraitements chimique et mécanique du biosorbant (Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar–Annaba, Algérie).
- [45] HARBI, I. (2025). Dépollution d'effluents aqueux contenant des nanoparticules à l'aide d'argile modifiée (Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar–Annaba, Faculté de Technologie, Département Génie des Procédés).
- [46] BENNEKROUF, F. Z. (2025). Valorisation des déchets hospitaliers dans le traitement des eaux (Thèse de doctorat, Université Mustapha Stambouli de Mascara, Algérie).
- [47] Ben Salah, S. (2025). Traitement des eaux usées textiles par adsorbants et techniques membranaires (Thèse de doctorat, Université de Montpellier & Université de Sfax). HAL.
- [48] Musah, M., Azeh, Y., Mathew, J. T., Umar, M. T., Abdulhamid, Z., & Muhammad, A. I. (2021). Adsorption kinetics and isotherm models: A review. *Caliphate Journal of Science and Technology (CaJoST)*, 4(1), 20–26.
- [49] Boubberka, Z. (2022). Procédés d'adsorption : Adsorption (Partie 1) [Support de cours, Master 1 Génie des Procédés de l'Environnement]. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf (USTO-MB), Faculté de Chimie.
- [50] Musah, M., Azeh, Y., Mathew, J. T., Umar, M. T., Abdulhamid, Z., & Muhammad, A. I. (2021). Adsorption kinetics and isotherm models: A review. *Caliphate Journal of Science and Technology (CaJoST)*, 4(1), 20–26.
- [51] Patel, H. (2019). Fixed-bed column adsorption study: A comprehensive review. *Applied Water Science*, 9(3), 45.

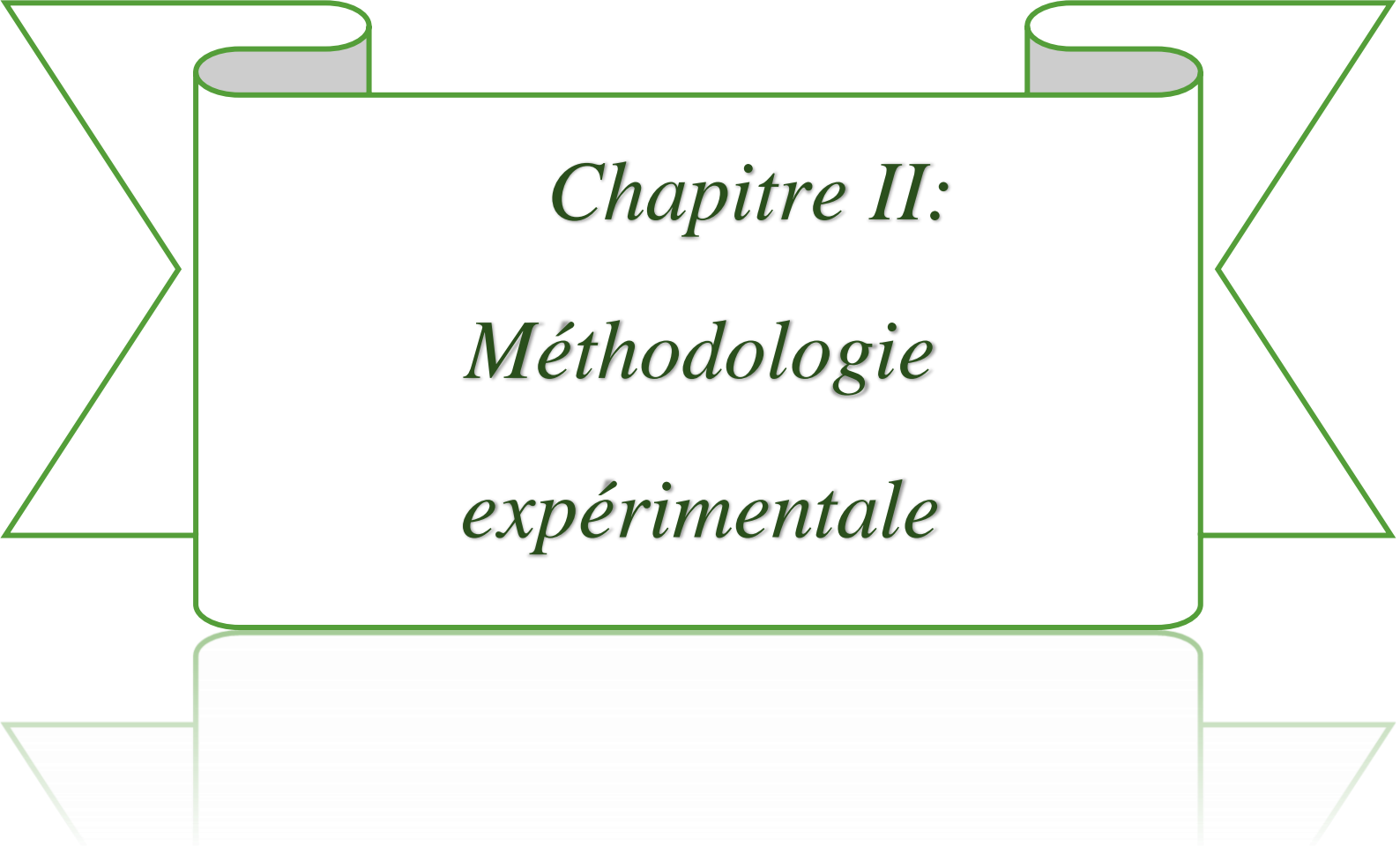
- [52] Saleh, T. A. (2021). Surface and morphological characterization of hybrid materials. In *Polymer hybrid materials and nanocomposites: Fundamentals and applications* (pp. 241–283). William Andrew Publishing.
- [53] Bonilla-Petriciolet, A., Mendoza-Castillo, D. I., & Reynel-Ávila, H. E. (Eds.). (2017). *Adsorption processes for water treatment and purification* (Vol. 256). Cham: Springer International Publishing.
- [54] Ouakouak, A. (2017). *Élimination du cuivre, des nitrates et des phosphates des eaux par adsorption sur différents matériaux* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [55] Bouserou, D., Bouzid, I., Ahmed Seid, A. (2025). *Gestion durable d'élimination de la pollution colorée par la valorisation d'adsorbants naturels : combinaison de deux applications vertes* (mémoire de master, Université 20 Août 1955 Skikda)
- [56] Kennedy, K. K., Maseka, K. J., & Mbulo, M. (2018). Selected adsorbents for removal of contaminants from wastewater: Towards engineering clay minerals. *Open Journal of Applied Sciences*, 8(8), 355–369.
- [57] Boughaita, I. (2018). *Essais de dépollution des eaux contaminées par un composé organique par l'utilisation de nouveaux biosorbants* [Thèse de doctorat, Génie chimique, option Matériaux et Environnement]. Université 20 Août 1955 de Skikda.
- [58] MENNAS, N. (2025). *Développement de nouveaux adsorbants: polymère conducteur renforcé par des supports inorganiques pour application dans l'élimination des polluants organiques* (Doctoral dissertation).
- [59] INORGANIQUE, M., & SAYADI, S. (2025). *ÉLABORATION D'UN NOUVEAU PROCÉDÉ DE TRAITEMENT DES EAUX USÉES À BASE DE FIBRES LIGNOCELLULOSIQUES PHOSPHORYLÉES ET DE*.
- [60] BENAOUNE, S. (2025). *Étude expérimentale et modélisation de l'élimination des polluants organiques dans les effluents liquides industriels* (Doctoral dissertation, Faculté des Sciences et de la technologie).
- [61] Tayeb, B. K. (2026). *Doctorat de 3ème cycle* (Doctoral dissertation, Université de M'Sila).
- [62] Hadj-Otmane, C. (2024). *Synthèse des charbons à base d'un biomatériau local: Caractérisation et propriétés d'adsorption des colorants synthétiques en milieux aqueux* (Doctoral dissertation, Faculté des sciences et technologie).

- [63] Merle, T. (2009). Couplage des procédés d'adsorption et d'ozonation pour l'élimination de molécules bio-récalcitrantes [Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Université de Toulouse].
- [64] SOUFAL, F. Z. (2023). Etude et caractérisation de l'adsorption d'un colorant par un géomatériau (Doctoral dissertation).
- [65] Makhlouf, M. R. (2025). Bio-adsorbants : Elaboration, caractérisation et applications pour le traitement des eaux usées [Thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma].
- [66] Hadj-Otmane, C. (2024). Synthèse des charbons à base d'un biomatériau local: Caractérisation et propriétés d'adsorption des colorants synthétiques en milieux aqueux (Doctoral dissertation, Faculté des sciences et technologie).
- [67] Gervais Lavoie, R. (2026). Adsorption multi-composante par la théorie du potentiel (Doctoral dissertation, Université du Québec à Trois-Rivières).
- [68] Aboulayt, R. (2024). Adsorption de l'isobutanol dans les zeolithes: apport des analyses multivariées (Doctoral dissertation, Normandie Université).
- [69] Chouchane, T. (2009). Synthèse, caractérisation et application de matériaux catalytiques (Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar – Annaba, Faculté des Sciences, Département de Chimie). Annaba, Algérie.
- [70] Bella, H. (2024). Élaboration de matériaux adsorbants pour l'élimination des polluants organiques pour la protection de l'environnement (Thèse de doctorat, Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle).
- [71] BOUGHAITA, I. (2018). Essais de dépollution des eaux contaminées par un composé organique par l'utilisation de nouveaux biosorbants (Thèse de doctorat, Université 20 Août 1955 de Skikda, Algérie).
- [72] Benhamou, A. (2022). Introduction aux procédés d'adsorption : Procédés d'adsorption (1^{re} partie) [Support de cours, Master 1 Génie des Procédés de l'Environnement]. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Faculté de Chimie, Département de Génie Chimique.
- [73] Djemai, I. (2021). Élimination des polluants organiques des eaux de surfaces par adsorption (Thèse de doctorat en sciences hydrauliques, Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd, Algérie).
- [74] Mennas, N. (2025). Développement de nouveaux adsorbants : polymère conducteur renforcé par des supports inorganiques pour application dans l'élimination des polluants organiques (Thèse de doctorat en sciences, Chimie). Université Mustapha Stambouli de

- Mascara, Faculté des Sciences Exactes, Département de Chimie, Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau.
- [75] Lazli, W. (2019). Élimination de polluants organiques par biosorption sur support combiné (Thèse de doctorat en sciences, Génie de l'Environnement, École Nationale Polytechnique). École Nationale Polytechnique.
- [76] Fafa, S., Dehmen, S., & Boukhemkhem, A. E. (2021). Etude de l'adsorption du crystal violet par le feldspath d'Ain Barbar (Annaba) (Doctoral dissertation, Université de Jijel).
- [77] Djelloul, C. (2014). Experimentation, modelisation et optimisation de l'adsorption des effluents textiles (Thèse de doctorat).
- [78] Slasli, M. A. (2002). Modélisation de l'adsorption par les charbons microporeux: Approches théorique et expérimentale.
- [79] Ouakouak, A. (2017). Elimination du cuivre, des nitrates et des phosphates des eaux par adsorption sur différents matériaux (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [80] Boughiout, O., & Saidani, A. (2020). Étude comparative de l'adsorption des métaux lourds (Cd et Pb) sur des adsorbants différents [Mémoire de master]. Université M'Hamed Bougara Boumerdès.
- [81] Nko'o Abuiboto, M. C., Avom, J., & Mpon, R. (2016). Évaluation des propriétés de charbons actifs de résidus de Moabi (*Baillonella toxisperma* Pierre) par adsorption d'iode en solution aqueuse. *Revue des sciences de l'eau*, 29(1), 51-60.
- [82] Knaebel, K. S. & Adsorption Research, Inc. (n.d.). Adsorbent selection. In *Adsorption Research*, Inc.
- [83] Zine, M., & Amouri, M. (2021). Évaluation de l'activité antibactérienne et antioxydante des extraits polyphénoliques issus d'*Allium cepa* (Mémoire de master, Université Ibn Khaldoun–Tiaret).
- [84] Celano, R., Docimo, T., Piccinelli, A. L., Gazzerro, P., Tucci, M., Di Sanzo, R., Carabetta, S., Campone, L., Russo, M., & Rastrelli, L. (2021). Onion peel: Turning a food waste into a resource. *Antioxidants*, 10(2), 304.
- [85] Shabir, I., Pandey, V. K., Dar, A. H., Pandiselvam, R., Manzoor, S., Mir, S. A., Shams, R., Kshirod K. Fayaz, U., Ahmad Khan, S., G. Jeevarathinam., Zhang, Y., Rusu, A.V., & Trif, M. (2022). Nutritional profile, phytochemical compounds, biological activities, and utilisation of onion peel for food applications: a review. *Sustainability*, 14(19), 11958.
- [86] Benkeblia, N., & Lanzotti, V. (2007). *Allium thiosulfonates*: Chemistry, biological properties and their potential utilization in food preservation. *Food*, 1(2), 193–201

- [87] Sagar, N. A., Pareek, S., Benkeblia, N., & Xiao, J. (2022). Onion (*Allium cepa* L.) bioactives: Chemistry, pharmacotherapeutic functions, and industrial applications. *Food Frontiers*, 3(3), 380-412.
- [88] Zhao, X. X., Lin, F. J., Li, H., Li, H. B., Wu, D. T., Geng, F., ... & Gan, R. Y. (2021). Recent advances in bioactive compounds, health functions, and safety concerns of onion (*Allium cepa* L.). *Frontiers in Nutrition*, 8, 669805.
- [89] Comment recycler les peaux d'oignon ? (2024, 10 décembre). Ceercle. <https://ceercle.eu/recycler-peaux-oignon>

Approche expérimentale



Chapitre II:
Méthodologie
expérimentale

II.1. Introduction

Ce chapitre présente les matériaux, réactifs et méthodes expérimentales utilisés dans cette étude. Pour garantir la fiabilité des résultats obtenus, les différentes étapes de préparation du bio-adsorbant, les techniques de caractérisation et les protocoles expérimentaux sont décrits.

II.2. Matériels utilisés

Le matériel utilisé dans cette partie de l'étude est le suivant :

- ❖ Etuve.
- ❖ Pompe à vide.
- ❖ Béchers.
- ❖ pH-mètre.
- ❖ Broyeur.
- ❖ Fiole jaugée.
- ❖ Micropipette.
- ❖ Seringue.
- ❖ Verre de montre.
- ❖ Balance de précision.
- ❖ Pissette.
- ❖ Cristallisatoire.
- ❖ Agitateur et bareau magnétique.
- ❖ Termomètre.
- ❖ Spectrophotomètre UV-visible.
- ❖ Picnomètre.
- ❖ Four à moufle.

II.3. Produits utilisés

II.3.1. Produits végétaux

- BO.
- Eau distillée.

II.3.2. Produits chimiques

- Méthyle violet
- NaOH et HCl pour ajuster le pH

II.4. Dispositif et protocole expérimentaux

II.4.1. Matériel d'étude (Biomatériau)

Dans cette étude, nous avons choisi le BO comme biomatériau végétal naturel en raison de leur diversité de propriétés et de leur abondance. Ce matériau est été collectée dans la wilaya de Skikda, en Algérie, plus précisément sur les marchés des villes de Collo et de Sidi Mezghiche, ainsi que dans les déchets de cuisine.



Figure II. 1 : Localisation géographique du site de collecte de BO.

II.4.2. Les étapes de préparation de biomatériau

II.4.2.1. L'étape de collection et tri

Comme mentionné précédemment, nous avons collecté le BO étudiée sur les marchés des villes de Collo et de Sidi Mezghiche, ainsi que dans les déchets de cuisine, et elles sont considérées comme des déchets ménagers organiques de première catégorie. La collecte a été réalisée en sélectionnant uniquement les fines couches externes des pelures. Nous les avons ensuite nettoyées, lavées à l'eau pour enlever la terre et la boue qui y adhéraient, puis séchées à l'air libre et au soleil ou à l'étuve.



Figure II. 2 : Le matériau étudié noté BO.

II.4.2.2. L'étape de broyage

À ce stade, une fois le matériau séché, nous les avons broyées à l'aide d'un broyeur électrique. Cette opération a permis d'obtenir deux fractions granulométriques différentes : une poudre fine et une poudre plus grossière. Les deux fractions ont été conservées séparément dans des récipients hermétiques placés dans un endroit sec



Figure II. 3 : Broyeur électrique.

II.4.2.3. L'étape de tamisage

Nous avons effectué le processus de tamisage pour déterminer la taille de la poudre que nous avons obtenue, et les résultats ont été les suivants, où nous avons obtenu deux tailles différentes:

Tableau II. 1: la granulométrie des échantillons.

Echantillon	BO ₁	BO ₂
Taille des particules	315µm	1mm



Figure II. 4: l'opération de tamisage par les tamis.

II.4.2.4. L'étape s lavage

Plus tard dans cette étape, nous avons lavé le matériau étudié à l'eau du robinet, à l'aide d'une passoire et d'un grand morceau de tissu (dont les pores étaient très fins afin d'éviter toute perte de matériau lors du lavage). Nous avons placé le matériau dans le tissu, posé ce dernier sur la passoire, maintenu le tout et rincé à l'eau courante jusqu'à ce que nous soyons certains qu'il était parfaitement débarrassé de ses impuretés, de sa poussière et de sa couleur.



Figure II. 5 : L'étape de lavage avec ébullition.

En raison de la difficulté d'élimination de la coloration, les échantillons ont été placés dans un bain-marie pendant quelques heures à une température ne dépassant pas 60 °C. Cette opération a été suivie de plusieurs cycles de lavage à l'eau jusqu'à obtention d'une eau de rinçage claire et transparente.

II.4.2.5. L'étape de séchage

Après l'étape de lavage vient l'étape de séchage, où nous avons séché le matériau dans une étuve à une température de 105°C pendant un ou deux jours afin de nous assurer qu'il était bien sec et sans humidité. Nous l'avons ensuite stocké, prêt pour les tests.



Figure II. 6 : Une étuve.

II.5. Caractérisation physico-chimique et structurale du bio-adsorbant

II.5.1. Le taux d'humidité

Cette opération a été réalisée afin d'évaluer le matériau ainsi que sa capacité d'adsorption. Pour ce faire, l'échantillon a été séché dans une étuve pendant 24 heures à une température de 105 °C. Le taux d'humidité a ensuite été déterminé selon l'expression suivante :

$$H(\%) = [(m_0 - m_1)/m_0] \times 100 \quad (\text{II.1})$$

Où :

m₀: masse initiale de l'échantillon ;

m₁: masse finale après séchage ;

II.5.2. La densité absolue

La densité réelle (ou absolue) constitue un paramètre important dans l'évaluation de la capacité d'adsorption. Elle permet d'estimer le degré de porosité du matériau étudié, lequel influence directement ses propriétés adsorbantes. Elle est déterminée par la méthode du pycnomètre.

Les masses suivantes sont mesurées

$$D = (m_2 - m_0) / [(m_1 - m_0) - (m_3 - m_2)] \quad (\text{II.2})$$

Avec :

m₀ : pycnomètre vide ;

m₁ : pycnomètre + eau ;

m₃ : pycnomètre + solide + eau ;



Figure II. 7 : Pycnomètre.

II.5.3. Le pH du bio-adsorbant

Afin de déterminer le pH du bio-adsorbant, 5 g de BO ont été pesés puis introduits dans un bécher contenant 100 ml d'eau distillée. Le mélange a ensuite été soumis à une agitation magnétique pendant 10 minutes, puis laissé en décantation pendant 15 minutes. Enfin, le pH a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre.

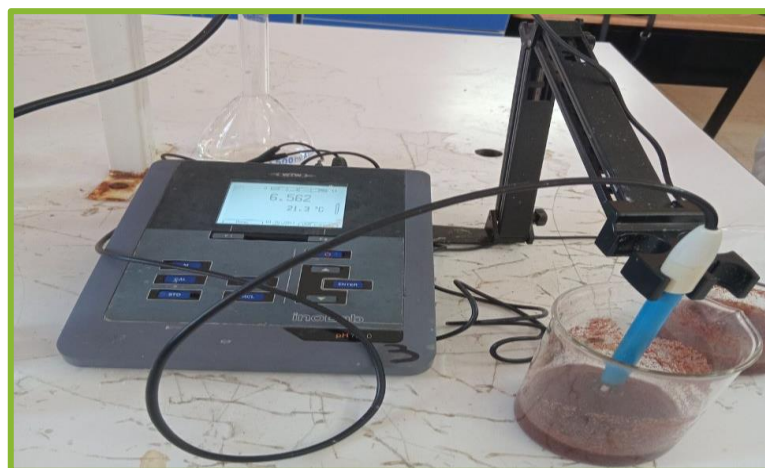


Figure II. 8 : Mesure du pH du bio-adsorbant étudié.

II.5.4. Analyse UV-Visible

Grâce au large domaine d'absorption mis en évidence par la technique d'analyse UV-Visible, il a été constaté que le matériau possède des groupes fonctionnels capables d'interagir avec les colorants.

Il existe une relation entre l'intensité de l'absorption et la concentration, comme l'indique la loi de Beer-Lambert :

$$A = \log(I_0/I) = k \cdot C \cdot l \quad (\text{II.3})$$

A : absorbance de la solution ;

I₀ : intensité du rayonnement incident ;

I : intensité du rayonnement transmis ;

K : constante propre à la substance ($L \cdot g^{-1} \cdot cm^{-1}$ ou $L \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$) ;

C : concentration de la solution ;

l : longueur du trajet optique (cuve)(cm) ;

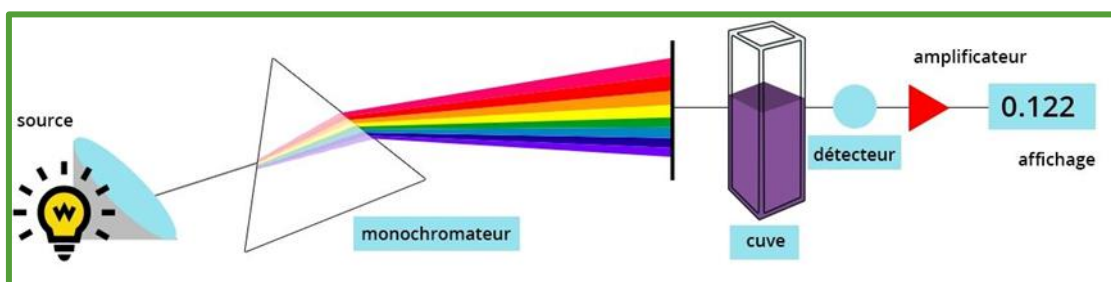


Figure II. 9 : Schéma de principe d'un spectrophotomètre à double faisceau

II.5.5. Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

L'analyse de diffraction des rayons X (DRX) a été réalisée pour étudier la structure du bio-adsorbant. Cette technique permet de mettre en évidence les phases cristallines présentes dans le matériau et d'évaluer son degré de cristallinité. Les résultats de cette analyse sont présentés au chapitre suivant.

II.5.6. La teneur en cendres

La teneur en cendres permet de déterminer la proportion de la matière inorganique restante après la combustion complète du matériau brut. Pour cela, une masse de BO est d'abord pesée avant d'être introduite dans un four à une température de 600 °C pendant 5 heures. Après refroidissement, les cendres obtenues sont pesées afin de calculer le pourcentage de cendres. Cette analyse permet d'évaluer la quantité de matière organique éliminée ainsi que la fraction minérale résiduelle.

II.6. Polluant modèle

Nous avons choisi le méthyle violet comme modèle d'un polluant organique courant car il est susceptible d'être présent en grande quantité dans les déchets industriels et d'autres sources.



Figure II. 10 : Méthyle violet.

II.6.1. Préparation des solutions

Nous voulions préparer une solution de méthyle violet à une concentration de 1000 mg/L. Pour ce faire, nous pesons 1g de poudre de méthyle violet et la dissolvons dans 1000L d'eau distillée.



Figure II. 11 : La solution mère de méthyle violet 1000 mg/l.

II.6.2. Préparation de solution fille

Pour préparer la solution fille à la concentration souhaitée, on applique la loi de dilution.

$$C_0 V_0 = C_1 V_1 \quad (\text{II.4})$$

Avec :

C_0 : la concentration de la solution mère 1000 mg/l ;

V_0 : le volume prélevé de la solution mère ;

C_1 : la concentration de la solution fille ;

V_1 : le volume final de la solution fille après dilution ;



Figure II. 12 : La solution fille de méthyle violet (10 ppm).

II.6.3. Protocole de dosage et d'étalonnage du méthyle violet

❖ La courbe d'étalonnage du méthyle violet

La loi de Beer-Lambert stipule qu'il existe une relation linéaire entre l'absorbance et la concentration. On peut déterminer la concentration d'un échantillon inconnu en traçant une courbe d'étalonnage pour des solutions de concentration connue et leurs absorbances correspondantes.

L'analyse par l'absorption UV-visible avec une $\lambda_{\text{max}} = 584 \text{ nm}$ a donné les résultats indiqués ci-dessous :

Tableau II. 2: Résultats de l'étalonnage du méthyle violet.

Echantillon	C (mg/l)	A
1	0	0
2	2	0.349
3	4	0.698
4	6	1.056
5	8	1.388
6	10	1.777

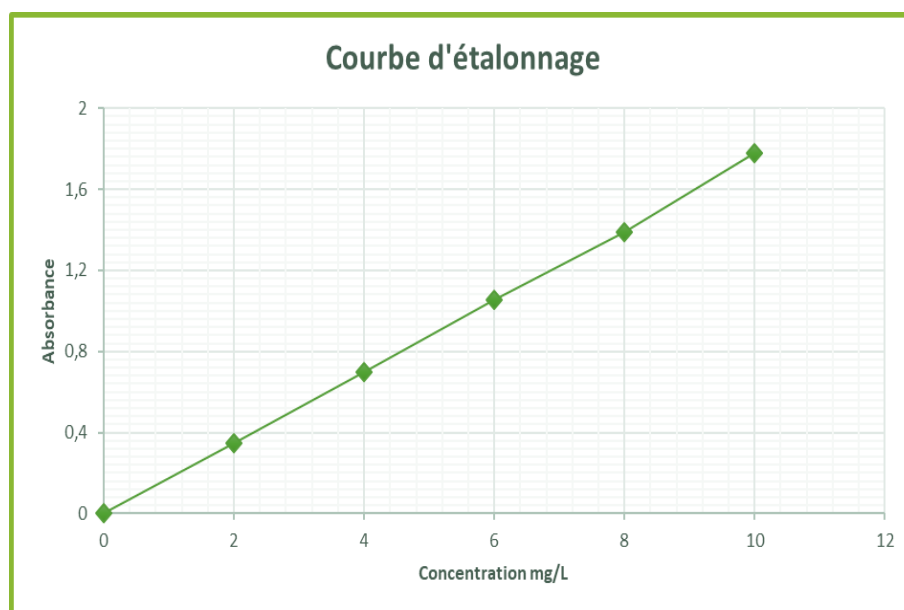


Figure II. 13 : Courbe d'étalonnage du méthyle violet.

II.7. Essai d'adsorption

Nous avons réalisé une étude expérimentale de la cinétique d'adsorption en introduisant une masse de $m = 0,3$ g de BO dans un bécher de 250 ml contenant 200 ml d'une solution de méthyle violet de concentration initiale $C_0 = 10$ ppm. Le système a été protégé de la lumière à l'aide d'un papier aluminium afin d'éviter toute photodégradation.

L'ensemble a ensuite été placé sur un agitateur magnétique à vitesse constante $v = 300$ tr/min, à température ambiante (22 °C).

Des prélèvements ont été effectués à intervalles de temps réguliers (de 0 à 100 minutes). Chaque prélèvement a été réalisé après une décantation d'environ 1 minute à l'aide d'une seringue de 5 ml, puis immédiatement protégé de la lumière en étant transféré dans des flacons opaques ou recouverts de papier aluminium.

Enfin, les échantillons ont été analysés par spectrophotométrie UV-Visible à une longueur d'onde de 584 nm.



Figure II. 14 : Essai d'adsorption.

II.7.1. Étude des facteurs influençant le rendement d'adsorption

Pour améliorer l'efficacité de l'adsorption du colorant par le matériau étudié, plusieurs paramètres ont été examinés.

II.7.1.1. L'effet de la masse de l'adsorbant

Il s'agit d'une étape essentielle visant à déterminer la masse minimale nécessaire pour assurer une adsorption optimale. En général, la capacité d'adsorption augmente avec l'augmentation de la masse de l'adsorbant, en raison de la disponibilité d'une surface de contact plus importante.

Dans cette étude, 200 ml d'une solution de méthyle violet de concentration initiale 10 ppm ont été introduits dans plusieurs béchers de 250 ml. Des masses différentes de l'adsorbant ont été ajoutées selon une gamme comprise entre 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4 ; 0,5 ; 0,6 et 0,7 g, puis les mélanges ont été placés sous agitation magnétique pendant 1 heure à une vitesse constante de 300 tr/min, à température ambiante.

Après décantation, les échantillons ont été prélevés puis analysés.

II.7.1.2. L'effet du temps d'équilibre d'adsorption

Le temps d'équilibre dans les études d'adsorption constitue un paramètre important, car il représente la durée optimale nécessaire pour que l'adsorption soit efficace et complète. Il correspond au moment où la quantité de colorant adsorbée à la surface du matériau adsorbant, représenté par le BO, atteint un état de stabilité.

Dans cette étude, une masse de 0,3 g de BO a été introduite dans 200 mL d'une solution de méthyle violet de concentration initiale 10 ppm, puis le mélange a été placé sous agitation magnétique à une vitesse constante de 300 tr/min.

Des prélèvements ont ensuite été effectués à différents intervalles de temps, selon un domaine temporel allant de 2 à 100 minutes, puis analysés par spectrophotométrie UV-Visible.

II.7.1.3. L'effet de la température

Dans cette étude, 200 ml d'une solution de méthyle violet ont été placés dans un bain-marie afin de régler la température du milieu. Une masse de 0,3 g de BO a ensuite été ajoutée, puis le mélange a été soumis à une agitation magnétique pendant 30 minutes à une vitesse constante de 300 tr/min.

L'expérience a été répétée à différentes températures comprises entre 10, 20, 30, 40, 50, 60 et 70 °C, tout en veillant au maintien de la température durant toute la période d'agitation à l'aide d'un thermomètre.

Après le temps de contact, des prélèvements ont été effectués puis analysés par spectrophotométrie UV-Visible afin de déterminer la température optimale permettant d'obtenir la meilleure capacité d'adsorption.

II.7.1.4. L'effet du pH

Afin d'étudier l'effet du pH sur l'adsorption, 200 ml d'une solution de méthyle violet de concentration initiale 10 ppm ont été introduits dans six béchers. Le pH de chaque solution a été ajusté respectivement à 2, 4, 6, 8, 10 et 12 par addition de quelques gouttes de solution de HCl et de NaOH.

Une masse de 0,3 g de BO a ensuite été ajoutée dans chaque bécher, puis les mélanges ont été placés sous agitation magnétique à une vitesse constante de 300 tr/min, à température ambiante, pendant 30 minutes.

Après ce temps de contact, des prélèvements ont été effectués puis analysés par spectrophotométrie UV-Visible afin de déterminer le pH optimal correspondant au meilleur taux d'adsorption.

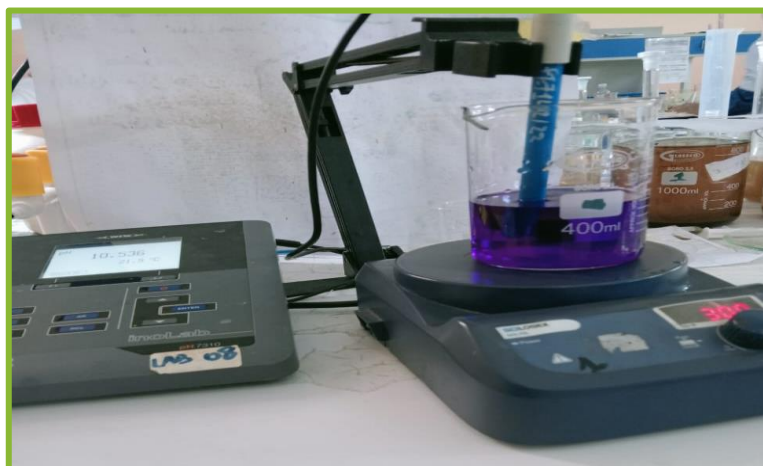


Figure II. 15 : Ajustement du pH de la solution.

II.7.1.5. L'effet de la concentration initiale en colorant sur l'adsorption

L'effet des concentrations initiales a été étudié en introduisant 200 ml de solution de méthyle violet de différentes concentrations (5, 10, 20, 30, 50 et 70 ppm) dans six béchers distincts. Une masse de 0,3 g du matériau adsorbant a ensuite été ajoutée dans chaque bécher, puis les mélanges ont été placés sous agitation magnétique pendant 30 minutes à une vitesse constante de 300 tr/min, à température ambiante.

Après le temps de contact, des prélèvements ont été effectués puis analysés par spectrophotométrie UV-Visible.

II.7.1.6. L'effet d'ultrasons

Le traitement par ultrasons est une technique permettant l'ouverture des pores et le nettoyage de la surface du matériau adsorbant grâce à l'action des ondes ultrasonores. Cette expérience a été réalisée afin d'évaluer l'influence des ultrasons sur les performances du bio-adsorbant.

Dans un premier temps, un essai d'adsorption a été effectué dans des conditions initiales de 200 ml de solution de méthyl violet de concentration initiale égale à 10 ppm, en ajoutant 0,3 g du matériau adsorbant sous agitation à une vitesse de 300 tr/min. Des échantillons ont ensuite été prélevés pour analyse.

Après l'essai d'adsorption, le matériau adsorbant saturé a été récupéré puis lavé à l'eau distillée pendant 1 heure sous agitation. Après filtration, 100 ml d'eau distillée ont été ajoutés au matériau, puis celui-ci a été soumis à un traitement par ultrasons pendant 20 minutes.

Le bio-adsorbant a ensuite été séparé de l'eau puis séché dans une étuve à une température de 80 °C jusqu'à séchage complet. Une nouvelle expérience d'adsorption a alors été réalisée dans les mêmes conditions opératoires.

Des prélèvements ont été effectués à des temps de contact de 30 minutes et 1 heure. L'expérience a été répétée trois fois afin d'obtenir trois cycles de traitement par ultrasons. Enfin, les échantillons obtenus ont été analysés par spectrophotométrie UV-Visible.



Figure II. 16: Ultrasons.

II.7.1.7. L'effet de l'irradiation solaire

Nous avons introduit 200 ml d'une solution de méthyl violet de concentration initiale de 10 ppm dans un bécher exposé à la lumière solaire et placé sur un agitateur magnétique à vitesse constante. Dans un autre bécher, nous avons placé 200 ml de solution de méthyl violet après l'essai d'adsorption, également soumis à une agitation magnétique à vitesse constante et exposé à la lumière solaire. Des prélèvements ont été effectués après 30 minutes et après 1 heure, puis les solutions ont été laissées pendant quatre jours sans agitation, exposées à la lumière à l'extérieur du laboratoire. Cette étude nous a permis de suivre l'évolution progressive de la coloration de la solution sous l'effet du rayonnement solaire.



Figure II. 17 : L'effet d'irradiation solaire.

II.7.1.8 L'effet de la vitesse d'agitation

Afin d'étudier l'influence de la vitesse d'agitation sur le processus d'adsorption, l'étude suivante a été réalisée.

Deux béchers de 250 ml contenant chacun 200 ml d'une solution de méthyle violet ont été préparés. Une masse de 0,3 g de BO a été ajoutée dans chaque bécher.

Le premier mélange a été placé sur un agitateur magnétique à une vitesse constante de 300 tr/min pendant 30 minutes. Le second bécher a ensuite été soumis à une agitation plus élevée de 1500 tr/min pendant la même durée.

Après le temps de contact, des échantillons ont été prélevés des deux béchers puis analysés par spectrophotométrie UV-Visible afin de comparer les résultats obtenus aux deux vitesses d'agitation différentes.

II.7.1.9 Détermination du point de charge zéro

Le but de l'étude du point de charge zéro est de déterminer la nature de la charge électrique présente à la surface du bio-adsorbant ainsi que son influence sur la fixation des polluants.

Pour réaliser cette étude, 0,1 g de BO a été introduit dans plusieurs béchers contenant des solutions à différents pH. Les valeurs de pH ont été ajustées de 1 à 14 à l'aide d'un pH-mètre, sous agitation magnétique, en utilisant des solutions de HCl et de NaOH. Les différentes solutions ont ensuite été mises sous agitation pendant 48 heures. Après stabilisation, les valeurs du pH ont été mesurées.

II.7.1.10. L'effet de la calcination

Cette expérience a été réalisée afin d'évaluer l'effet de la calcination complète du bio-adsorbant sur le processus d'adsorption. Pour cela, le matériau adsorbant a été calciné à une température de 600 °C pendant 5 heures. Les cendres obtenues, de couleur grise, ont été broyées puis une masse de 0,3 g a été introduite dans 200 ml d'une solution de méthyl violet de concentration initiale égale à 10 ppm. Le mélange a ensuite été agité à l'aide d'un agitateur magnétique pendant une heure à une vitesse constante de 300 tr/min. Des échantillons ont été prélevés après 30 minutes et après une heure de contact.

La même procédure expérimentale a été répétée avec une seconde calcination effectuée à 450 °C pendant 5 heures. Dans ce cas, les cendres obtenues présentaient une couleur noire.

Enfin, les échantillons recueillis ont été analysés par spectrophotométrie UV-Visible afin d'évaluer l'efficacité d'adsorption et d'observer les résultats obtenus.

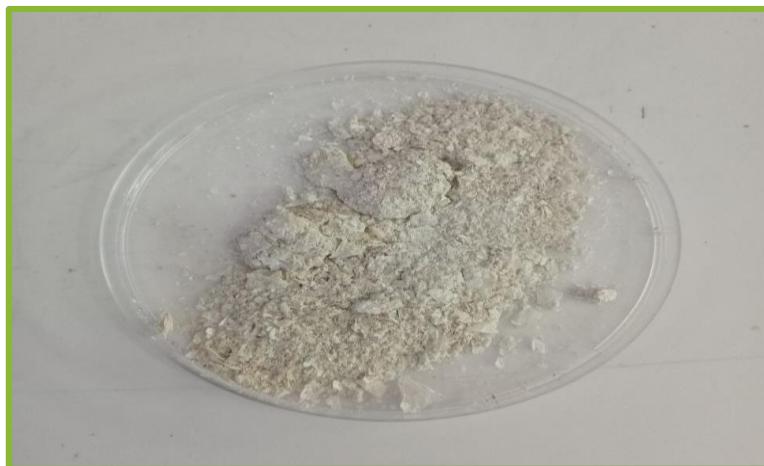


Figure II. 18 : Cendres obtenues après calcination à 600 °C.



Figure II. 19 : Cendres obtenues après calcination à 450 °C.

II.7.1.11. L'effet de régénération de la bio-adsorbant

La régénération est une opération visant à réactiver le bio-adsorbant après son utilisation dans le procédé d'adsorption. Dans cette étude, deux agents régénérants ont été utilisés : l'acide chlorhydrique (HCl) et le chlorure de sodium (NaCl). Ces solutions permettent

de nettoyer la surface du matériau adsorbant et de libérer les colorants ainsi que les dépôts fixés durant l'adsorption.

Au cours de cette expérimentation, trois cycles de régénération ont été réalisés pour chaque solution régénérante. Une expérience d'adsorption classique a d'abord été effectuée, puis le matériau adsorbant saturé a été récupéré. Celui-ci a ensuite été lavé à l'eau distillée pendant 30 minutes sous agitation.

Dans le cas de la régénération par HCl, le bio-adsorbant a été traité dans 200 ml de solution d'HCl pendant 2 heures, puis rincé de nouveau à l'eau distillée durant 1 heure afin d'éliminer les résidus acides. Le matériau a ensuite été séché dans une étuve à une température de 80 °C jusqu'à séchage complet.

Après cette étape, une nouvelle expérience d'adsorption a été réalisée dans les mêmes conditions initiales, à savoir 200 ml de solution de méthyl violet de concentration initiale égale à 10 ppm. L'opération a été répétée trois fois afin d'évaluer l'efficacité de la régénération.

Le même protocole a été appliqué pour la régénération par NaCl. Toutefois, le lavage a été effectué dans 500 ml de solution de NaCl pendant 12 heures. Trois cycles de régénération ont également été réalisés.

Durant les essais d'adsorption, les solutions ont été maintenues sous agitation et des échantillons ont été prélevés toutes les 30 minutes afin de suivre l'évolution de l'adsorption par analyse UV-Visible.

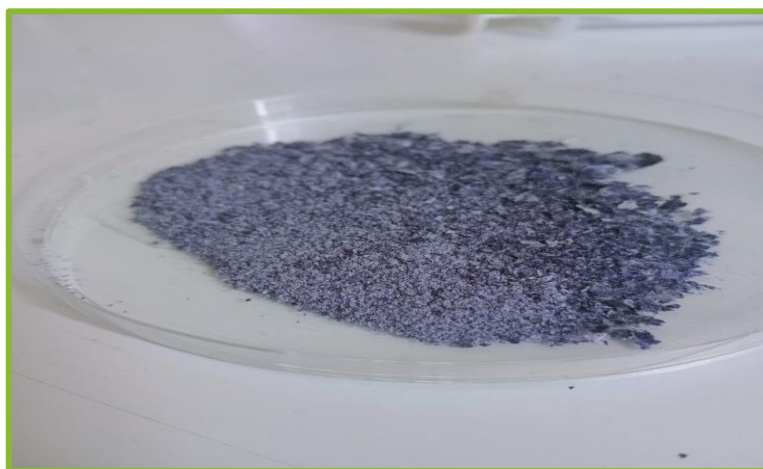


Figure II. 20 : Un matériau prêt à être régénéré après un essai d'adsorption.

II.7.2. Tracé des isotherme et modélisation d'adsorption


Le tracé de l'isotherme d'adsorption nous a permis de déterminer la capacité maximale d'adsorption du bio-adsorbant ainsi que de comprendre le mécanisme et le comportement du processus d'adsorption.

Pour la modélisation les isothermes ont été analysées selon les modèles de Freundlich et Langmuir. La comparaison a été faite entre les modèles cinétiques du pseudo-premier ordre et du pseudo-deuxième ordre.

II.8. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter de manière détaillée les matériaux utilisés, ainsi que l'ensemble des équipements employés, en plus des protocoles expérimentaux réalisés dans le cadre de cette étude. Nous avons également optimisé les conditions expérimentales afin d'améliorer l'efficacité du bio-adsorbant.

Les résultats ont montré une capacité intéressante d'élimination des colorants, ce qui fait de ce matériau un bon candidat pour des applications de traitement des eaux contaminées par des colorants. De plus, ces protocoles expérimentaux simples constituent la base de notre étude, s'inscrivant dans une démarche écologique, sans ajout de produits chimiques et à faible coût.



Chapitre III:
Présentation et discussion
des résultats

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, on expose les résultats expérimentaux de l'étude de l'élimination du colorant Méthyle violet par adsorption sur le biomatériau préparé (BO). Les performances du matériau ont été étudiées en examinant l'influence des principaux paramètres opératoires, notamment le pH, le temps de contact, la concentration initiale du colorant et la masse de l'adsorbant. Les résultats sont étudiés à l'aide de modèles d'isothermes, de modèles cinétiques et de paramètres thermodynamiques pour mieux comprendre le mécanisme du processus.

Par ailleurs, les résultats des essais de régénération du biomatériau sont présentés pour évaluer sa réutilisabilité et la durabilité du procédé. Enfin, on a appliqué une étape de photo-dégradation sous irradiation solaire au milieu traité, afin d'assurer une élimination plus complète des résidus de colorant et d'améliorer l'efficacité globale du traitement.

III.2. Évaluation des propriétés physico-chimiques du biomatériau

Les propriétés physico-chimiques d'un biomatériau constituent des paramètres essentiels pour évaluer son aptitude à adsorber les polluants présents dans les eaux. Elles permettent de mieux comprendre son comportement et son efficacité au cours du processus d'adsorption. Ces propriétés sont déterminées à partir de mesures telles que le pH, le taux d'humidité, la teneur en cendres, la densité absolue et pH_{pcz}. En complément, des techniques de caractérisation plus approfondies, notamment la spectroscopie UV-Visible et la diffraction des rayons X (DRX), sont utilisées afin d'étudier la composition et la structure du biomatériau.

III.2.1. Mesure du taux d'humidité

L'humidité est un paramètre physico-chimique important des propriétés du biomatériau. Les résultats obtenus permettent d'évaluer son état de conservation et les conditions dans lesquelles il a été stocké.

Tableau III. 1: Le taux d'humidité de biomatériau.

	Masse avant séchage (g)	Masse après séchage (g)	L'humidité (%)
Biomatériau (BO)	5	3.928	21.44

Le biomatériau présente un taux d'humidité de **21,44 %**, ce qui traduit une teneur relativement élevée en eau. Cette humidité peut réduire la disponibilité des sites actifs en occupant une partie des pores du matériau. Un bon séchage est donc nécessaire pour obtenir les meilleures performances d'adsorption.

III.2.2. La teneur en cendres

La teneur en cendres a été déterminée selon la norme AFNOR (1970) par calcination de l'échantillon dans un four à moufle, afin d'éliminer la matière organique et de quantifier le résidu minéral obtenu.

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau III. 2: La teneur en cendres.

Biomatériau	Matière organique (g)	La teneur en cendres (%)
BO	87.182	12.818

La teneur en cendres obtenue est de **12,81 %**. Cela indique que le biomatériau est constitué principalement de matière organique, avec une fraction minérale modérée. Cette composition est favorable à l'adsorption, puisque la forte proportion de matière organique favorise la présence de sites actifs susceptibles de fixer les molécules du colorant.

III.2.3. La densité absolue

La densité absolue du biomatériau est de **1,24 g/cm³**, une valeur compatible avec celles généralement rapportées pour les biomatériaux issus de résidus naturels. Cette densité traduit une structure favorable à l'adsorption, en permettant une bonne accessibilité des pores et des sites actifs. Le biomatériau présente ainsi des caractéristiques propices à une adsorption efficace.

III.2.4. Le pH de point de charge nulle (pH_{pcz})

L'évolution de ΔpH en fonction du pH initial est présentée sur la figure suivante et a permis de déterminer le pH au point de charge zéro (pH_{pcz}) du biomatériau. Ce paramètre permet de décrire les propriétés de surface du biomatériau et de prédire son comportement d'adsorption dans un milieu aqueux.

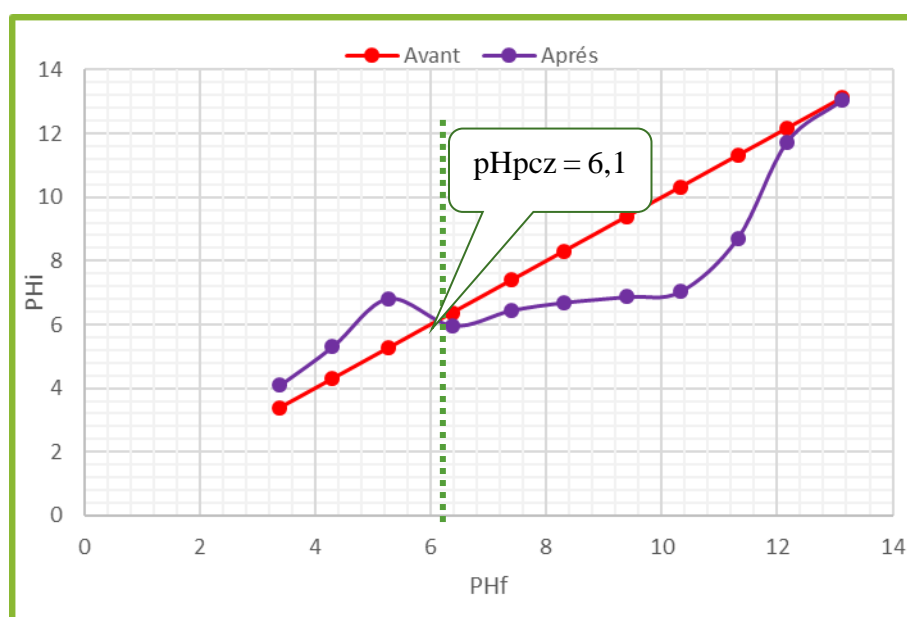


Figure III. 1 : Détermination du pH_{pcz}.

La courbe montre que la valeur du pH_{pcz} = 6,1 est déterminée à partir du point d'intersection de la courbe pH_f avec le droit pHi. Cette valeur indique que la surface du matériau adsorbant est chargée positivement si le pH de la solution est < 6,1. En revanche, pour des valeurs de pH > 6,1, la surface devient négativement chargée.

III.2.5. Le pH

La mesure du pH du biomatériau (BO) permet de déterminer son caractère acide ou basique, un paramètre pouvant influencer ses performances d'adsorption.

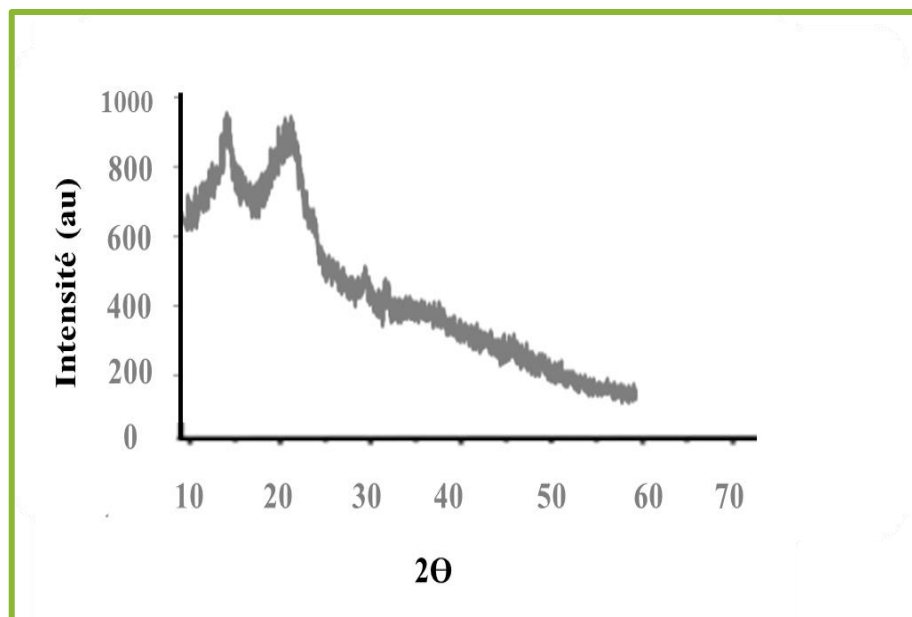
Tableau III. 3: Le pH de biomatériau

Biomatériau	Le pH	La temperature °C
BO	6.49	21.3

Le pH trouvé (6,49) montre que le biomatériau est pratiquement neutre. Cette propriété peut affecter les interactions entre le biomatériau et le colorant pendant le processus d'adsorption.

III.2.6 Analyse diffraction des rayons X

Un spectre de DRX de l'échantillon BO est présenté dans la figure III.2 :

**Figure III. 2 :** Diffraction des rayons X de biomatériau BO

Le diagramme de diffraction des rayons X de biomatériau BO illustré sur la figure III.2 montre deux larges pics de diffraction situés approximativement à $2\theta = 15-16^\circ$ et 22° , caractéristiques de la cellulose I. La largeur de ces pics ainsi que la présence d'une large bande diffuse indiquent que le matériau possède une structure semi-cristalline, composée d'une phase cristalline (cellulose) et d'une phase amorphe (lignine, hémicellulose et pectine). On observe là un accord avec les résultats rapportés dans la littérature [1]. C'est la structure de cette organisation qui est

typique des biomasses naturelles et qui favorise les phénomènes d'adsorption grâce à la disponibilité des sites actifs.

III.2.7. Analyse UV-Visible

La spectroscopie UV-Visible est principalement utilisée pour une analyse quantitative et concerne l'absorption des rayonnements dans la région ultraviolette et visible.

Le résultat est représenté ci-dessous figure III.3.

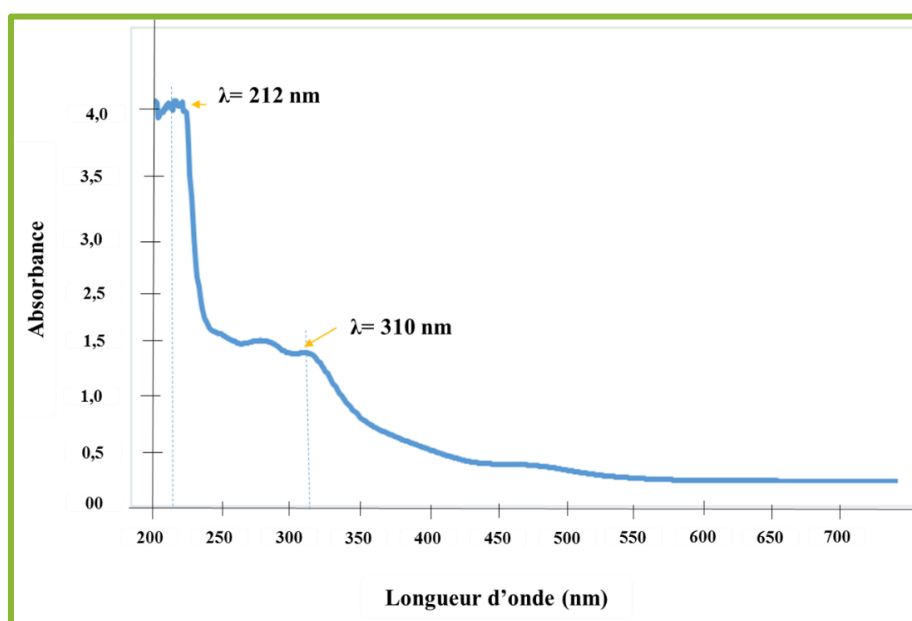


Figure III. 3 : UV-Visible de biomatériau.

Le spectre UV-Visible du biomatériau montre une bande d'absorption principale à 212 nm, associée aux transitions électroniques des composés organiques constituant la biomasse naturelle [2,3]. On observe également un faible épaulement vers 300 nm pouvant être attribué aux composés phénoliques et en particulier aux flavonoïdes [2,3]. Les résultats obtenus montrent que des fonctions organiques sont présentes et peuvent participer au processus d'adsorption.

III.3. Évaluation des performances d'adsorption du biomatériau

Dans cette partie, on a évalué les performances d'adsorption du biomatériau non modifié BO pour l'élimination du colorant Méthyle Violet en solution aqueuse.

III.3.1. Détection spectroscopique du colorant de méthyle violet

Le spectre d'absorption du Méthyle Violet a été enregistré en spectrophotométrie UV-Visible après balayage spectral dans le domaine de 200 à 800 nm. Le spectre obtenu est présenté à la figure III.4.

Le Violet de Méthyle absorbe le rayonnement dans le domaine visible et présente une bande d'absorption intense dont le maximum est situé aux environs de $\lambda_{\max} = 584$ nm. Cette longueur d'onde a été retenue pour le suivi de la concentration résiduelle du colorant au cours des expériences d'adsorption. Conformément à la loi de Beer-Lambert [4], l'absorbance mesurée à 584 nm est directement proportionnelle à la concentration du Méthyle Violet en solution.

Les spectres enregistrés sont présentés dans les figures suivantes :

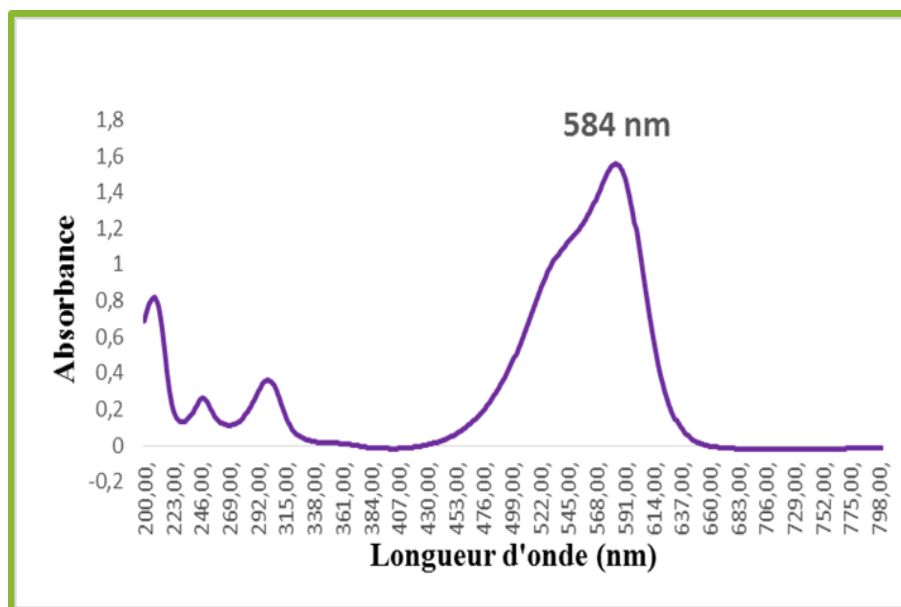


Figure III. 4 : Spectrophotométrie UV-visible d'adsorption de méthyle violet.

La courbe d'étalonnage du méthyle violet, obtenue dans la section précédente, a servi de référence pour le traitement des données expérimentales et la détermination des concentrations résiduelles au cours des expériences d'adsorption (Figure III.4).

III.3.2. Essai d'adsorption du méthyle violet

L'efficacité du biomatériau BO pour l'adsorption du Méthyle Violet a été évaluée en fonction des principaux paramètres opératoires :

III.3.2.1. Effet de la taille des particules

Un essai préliminaire a été effectué pour étudier l'effet de la taille des particules du biomatériau sur le processus étudié.

Les résultats sont illustrés par la figure III.5.



Figure III. 5 : Effet de la taille des particules du biomatériau étudié sur l'élimination du MV
($V = 200$ ml ; $C = 10$ ppm ; $v = 230$ tr.min⁻¹ ; $pH = pH_{libre}$; $T = \pm 21^{\circ}C$).

Les résultats montrent que la vitesse d'adsorption du Méthyle Violet dépend de la taille des particules du biomatériau. La plus faible taille des particules (BO1) présente un rendement d'élimination plus élevé aux premiers temps de contact, en raison de sa surface spécifique plus importante. À partir du temps d'équilibre, les deux tailles des particules donnent des rendements d'adsorption très voisins.

- On a donc retenu la plus faible granulométrie pour la suite des expériences.

III.3.2.2. Effet de la masse de biomatériau

Afin d'étudier l'influence de la masse du biomatériau BO₁ sur le processus d'adsorption, différentes masses, comprises entre 0,1 et 0,7 g, ont été testées. Les résultats obtenus sont présentés à la figure suivante.

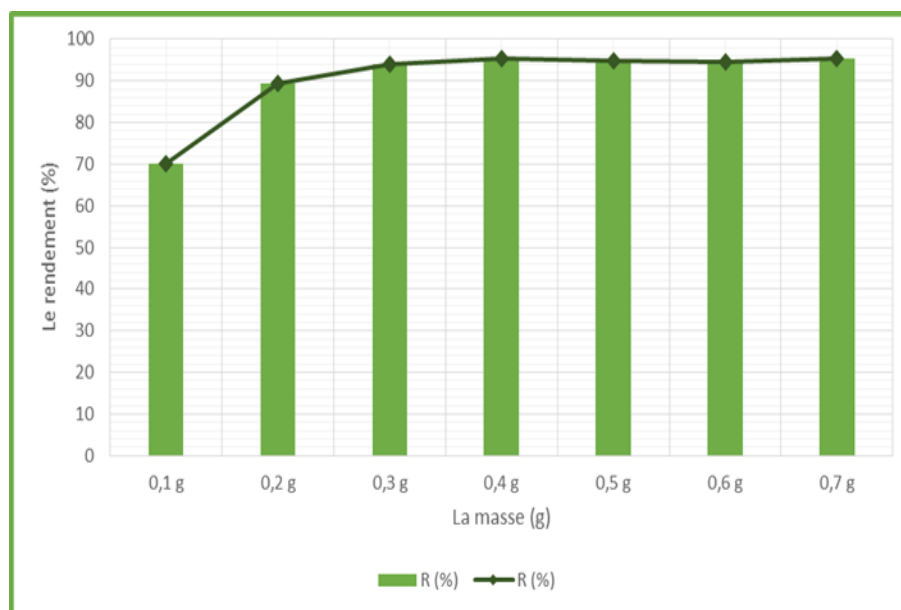


Figure III. 6 : Effet de la masse de biomatériau étudié sur l'élimination du MV. ($V = 200$ ml ; $C = 10$ ppm ; $v = 230$ tr.min⁻¹ ; $pH = pH_{libre}$; $T = \pm 21^{\circ}C$).

La figure III.6 montre que le rendement d'adsorption augmente de façon significative avec la masse de biomatériau. Cette amélioration est due à l'augmentation du nombre de sites actifs disponibles, liée à l'accroissement de la surface d'adsorption [5,6]. Le rendement d'adsorption présente un maximum pour une masse de 0,3 g, au-delà duquel il reste pratiquement constant.

D'après les résultats obtenus, la masse de 0,3 g a été retenue comme masse optimale pour le processus d'adsorption.

III.3.2.3. Effet du temps de contact

L'étude de l'effet du temps de contact permet d'évaluer la cinétique d'adsorption et de déterminer le temps d'équilibre du système matériau-colorant.

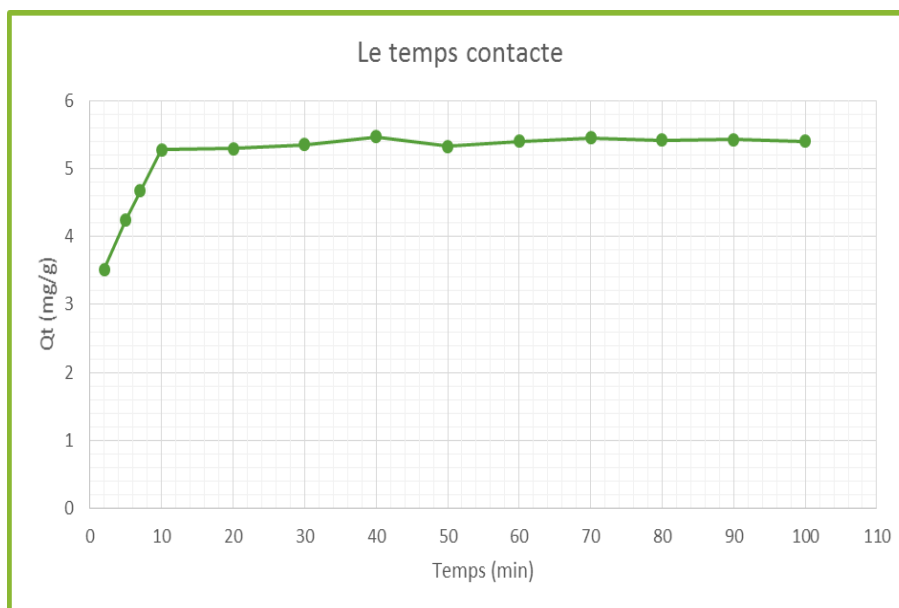


Figure III. 7 : Effet du temps de contact sur l'élimination de MV sur le biomatériau étudié.

($V= 200$ ml ; $v=230$ tr. min^{-1} ; $\text{pH}=\text{pH}_{\text{libre}}$; $m=0.3$ g ; $T= \pm 21^\circ\text{C}$).

Les résultats montrent une adsorption rapide au cours des premières minutes, favorisée par la disponibilité des sites actifs du bio-adsorbant. Ensuite, la vitesse d'adsorption ralentit progressivement avec l'occupation des sites d'adsorption [7], jusqu'à l'atteinte de l'équilibre après 20 min de contact.

III.3.2.4. Effet de la concentration initiale

L'effet de la concentration initiale a été évalué à 5, 10, 20, 30 et 50 mg/l. Les Résultats sont illustrés dans les courbes suivantes :

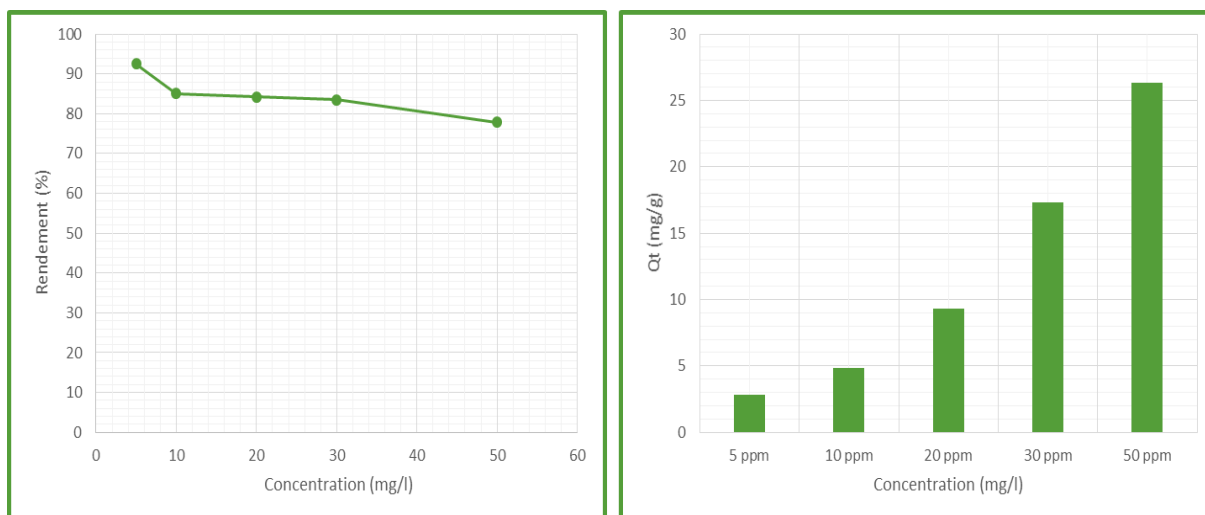


Figure III. 8 : Effet de la concentration initiale du MV sur biomatériau étudié. ($V=200$ ml ; $v=230$ tr. min^{-1} ; $m=0.3$ g ; $\text{pH}=\text{pH}_{\text{libre}}$; $T=\pm 21^{\circ}\text{C}$).

L'augmentation de la concentration initiale du colorant entraîne une diminution du rendement d'élimination, due à la saturation progressive des sites actifs. En revanche, la capacité d'adsorption augmente, car une plus grande quantité de colorant est adsorbée par unité de masse du biomatériau [8].

III.3.2.5. Effet de la température

Des expériences ont été réalisées entre 10 et 70 °C dans les conditions optimales d'adsorption pour étudier l'effet de la température sur le processus d'adsorption. La Figure III.9 présente l'évolution du rendement d'élimination du Méthyle Violet selon la température.

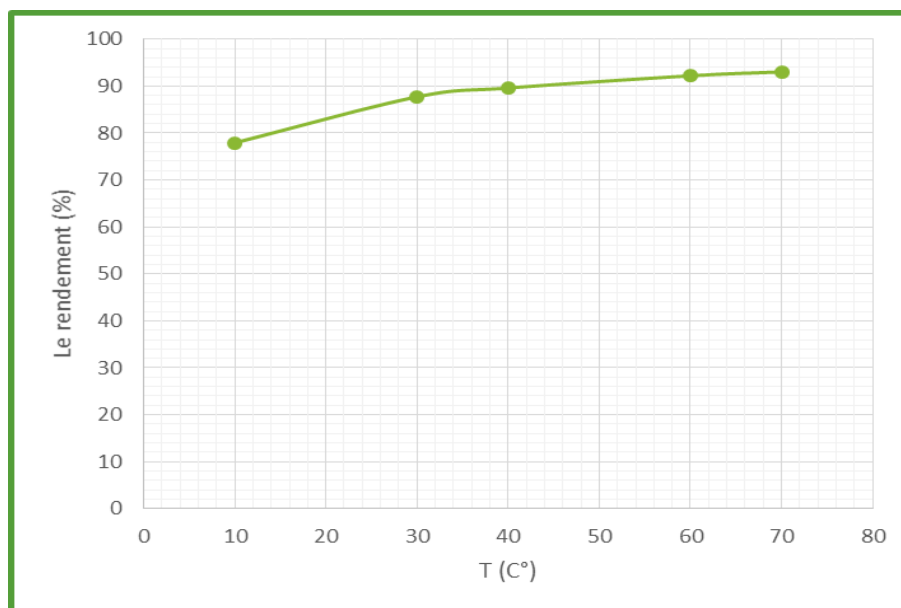


Figure III. 9 : Effet de la température sur l'élimination du MV, ($V= 200$ ml ; $C_0=10$ ppm
 $v=230$ tr. min⁻¹ ; $m=0.3$ g ; pH= pH libre)

La figure montre que le rendement d'élimination du Violet de Méthyle augmente avec l'élévation de la température, pour atteindre environ 93 % à 60 °C. Cette amélioration peut être attribuée à une augmentation de la mobilité des molécules de colorant et à une meilleure accessibilité des sites actifs du bio-adsorbant. Au-delà de 60 °C, le rendement reste pratiquement constant jusqu'à 70 °C, ce qui indique que l'influence de la température devient faible lorsque l'équilibre d'adsorption est atteint. Ces résultats suggèrent que le processus d'adsorption est de nature endothermique. [9].

III.3.2.6. Effet du pH

La Figure III.10 illustre l'effet du pH sur le rendement d'élimination du Méthyle Violet par le biomatériau.

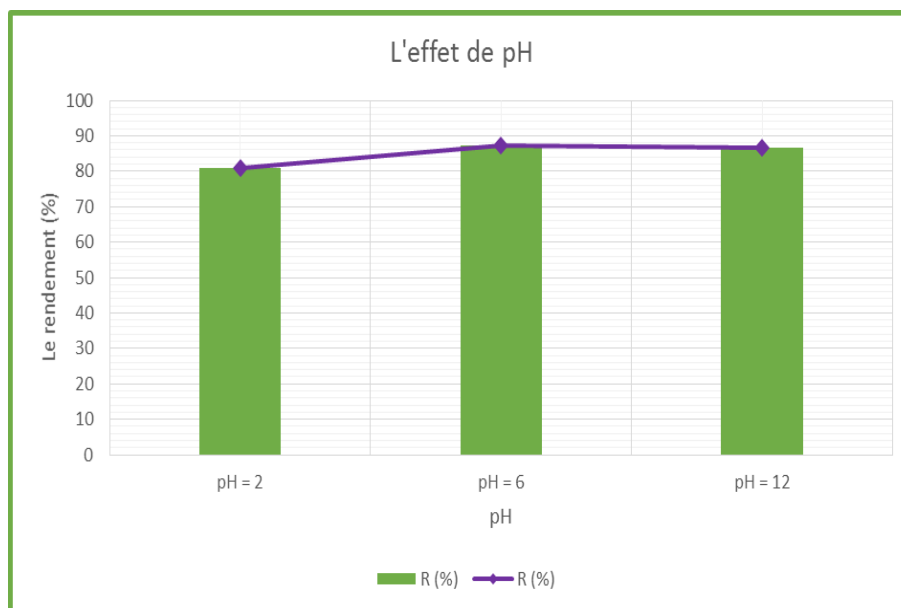


Figure III. 10 : Effet du pH sur l'élimination du MV. ($V = 200$ ml ; $C_0 = 10$ ppm v = 230 tr. min^{-1} ; $m = 0.3$ g ; $T = \pm 21^\circ\text{C}$).

Le rendement d'élimination augmente jusqu'à une valeur maximale à pH 6, proche du pH_{pcz} du biomatériau. Lorsque le pH est supérieur au pH_{pcz} , la surface du biomatériau se charge négativement, ce qui augmente l'attraction électrostatique avec les molécules cationiques du Méthyle Violet. Le rendement reste donc élevé entre les valeurs de pH 6 et 12.

La légère baisse relevée à après $\text{pH} < 6$ pourrait être satisfaite par d'autres phénomènes tels que les variations de l'état de protonation des groupements fonctionnels de la surface ou les interactions entre les molécules de colorant en solution. Bien qu'il y ait une légère diminution [10], l'efficacité d'adsorption reste élevée, ce qui confirme les bonnes performances du matériau sur une large gamme de pH.

III.3.2.7. Effet de calcination sur l'élimination du colorant

L'effet de la calcination sur les performances d'adsorption du biomatériau a été étudié à deux températures de calcination (450°C et 600°C). Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux et les figures ci-après.

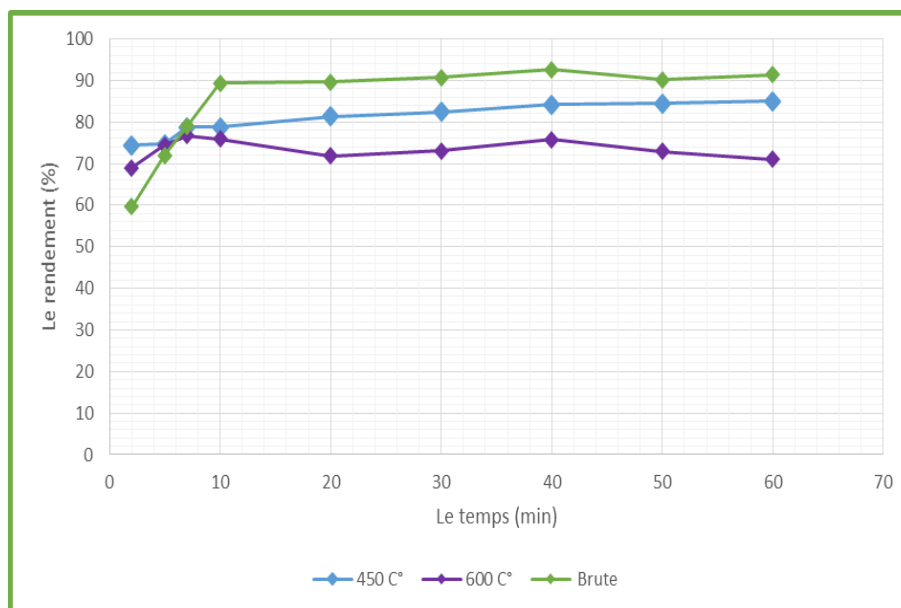


Figure III. 11 : Effet de la calcination sur l'élimination du MV.

Les résultats montrent que les biomatériaux calcinés à 400 °C et à 600 °C ont des rendements d'adsorption similaires pendant les premières minutes de contact. Au-delà de cette période, le biomatériau calciné à 400 °C présente un meilleur rendement d'élimination. Cette différence peut être due à une modification de la structure de surface aux deux températures, ce qui diminue le nombre de sites actifs disponibles.

III.3.2.8. Effet de la vitesse d'agitation

Afin d'évaluer l'effet de la vitesse d'agitation, des essais ont été réalisés à deux vitesses différentes. Les résultats obtenus sont présentés à la figure suivante :

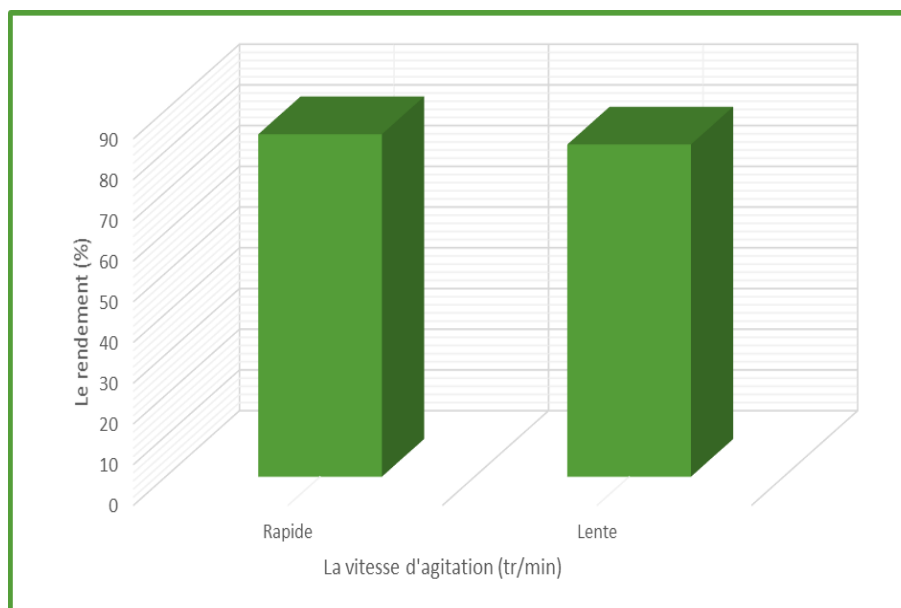


Figure III. 12 : Effet de la vitesse d'agitation.

Les résultats montrent que la vitesse d'agitation a un effet négligeable sur le rendement d'adsorption. A la plus haute vitesse d'agitation, on observe une légère augmentation du rendement grâce à une meilleure homogénéisation de la solution et à un transfert de matière plus efficace.

III.3.2.9. Effet de la force ionique

La figure III.13 illustre les variations du rendement d'élimination du MV pour les 03 concentrations de NaCl (0,1M, 5M et 10M).

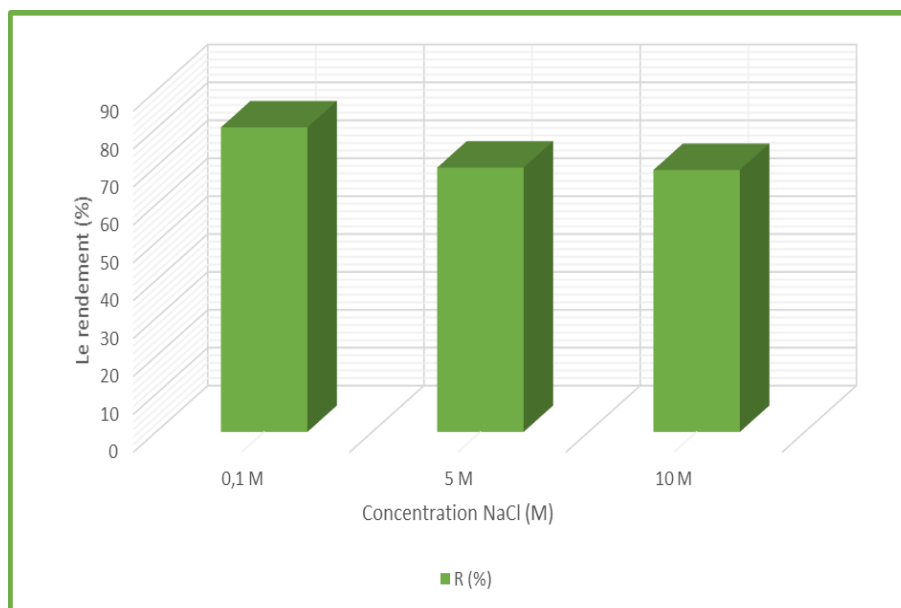


Figure III. 13: Effet de la force ionique sur le rendement d'élimination du MV.

L'augmentation de la force ionique entraîne une diminution du rendement d'élimination. Cette baisse s'explique par la compétition des ions présents en solution avec les molécules du colorant pour les sites d'adsorption. Aux fortes concentrations, le rendement devient pratiquement constant [11,12].

III.3.3. Évaluation de la réutilisabilité de matériau

La réutilisabilité du biomatériau a été évaluée au cours de trois cycles successifs, la régénération étant réalisée par ultrasons. Les résultats sont présentés à la figure III.14.

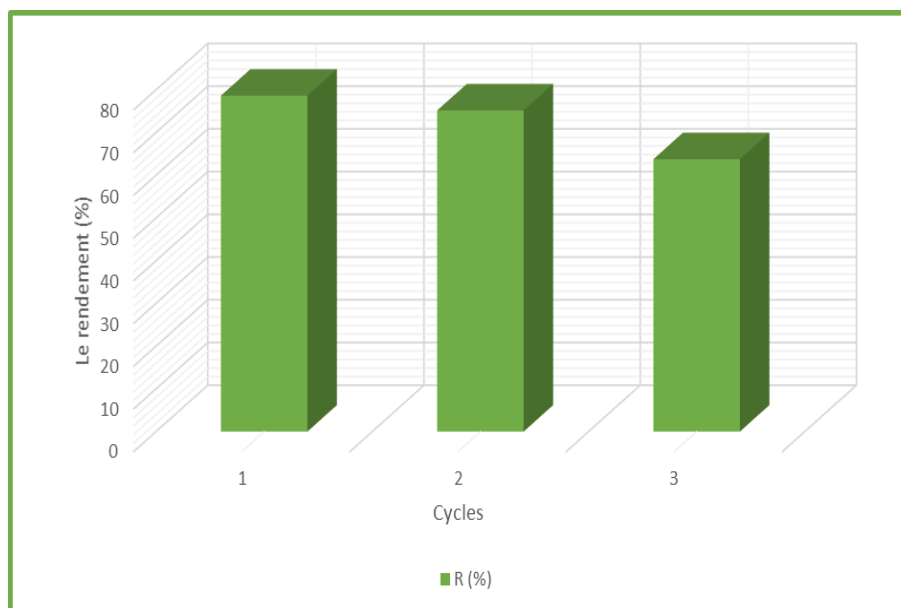


Figure III. 14 : Rendement d'élimination du MV en fonction des cycles.

Le rendement d'élimination décroît dans les cycles successifs, ce que montrent bien les résultats ; Cette évolution est la conséquence d'une diminution progressive du nombre de sites actifs disponibles. Cependant, le biomatériau présente une capacité d'adsorption encore appréciable, et témoigne ainsi de ses perspectives de réutilisation.

III.4 Modélisation de l'équilibre d'adsorption

III.4.1 Tace l'isotherme d'adsorption

L'analyse des isothermes d'adsorption permet d'évaluer la capacité du biomatériau à retenir le MV et de mieux comprendre le mécanisme d'interaction entre le colorant et la surface de biomatériau dans les conditions expérimentales étudiées.

La figure III.15 présente l'évolution de la capacité d'adsorption à l'équilibre (Q_e) en fonction de la concentration d'équilibre (C_e) du MV sur BO_1 .

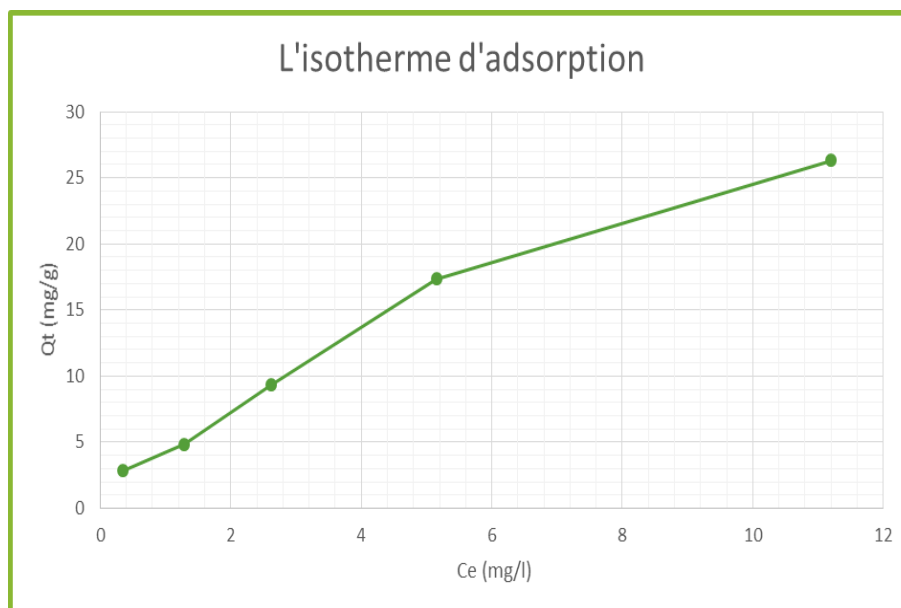


Figure III. 15 : Isotherme d'adsorption de MV sur le biomatériau. ($V= 200$ ml ; $t_{eq}=40$ min, $v = 230$ tr. min^{-1} ; $m = 0.3$ g ; $\text{Ph} = 6$; $T= \pm 21^{\circ}\text{C}$).

La courbe expérimentale $Q_e = f(C_e)$ montre que la capacité d'adsorption augmente avec la concentration à l'équilibre du MV. Ce comportement traduit une bonne affinité entre le colorant et la surface du matériau. Dans les conditions expérimentales étudiées, la capacité d'adsorption atteint une valeur maximale d'environ 27 mg/g.

III.4.2 Modélisation des isothermes d'adsorption

Les données d'équilibre ont été exploitées à l'aide des modèles de Langmuir et de Freundlich afin de caractériser le processus d'adsorption du MV.

Les paramètres des isothermes ont été déterminés à partir des représentations linéaires de $C_e/q_e = f(C_e)$ et de $\ln q_e = f(\ln C_e)$, respectivement. Les constantes caractéristiques de chaque modèle ont ainsi été calculées et les résultats obtenus sont présentés dans le tableau III.4.

Les figures III.16 et III.17 présentent les isothermes d'adsorption selon les modèles de Freundlich et Langmuir.

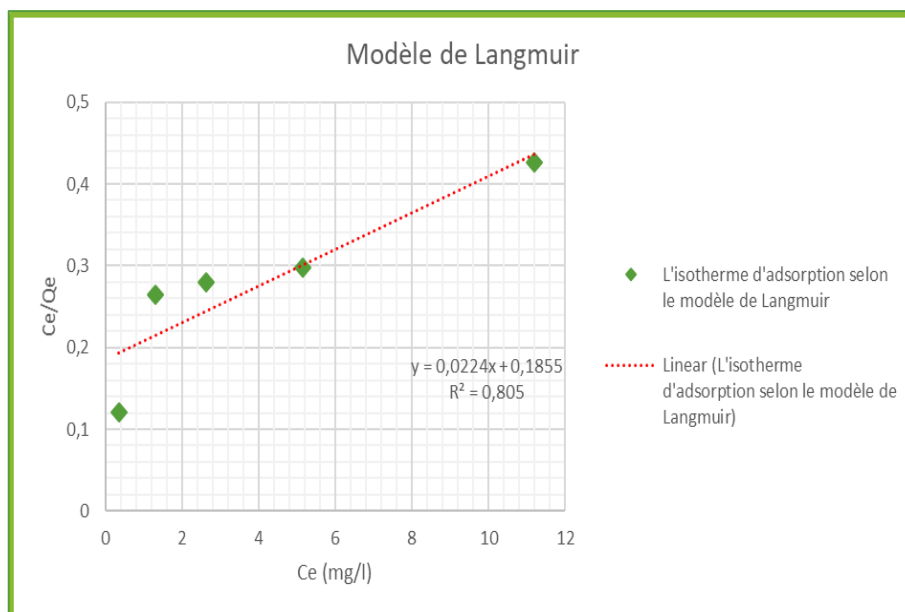


Figure III. 16 : Isothermes d'adsorption selon le modèle de Langmuir.

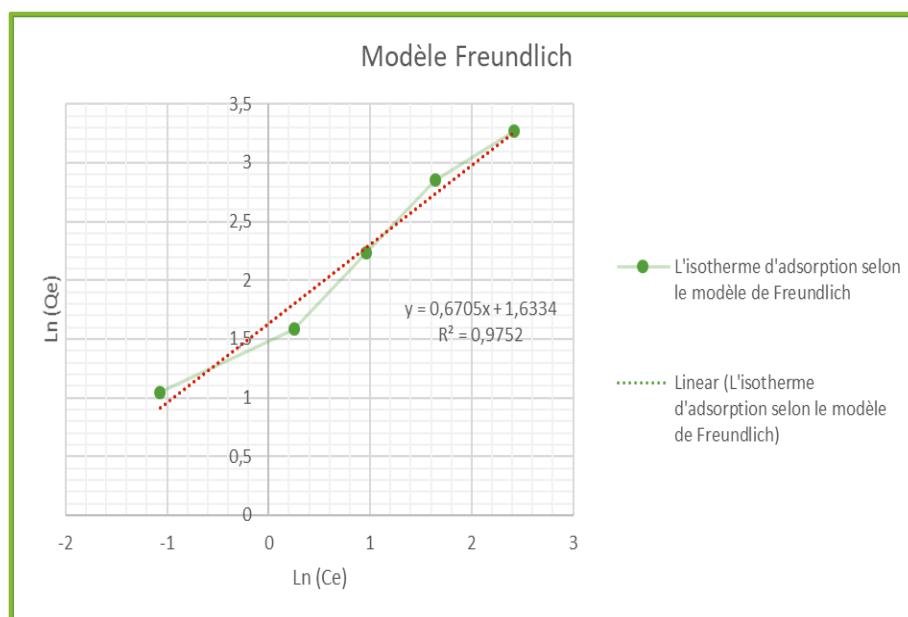


Figure III. 17 : Isotherme d'adsorption selon le modèle de Freundlich.

Tableau III. 4 : Les paramètres d'adsorption de Freundlich et de Langmuir.

Modèle	Freundlich				Langmuir		
Équation linéaire	$C_e/Q_e = aC_e + b$				$\ln(Q_e) = \ln(K_F) + 1/n \ln(C_e)$		
Paramètres	K_F (mg/g)	n_F	1/n	R^2	Q_{max} (mg/g)	K_L (l/mg)	R^2
	5.1212	1.4914	0.6705	0,9752	44.6428	0.1207	0,805

Les résultats montrent que le modèle de Freundlich décrit mieux les données expérimentales que le modèle de Langmuir, avec un coefficient de détermination élevé ($R^2 = 0,9752$). Ce résultat indique que l'adsorption du Méthyle Violet s'effectue sur une surface hétérogène et peut conduire à la formation de multicouches. La constante K_F traduit une bonne capacité d'adsorption du biomatériau. Par ailleurs, la valeur de (n) ou (1/n) indique que le processus d'adsorption est favorable.

III.4.3 Étude cinétique de l'adsorption du MV sur BO_1

Afin de décrire le comportement cinétique de l'adsorption du Violet de Méthyle, les modèles du pseudo-premier ordre et du pseudo-second ordre ont été appliqués aux données expérimentales. La comparaison des coefficients de détermination (R^2) a permis de sélectionner le modèle le plus adapté.

Les résultats de l'application des deux modèles cinétiques sont présentés dans les figures III.18 et III.19.

Ainsi que les constantes cinétiques et les valeurs de coefficients de corrélation R^2 correspondant à chaque modèle sont rassemblées dans le tableau III.5.

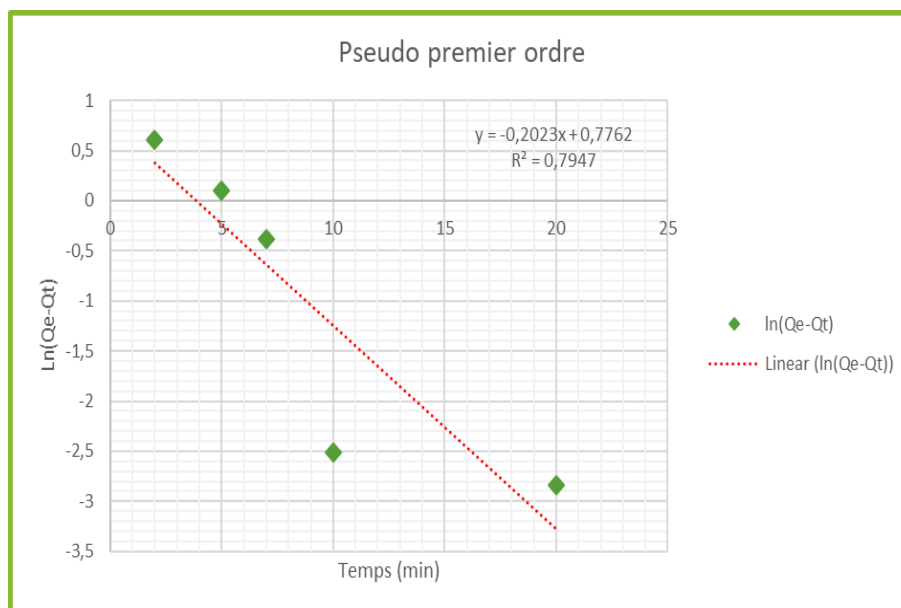


Figure III. 18 : Cinétique d'adsorption du pseudo premier ordre du VM sur biomatériau.

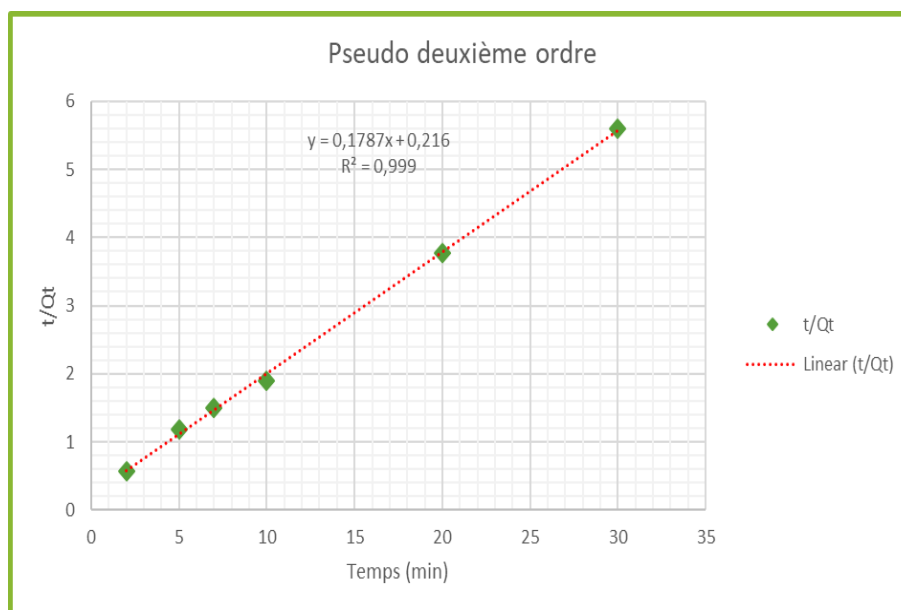


Figure III. 19 : Cinétique d'adsorption du pseudo second ordre du VM sur biomatériau.

Tableau III. 5 : Paramètres obtenus pour les deux modèles cinétiques étudiés.

Pseudo premier ordre			Pseudo deuxième ordre		
K_1 (min ⁻¹)	$Q_{e,cal}$ (mg/g)	R^2	K_2 (min ⁻¹)	$Q_{e,cal}$ (mg/g)	R^2
0.2023	2.1731	0,7947	0.8273	5.5959	0.999

Les résultats montrent que le modèle cinétique de pseudo-deuxième ordre décrit de façon la plus adéquate le processus d'adsorption, comme le suggère la valeur élevée du coefficient de détermination ($R^2 = 0,999$). Par ailleurs, la capacité d'adsorption à l'équilibre calculée par ce modèle est très proche de la valeur expérimentale, ce qui confirme la bonne concordance entre les données expérimentales et les valeurs théoriques. Les résultats obtenus montrent que le modèle de pseudo-second ordre représente de façon satisfaisante la cinétique d'adsorption du Méthyle Violet sur le biomatériau.

III.5 Les paramètres thermodynamiques

On a utilisé les données expérimentales d'élimination du MV sur le biomatériau, obtenues à différentes températures, pour déterminer les paramètres thermodynamiques à partir des équations de Van't Hoff. Cette analyse permet de comprendre l'effet de la température sur l'adsorption ainsi que la nature thermodynamique du processus étudié.

La figure suivante montre le tracé $\ln KD = f(1/T)$ qui 'il donne une droite de pente ($-\Delta H^\circ / R$) et d'ordonnée ($\Delta S^\circ / R$) [13].

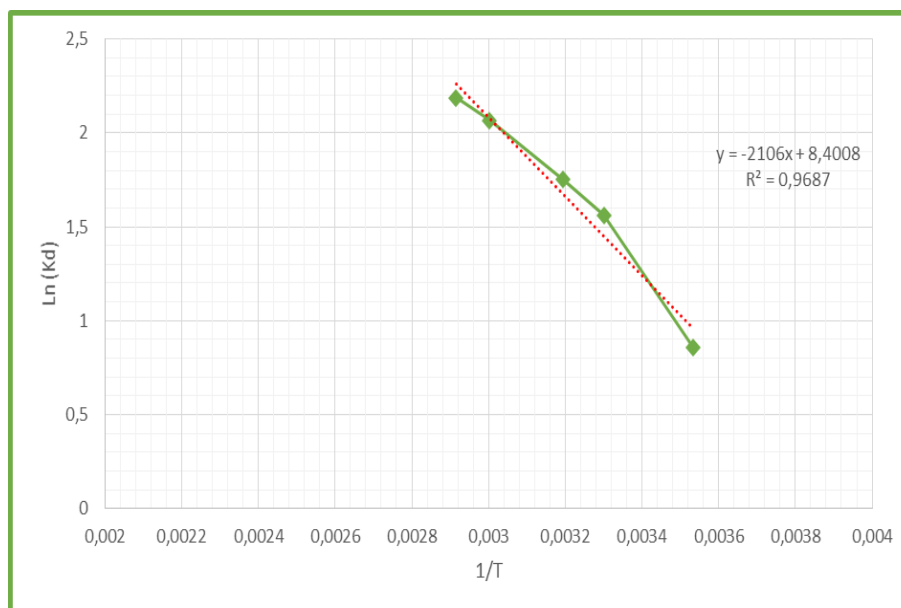


Figure III. 20 : Variation de la constante de distribution avec la température d'élimination VM sur biomatériau.

A partir de la figure III.20 : représentant l'évolution de Ln Kd en fonction de 1/T, nous a permis de déduire les grandeurs thermodynamiques : l'énergie libre de Gibbs (ΔG°), la variation d'enthalpie (ΔH°) et la variation d'entropie standard (ΔS°) relatives au processus étudié qui sont rassemblé dans le tableau ci-dessous :

Tableau III. 6 : Paramètres thermodynamiques de l'adsorption de MV sur BO₁.

T °K	Qe (mg/g)	1/T (°K ⁻¹)	lnKd	ΔH° KJ/mol	ΔS° J/mol.K	ΔG° KJ/mol
283	4,444	0,0035	0,8565	8,0679	66,8919	-2,0153
303	5,002	0,0033	1,5610			-3,9325
313	5,11	0,0031	1,7499			-4,5539
333	6,0253	0,0030	2,0651			-5,7175
343	6,0793	0,0029	2,1861			-6,2342

Le tableau montre que la valeur positive de l'enthalpie standard ($\Delta H^\circ > 0$) indique que le processus d'adsorption est endothermique [14], c'est-à-dire favorisé par une élévation de la température. Des valeurs négatives de l'énergie libre de Gibbs ($\Delta G^\circ < 0$) attestent du caractère spontané et thermodynamiquement favorable du processus [15]. Enfin, la valeur positive de l'entropie standard ($\Delta S^\circ > 0$) reflète une augmentation du désordre à l'interface solide–solution pendant l'adsorption.

III.6 Traitement complémentaire par irradiation solaire

Bien que l'adsorption assure une élimination élevée du Violet de Méthyle, une faible quantité de colorant reste présente dans la solution. Afin de compléter le traitement et d'éliminer ce colorant résiduel, l'effet du rayonnement solaire a été étudié. Les résultats obtenus sont présentés ci-après.

III.6.1. Étude de la photolyse solaire du Méthyle Violet

On a d'abord procédé à une photolyse solaire d'une solution de Méthyle Violet sans matériaux. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'efficacité du rayonnement solaire pour dégrader le colorant.

Ce test a permis d'évaluer la capacité de dégradation du Méthyle Violet sous le rayonnement solaire. Le rendement d'élimination n'a atteint qu'environ 20 % en 1h, contre près de 92 % par adsorption en seulement 20 min. Ces résultats montrent que l'adsorption constitue le procédé principal d'élimination, tandis que le rayonnement solaire agit comme un traitement complémentaire pour éliminer le colorant résiduel.

III.6.2 Élimination du violet de Méthyle par le procédé combiné adsorption–photolyse solaire.

Afin de compléter l'élimination du Méthyle Violet, la solution résiduelle obtenue après l'étape d'adsorption a été soumise au rayonnement solaire. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure suivante.

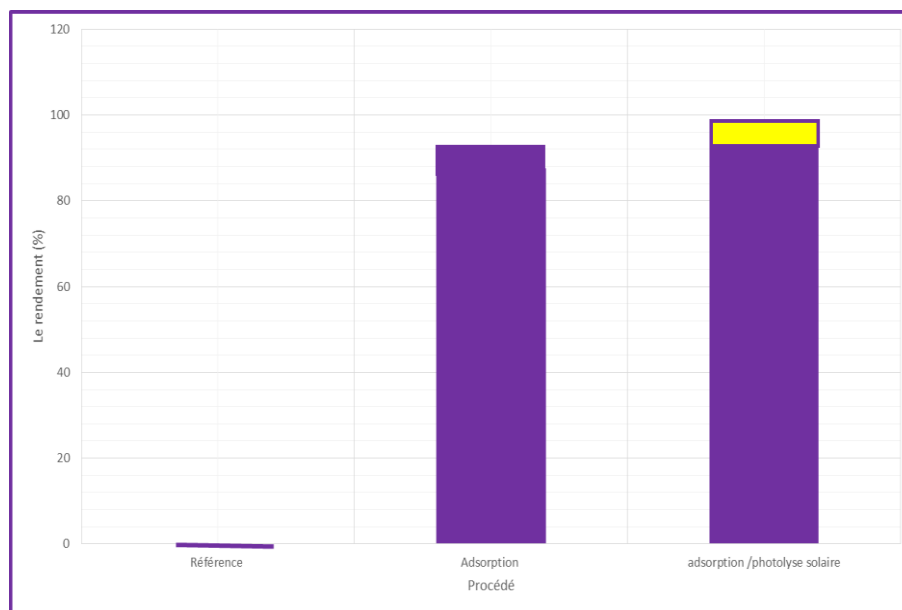


Figure III. 21 : Rendement d'élimination du MV par le procédé combiné adsorption–photolyse solaire.

Les résultats montrent que l'exposition de la solution résiduelle au rayonnement solaire améliore le rendement global d'élimination. Le procédé combiné adsorption–irradiation solaire permet ainsi d'éliminer la quasi-totalité du Violet de Méthyle. Ces résultats confirment que l'adsorption constitue l'étape principale du traitement, tandis que le rayonnement solaire complète efficacement le procédé en éliminant le colorant résiduel.

III.7 Conclusion

En conclusion, cette étude a montré que le biomatériau BO1 constitue un bio-adsorbant efficace pour l'élimination du MV en solution aqueuse. Les paramètres expérimentaux optimaux ont permis d'obtenir un rendement d'élimination élevé. Les études cinétique, isotherme et thermodynamique ont permis de mieux comprendre le mécanisme d'adsorption, révélant un processus favorable, spontané et endothermique. Enfin, le couplage de l'adsorption avec la photolyse solaire a amélioré l'élimination du colorant résiduel, confirmant l'intérêt de cette approche pour le traitement des eaux contaminées.

LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] DEL MUNDO, J. T., Rongpipi, S., Yang, H., et al. (2023). Grazing-incidence diffraction reveals cellulose and pectin organization in hydrated plant primary cell wall. *Scientific Reports*, 13, 5421.
- [2] Sharma, K., Mahato, N., Cho, M. H., et al. (2017). Converting citrus wastes into value-added products: Economic and environmentally friendly approaches. *Nutrition*, 34, 29–46.
- [3] Torche, A., Chouana, T., Sanah, I., et al. (2025). pH-sensitive cassava starch/onion peel powder films as colorimetric indicators for minced beef freshness monitoring. *Foods*, 14(17), 2974.
- [4] Harris, D. C. (2010). *Quantitative chemical analysis*. Macmillan.
- [5] Nadji, L. (2025). Adsorption d'un colorant azoïque par du charbon actif (Thèse de doctorat, Faculté des sciences et de la technologie, Université de Bordj Bou Arréridj).
- [6] Laouar, A., Oulad Kouider, C. L., & K Moulai, Encadrant. (2025). Élimination d'un colorant textile (vert de malachite forme oxalate) par un matériau (MAGADIITE-Na) (Thèse de doctorat, Université Ghardaïa).
- [7] Iddou, A. (2016). Modification thermique, chimique et application d'une argile de type 1:1 à la coadsorption de colorants (Thèse de doctorat, Université de Mostaganem).
- [8] Lamri, N. (2010). Élimination du colorant Orange II en solution aqueuse, par voie photochimique et par adsorption (Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine).
- [9] Ayawei, N., Ebelegi, A. N., & Wankasi, D. (2017). Modelling and interpretation of adsorption isotherms. *Journal of Chemistry*, 2017(1), 3039817.
- [10] Tran, H. N., You, S.-J., Hosseini-Bandegharai, A., et al. (2017). Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: A critical review. *Water Research*, 120, 88–116.
- [11] Altaleb, H. A. (2024). Effective removal of hazardous cationic dye from polluted water using sulfonated copolymer hydrogel: Synthesis, nonlinear isotherm, and kinetics investigation. *Journal of Saudi Chemical Society*, 28(3), 101852.
- [12] Cetina, M., Mihovilović, P., Pešić, A., et al. (2025). Influence of ionic strength and temperature on the adsorption of Reactive Black 5 dye by activated carbon: Kinetics, mechanisms and thermodynamics. *Molecules*, 30(12), 2593.

- [13] Diop, A., Faye, M., Diedhiou, D., et al. (2022). Valorisation des coques de graines de neem, *Azadirachta indica* A. Juss, comme bioadsorbant: Application à l'élimination d'un colorant (bleu de méthylène). *Afrique Science*, 20(6), 100–120.
- [14] Djebrit, I., Boudjerada, B., & Bentarfa, D. (2025). Élimination d'un polluant organique par adsorption sur charbon actif préparé à partir des fibres de palmier dattier (Thèse de doctorat, Université Ghardaïa).
- [15] Guendouz, A., Sayoud, N., & Darnane, C. (2025). Élimination d'un colorant textile en solution aqueuse par adsorption sur résine macroporeuse (Thèse de doctorat, Université de Jijel).



Conclusion générale

Cette étude s'inscrit dans une démarche de gestion durable des biomasses végétales et de réduction des impacts environnementaux, en proposant une solution efficace, économique et respectueuse de l'environnement pour la dépollution des eaux contaminées par les colorants contribuant à la valorisation des ressources renouvelables et au développement de procédés plus respectueux de l'environnement.

L'étude a porté sur l'étude de l'élimination du colorant MV sur un biomatériau issu de biomasse végétales pelures d'oignon, pour évaluer les performances du biomatériau et mieux comprendre le processus d'adsorption en étudiant les principaux paramètres opératoires. L'ensemble des résultats expérimentaux met en évidence que :

Les résultats des analyses DRX, UV-Visible et de la caractérisation physicochimique ont révélé que le biomatériau (BO) possède des propriétés adaptées au processus d'adsorption. Les résultats obtenus confirment les interactions établies entre le colorant et le biomatériau, confirmant ainsi son potentiel pour l'élimination des colorants MV en milieu aqueux.

L'efficacité du processus d'adsorption dépend de plusieurs paramètres opératoires, notamment la température, le temps de contact, le pH et la concentration initiale du colorant.

L'analyse cinétique et d'équilibre a montré que le processus d'adsorption est décrit de manière satisfaisante par le modèle du pseudo-deuxième ordre et l'isotherme de Freundlich, confirmant une bonne affinité du biomatériau pour le colorant.

Les essais de régénération ont confirmé la réutilisabilité du biomatériau, qui conserve une efficacité satisfaisante au cours des différents cycles d'utilisation.

L'analyse thermodynamique a démontré que le processus d'adsorption est à la fois spontané et endothermique. Les valeurs négatives de ΔG° valident la spontanéité du phénomène, tandis que les valeurs positives de ΔH° et ΔS° confirment respectivement son caractère endothermique et l'augmentation du désordre à l'interface solide-solution.

Dans l'ensemble, les résultats de cette étude confirment l'intérêt de l'utilisation du biomatériau d'origine végétale dans le traitement des eaux colorées. Les résultats obtenus incitent à poursuivre les recherches pour améliorer ce procédé et à envisager son application à plus grande échelle.