



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Amar Telidji- Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GÉNIE DES PROCÉDÉS

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : **Mohammed AD**
Mohammed Bachir ANTAR

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Génie des Procédés

OPTION : Génie des Procédés de l'Environnement

Thème

**Utilisation d'un matériau écologique pour l'adsorption d'un
colorant cationique en solution aqueuse**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Pr. DJEDID Mebrouk	Professeur	Président
Dr. BOUDAOU D Asma	MCA	Examinatrice
Dr. AD Chifaa	MCA	Rapportrice
Mme. SAADALLAH Kelthoum	Doctorante	Co-rapportrice

Année Universitaire : 2024-2025

Remerciements

Ce mémoire a été effectué au laboratoire de recherche de l'Ingénierie des procédés, matériaux et environnement (LIPME) de l'université de Amar Telidji- Laghouat.

Le premier et le dernier commandement est Dieu, qui nous a donné suffisamment de capacités pour accomplir ce travail. .

*Nous souhaitons exprimer notre gratitude à notre rapportrice, **Ma sœur Dr. AD Chifaa**, et à **Madame SAADALLAH Kelthoum**, co-rapportrice. Pour leurs précieux conseils et leurs Encouragements constants. Nous avons eu la chance inestimable de bénéficier d'un Encadrement si dévoué et attentif, répondant rapidement à nos questions et à nos demandes.*

Nous tenons également à remercier les membres du jury :

***Pr. DJEDID Mebrouk**, Président et **Dr BOUDAOU D Asma** , examinatrice . Pour avoir accepté de lire et d'examiner notre travail avec soin et rigueur.*

Un merci spécial à tous ceux qui nous ont soutenus pour mener à bien ce travail.

Enfin, nous remercions les ingénieurs du laboratoire LIPME, pour leur soutien et leurs contributions, ainsi que tous les ingénieurs et les techniciens du Laboratoire de Génie des Procédés de l'Université de Laghouat.

Merci à tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail à ma mère, source de vie, de tendresse et de courage, et à mon père, exemple de force et de respect, avec toute ma gratitude et mon amour.

À ma sœur Chifaa, soutien inestimable, merci pour ton amour constant. À ma sœur Afaf et à mes frères Brahim, Abd el Karim, Sassi et Raid, merci pour votre amour indéfectible.

À mon partenaire Bachir, et Mme SAADALLAH Kalthoum, pour leur aide précieuse en laboratoire, et à tous mes camarades de la promotion 2025, avec qui j'ai partagé des souvenirs inoubliables.

Mohamed

Dédicace

Je dédie ce mémoire à ma mère, pour son amour et sa force.

À mon père et à mon oncle, pour leur soutien constant.

*À toute ma famille, y compris mes cousins, pour leur présence, leurs encouragements
et leurs prières.*

*À mes amis et camarades, pour leur aide, leur écoute et les moments partagés qui ont
marqué ce parcours.*

Bachir

SOMMAIRE

Sommaire

<u>Titre</u>	<u>Page</u>
Liste des abréviations.....	I
Liste des figures.....	III
Liste des tableaux.....	V

Introduction générale

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre I : Généralités sur l'adsorption

I.1. Les eaux usées	04
I.1.1. Définition.....	04
I.1.2. Les sources des eaux usées	04
I.2. Les colorants	05
I.2.1. Définition.....	05
I.2.2. Types des colorants.....	05
I.2.2.1. Colorants synthétiques.....	05
I.2.2.2. Colorants naturels	05
I.2.3. Classification des colorants.....	05
I.2.4. Utilisation et application des colorants	06
I.2.5. Toxicité des colorants	06
I.2.5.1. Impacts environnementaux	06
I.2.5.2. Toxicité sur la santé humaine	07
I.2.6. Technique d'élimination des colorants	07
I.3. Procédés d'adsorption	07
I.3.1. Définition.....	07
I.3.2. Différents types d'adsorption.....	08
I.3.3. Facteurs influençant l'adsorption.....	08
I.3.3.1. Facteurs caractérisant l'adsorbant.....	09
I.3.3.2. Facteurs caractérisant l'adsorbat.....	09
I.3.3.3. Facteurs liés aux conditions opératoires	09
I.3.4. Différents types d'adsorbants	10
I.3.5. Les biosorbants.....	10
I.3.5.1. Définition.....	10
I.3.5.2. Classification des biosorbants.....	10
I.4. Modélisation des isothermes d'adsorption	11
I.4.1. Modèle de Langmuir.....	11
I.4.2. Isotherme de Freundlich	12
I.5. Etude cinétique d'adsorption	13
I.5.1. Modèle du pseudo premier ordre.....	13
I.5.2. Modèle du pseudo second ordre.....	14

Chapitre II : Revue bibliographique

II.1. Introduction	16
II.2. Revue bibliographique du BM comme adsorbat.....	16
II.3. Revue bibliographique des Graines de coriandre comme adsorbant.....	19

Chapitre III : Matériels et méthodes

III.1. Introduction.....	23
III.2. Appareillage, matériel et réactifs utilisés	23
III.2.1. Appareillage	23
III.2.2. Matériel utilisé.....	23
III.2.3. Réactifs chimiques utilisés	24
III.3. Le Blue de méthylène	24
III.4. Les Grains de coriandre	26
III.5. Préparation des réactifs	26
III.5.1. Préparation de NaOH	26
III.5.2. Préparation de H ₂ SO ₄	27
III.5.3. Préparation de la solution mère de colorant	27
III.6. Dosage du BM par spectroscopie UV-Visible.....	29
III.6.1. Principe	29
III.6.2. Loi de Beer-Lambert.....	30
III.6.3. Détermination du λ_{\max}	30
III.6.4. Etablissement de la courbe d'étalonnage	31
III.6.5. Détermination de la concentration résiduelle de l'échantillon.....	31
III.7. L'analyse du GC par Spectroscopie infrarouge.....	31
III.8. Protocole d'essais d'adsorption.....	32
III.8.1. Effet de la masse de l'adsorbant.....	32
III.8.2. Effet de temps de contact et de la concentration initiale	32
III.8.3. Effet du pH de la solution	33
III.8.4. Effet de la concentration.....	33
III.8.5. Effet de la Température	33
III.8.6. Effet de la force ionique	34
III.9. Mesure de la capacité d'adsorption.....	34
III.10. Détermination du rendement d'élimination du colorant	34
III.11. Etude cinétique.....	35
III.11.1. Modèle de pseudo- premier ordre.....	35
III.11.2. Modèle de pseudo-second ordre.....	35
III.12. Etude isothermique	36
III.12.1. Modèle de Langmuir	36
III.12.2. Isotherme de Freundlich	36
III.13. Désorption	37

Chapitre IV : Résultats et discussion

Sommaire

IV.1. Introduction.....	39
IV.2. Caractérisation de la plante par Spectroscopie Infra-Rouge	39
IV.3. Etablissement de la courbe d'étalonnage du colorant.....	40
IV.4. Optimisation des conditions opératoires	41
IV.4.1. Effet de la masse d'adsorbant.....	41
IV.4.2. Effet du pH de solution	42
IV.4.3. Effet du temps de contact	43
IV.4.4. Effet de la concentration	44
IV.4.5. Effet de la température	45
IV.4.6. Effet de la force ionique	46
IV.5. Etude cinétique	47
IV.6. Etude isothermique.....	49
IV.6.1 Modélisation des isothermes d'adsorption	49
IV.7. Etude thermodynamique	51
IV.8. Désorption.....	53
IV.9. Etude comparative.....	53

Conclusion Général

Conclusion Général.....	56
-------------------------	----

Références bibliographiques

Liste des abréviations

<u>Symbole</u>	<u>Signification</u>
GC :	Graines de Coriandres
BM :	Bleu de méthylène
UV :	Ultraviolet
IR :	Infrarouge
A :	L'absorbance
ϵ :	Coefficient spécifique d'absorbance molaire
λ_{\max} :	Longueur d'onde maximale
Q_{ads} :	Capacité d'adsorption
R(%) :	Le taux d'élimination
Q_m :	Capacité maximale d'adsorption
V :	Volume de la solution
m :	Masse d'adsorbant
C :	Concentration
C_0 :	Concentration initiale de l'adsorbat
C_e :	Concentration à l'équilibre de l'adsorbat
pH :	Potentiel d'hydrogène
T° :	Température
t :	Temps
Q_T :	Quantité de soluté adsorbée à l'instant
Q_E :	Quantité adsorbée de soluté à l'équilibre
K_L :	Constante de Langmuir
K_F :	Constante de Freundlich
n :	Coefficient de Freundlich
R^2 :	Coefficient de régression
PPO :	Pseudo premier ordre
PSO :	Pseudo second ordre
K_1 :	Constante de vitesse de premier ordre

K₂ :	Constante de vitesse de second ordre
K_a	Constante d'équilibre
ΔH :	Variation de l'enthalpie
ΔS :	Variation de l'entropie
ΔG :	Variation de l'enthalpie libre
°C :	Degré Celsius
K :	Kelvin
KJ :	Kilo Joule
tr/min :	Tour par minute
ppm :	Partes par million
M :	Molarité
ml :	Millilitre
L :	Litre
mg :	Milligramme
g :	Gramme
cm :	Centimètre
mm :	Millimètre
nm :	Nanomètre
min :	Minute
h :	heure

Liste des figures

<u>Figure N°</u>	<u>Titre</u>	<u>Page</u>
<i>Chapitre I : Généralités sur l'adsorption</i>		
Figure I.1 :	Termes de base pour l'adsorption	07
Figure I.2 :	Schéma de l'adsorption physique (a) et chimique (b)	08
Figure I.3 :	Modèle d'adsorption de Langmuir	11
Figure I.4 :	Modèle d'adsorption de multicouche	12
<i>Chapitre III : Matériels et méthodes</i>		
Figure III.1 :	Aspect du colorant bleu de méthylène.	25
Figure III.2 :	Graines de coriandre	26
Figure III.3 :	Le protocole de préparation du l'adsorbant	28
Figure III.4 :	Échantillon de l'adsorbant GC	28
Figure III.5 :	La spectrophotométrie UV-Visible	29
Figure III.6 :	Spectromètre Infrarouge à transformée de Fourier	32
<i>Chapitre IV : Résultats et discussion</i>		
Figure IV.1 :	Spectre FTIR du GC avant et après l'adsorption de BM	40
Figure IV.2 :	Courbe d'étalonnage du BM à $\lambda_{\max} = 664 \text{ nm}$	41
Figure IV.3 :	Influence de la masse de l'adsorbant GC sur l'adsorption du BM.	42
Figure IV.4 :	Effet du pH sur l'adsorption du BM dans les conditions opératoires	43

Figure IV.5 :	Influence du temps de contact sur l'adsorption du BM dans les conditions	44
Figure IV.6 :	Effet de la concentration sur l'adsorption du BM dans les conditions	45
Figure IV.7 :	Effet de la température sur l'adsorption du bleu de méthylène	46
Figure IV.8 :	Effet de la force ionique sur l'adsorption du bleu de méthylène	47
Figure IV.9 :	Représentation linéaire du modèle cinétique du pseudo premier -ordre pour l'adsorption du bleu de méthylène sur GC	48
Figure IV.10 :	Représentation linéaire du modèle cinétique du pseudo second- ordre pour l'adsorption du bleu de méthylène sur GC	48
Figure IV.11 :	Application du modèle linéaire de Langmuir sur l'isotherme d'adsorption du bleu de méthylène sur GC	50
Figure IV.12 :	Application du modèle linéaire de Freundlich sur l'isotherme d'adsorption du bleu de méthylène sur GC	50
Figure IV.13 :	Représentation linéaire de $\ln K = f(1/T)$ de l'adsorption de BM par coriandrum sativum	52
Figure IV.14:	Representation graphique des cycle de regeneration du GC	53

Liste des tableaux

<u>Tableau N°</u>	<u>Titre</u>	<u>Page</u>
<i>Chapitre I : Généralités sur l'adsorption</i>		
Tableau I.1 :	Classification des colorants	06
Tableau I.2 :	Principales différences entre les deux types d'adsorption	08
<i>Chapitre III : Matériels et méthodes</i>		
Tableau III.1 :	Caractéristiques des réactifs utilisés.	24
Tableau III.2 :	Propriétés physico-chimiques du bleu de méthylène	25
<i>Chapitre IV : Résultats et discussion</i>		
Tableau IV.1 :	Résultats d'applications du modèle cinétique du pseudo premier ordre et pseudo second ordre pour l'adsorption du bleu de méthylène sur GC	49
Tableau IV.2 :	Constantes relatives aux modèles de Langmuir et Freundlich pour l'adsorption du bleu de méthylène sur GC	51
Tableau IV.3 :	Paramètres thermodynamiques pour l'adsorption du BM sur les graines de coriandre	52
Tableau IV.4 :	Etude comparative de l'adsorption de BM sur différents adsorbants	53

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est une source de vie, est utilisée pour des usages domestiques, industriels ou agricoles qui requièrent tous en abondance une eau de qualité. Mais au cours de ses diverses utilisations, l'eau est souvent polluée. Son rejet au milieu naturel sous forme d'effluents plus ou moins fortement pollués peut engendrer à court ou à long terme des conséquences graves, tant pour la santé et l'environnement.

Les colorants, qui sont largement utilisés dans diverses industries telles que l'alimentation, le papier, les tapis, les caoutchoucs, les plastiques, les cosmétiques et les textiles pour colorer leurs produits, sont considérés comme l'un des importants polluants. Une fois dissous dans l'eau, leur origine synthétique et leur structure moléculaire complexe rendent leur traitement difficile et les rendent instables et difficiles à biodégrader [1], ce qui peut causer des risques pour la santé et le bien-être de l'environnement. Par conséquent, il est important de limiter autant que possible ces polluants en mettant en place des moyens de traitement adaptés tels qu'une unité de décoloration.

Différentes techniques ont été utilisées pour l'élimination de certains polluants solubles dans les effluents industriels ou domestiques. Elles sont différentes les unes par rapport aux autres et peuvent être citées à titre d'illustration l'adsorption. L'adsorption est l'un des procédés de séparation qui trouve son application dans de larges domaines, l'extraction, l'épuration, la dépollution, etc. Au cours de ce processus, la molécule d'un fluide (gaz ou liquide) vient se fixer sur la surface d'un solide [2].

En effet la performance et l'efficacité de cette technique d'adsorption dépend d'une façon prépondérante de la nature du support utilisé comme adsorbant, son coût, son abondance, sa régénération, etc... Parmi les adsorbants couramment utilisés en raison de sa grande capacité d'adsorption des contaminants organiques, le charbon actif. Toutefois, reste très onéreux, nécessite en plus une régénération constituant un facteur limitant et son coût élevé limite son utilisation pour le traitement des grands volumes d'eaux polluées. Ceci a donc encouragé des travaux de recherche sur des adsorbants alternatifs, efficaces à faible coût et largement disponibles, de préférence issus des substances naturelles et déchets locaux [3].

L'objectif de notre étude est d'utiliser Graines de Coriandres comme biosorbant efficace et économiques pour l'élimination du colorant bleu de méthylène en solution aqueuse par adsorption. Notre mémoire est divisé en quatre chapitres :

- ❖ **Le premier chapitre** traite des eaux usées colorées, de leur origine, des différents types de colorants utilisés ainsi que de leur impact sur l'environnement et des techniques d'élimination. Il présente également des informations générales sur l'adsorption, y compris les paramètres influant sur le phénomène, ainsi que les classes et les modèles les plus couramment utilisés pour sa description.
- ❖ **Le deuxième chapitre** passe en revue les études antérieures sur l'adsorption des colorants par les biosorbants, en citant des recherches ayant utilisé le bleu de méthylène comme colorant et d'autres ayant utilisé du Graines de Coriandres comme biosorbant.
- ❖ **Le troisième chapitre** décrit le matériel et les réactifs utilisés, ainsi que les protocoles expérimentaux utilisés pour la mise en œuvre de notre étude, y compris les différentes méthodes d'analyse et le protocole expérimental pour l'optimisation des paramètres influant sur le phénomène d'adsorption.
- ❖ **Le quatrième chapitre** présente les résultats expérimentaux obtenus et leur discussion suivie par une étude comparative aux travaux antérieurs.

Et enfin, une conclusion générale récapitulant les principaux résultats obtenus de notre étude, ainsi que des perspectives pour leur enrichissement.

CHAPITRE I:

Généralités sur l'adsorption

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique sur la pollution des eaux usées par les colorants, les différentes techniques de traitement des eaux usées, notamment l'adsorption, une méthode efficace et peu coûteuse qui trouve de plus en plus d'applications dans la purification des eaux contaminées, qui fait l'objet de cette étude.

I.1. Les eaux usées

I.1.1. Définition

Les eaux usées sont des milieux extrêmement complexes, altérées par les activités anthropiques à la suite d'un usage domestique, industriel, artisanal, agricole ou autre. Elles sont considérées comme polluées et doivent être donc traitées avant toute réutilisation ou injection dans les milieux naturels récepteurs [4].

I.1.2. Les sources des eaux usées

L'eau est largement utilisée à des fins industrielles et domestiques, mais elle peut contenir une multitude de matières et de substances qui peuvent être présentes dans trois états différents : solide, liquide ou gazeux. Ces matières peuvent être caractérisées par leur taille dans un environnement aqueux [5]. Cependant, il existe de nombreuses sources de pollution telles que :

- ❖ **Les eaux usées domestiques.**
- ❖ **Les eaux usées industrielles.**
- ❖ **Les eaux usées agricoles.**
- ❖ **Les eaux usées pluviales.**

I.2. Les colorants

I.2.1. Définition

Un colorant est une substance chimique colorée capable de transmettre sa coloration à d'autre corps [7]. Les matières colorantes sont un assemblage de groupes chromophores (qui confèrent la couleur) et groupes auxochromes (qui permettent sa fixation) et de structures aromatiques conjuguées (cycles benzéniques, anthracène, etc...).

I.2.2. Types des colorants

Il existe deux principales catégories de colorants, à savoir les colorants naturels et les colorants synthétiques :

I.2.2.1. Colorants synthétiques

Un colorant est une substance qui possède des propriétés distinctes et spécifiques. Ces propriétés sont indépendantes les unes des autres. Ils sont fabriqués à partir de molécules telles que le benzène, qui est obtenu par la distillation de la houille.

I.2.2.2. Colorants naturels

Les colorants naturels proviennent d'éléments naturels extraits par des procédés simples comme le chauffage ou le broyage. Ils sont largement répandus, particulièrement dans les plantes, les micro-organismes et les corps des animaux [4].

I.2.3. Classification des colorants

D'une manière générale, les principaux modes de classification des colorants reposent sur deux critères :

- ✓ Classification chimique selon la structure chimique du colorant (groupe chromophore).
- ✓ Classification tinctoriale selon le mode d'utilisation et d'application de la couleur (groupe auxochrome).

Le **tableau I.1** résume ces deux modes de classifications des colorants.

Tableau I.1 : Classification des colorants [7].

<i>Classification chimique</i>	<i>Classification tinctoriale</i>
Colorants anthra-quinoniques	Colorants acides / basiques
Colorants indigoïdes	Colorants de cuve
Colorants xanthènes	Colorants directs
Colorants phtalocyanines	Colorants à mordants
Colorants nitrés et nitrosés	Colorants réactifs
	Colorants azoïques insolubles
	Colorants dispersés

I.2.4. Utilisation et application des colorants

Les domaines d'application des colorants sont variés et peuvent inclure [8] :

- ✓ L'industrie textile.
- ✓ L'industrie des matières plastiques.
- ✓ L'industrie de la construction : peintures.
- ✓ L'industrie pharmaceutique et cosmétique.
- ✓ L'industrie agroalimentaire (colorants alimentaires).
- ✓ Dans l'imprimerie (encre, papier).
- ✓ Colorants au soufre.

I.2.5. Toxicité des colorants

I.2.5.1. Impacts environnementaux

Il est possible de distinguer plusieurs colorants dans l'eau même à des concentrations très faibles, de l'ordre de 1 mg/l ou moins. Ces colorants contribuent largement aux problèmes de pollution associés à la production d'eaux usées colorées. Les rejets de ces eaux dans l'écosystème représentent une source de pollution, d'eutrophisation et de perturbation esthétique pour les espèces aquatiques [7].

I.2.5.2. Toxicité sur la santé humaine

Il est possible que les colorants aient des effets toxiques sur la santé humaine et peuvent provoquer : Irritations de la peau et des dermatites (Eczéma et ulcération), Réactions allergiques et asthme, des Risques cancérogènes et des tumeurs urinaires [7].

I.2.6. Technique d'élimination des colorants

Il existe de nombreuses méthodes de traitement des eaux usées de colorant, telles que la méthode de sédimentation par floculation, la méthode de séparation par membrane et la coagulation-précipitation, les techniques membranaires, l'échange d'ions et l'adsorption [9]. Dans cette étude, la technique d'adsorption a été choisie pour la remédiation des eaux usées synthétiques contaminé par les colorants.

I.3. Procédés d'adsorption

I.3.1. Définition

L'adsorption est un procédé largement employé pour la séparation et la purification des gaz et des liquides dans des domaines très variés, allant des industries pétrolières, pétrochimiques et chimiques, aux applications environnementales (le traitement des eaux usées) et pharmaceutiques [10]. Ce procédé permet de retenir les polluants présents en phase fluide ou encore pour récupérer les éléments précieux solubles dans la phase liquide. [11]

L'adsorption est aussi un phénomène de transfert de matière d'un fluide vers la surface d'un solide (**Figure I.1**) où des molécules présentes dans effluent liquide ou gazeux, appelée adsorbat viennent se fixer sur la surface d'un solide, appelé adsorbant [12]. Ce phénomène dépend à la fois de cette interface et des propriétés physico-chimiques de l'adsorbât [13].

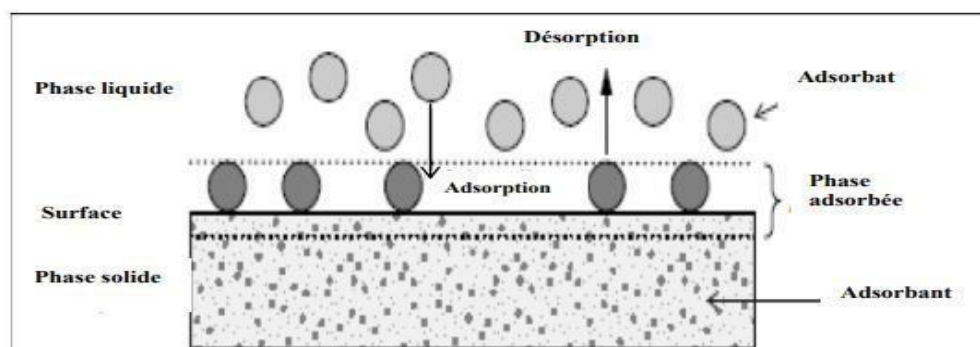


Figure I.1 : Termes de base pour l'adsorption [14].

I.3.2. Différents types d'adsorption

Selon la nature des interactions qui relient l'adsorbé à la surface de l'adsorbant, on distingue deux types d'adsorption : adsorption physique ou physisorption et adsorption chimique ou chimisorption (**Figure I.2**). Le tableau suivant présente les différences entre les deux types d'adsorption.

Tableau I.2 : Principales différences entre les deux types d'adsorption [5].

Propriétés	Adsorption physique	Adsorption chimique
Energie d'adsorption	5 à 10 Kcal/mole	20 à 100 Kcal/mole
Température de processus	Inférieure à la température d'ébullition de l'adsorbé	Elevée
Nature de liaison	Physique (Van der Waals)	Chimique
Désorption	Plus ou moins parfaite	Difficile
Energie d'activation	Non appréciable	Peut être mise en jeu
Cinétique	Très rapide	Lente
Etat de surface	Formation de multicouches	Conduit tout ou plus à une monocouche

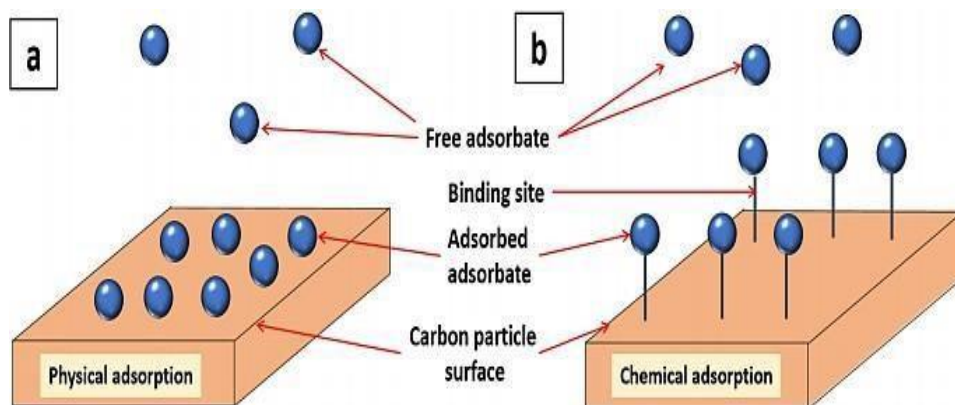


Figure I.2 : Schéma de l'adsorption physique (a) et chimique (b) [23].

I.3.3. Facteurs influençant l'adsorption

L'équilibre d'adsorption entre un adsorbant et un adsorbé, dépend de nombreux facteurs, les principaux facteurs influençant l'adsorption sont :

I.3.3.1. Facteurs caractérisant l'adsorbant

- **La surface spécifique :** Il est clair que l'on cherche à conférer aux adsorbants une grande surface spécifique, cette grandeur désigne la surface accessible rapportée à l'unité de poids d'adsorbant [15].
- **Porosité :** La porosité est liée à la répartition de la taille des pores. Elle reflète la structure interne des adsorbants microporeux [14].
- **Polarité :** On peut classer les adsorbants en solides polaires (les gels de silice et les différentes argiles) adsorbent préférentiellement les corps polaires, et les solides apolaires (charbon, graphite, talc, etc.) adsorbent les corps apolaires [16].

I.3.3.2. Facteurs caractérisant l'adsorbat

Les caractéristiques de l'adsorbat ont un impact considérable sur le phénomène d'adsorption. Plus particulièrement : le poids moléculaire ainsi que la structure moléculaire, la polarité, la solubilité, la concentration, le point d'ébullition [17]. L'effet de la nature de l'adsorbat sur le processus d'adsorption est décrit par les règles suivantes [14] :

- ✓ Plus une substance est insoluble dans le solvant, plus elle sera facilement adsorbée. En revanche, si la substance est très soluble, elle aura moins de chances d'être adsorbée.
- ✓ Les substances polaires auront plus d'affinité pour les solvants ou pour les adsorbants les plus polaires.

De façon générale, les substances non dissociées ou neutres sont mieux adsorbées que les substances ionisées.

I.3.3.3. Facteurs liés aux conditions opératoires

Plusieurs paramètres opératoires ont une influence sur l'adsorption tel que : le pH de la solution, les forces ioniques, la température de la solution, le temps de contact entre adsorbat-adsorbant, la concentration initiale de l'adsorbat et la masse de l'adsorbant. [18].

- Le pH du milieu.
- La Température.
- La Concentration.

- Le temps de contact.
- La masse de l'adsorbant.
- La force ionique.

I.3.4. Différents types d'adsorbants

Il existe six grands types d'adsorbants : les charbons actifs, les zéolithes, les alumines, les gels de silice, les argiles et les biosorbants. Grâce à leur structure cristalline en feuillets, les argiles et les zéolithes sont de bons adsorbants naturels. Le charbon actif est également un excellent adsorbant, avec une capacité d'adsorption remarquable des molécules organiques et des gaz, ce qui explique son utilisation dans des domaines très variés [19].

I.3.5. Les biosorbants

I.3.5.1. Définition

La bio-sorption correspond à l'utilisation des matériaux biologiques ayant un grand potentiel de fixation des polluants par adsorption. Elle est considérée comme alternative ou complémentaire aux méthodes conventionnelles, utilisées pour le traitement des effluents contenant des ions métalliques ou des colorants qui sont généralement coûteuses [14]. A ce titre, on peut citer : la pulpe d'olive traitée, la fougère des arbres, les fibres des palmiers, le bois, la sciure de bois, déchets de thé ou encore les coriandrum sativum [11].

I.3.5.2. Classification des biosorbants

Les biosorbants peuvent être regroupés en deux catégories : les biosorbants d'origine aquatique et ceux provenant du secteur agro-industriel.

➤ Biosorbants d'origine aquatique

Les biosorbants d'origine aquatique désignent la biomasse, constituée à la fois d'espèces animales et végétales. Il est prouvé que la biomasse (vivante ou morte) possède de très bonnes capacités d'adsorption dues particulièrement à ses caractéristiques physicochimiques. Toutefois, il est préférable d'utiliser la biomasse morte, car sont alors éliminés les problèmes de toxicité, d'alimentation et de maintenance du milieu de culture [18].

➤ Biosorbants d'origine agro-industrielle

Ce sont des bio-sorbants d'origine végétale. Ce sont des matériaux riches en matière

organiques dont les polyphénols qui, grâce à leurs groupements hydroxyles, leur accorde un grand rendement dans la rétention des polluants. Ces bio-adsorbants représentent beaucoup d'avantages et des propriétés importantes. Ils sont abondants, non toxiques, renouvelables, biodégradables et peu coûteux. D'un point de vue chimique, ils contiennent des chaînes macromoléculaires porteuses de nombreuses fonctions chimiques très réactives [14].

I.4. Modélisation des isothermes d'adsorption

Cet équilibre est décrit en exprimant la quantité de soluté adsorbé par unité de masse d'adsorbant q_e , en fonction de la concentration de soluté c_e restant dans la solution. Une expression de ce type, à une température donnée, est généralement appelée isotherme d'adsorption :

$$q_e = f(C_e) \quad (I.1)$$

Il existe plusieurs modèles définissant l'équilibre d'adsorption pour lequel les coefficients sont calculés par des études expérimentales [20].

I.4.1. Modèle de Langmuir

La théorie proposée par Langmuir (1918) repose sur une vision cinétique de l'adsorption de molécules sur une surface plane [19].

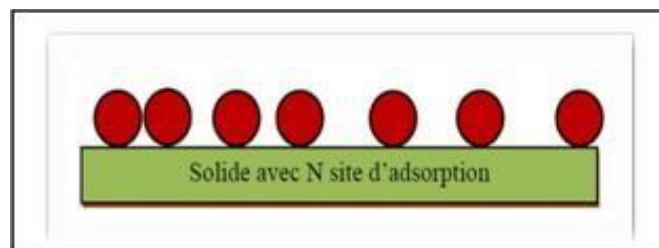


Figure I.2 : Modèle d'adsorption de Langmuir [14]

Les hypothèses de ce modèle sont les suivantes :

- ✓ les sites d'adsorption sur la surface solide sont homogènes d'un point de vue énergétique : on parle de « surface d'adsorption homogène » ;
- ✓ chacun de ces sites peut adsorber une seule molécule, et une seule couche de molécules peut se former ;
- ✓ chacun des sites a la même affinité pour les molécules en solution ;
- ✓ il n'y a pas d'interactions entre les molécules adsorbées.

L'isotherme de Langmuir est représentée par la relation suivant :

$$q_e = \frac{q^0 \cdot K_L \cdot C_e}{1 + K_L \cdot C_e} \quad (I.2)$$

Avec :

C_e : Concentration résiduelle du soluté en solution à l'équilibre (mg/l).

q_e : Capacité d'adsorption à l'équilibre (mg/g)

q_m : Capacité maximum d'adsorption qui est la quantité du produit adsorbé par unité de masse d'adsorbant exprimé en (mg/g)

K_L : Constante de l'équilibre thermodynamique d'adsorption ou Coefficient d'adsorption de Langmuir (l/mg).

La meilleure linéarisation de l'équation de Langmuir d'après Zahou (1992) serait celle de Weber, (1972).

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{q_m K_L C_e} \quad (I.3)$$

Le traçage de $(1/q_e)$ en fonction de $(1/C_e)$, permet de déterminer graphiquement q_m et K_L en utilisant l'équation de linéarisation de Langmuir.

I.4.2. Isotherme de Freundlich

Ce modèle d'adsorption de Freundlich est utilisé dans le cas de formation possible de plus d'une monocouche d'adsorption sur la surface et les sites sont hétérogènes avec des énergies de fixation différentes. Il est aussi souvent utilisé pour décrire l'adsorption chimique des composés organiques sur le charbon actif, à des concentrations élevées dans l'eau et les eaux de rejet.

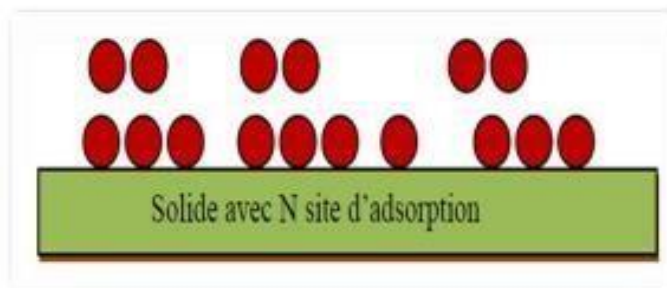


Figure I.3 : Modèle d'adsorption de multicouche [14]

L'expression mathématique associée à ce modèle est donnée par l'équation :

$$q_e = K_F (C_e)^{\frac{1}{n}} \quad (\text{I.4})$$

Avec : q_e : la quantité d'adsorbant adsorbée par masse d'unité d'adsorbant (mg.g^{-1}) ;

K_F : Constante de Freundlich qui est un paramètre lié à la capacité d'adsorption maximale ($\text{mg.g}^{-1} (\text{mg.L}^{-1})^n$) ;

C_e : la concentration de l'adsorbant dans la solution à l'équilibre (mg.L^{-1}).

n : est un paramètre lié aux coefficients de variation des énergies d'interactions avec le taux de recouvrement.

La transformée linéaire de ce modèle a pour équation :

$$\text{Ln} q_e = \text{Ln} K_F + \frac{1}{n} \text{Ln} C_e \quad (\text{I.5})$$

Le traçage de $\text{Ln}(q_e)$ en fonction de $\text{Ln}(C_e)$ permet de déterminer K_F et $1/n$ (l'ordonnée à l'origine représente $\text{Ln}(K_F)$ et la pente représente $(1/n)$ du modèle linéaire de Freundlich).

I.5. Etude cinétique d'adsorption

La cinétique d'adsorption est le second paramètre indicateur de la performance épuratoire d'un adsorbant. Elle permet d'estimer la quantité de polluants adsorbée en fonction du temps [18]. Il existe plusieurs modèles cinétiques pour étudier le mécanisme d'adsorption où les plus courants sont expliqués ci-dessous.

I.5.1. Modèle du pseudo premier ordre

Il a été supposé que dans ce modèle la vitesse de sorption à l'instant t est proportionnelle à la différence entre la quantité adsorbée à l'équilibre, q_e et la quantité q_t adsorbée à cet instant et que l'adsorption est réversible [14].

Le modèle pseudo-premier ordre exprimé par l'équation de Lagergren est donné par l'équation suivante [21] :

$$\frac{dq}{dt} = K_1 (q_e - q_t) \quad (\text{I.6})$$

Avec : q_e : Capacité d'adsorption à l'équilibre (mg/g).

t : Temps de contact (min).

k_1 : Constante de vitesse d'adsorption pour le premier ordre (min^{-1}).

L'intégration de cette équation donne :

$$\log_{10}(q_e - q_t) = \log_{q_e} - \frac{K_1}{2.303} t \quad (\text{I.7})$$

Dans le cas d'une cinétique apparente du premier ordre, le tracé de $\log(q_t - q_e)$ en fonction du temps t , L'ordonnée à l'origine et la pente de la droite permettent de calculer q_e et K_1 .

I.5.2. Modèle du pseudo second ordre

La vitesse de réaction de pseudo -deuxième -ordre dépend de la quantité adsorbée sur la surface de l'adsorbant et de la quantité adsorbée à l'équilibre [14]. La modélisation des résultats expérimentaux des cinétiques de sorption par le modèle de Blanchard présentant le modèle pseudo-second ordre, est donnée par l'équation suivante [3] :

$$\frac{dq_e}{dt} = K_2(q_e - q_t)^2 \quad (\text{I.8})$$

Où : K_2 : Constante de vitesse d'adsorption du modèle de pseudo-deuxième-ordre (mg/g.min).

q_t : La capacité d'adsorption à l'instant t .

q_e : La capacité d'adsorption à l'équilibre.

L'intégration de l'équation précédente donne :

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 \cdot q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (\text{I.9})$$

CHAPITRE II:

Revue bibliographique

II.1. Introduction

Ce chapitre propose une revue bibliographique portant sur une dizaine d'années, centrée sur l'élimination du Bleu de Méthylène (BM) par adsorption. Il présente, d'une part, les travaux relatifs au bleu de méthylène en tant qu'adsorbat, et d'autre part, l'étude des grains de coriandre comme adsorbant naturel. En outre, il intègre l'analyse d'autres adsorbants biosourcés, modifiés ou non, renouvelables et économiques, envisagés comme alternatives viables aux adsorbants conventionnels souvent onéreux. Cette synthèse critique vise à dresser un état des lieux des avancées récentes, à comparer les performances des différents adsorbants et à identifier les perspectives pour un traitement écologique et accessible des eaux polluées.

II.2. Analyse bibliographique sur l'adsorption du BM

Depuis plusieurs décennies, l'élimination du BM en milieu aqueux suscite un intérêt croissant, en raison de sa persistance et de sa toxicité avérée. Cette revue analyse les progrès réalisés au cours des dix dernières années dans le développement de matériaux biosourcés utilisant l'adsorption comme méthode d'élimination. L'objectif est de mettre en lumière, à travers différentes références, les divers adsorbants étudiés, en insistant particulièrement sur les analyses paramétriques, cinétiques, isothermiques et thermodynamiques permettant d'évaluer leur efficacité.

E. Misran et al. (2025) ont examiné l'adsorption assistée par ultrasons du bleu de méthylène utilisant des coquilles de crevettes, un adsorbant économique issu de déchets biologiques. Trois procédés de préparation (A1, A2, A3) ont été comparés pour évaluer leur impact sur les propriétés physico-chimiques et l'efficacité d'adsorption. Les analyses MEB-EDX, FTIR, granulométriques et de surface spécifique ont révélé des différences significatives selon la méthode. Aux conditions optimales, les adsorbants A2 et A3 ont atteint plus de 99,7 % d'élimination du colorant sans ajustement de pH. Les isothermes d'adsorption ont suivi le modèle de Freundlich pour A1 et celui de Langmuir pour A2 et A3. La cinétique correspond au modèle pseudo-second ordre avec un excellent coefficient de corrélation (R^2 proche de 1). L'étude thermodynamique a confirmé un processus spontané et endothermique, attestant de l'efficacité des coquilles de crevettes activées par ultrasons pour le traitement aqueux du bleu de méthylène [15].

K. Saadallah et al. (2024) ont valorisé l'écorce de pin natif algérien comme biosorbant durable et à faible coût pour éliminer le bleu de méthylène. Sa structure poreuse et sa forte surface spécifique, riche en groupes fonctionnels, favorisent l'adsorption. Les conditions optimales (pH 8, 55 °C, 0,4 g de biosorbant) ont permis d'atteindre un taux de retrait de 99,47 %. La cinétique a suivi un modèle pseudo-second ordre et la diffusion intraparticulaire a suggéré un mécanisme de chimisorption. L'isotherme de Freundlich a décrit l'adsorption avec une capacité de 37,15 mg/g. Les études thermodynamiques ont indiqué un phénomène spontané, endothermique et favorable aux températures élevées. Son coût faible (0,1376 USD/m³) en fait une solution écologique et économique prometteuse [16].

C. Waghmare et al. (2024) ont étudié les pelures de grenade activées à l'acide orthophosphorique comme biosorbant pour le bleu de méthylène. L'activation chimique au H₃PO₄ (1:1 poids) a amélioré la capacité d'adsorption. Les paramètres tels que pH, temps, concentration initiale et dose ont été optimisés, conduisant à une efficacité de plus de 92 % à pH 8 avec 0,25 g/100 mL et 120 min de contact. La capacité maximale de 14,03 mg/g s'ajuste à l'isotherme de Langmuir ($R^2=0,9883$), indiquant une adsorption monomoléculaire. La cinétique suit un modèle pseudo-second ordre ($R^2=0,9997$), en accord avec les résultats expérimentaux. Les paramètres thermodynamiques confirment la nature spontanée et endothermique du processus. Le biosorbant a conservé sa capacité après trois cycles de régénération (NaOH, HCl), soulignant son potentiel économique et écologique [17].

M. Loutfi et al. (2023) ont employé une argile naturelle marocaine pour l'adsorption du bleu de méthylène, évaluant l'effet de la dose d'adsorbant, concentration, temps, température et pH. La cinétique s'ajuste à un modèle pseudo-second ordre ($R^2=0,99$). L'isotherme de Langmuir décrit mieux le processus, avec une capacité maximale de 456,62 mg/g. Les analyses thermodynamiques confirment un procédé spontané, exothermique et favorable. La possibilité de régénération du matériau souligne son intérêt économique et environnemental. Les caractérisations FTIR, DRX et pH point de charge ont confirmé ses propriétés physico-chimiques [18].

S. Radoor et al. (2022) ont conçu un biosorbant composite à base de curcuma, polyvinylalcool et carboxyméthylcellulose pour éliminer le bleu de méthylène.

Les propriétés antibactériennes, biodégradables et thermo-mécaniques du film ont été confirmées. Le film a affiché une capacité d'adsorption de 6,27 mg/g et un retrait de 83 % à 10 mg/L en 170 minutes. Les isothermes Langmuir, Freundlich, Temkin et Dubinin–Radushkevich ainsi que les cinétiques pseudo-premier et pseudo-second ordre et diffusion intraparticulaire ont été appliqués. Ces résultats montrent que le film est un adsorbant économique et performant pour le traitement des eaux [19].

W. Alghamdi et I. El Mannoubi (2021) ont utilisé graines et pelures de *Citrullus colocynthis* comme biosorbants naturels. Les graines (CCSs) et pelures (CCPs) ont été caractérisées par BET, SEM, TGA et FTIR. Les isothermes de Langmuir et Freundlich ont bien décrit l'adsorption sur CCSs, tandis que CCPs s'ajustent à Langmuir et Temkin. Sous conditions optimales, CCSs ont montré une capacité maximale de 18,83 mg/g avec 98 % d'élimination, contre 4,48 mg/g et 91,43 % pour CCPs. Les cinétiques suivent pseudo-premier ordre (CCSs) et pseudo-second ordre (CCPs). Les thermodynamiques indiquent un caractère endothermique et spontané pour CCSs, et exothermique pour CCPs à température ambiante. Ces résultats valident l'efficacité des biosorbants naturels issus de *Citrullus colocynthis*, la graine étant la plus performante [20].

N. Ahmad et al. (2021) ont préparé un charbon activé à partir de pelures de grenade via imprégnation au KOH et gazéification au CO₂. L'optimisation par surface de réponse a permis d'obtenir une surface spécifique améliorée (de 1,01 à 845,96 m²/g). Les conditions optimales ont permis un retrait de 83,4 % du bleu de méthylène en 6 heures, avec un maximum d'adsorption selon Langmuir à 303 K de 250 mg/g. La cinétique pseudo-premier ordre a été retenue, indiquant un mécanisme physico-chimique. Ce charbon activé est un adsorbant prometteur pour le traitement des eaux colorées [21].

A. Seidmohammadi et al. (2019) ont comparé l'efficacité des écales de gland brutes et de leur charbon actif pour éliminer le bleu de méthylène. L'efficacité d'élimination a augmenté avec le temps, le pH et la dose d'adsorbant, mais a diminué avec la concentration initiale. L'adsorption sur écales brutes suit le modèle de Langmuir ($R^2=0,9971$) et une cinétique pseudo-second ordre, tandis que le charbon actif suit Langmuir ($R^2=0,7631$) et cinétique d'ordre zéro. Le charbon actif est supérieur pour le traitement des eaux [22].

Y.Miyah et al. (2018) ont évalué la poudre de coquilles de noix comme biosorbant économique pour éliminer le bleu de méthylène. L'adsorption, étudiée par batch, dépend de la dose, concentration, temps, température, pH et force ionique. Les isothermes Langmuir et Freundlich montrent une capacité maximale de 178,9 mg/g. La cinétique suit un modèle pseudo-second ordre. Les paramètres thermodynamiques confirment la faisabilité, spontanéité et caractère exothermique du processus. La régénération possible du matériau renforce son intérêt [23].

O. Amode et al. (2016) ont étudié l'adsorption du bleu de méthylène avec des déchets de Metroxylon spp. traités alcalinement ou acide. Le traitement alcalin a plus que doublé la capacité d'adsorption par augmentation de la surface et porosité. Les isothermes de Langmuir montrent des capacités maximales respectives de 83,5 mg/g (non traité), 212,8 mg/g (KOH) et 36,82 mg/g (H₃PO₄). La cinétique suit un modèle pseudo-second ordre ($R^2=0,999$). Le traitement alcalin simple améliore significativement la performance pour éliminer les colorants cationiques des eaux usées [24].

II.3. Analyse bibliographique sur les grains de coriandre

Cette section rassemble une revue des études récentes consacrées à l'usage des graines, feuilles et résidus de coriandre comme biosorbants dans l'élimination de colorants aqueux. L'accent est mis sur l'évaluation des capacités d'adsorption, les modèles cinétiques et isothermiques employés, ainsi que sur l'analyse des mécanismes thermodynamiques. Ces recherches soulignent l'intérêt croissant pour ces matériaux naturels, renouvelables et économiques, en tant que solutions durables pour la dépollution des eaux chargées en colorants.

R.Sulthana et al. (2024) ont évalué un résidu industriel de graines de coriandre (NICSS) comme adsorbant pour éliminer le colorant cationique mutagène Brilliant Green (BG) en solution aqueuse. L'étude a analysé l'influence du pH, de la concentration, de la température, de la dose et de la taille des particules. Dix modèles d'isothermes ont été appliqués, avec une capacité expérimentale proche de 110 mg/g et un maximum de 136,17 mg/g selon Dubinin–Radushkevich. La cinétique suit un modèle pseudo-second ordre, et la diffusion est principalement contrôlée par le transfert de masse externe. L'adsorption est endothermique et quasi spontanée, confirmée par FTIR et SEM. Ces résultats confirment l'efficacité du NICSS pour la dépollution aqueuse [31].

M. Vemula (2024) a testé la poudre de graines de coriandre (CS) pour éliminer le malachite vert (MG) en solution synthétique. La biosorption, rapide et efficace, a été influencée par la dose d'adsorbant, la concentration initiale, le pH et le temps de contact. Le processus suit les modèles de Langmuir et pseudo-second ordre, avec une capacité maximale de 130,38 mg/g. Un taux d'élimination de 99,74 % a été atteint en 40 minutes à pH 7 [32].

C. de Souza et al. (2022) ont produit un charbon actif à partir des tiges, racines et feuilles de coriandre (CSL) par activation chimique au H₃PO₄. Le matériau (AC-CSL) a été caractérisé par FTIR, TGA, SEM, XRD, EDXRF et adsorption/désorption d'azote, révélant une surface spécifique de 193 m²/g et une structure poreuse. L'adsorption du bleu de méthylène (MB) a été optimale à 90 min, 8 g/L d'AC-CSL, pH 10. La cinétique suit un modèle pseudo-second ordre et l'isotherme de Temkin. La capacité maximale atteignait 94,9 mg/g [33].

H. Mukherjee et Soma Mukherjee (2022) ont évalué les feuilles de coriandre comme adsorbant pour le brillant vert (BG). Après caractérisation par SEM, BET et FTIR, les essais ont étudié la dose, le pH et la concentration. L'adsorption suit un modèle pseudo-second ordre ($R^2 = 0,99$) et l'isotherme de Freundlich ($R^2 = 0,96$). La capacité maximale a été estimée à 68,49 mg/g avec plus de 80 % d'efficacité globale [34].

L. Kadiri et al. (2021) ont étudié les graines de coriandre pour éliminer les colorants indigo bleu et orange méthyle. La poudre présente une structure poreuse riche en sites actifs. Les temps de contact optimaux sont de 20 et 35 min respectivement. Les capacités d'adsorption varient de 9 à 124 mg/g pour l'indigo bleu et de 8,23 à 42 mg/g pour l'orange méthyle, avec des rendements de 92 % et 83 %. Des calculs DFT ont confirmé la corrélation entre les propriétés électroniques des graines et leur affinité pour les colorants [35].

S.Noeman Taqui et al. (2019) ont valorisé les résidus de graines de coriandre (NICSS) pour adsorber le colorant Acid Black 52 (AB52). L'adsorption a été influencée par le pH, la concentration, la dose, la taille des particules, le temps et la température. La capacité maximale variait de 164 à 432 mg/g selon le pH. L'adsorption est endothermique et quasi spontanée, contrôlée par le transfert de masse externe, confirmée par SEM et FTIR [36].

L. Kadiri et al. (2018) ont évalué les graines de coriandre comme biosorbant pour le bleu de méthylène (MB). Les analyses FTIR et SEM ont confirmé leur efficacité. La biosorption, rapide et performante, a été étudiée selon le temps, la masse, le pH, la concentration et la température. Le processus suit un modèle pseudo-second ordre et un isotherme de Langmuir, avec une capacité maximale de 107,53 mg/g. La régénération sur quatre cycles a conservé des taux d'adsorption élevés [37].

CHAPITRE III:

Matériels et méthodes

III.1. Introduction

Les expériences de cette étude ont été réalisées au laboratoire d'ingénierie des procédés, matériaux et environnement (LIPME) ainsi qu'au laboratoire du département de génie des procédés de l'Université de Laghouat. L'objectif principal est d'examiner l'utilisation des graines de coriandre, connues sous le nom scientifique *Coriandrum sativum*, comme adsorbant naturel et biodégradable pour l'élimination du bleu de méthylène dans une solution aqueuse synthétique, en tirant parti de ses atouts, notamment sa disponibilité abondante et son faible coût.

Ce chapitre présente une analyse approfondie de l'adsorption du bleu de méthylène (BM) par les graines de coriandre (GC), en fonction de plusieurs paramètres expérimentaux. Parmi ceux-ci figurent la masse de l'adsorbant, le pH de la solution, le temps de contact, la concentration initiale du colorant, ainsi que la température et la force ionique, afin d'évaluer l'impact de chaque variable sur l'efficacité du processus d'adsorption.

III.2. Appareillage, matériel et réactifs utilisés

III.2.1. Appareillage utilisés

- ✓ Agitateur magnétique
- ✓ Bain agité
- ✓ Le pH-mètre
- ✓ Balance analytique de précision
- ✓ Etuve
- ✓ Spectrophotomètre UV-visible.
- ✓ Micropipette de volume variable

III.2.2. Matériels utilisés

- ✓ Bêchers de capacité de 100 ml et 150 mL.
- ✓ Eprouvette graduée de capacité de 10, 50 et 100 mL,
- ✓ Fioles jaugés de capacité de 100, 250, 500 et 1000 mL,
- ✓ Flacons de capacité de 150 ml
- ✓ Tube à essai de 5 mL avec support
- ✓ Les barreaux magnétiques

- ✓ Les cuves
- ✓ Entonnoir
- ✓ Embouts
- ✓ Spatule, Verre de montre

III.2.3. Réactifs chimiques utilisés

Les produits chimiques utilisés dans cette étude et leurs propriétés sont regroupés dans le **Tableau III.1**.

Tableau III.1 : Caractéristique des réactifs utilisés.

Le produit	Formule chimique	Masse molaire	Densité	Pureté	Etat physique
Hydroxyde de sodium	NaOH	40	-	98 %	Solide cristalline
Acide sulfurique	H ₂ SO ₄	98,08	1,84	95 %	Liquide
Chlorure de sodium	NaCl	58,44	2,16	99,9 %	Poudre
Bleu de Méthylène	C ₁₆ H ₁₈ ClN ₃ S	319.86	-	-	Poudre
L'éthanol	C ₂ H ₆ O	46.07	0.789	99.5	Liquide

III.3. Le choix de l'adsorbat : Bleu de méthylène

Le Bleu de Méthylène est un dérivé de phénothiazine, de nature cationique, il existe sous forme de poudre verte foncée, à divers états d'hydratation : monohydrate, dihydrate, trihydrate et pentahydrate, le plus courant c'est le trihydrate. Il est couramment utilisé comme modèle de contaminant organique en raison de sa structure moléculaire stable [15]. Le BM est un colorant basique de nature cationique et il est détecté par UV-Visible à 664 nm. Ce colorant étudié répond aux critères suivants:

- Solubilité élevée dans l'eau.
- Analyse par spectrophotomètre UV/visible.
- Modèle de structure cationique.
- Tension de vapeur faible.



Figure III.1 : Aspect du colorant bleu de méthylène.

Tableau III.2 : Propriétés physico-chimiques du bleu de méthylène [32].

Propriétés	Bleu de méthylène
Dénomination	Bleu de méthylène ou chlorure de tétraméthylthionine, Basic blue 9 (C.I.)
Appellation chimique	Chlorure de 3,7- bis (diméthylamino) Phénazathionium
Famille	Colorant basique
Formule brute	C ₁₆ H ₁₈ ClN ₃ S
Masse molaire (mg.L ⁻¹)	319,85
Solubilité dans l'eau (g.L ⁻¹) à 20°C	40
Point de fusion (°C)	190
pH	5,9
pKa	3,8
λ _{max} (nm)	665
Structure	

III.4. Le choix de l'adsorbant : Grains de coriandres (GC)

Le coriandre (*Coriandrum sativum*) est une épice très prisée, notamment dans la confection du curry, reconnue pour ses propriétés antioxydantes et ses bienfaits thérapeutiques, tels que le soulagement des rhumatismes, le traitement des infestations parasitaires intestinales et l'amélioration de la digestion. Les graines de coriandre présentent également diverses activités biologiques, incluant des effets antimicrobiens, insecticides, hypolipémiants, hypoglycémiant, ainsi qu'une capacité à inhiber la corrosion. Par ailleurs, elles ont démontré une aptitude notable pour l'adsorption des métaux lourds.

Cette recherche vise à évaluer le potentiel des graines de coriandre en tant qu'adsorbant naturel pour l'élimination du bleu de méthylène (MB) dans des solutions polluées. Bien que leurs propriétés bioactives soient bien documentées, leur utilisation comme biosorbant demeure peu explorée, offrant une alternative respectueuse de l'environnement et économique pour le traitement des eaux contaminées [30,33].



Figure III.2 : Adsorbant choisi : Graines de coriandre (GC).

III.5. Préparation des réactifs**III.5.1. Préparation de NaOH (0.1 M)**

Pour préparer la solution, on pèse 0,4 g de NaOH ($m = 39,99 \text{ g/mol}$, $p = 98 \%$). On dissout cette quantité dans de l'eau distillée dans une fiole jaugée de 100 ml et on ajoute de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Cette solution est utilisée pour ajuster le pH.

Pour préparer la solution on pèse 0.4 g de NaOH ($M=39.99$ g/mol, $P = 98 \%$), On dissout cette quantité dans l'eau distillée dans une fiole jaugée de 100 mL et on ajoute l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Cette solution est utilisée pour ajuster le pH.

III.5.2. Préparation de H_2SO_4 (0.1 M)

Pour préparer cette solution, on prend 0.30 ml de H_2SO_4 ($M=98.08$ g/mol, $P = 95 \%$, $d = 1.84$), On dissout cette quantité dans de l'eau distillée dans une fiole jaugée de 100 mL et on ajoute l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Cette solution est employée aussi pour ajuster le pH.

III.5.3. Préparation de la solution mère de colorant (1000 ppm)

Pour préparer la solution mère de colorant (1000 ppm), on commence par peser 1 g de BM, puis on le dilue dans un petit volume d'eau distillée. On agite le mélange pendant 10 minutes pour obtenir une bonne homogénéisation et on le transfère ensuite dans une fiole de 1000 ml. Ensuite, on complète avec de l'eau distillée jusqu'au repère de jauge, puis on agite pendant 30 minutes afin d'obtenir une solution contenant le colorant à une concentration de $c_0 = 1000$ mg/l.

Dans cette étude, les graines de coriandre ont été utilisées comme adsorbant. Celles-ci ont été récoltées sur le marché local de Laghouat, en Algérie. Le protocole de préparation de l'adsorbant, résumé dans le schéma de la **Figure III.3**, comprend quatre étapes principales : lavage, séchage, broyage et tamisage.

- **Lavage** : Les graines de coriandre collectées ont d'abord été lavées à l'eau du robinet, puis rincées plusieurs fois à l'eau distillée afin d'éliminer efficacement les impuretés telles que le sable et la poussière.
- **Séchage** : Après nettoyage, les graines ont été laissées à l'air libre jusqu'à séchage complet, assurant ainsi l'élimination totale de l'humidité résiduelle.
- **Broyage** : La matière sèche a été broyée à l'aide d'un appareil électrique, jusqu'à l'obtention d'une poudre homogène.
- **Tamisage** : Pour garantir une granulométrie uniforme, la poudre a été tamisée à travers un tamis dont les mailles ont un diamètre compris entre 0,06 et 0,1 mm.
- **Rinçage finale** : Afin d'éviter la libération de la couleur naturelle des graines dans la solution colorante, une étape supplémentaire a été ajoutée. La poudre tamisée a été trempée dans de l'eau distillée pendant 4 heures, avec un rapport solide/liquide de 1 g pour 10 mL, à température

ambiante. Ensuite, la poudre a été filtrée, séchée à l'air et conservée dans des contenants hermétiques pour une utilisation ultérieure.

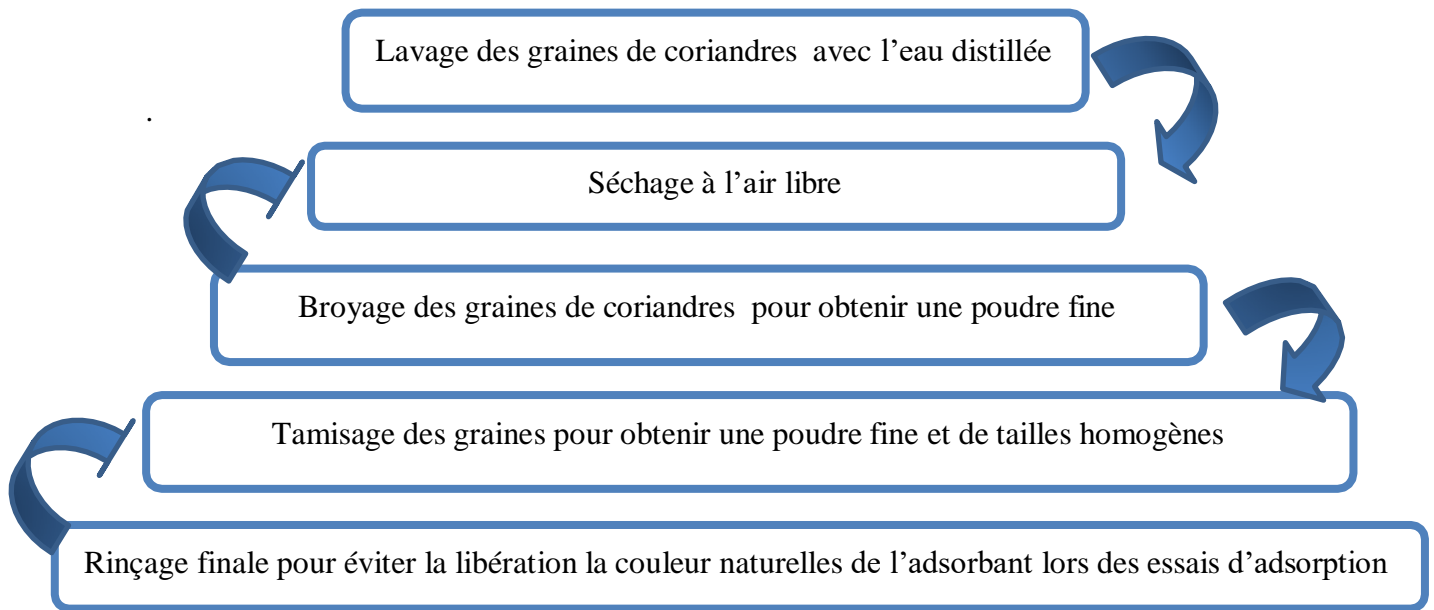


Figure III.3 : Le protocole de préparation du l'adsorbant



Figure III.4 : Échantillon de l'adsorbant GC.

III.6. Dosage du BM par spectroscopie UV-Visible

III.6.1. Principe

La spectrophotométrie UV-Visible est une technique analytique, basée sur l'interaction des radiations lumineuses de la matière dans le domaine de longueurs d'onde 180 à 1100 nm. Bien que cette partie du spectre ne fournisse que peu d'informations structurales, elle est très utile en analyse quantitative [20], elle permet de déterminer la concentration d'un soluté dans une solution, par l'interaction des électrons des molécules du soluté avec la lumière.

Les concentrations de différentes solutions utilisées et les concentrations à l'équilibre ont été déterminées par analyse à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible à la longueur d'onde maximum (λ_{\max}) pour le Bleu de méthylène de 664 nm au pH de la solution. Cela permet de mesurer directement les densités optiques de chaque solution permettant l'accès aux différentes concentrations grâce à la loi de Beer- Lambert qui montre une relation de proportionnalité entre l'absorbance et la concentration de la solution à analyser [34].

Le **Figure III.5** montre l'appareil utilisé lors de dosage de BM.



Figure III.5 : La spectrophotométrie UV-Visible

II.6.2. Loi de Beer-Lambert

Le principe d'analyse par spectrophotométrie UV-visible est basé sur la loi de Beer-Lambert. Cette dernière sert à établir une relation entre l'absorbance, l'épaisseur de l'échantillon et la concentration des espèces absorbantes. La loi de Beer-Lambert n'est vérifiée que si les conditions suivantes sont respectées :

- ✓ Lumière monochromatique
- ✓ Solutions très diluées
- ✓ Pas de réflexion, diffusion ou fluorescence du faisceau incident.

La loi de Beer-Lambert s'exprime sous la forme suivante :

$$A = \epsilon \cdot L \cdot C \quad (\text{II.1})$$

Avec :

A : Absorbance de la solution (sans unité) ;

ϵ : Le coefficient d'adsorption d'extinction molaire ($L \cdot \text{mole}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$).

L : la longueur de la cuve ou trajet lumineux (cm) ;

C : La concentration molaire de l'espèce adsorbant ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)

III.6.3. Détermination du λ_{max}

La longueur d'onde maximale d'absorption λ_{max} a été déterminée par l'établissement du spectre d'absorption d'un échantillon d'une solution de concentration de 100 mg/L en colorant, après un balayage d'ondes dans le domaine du visible 400-800 nm.

Après avoir déterminé la longueur d'onde maximale d'absorption pour le bleu de méthylène. La solution standard de colorant a été préparée à partir de la solution mère du colorant (1g/l) afin de mesurer l'absorbance et de tracer les courbes d'étalonnages appropriées. L'analyse a donc fournie la valeur de $\lambda_{\text{max}} = 664 \text{ nm}$.

III.6.4. Etablissement de la courbe d'étalonnage

Pour établir la courbe d'étalonnage, il faut suivre les étapes suivantes :

- ✓ Préparation de la solution mère de 1000 ppm et l'étalon blanc ;

- ✓ Préparation des solutions étalons de concentrations 1 ppm jusqu'à 10 ppm à partir de la solution mère ;
- ✓ Allumer l'appareil UV-Visible ;
- ✓ Puis fixer $\lambda = 664$ nm pour le dosage du BM,
- ✓ Régler l'appareil en utilisant le blanc,
- ✓ Effectuer les différentes lectures pour les étalons préparés,
- ✓ Tracer la courbe d'étalonnage absorbance en fonction de concentrations.

III.6.5. Détermination de la concentration résiduelle de l'échantillon

- ✓ Traiter de la même manière l'échantillon,
- ✓ Mesure l'absorbance de l'échantillon en utilisant le blanc,
- ✓ La concentration résiduelle du colorant est déterminée à partir de la droite de la courbe d'étalonnage.

III.7. L'analyse du GC par Spectroscopie infrarouge

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier est utilisée pour la détermination des fonctions principales de l'adsorbant est de type « JASCO FT/IR- 4200 (**Figure III.6**) », pour identifier les différentes liaisons. L'analyse est effectuée à l'état solide sur des pastilles de 1 cm de diamètre et de 2 mm d'épaisseur obtenues par un mélange de 2 mg de l'adsorbant avec 98 mg de KBr. L'enregistrement du spectre absorbance en fonction du nombre d'onde $A = f(1/\lambda)$ permet de mettre en évidence la présence des bandes caractéristiques de l'adsorbant [35]. L'appareil est disponible au Laboratoire physicochimie des matériaux à l'université d'Amar Telidji - Laghouat.



Figure III.6 : Spectromètre Infrarouge à transformée de Fourier

III.8. Protocole d'essais d'adsorption

Les expériences d'adsorption ont été effectuées en système batch. Une série de flacons de capacité 125 ml, ont été utilisée pour réaliser ces différents essais. Les échantillons sont dilués pour mesurer enfin la concentration résiduelle du BM.

III.8.1. Effet de la masse de l'adsorbant

La masse de l'absorbant est l'un des facteurs affectant sur l'adsorption qui peuvent aider à déterminer le cout du procédé. Nous avons appliqué la procédure suivante :

- ❖ Un volume de 50ml de solution aqueuse de colorant (BM) de concentration connue (100 mg/l) a été mélangé et agité respectivement avec (0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1g) d'adsorbant (GC) dans des flacons.
- ❖ L'agitation est assurée durant 120 minutes dans un bain marie à agitation à une vitesse de 150 tr/min et à une température de 25°C.
- ❖ Lorsque le processus de l'agitation est terminé, nous diluons chaque solution dans un tube à essai, puis les solutions sont analysées par spectrophotométrie UV- visible à la longueur d'onde de $\lambda_{\max} = 664 \text{ nm}$.

III.8.2. Effet de temps de contact et de la concentration initiale

Nous préparons 4 béchers, dans chaque béchers, on mélange la masse optimal (1.6 g) de l'adsorbant GC avec 100 mL de solution du BM à différentes concentrations (35, 50, 100, et 150 ppm).

- ❖ On met les 4 béchers sous agitation à l'aide d'un agitateur magnétique à une température ambiante.
- ❖ Pendant la durée d'agitation continue de ce mélange, on prélève chaque fois une petite quantité à des intervalles de temps différents (1, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 90, 120, 150 et 180 min).
- ❖ Ces quantités prélevées sont diluées avec l'eau distillée pour dosées par la technique UV-visible à la longueur d'onde de $\lambda_{\max} = 664 \text{ nm}$.

III.8.3. Effet du pH de la solution

Le pH joue un rôle important dans le processus d'adsorption, c'est pourquoi une variation de pH dans la gamme (3, 4, 6, 7, 8, 10,11) a été effectuée pour connaître l'influence du pH de la solution sur l'adsorption de BM. Pour ce faire, le protocole suivant a été appliqué :

- ❖ On doit répartir dans 7 flacons on ajoutant la masse optimale (0.8 g) du biosorbant GC sur 50 ml de solution de BM à concentration ($C = 50 \text{ ppm}$), puis on le fait subir une agitation dans bain à agitation d'une vitesse de 150 tr / min pendant 2 h à une température de 25 °C
- ❖ Le pH ajusté une fois l'ajout quelques gouttes soit de solution acide sulfurique H_2SO_4 (0,1M) ou d'hydroxyde de sodium NaOH (0,1M) pour avoir des solutions de pH souhaitées de 3, 4, 5,7, 8, 10,11.
- ❖ Puis les échantillons sont dilués et puis la lecture de l'absorbance se fait à l'aide d'un spectrophotomètre UV-visible à la longueur d'onde appropriée de BM ($\lambda_{\max} = 664 \text{ nm}$).

III.8.4. Effet de la concentration :

Les essais ont été réalisés par agitation de 50 ml de solutions de colorant (BM) à des concentrations différentes (15, 30, 50, 100 et 150 ppm), avec une masse des graines de coriandre de 0.8 g sous une agitation constante de 150 tr/min, pendant 1h, à une température de 25° C .

Les solutions obtenues sont diluées et analysées directement par spectrophotomètre UV-visible à la longueur d'onde appropriée de BM ($\lambda_{\max} = 664 \text{ nm}$).

III.8.5. Effet de la Température :

Dans le but d'examiner l'effet de la température sur l'adsorption de BM, l'effet de la température a été étudié à différentes températures (25, 35 et 45°C). Les essais ont été réalisés sur des mélanges de 50 mL de solution de BM à différentes concentrations (15, 50, 100 et 150 ppm), avec la masse optimale de l'adsorbant 0.8 g dans les flacons. Ces mélanges ont été maintenues sous agitation constant de 150 tr / min, pendant 1 h.

III.8.6. Effet de la force ionique :

Les eaux industrielles et naturelles contiennent beaucoup des sels qui ont un effet sur l'adsorption des colorants, donc il est très important d'évaluer l'effet de la force ionique sur l'adsorption [36].

- ❖ On ajoute aux solutions de 50 ppm de BM (0.5, 1.5, 3 g) de NaCl mise en contact avec la masse optimale de l'adsorbant (0.8g) maintenues en agitation constant de 150 tr/min, pendant 1 h à une température ambiante.

III.9. Mesure de la capacité d'adsorption :

La capacité d'adsorption est exprimée par la relation suivante [36]:

$$Q_{\text{ads}} = \frac{(C_0 - C_e) * V}{m} \quad (\text{III.1})$$

Sachant que :

Q : Quantité adsorbée (mg/g).

V : Volume de la solution (L).

m : Masse d'adsorbant (g).

C₀ : Concentration initiale de l'adsorbat à t = 0 (mg/l).

C_e : Concentration à l'équilibre de l'adsorbat (mg/l).

III.10. Détermination du rendement d'élimination du colorant :

Le taux d'élimination R(%), est exprimé par la relation suivante [36] :

$$R \% = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} * 100 \quad (\text{III.2})$$

Avec : C_0 : Concentration initiale de l'adsorbat (mg/l).

C_e : Concentration à l'équilibre de l'adsorbat (mg/

III.11. Etude cinétique

Cette étude nous a permis de déterminer l'ordre de cinétique, le modèle qui décrit bien cette cinétique d'adsorption de BM par GC, le temps nécessaire pour atteindre l'état d'équilibre et de déterminer les constantes de vitesse d'adsorption du BM. Donc on étudié deux modèle, modèle de pseudo-premier ordre et modèle de pseudo- second ordre.

III.11.1. Modèle de pseudo- premier ordre

Le modèle pseudo-premier ordre exprimé par l'équation de Lagergren est donne par l'équation suivant [36] :

$$\frac{dq}{dt} = K_1 (q_e - q) \quad (\text{III.3})$$

Après intégration de l'équation précédent, on écrite l'équation linéaire suivante :

$$(q_e - q_t) = \log (q_e) - K_1 T \quad (\text{III.4})$$

Avec :

q_t : Quantité de soluté adsorbée à l'instant en (mg/g).

q_e : Quantité adsorbée de soluté à l'équilibre en (mg/g).

K_1 : Constante de vitesse de premier ordre en (g/min).

Dans le cas d'une cinétique apparente du premier ordre, le tracé de $\log (q_t - q_e)$ en fonction du temps t, L'ordonnée à l'origine et la pente de la droite permettent de calculer q_e et K_1 .

III.11.2. Le modèle de pseudo-second ordre

La modélisation des résultats expérimentaux des cinétiques de sorption par le modèle de Blanchard présentant le modèle pseudo-second ordre, est donnée par l'équation suivante [37]:

$$\frac{dq_e}{dt} = K_2(q_e - q_t)^2 \quad (\text{III.5})$$

L'intégration de l'équation précédente donne :

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 \cdot q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (\text{III.6})$$

Avec :

K_2 : Constante de vitesse apparente du pseudo second ordre ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$).

La quantité adsorbée à l'équilibre q_e et K_2 peuvent être déterminées expérimentalement à partir de la pente et de l'ordonnée à l'origine de la fonction de $t/q_t = f(t)$.

III.12. Etude isothermique

Nous allons appliquer les deux modèles les plus couramment employés qui sont les modèles de Langmuir et Freundlich.

III.12.1. Isotherme de Freundlich

L'isotherme de Freundlich est représentée par la relation suivant :

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (\text{III.7})$$

La linéarisation de cette équation donne :

$$\ln q_e = \ln k + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (\text{III.8})$$

K_f : Constante de la relation de Freundlich.

n : Coefficient de l'équation de Freundlich.

Le traçage de $\ln(q_e)$ en fonction de $\ln(C_e)$ permet de déterminer K_F et $1/n$ (l'ordonnée à l'origine représente $\ln(K_F)$ et la pente représente $(1/n)$)

III.12.2. Isotherme de Langmuir

L'isotherme de Langmuir est représentée par la relation suivant :

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (\text{III.9})$$

Cette équation peut être linéarisée sous la forme suivante :

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L C_e} + \frac{1}{q_m} \quad (\text{III.10})$$

Avec :

C_e : Concentration à l'équilibre, exprimé en (mg/l).

q_e : Quantité du produit adsorbé par unité de masse d'adsorbant exprimé en (mg/g).

q_m : Capacité maximale d'adsorption théorique exprimée en (mg/g).

k_L : Constante de l'équilibre thermodynamique d'adsorption.

Le traçage de $(1/q_e)$ en fonction de $(1/C_e)$, permet de déterminer graphiquement q_m et K_L en utilisant l'équation de graph.

III. 13 Désorption

Afin d'étudier le comportement de désorption du BM en système batch, l'adsorbant saturé en BM (obtenu après une étape d'adsorption) est séparé de la solution. Cet adsorbant est ensuite lavé plusieurs fois avec de l'eau distillée pour éliminer tout excès de BM non adsorbé.

Après cette étape, une solution d'éthanol - eau (v/v) est ajoutée à l'adsorbant saturé en BM dans un bécher. Le mélange est agité à une vitesse constante pendant un temps prédéterminé afin de permettre la désorption du BM. La phase liquide contenant le BM désorbé est ensuite séparée de l'adsorbant par filtration. La concentration du BM désorbé dans la solution est déterminée par spectrophotométrie UV-Vis en mesurant l'absorbance à la longueur d'onde maximale du BM. Cette procédure a été répétée plusieurs fois sur le même adsorbant en utilisant une nouvelle solution d'éthanol afin d'évaluer la régénération de l'adsorbant.

Équations pour le calcul de :

Capacité de désorption (q_{des} , en mg/g) :

$$q_{des} = c_{des} \times \frac{V}{m} \quad (\text{III.11})$$

Où : C_{des} : est la concentration du BM désorbé dans la solution (mg/L).

V : est le volume de la solution de désorption (L).

m : est la masse de l'adsorbant utilisé (g).

Efficacité de désorption ($Des\%$, en %) :

$$\%des = \frac{q_{des}}{q_{ads}} \times 100 \quad (\text{III.12})$$

Où : Q des: est la capacité de désorption (mg/g).

Q ads: est la capacité d'adsorption initiale de l'adsorbant pour le BM (mg/g).

CHAPITRE IV:

Résultats et discussions

IV.1. Introduction

Ce chapitre présente l'analyse détaillée des résultats expérimentaux. La surface de l'adsorbant a été caractérisée par spectroscopie infrarouge (FTIR) pour identifier les groupes fonctionnels actifs dans l'adsorption. Les conditions influençant l'adsorption du bleu de méthylène, telles que la masse d'adsorbant, le temps de contact, la concentration initiale, le pH, la température et la force ionique, ont été optimisées. La cinétique d'adsorption a été modélisée à l'aide des équations pseudo premier ordre et pseudo second ordre, tandis que les isothermes ont été analysés via les modèles de Langmuir et Freundlich. Une étude thermodynamique a également été menée pour déterminer les paramètres énergétiques et confirmer le caractère spontané du processus. Cette approche complète vise à démontrer la performance des graines de coriandre (GC) comme adsorbant efficace pour le bleu de méthylène (BM).

IV.2. Caractérisation de GC par Spectroscopie Infra-Rouge

La spectroscopie est une technique importante utilisée pour l'identification des groupes fonctionnels caractéristiques de la surface de l'adsorbant. Ces groupes sont souvent responsables des liaisons adsorbant-adsorbat, Le spectre Infra-Rouge à Transformé de Fourier (FTIR) du GC est présenté dans la **figure IV.1**

L'analyse par spectroscopie infrarouge (FTIR) permet de suivre les changements chimiques à la surface des graines de coriandre avant et après adsorption du bleu de méthylène. Avant adsorption, la bande large à 3425 cm^{-1} correspond aux vibrations d'étirement des groupes hydroxyles (O-H), indiquant la présence de sites hydrophiles. Les pics entre 2904 et 2859 cm^{-1} sont attribués aux vibrations d'étirement des liaisons C-H des groupes alkyles. La bande à 2338 cm^{-1} peut être liée à la présence de traces de CO_2 adsorbé ou à des vibrations nitriles. Le signal à 1617 cm^{-1} correspond aux vibrations des doubles liaisons C=C aromatiques ou des groupes amides. La bande à 1362 cm^{-1} est caractéristique des déformations des liaisons C-H.

Après adsorption, des modifications subtiles ont été observées dans les spectres FTIR des graines de coriandre suite à leur interaction avec le bleu de méthylène. De légers déplacements en intensité et en position des bandes principales, suggèrent la formation de liaisons hydrogène entre les groupements fonctionnels de la surface des graines et les molécules de BM.

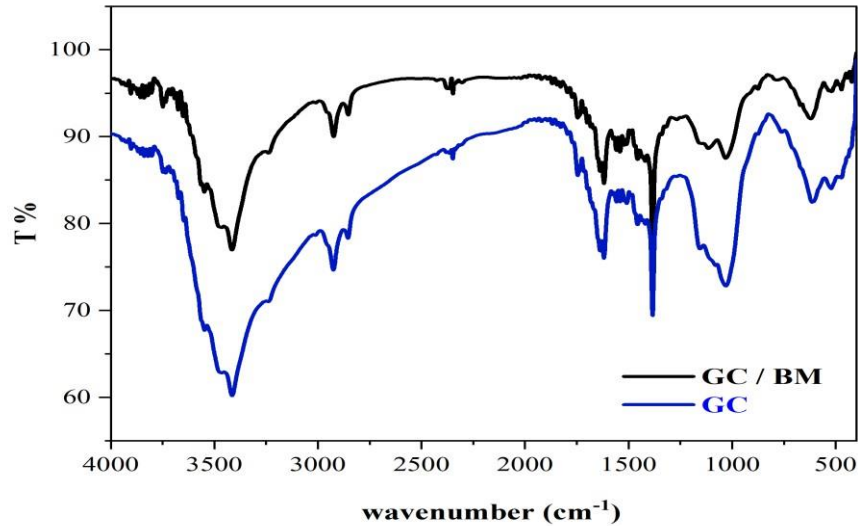


Figure IV.1 : Spectre FTIR du GC avant est après l'adsorption. de BM..

IV.3. Etablissement de la courbe d'étalonnage du colorant

Afin de déterminer la longueur d'onde maximale à laquelle le bleu de méthylène absorbe, une expérience de balayage par spectrophotométrie UV-visible a été menée sur une plage de fréquences allant de 200 à 800 nm. Les résultats de cette expérience ont révélé que la longueur d'onde maximale d'absorption du bleu de méthylène était de 664 nm. De plus, différentes concentrations de BM ont été analysées à l'aide de l'UV-Vis à la longueur d'onde observée. Par la suite, un graphique linéaire a été élaboré en reliant la concentration de BM à l'absorbance. Cette courbe pourrait servir à interpréter l'absorbance UV-Vis en termes de concentration de BM. Les résultats de cette étude sont présentés dans la **figure IV.2**

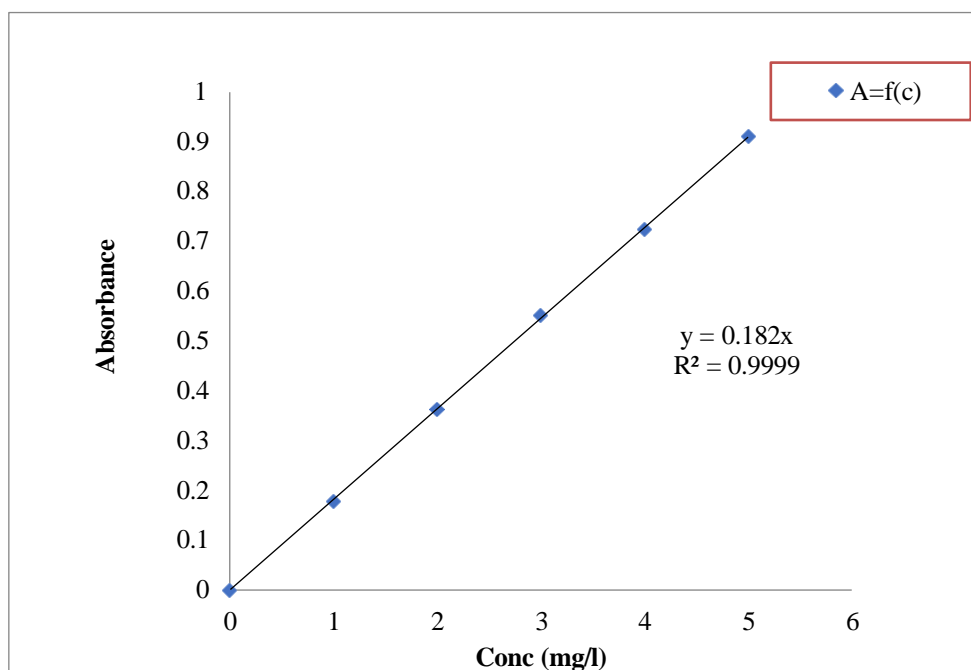


Figure IV.2 : Courbe d'étalonnage du BM à $\lambda_{\max} = 664 \text{ nm}$

IV.4. Optimisation des conditions opératoires

IV.4.1. Effet de la masse d'adsorbant

La masse de l'adsorbant est un facteur primordial influençant l'adsorption du colorant. Afin d'estimer la quantité optimale de l'adsorbant GC, les expériences ont été menées en utilisant 50 mL de la solution de BM, à laquelle différentes quantités de GC ont été ajoutées.

Les résultats obtenus ont permis de tracer la **figure IV.3** qui présente l'influence de la masse d'adsorbant dans l'élimination de la fuchsine basique par adsorption.

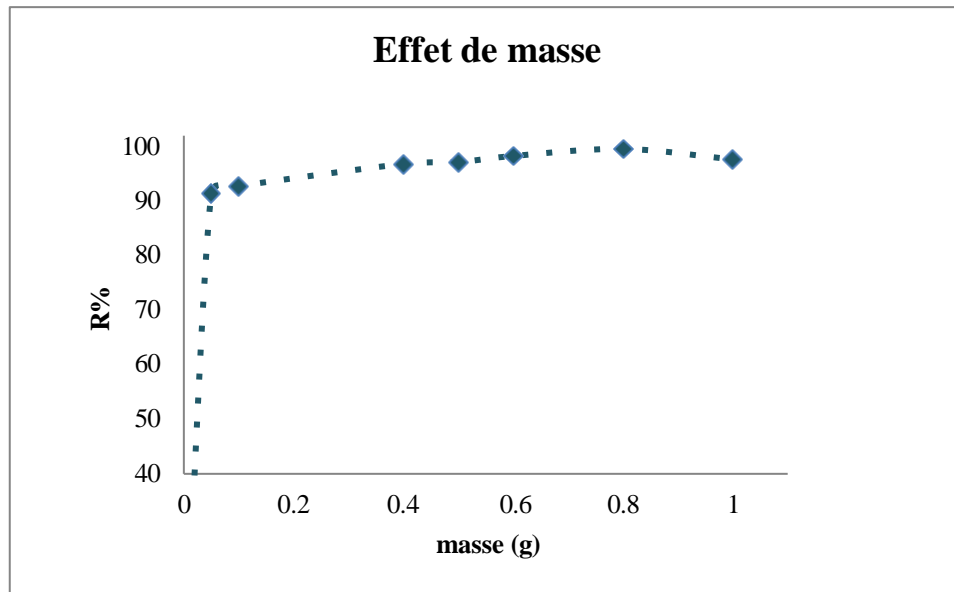


Figure IV.3 : Influence de la masse de l'adsorbant GC sur l'adsorption du BM.

[BM] = 100 mg/L, V = 50 ml, temps de contact = 120 min, Vitesse d'agitation=150 tr/min et T= ambiante.

L'influence de la masse de l'adsorbant a été examinée dans la plage de masse allant de 0,05 à 1 g. En examinant la courbe présentée dans la **Figure IV.3**, il est observé que la quantité d'adsorption croît jusqu'à atteindre une masse de 0,8 g, avec une quantité d'adsorption à environ 99.57%. Par la suite, une augmentation supplémentaire de la masse de la substance à adsorber entraîne une diminution du taux d'élimination. Ces résultats indiquent que la masse optimale de l'adsorbant est de 0.8g.

IV.4.2. Effet du pH de solution

Le pH a une influence remarquable sur le procédé d'adsorption, car il influe directement sur la charge de la surface des adsorbants et la nature des espèces ioniques des adsorbats. De fait l'adsorption ou capacité d'adsorption, évolue certainement avec le pH. Les résultats d'adsorption du BM sur GC en fonction de la variation du pH sont

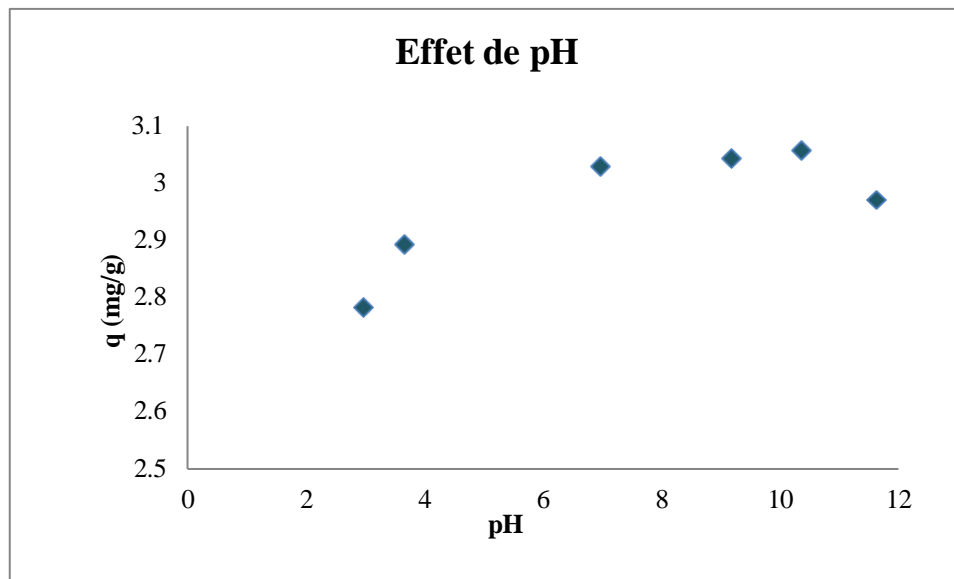


Figure IV.4 : Effet du pH sur l'adsorption du BM dans les conditions opératoires :

$m = 0.8$ g, $V = 50$ ml, $C_0 = 50$ ppm, $T =$ ambiante, vitesse d'agitation = 150 tr/min

La **figure VI.4** présente l'évolution de la capacité d'adsorption du biosorbant (GC) en fonction du pH de la solution. Cette courbe démontre que le pH a un effet significatif sur l'adsorption du colorant par le biosorbant. La capacité d'adsorption augmente progressivement lorsque le pH passe de 3,0 à 10,0, atteignant une élimination maximale à 3,05 mg/g, puis diminue légèrement avec une valeur de pH de 11. Il est à noter que le maximum d'adsorption du colorant a été observé à un pH de 10.

IV.4.3. Effet du temps de contact

L'influence du temps de contact sur le phénomène d'adsorption est significative car il permet de déterminer le temps nécessaire pour atteindre la capacité maximale d'adsorption, qui correspond à un rendement optimal. Cette étude a été menée à une température de 25°C et au pH de la solution d'adsorbat, avec une masse de 1.6g placée dans 100ml de solution soumise à une agitation de 150 tr/min, à des intervalles allant de 0 à 180 minutes. Les résultats obtenus pour le coefficient de variation sont présentés dans la **figure IV.5**.

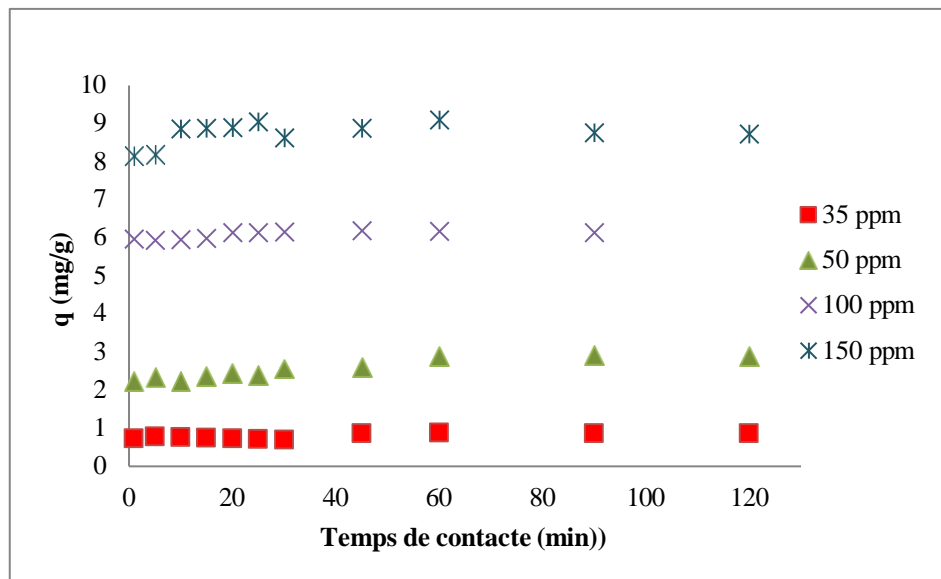


Figure IV.5 : Influence du temps de contact sur l'adsorption du BM dans les conditions : [BM] = 100 mg/L, V = 100 ml, temps de contact = 120 min et T=ambiante, m =1.6 g, pH=10, Vitesse d'agitation= 150 tr/min.

La **Figure IV.5** révèle que la capacité d'adsorption augmente avec le temps pour les quatre concentrations initiales de BM. Il convient de noter que l'adsorption initiale est rapide au cours des 45 premières minutes de la réaction en raison de la disponibilité des sites actifs disponibles à la surface de l'adsorbant. Cependant, au-delà de cette période, une stabilisation de la capacité d'adsorption est observée, indiquant probablement la saturation des sites à la surface et dans les pores de l'adsorbant. En somme, il est donc possible de conclure que 45 minutes sont suffisantes pour atteindre l'équilibre.

IV.4.4. Effet de la concentration

Pour examiner l'effet de la concentration initiale de l'adsorbant sur la capacité d'adsorption de l'adsorbant, plusieurs essais ont été réalisés avec différentes concentrations (15, 30, 50, 100, et 150 mg/l), en gardant les autres paramètres constants. Les résultats obtenus sont représentés sur la **Figure IV.6**.

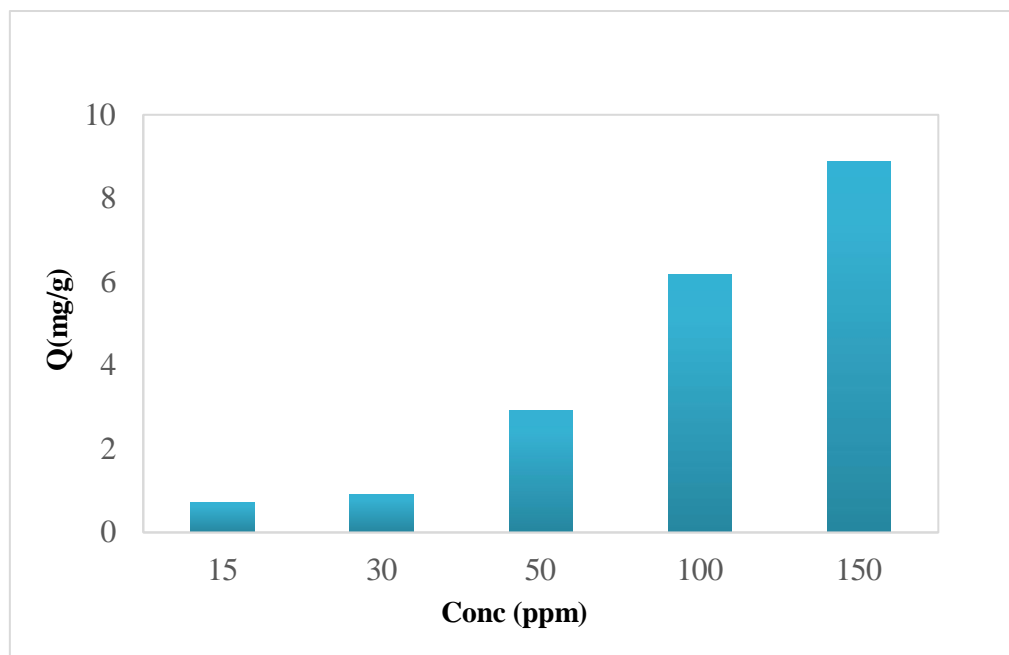


Figure IV.6 : Effet de la concentration sur l'adsorption du BM dans les conditions :
 $m = 0.8\text{g}$, $V = 50\text{ ml}$, $\text{pH} = 10$, $t = 2\text{h}$, $T = 25^\circ\text{C}$.

La **figure IV.6** illustre l'évolution de la capacité d'adsorption de l'adsorbant GC en fonction de la concentration initiale de l'adsorbant BM. Les résultats indiquent que la capacité d'adsorption de GC augmente proportionnellement avec l'augmentation de la concentration initiale de BM. Cette observation peut être expliquée par la présence d'un grand nombre de sites actifs sur la surface de l'adsorbant qui sont disponibles pour la rétention des espèces adsorbées.

IV.4.5. Effet de la température

Afin d'examiner l'influence de la température T° sur l'adsorption de BM. Plusieurs expériences ont été menées aux différentes températures 298, 308, 318 K. Les résultats obtenus sont représentés dans la **figure IV.7**.

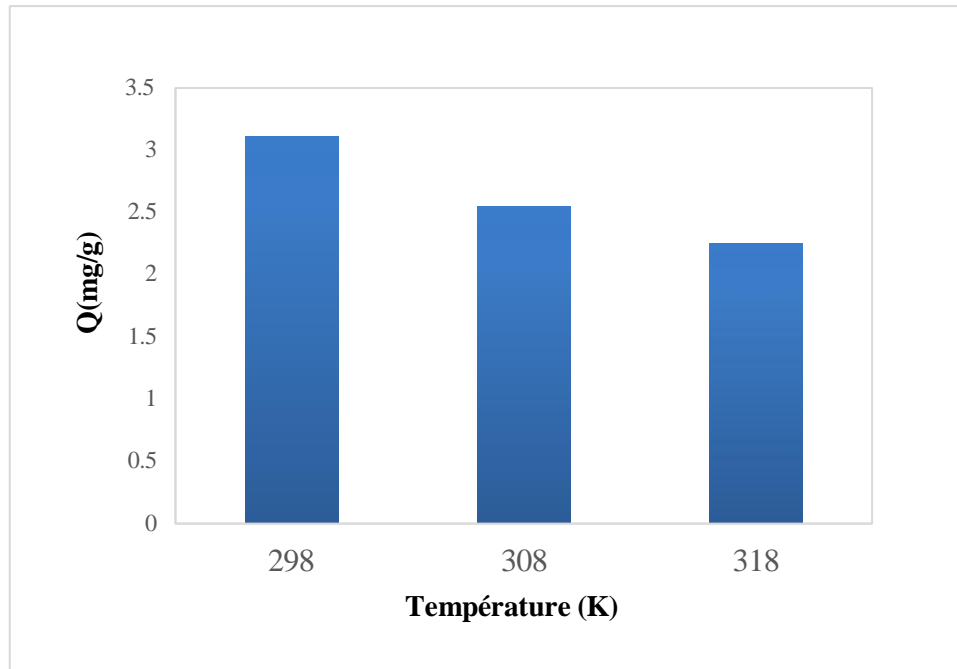


Figure IV.7 : Effet de la température sur l'adsorption du BM dans les conditions opératoires de : $m=0.8$ g, $V = 50$ ml, $C_0=100$ ppm, $pH=10$, vitesse d'agitation 150 tr/min

L'adsorption du BM par GC est sensiblement affectée par la température, comme l'illustre la **Figure IV.7**. Les données indiquent une réduction progressive de la capacité d'adsorption, qui passe de 3,11 mg/g à 2,25 mg/g lorsque la température augmente de 298 K à 328 K. Cette tendance s'explique par la nature exothermique du mécanisme d'adsorption, où des températures plus basses favorisent une meilleure fixation du BM, grâce à une moindre agitation moléculaire dans la solution. Par conséquent, la capacité maximale d'élimination, soit 3,11 mg/g, est obtenue à 25 °C (298 K).

IV.4.6. Effet de la force ionique

Il est connu que les eaux naturelles et contaminées contiennent des concentrations variables des ions organiques et inorganiques. Ainsi, des expériences ont été effectuées dans le but de mieux comprendre l'impact de ces ions sur le processus d'adsorption de colorant sur les graines de coriandres (GC) brute. Dans cette étude on a choisi différentes concentration de chlorure de sodium (NaCl) pour étudier l'influence de la solution saline sur l'adsorption de BM. Les résultats expérimentaux de cet essai sont présentés dans la **Figure IV.8**.

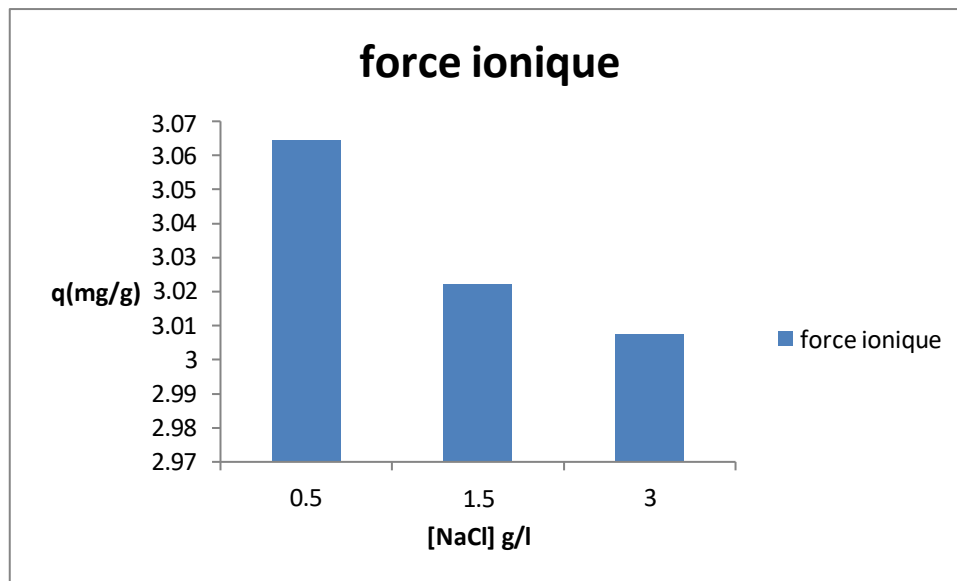


Figure IV.8 : Effet de la force ionique sur l'adsorption du BM dans les conditions opératoires de : $m=0.8$ g, $V = 50$ ml, $C_0= 50$ ppm vitesse d'agitation= 150 tr/min

Les résultats présentés dans la **Figure IV.8** montrent que l'augmentation de la force ionique réduit l'adsorption du bleu de méthylène (BM) sur les graines de coriandre (GC). Ce phénomène s'explique par une compétition entre les ions sodium (Na^+) et les cations BM pour les sites actifs de surface de l'adsorbant. Il est à noter que l'adsorption atteint son niveau maximal en l'absence d'électrolytes tels que le NaCl.

IV.5. Etude cinétique

Dans la littérature, plusieurs modèles cinétiques ont été utilisés pour évaluer le processus d'adsorption. Dans le cadre de l'étude de l'adsorption de BM par GC, deux modèles cinétiques, à savoir le modèle pseudo-premier ordre et le modèle pseudo-second ordre, ont été utilisés pour déterminer les paramètres cinétiques tels que la constante de vitesse et la quantité adsorbée à l'équilibre.

Les résultats ont permis d'établir les courbes présentées dans les **figures IV.9** et **IV.10**. En exploitant la linéarité de ces courbes, on peut calculer les différentes valeurs de k et q qui sont indiquées dans le **tableau IV.1**. Compte tenu de la valeur du coefficient de régression linéaire R^2 , plus ce facteur est élevé plus le modèle est le plus approprié.

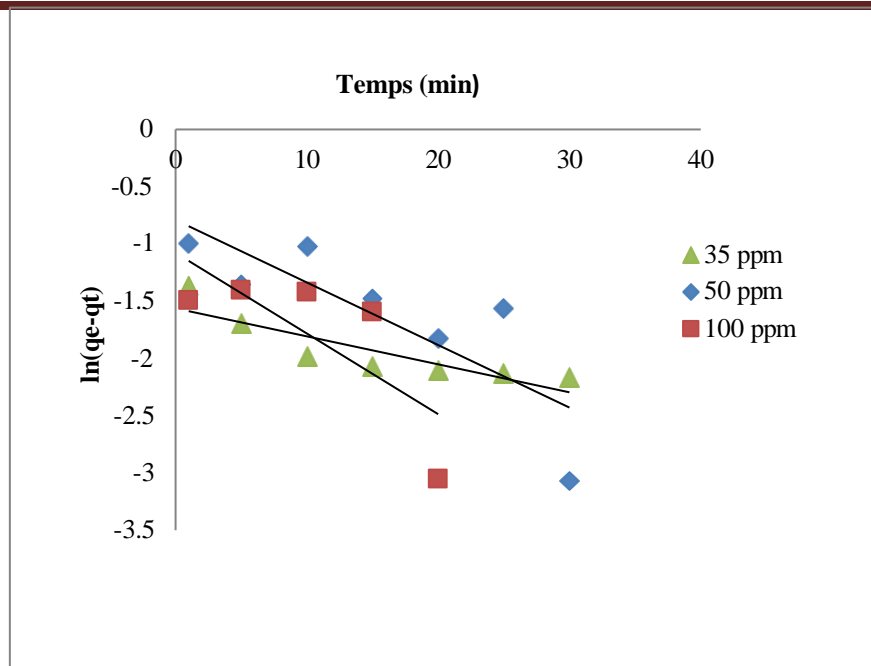


Figure IV.9 : Représentation linéaire du modèle cinétique du pseudo premier -ordre pour l'adsorption du BM sur GC

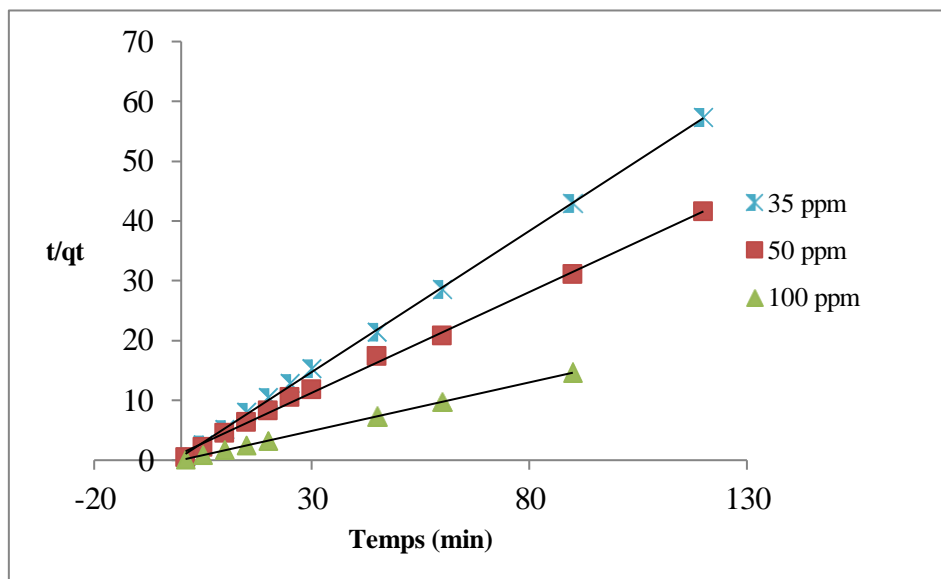


Figure IV.10 : Représentation linéaire du modèle cinétique du pseudo second- ordre pour l'adsorption du BM par GC.

Tableau IV.1 : Résultats d'applications du modèle cinétique du pseudo premier ordre et pseudo second ordre pour l'adsorption du bleu de méthylène sur GC

Modèle cinétique		Pseudo premier ordre			Pseudo second ordre		
<i>C</i> (ppm)	<i>Q_e exp</i> (mg/g)	<i>Q_e cal</i> (mg/g)	<i>K₁</i> (min ⁻¹)	<i>R</i> ²	<i>Q_e cal</i> (mg/g)	<i>K₂</i> (g/mg.min)	<i>R</i> ²
35	2,096	0,209	0,0244	0,7709	2,119	0,808	0,9995
50	3,018	0,091	0,0546	0,671	2,967	0,292	0,9972
100	6,182	0,340	0,0704	0,5697	6,165	5,731	0,9999

L'analyse des résultats consignés dans le **tableau IV.1** révèle que le modèle cinétique pseudo-second ordre se distingue par les coefficients de corrélation les plus élevés, compris entre 0,9972 et 0,9999, quelle que soit la concentration testée. Par ailleurs, les quantités adsorbées (q_e) estimées par ce modèle correspondent très étroitement aux valeurs mesurées expérimentalement. Ces observations confirment que le modèle pseudo-second ordre offre la meilleure description de la cinétique d'adsorption du bleu de méthylène (BM) sur les graines de coriandre (GC).

IV.6. Etude isothermique

IV.6.1 Modélisation des isothermes d'adsorption

Plusieurs modèles mathématiques d'adsorption, dont Langmuir et Freundlich ont été développés pour évaluer les résultats des essais. Ces modèles ont permis de calculer la capacité maximale d'adsorption ainsi que les paramètres d'adsorption. Les chercheurs ont tracé des isothermes linéaires à partir des modèles de Langmuir et de Freundlich. Les résultats obtenus ont permis de tracer les isothermes linéaires à partir des modèles de Langmuir et de Freundlich qui sont présentés respectivement dans les **figures IV.11** et **IV.12**. En exploitant la linéarité de ces courbes, on peut calculer les différentes Constantes relatives aux modèles de Langmuir et Freundlich qui sont indiquées dans le **tableau IV.2**.

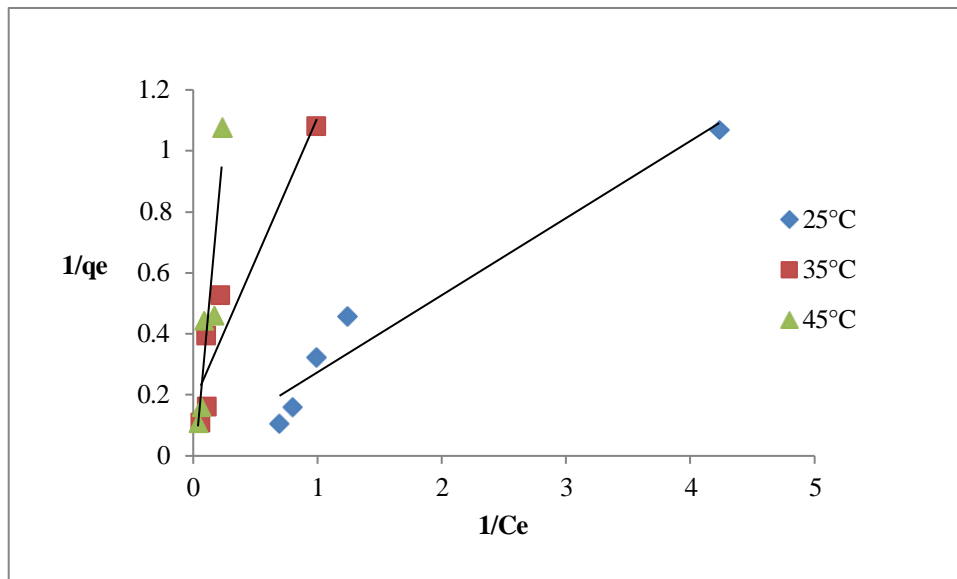


Figure IV.11 : Application du modèle linéaire de Langmuir sur l'isotherme d'adsorption du bleu de méthylène sur GC

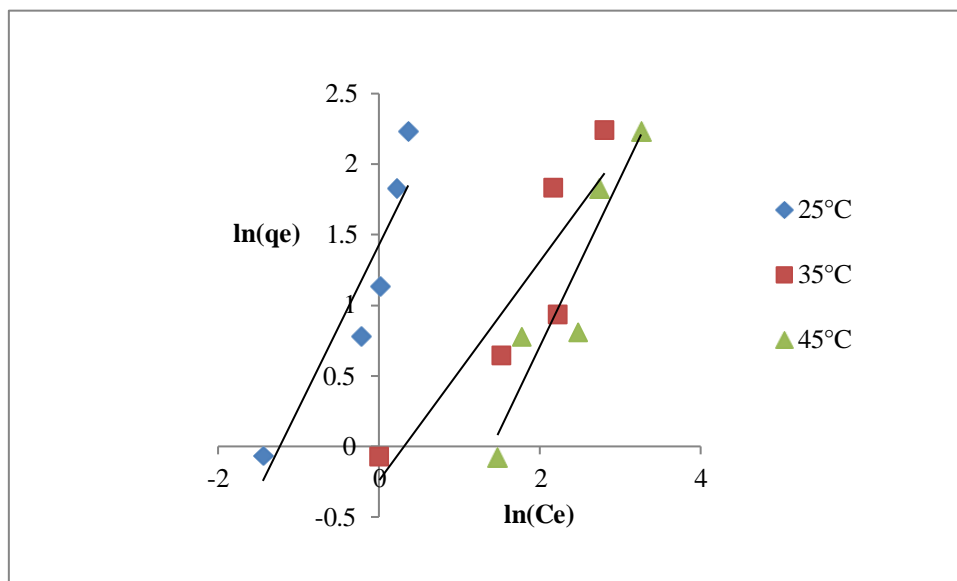


Figure IV.12 : Application du modèle linéaire de Freundlich sur l'isotherme d'adsorption du bleu de méthylène sur GC

Tableau IV.2 : Constantes relatives aux modèles de Langmuir et Freundlich pour l'adsorption du bleu de méthylène sur GC

Modèle		Langmuir		Freundlich		
<i>T (K)</i>	<i>K_L(l/mg)</i>	<i>Q_L(mg/g)</i>	<i>R²</i>	<i>n</i>	<i>K_F(l/mg)</i>	<i>R²</i>
298	11.8084	3.9572	0,949	0.863111	4.167849	0.8604
308	5.3925	1.0688	0,8907	1.287498	1.275069	0,8075
318	1.6625	0.2237	0,8476	0.838293	5.356978	0,878

Les résultats du **Tableau IV.2** indiquent que le modèle de Langmuir présente des coefficients de détermination (R^2) plus élevés, compris entre 0,8476 et 0,949, par rapport au modèle de Freundlich. Ces observations suggèrent que l'adsorption du (BM) sur (GC) est mieux décrite par le modèle de Langmuir, reflétant un mécanisme d'adsorption monomoléculaire sur une surface homogène.

IV.7. Etude thermodynamique

Afin d'identifier la nature du processus de la biosorption de BM sur la surface des GC (endothermique ou exothermique et spontanée), il est nécessaire de déterminer les différents paramètres thermodynamiques tels que l'énergie libre de Gibbs ΔG° (kJ. mol⁻¹), la variation d'entropie ΔS° (J.mol⁻¹ .K⁻¹) et de l'enthalpie d'adsorption ΔH° (kJ.mol⁻¹). Le tracé de $\ln K=f(1/T)$ permet d'obtenir les valeurs ΔH (pente de la droite) et ΔS (ordonnée à l'origine) (**figure IV.13**)

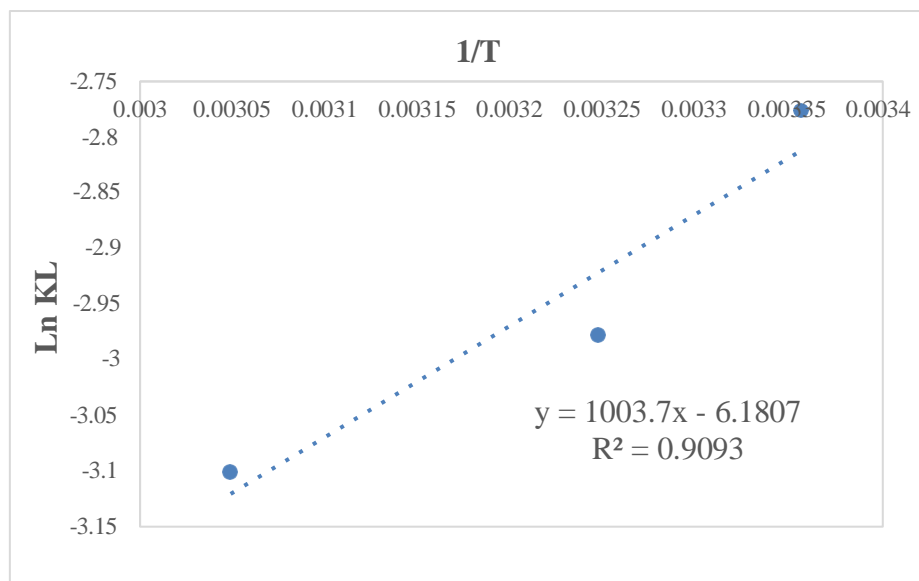


Figure IV.13 : Représentation linéaire de $\ln K = f(1/T)$ de l'adsorption de BM par GC

A partir de la représentation linéaire de $\ln K = f(1/T)$, on peut déduire toutes les valeurs estimées de ΔG° , ΔH° , ΔS° qui sont regroupés dans le **tableau IV.3**

Tableau IV.3 : Paramètres thermodynamiques pour l'adsorption du B M sur les Graines de coriandre

Température (K)	ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (J/mol.K)	ΔG° (kJ/mol)
298	-83.1307	0.0514	-98,4365
308			-98,9501
318			-99,9773

Les données du tableau précédent indiquent une enthalpie (ΔH) négative de -83,13 kJ/mol, confirmant ainsi que le processus d'adsorption est exothermique et de nature physico-chimique (physisorption). La valeur positive de l'entropie (ΔS) reflète une augmentation du désordre au niveau de l'interface entre le soluté et l'adsorbant lors de l'adsorption du bleu de méthylène (BM) sur les graines de coriandre (GC). De plus, les valeurs négatives de l'énergie libre de Gibbs (ΔG) attestent du caractère spontané de ce processus.

IV.8 Désorption

L'étude de la désorption du bleu de méthylène (BM) adsorbé sur les graines de coriandre a été réalisée en utilisant un mélange éthanol-eau. Les résultats de ces cycles d'adsorption-désorption sont présentés ci-dessous

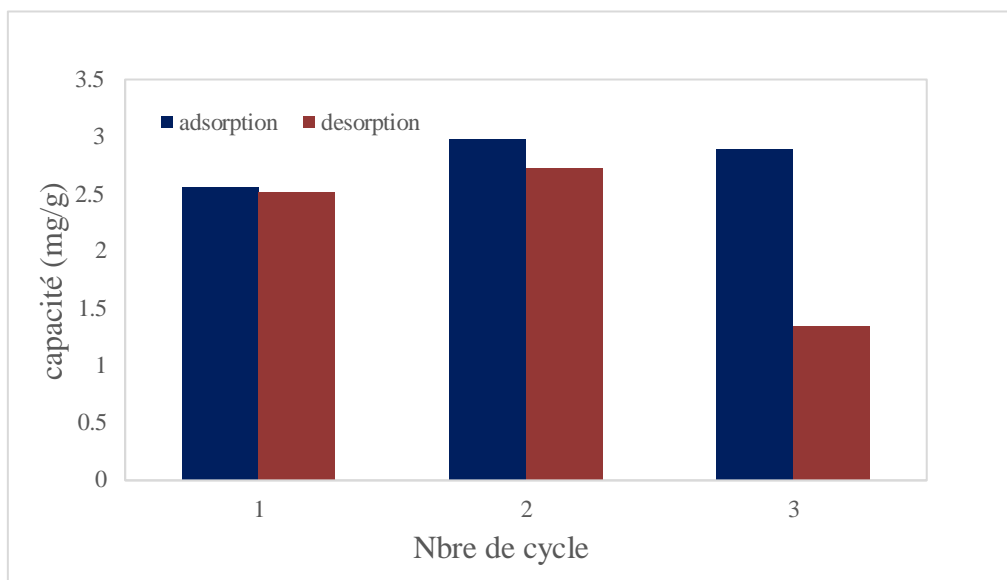


Figure IV.14 Représentation graphique des cycles de régénération du GC .

Les graines de coriandre présentent une capacité d'adsorption intéressante pour le bleu de méthylène, qui se maintient relativement acceptable sur les trois cycles. Cependant, l'efficacité de la désorption tend à diminuer avec le troisième cycle. Cela suggère qu'une partie du colorant pourrait rester fortement liée à l'adsorbant, limitant sa régénération complète. Des études plus approfondies pourraient être nécessaires pour optimiser les conditions de désorption et améliorer la réutilisabilité à long terme des graines de coriandre pour l'élimination du BM.

IV.9. Etude comparative

Les résultats de cette étude, portant sur la capacité d'adsorption de BM sur les graines de coriandre, a été ensuite comparé aux autres études utilisant le même adsorbat. Le **tableau IV.4** regroupe quelques paramètres comparatifs d'adsorption tels que le q_{max} , le pH optimal et la nature de l'isotherme.

Tableau IV.4 : Etude comparative de l'adsorption de BM sur différents adsorbants.

<i>Adsorbant</i>	<i>Temps d'équilibre</i>	<i>PH optimal</i>	<i>Modèle cinétique</i>	<i>Isotherme</i>	<i>q_{max} (mg/g)</i>	<i>référence</i>
phosphoric acid-treated pomegranate peel	120 min	8	Pseudo second ordre	Langmuir	14.03	[17]
Raphia taedigera seed activated carbon		10	Pseudo second ordre	langmuir	1.8245	[39]
Magnetic/Activated Charcoal/ β -Cyclodextrin/Alginate Polymer Nanocomposite	90 min	6	Pseudo second ordre	langmuir	2.079	[40]
Graines des coriandres	45 min	10	Pseudo second ordre	Langmuir	3.957	<i>Cette étude</i>
Poluvinil alcohol film	170 min	6	Pseudo second ordre	Langmuir	6.27	[19]
colocynthis seeds (CCSs) and peels (CCPs)	60 min	8	Pseudo second ordre	Langmuir	18.83	[20]
Cedrus atlantica sawdust type H	10 min	10	Pseudo second ordre	-	7.84	[41]
P.excels biochar (wood waste)	24h	7	Pseudo - second ordre	Langmuir	30	[42]

Suite à la comparaison des divers résultats présentés dans le **tableau IV.4**, il est possible d'affirmer que le biosorbant employé dans notre étude démontre une capacité d'adsorption favorable par rapport aux autres adsorbants étudiés. de plus, notre adsorbant n'a pas subi de traitement ou d'activation, ce qui représente un avantage tant sur le plan économique que technique en cas de pénurie d'autres adsorbants de qualité supérieure.

CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de cette étude, notre objectif était d'éliminer le colorant bleu de méthylène (BM) des eaux en utilisant la technique d'adsorption. Nous avons choisi d'utiliser les graines de coriandres (GC) comme adsorbant en raison de son faible coût et de sa grande disponibilité en Algérie, où nous avons mené notre étude.

En un premier lieu, nous avons procédé à une caractérisation des graines par spectromètre IR.

Afin d'optimiser la biosorption, nous avons effectué des essais visant à déterminer l'influence du pH de la solution, de la température du milieu, de la quantité de biosorbant, de la concentration initiale de l'adsorbat, de l'influence du temps de contact et de la force ionique. Nous avons ensuite procédé à une étude cinétique et une étude isothermique.

Les résultats obtenus nous ont permis de conclure que :

- ❖ L'analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) a révélé la présence de multiples bandes d'absorption qui reflètent les fonctions chimiques de la graines de coriandre.
- ❖ La capacité d'adsorption augmente avec l'augmentation de la masse de l'adsorbant jusqu'à atteindre une masse optimale de 0,8 g.
- ❖ L'étude de l'effet du pH a montré que le taux d'élimination du BM a atteint son maximum à un pH de 10.
- ❖ Le taux d'adsorption maximal du colorant sur l'adsorbant est atteint après un temps d'équilibre de 45 minutes, avec une capacité d'adsorption de 11,86 mg/g.
- ❖ La capacité d'adsorption est directement proportionnelle à l'augmentation de la concentration de l'adsorbat.
- ❖ La température joue un rôle déterminant dans l'adsorption du bleu de méthylène (BM) par les graines de coriandre (GC), où une température ambiante de 25 °C s'avère optimale pour favoriser ce processus.
- ❖ La présence de salinité (NaCl) indique que le taux d'adsorption augmente avec l'augmentation de la concentration en électrolyte, ce qui suggère que la force ionique augmente la quantité adsorbée.

- ❖ Le modèle cinétique de pseudo-second ordre est le plus adapté pour décrire la cinétique d'adsorption du BM par les GC, avec un coefficient de corrélation de $R^2 = 0,999$.
- ❖ Les isothermes d'adsorption montrent une correspondance significative avec l'isotherme de Langmuir, ce qui indique une adsorption monocouche avec une capacité d'adsorption maximale de 3,95 mg/g.
- ❖ Le processus est exothermique. Les valeurs négatives de ΔG° montrent que ce processus est de nature spontané.
- ❖ l'efficacité de la désorption a diminué progressivement, soulignant la nécessité d'optimiser les conditions de régénération pour une application durable.

L'étude comparative effectuée révèle que le biosorbant examiné au cours de notre recherche présente une capacité d'adsorption comparable à celle d'autres adsorbants. Il est important de noter que cet adsorbant n'est ni traité ni activé. Par conséquent, l'utilisation des graines de coriandre en tant qu'adsorbant local permet une élimination efficace et économiquement avantageuse des colorants cationiques tels que le BM. Cette méthode parvient à atteindre une capacité d'élimination acceptable, dépassant ainsi celle de nombreux autres adsorbants. Afin d'enrichir davantage les acquis de cette étude, nous recommandons de procéder :

- ❖ Une caractérisation plus détaillée de notre adsorbant en utilisant diverses techniques d'analyse, telles que la microscopie électronique à balayage (MEB) pour observer sa structure en surface, la détermination de sa surface spécifique par la méthode BET, ainsi que d'autres caractérisations de sa composition et de ses propriétés.
- ❖ Amélioration de la capacité de cet adsorbant par activation thermique ou chimique.
- ❖ L'étude d'utilisation de cet adsorbant pour l'élimination des colorants anionique (nous avons utilisé dans ce travail un colorant cationique).
- ❖ Utilisation de cet adsorbant pour l'élimination d'autres polluants organiques (pharmaceutiques, pétroliers ; ...) et inorganiques (les métaux lourds).
- ❖ Application aux effluents industrielles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] N'guessan Joachim KROU ;THÈSE de doctorat ;l'université de toulouse ; mars 2010
- [2] Khenfoussi, M. Boulghiti. C ; mémoire de master ; université ahmed draïa adrar ; juillet 2019
- [3] Benamraoui Faouzia ; mémoire de magister ; Université Ferhat Abbas Setif-1 ; 2014
- [4] M. Auta, B.H. Hameed .Chitosan–clay composite as highly effective and low-cost adsorbent for batch and fixed-bed adsorption of methylene blue. Chemical Engineering Journal 237 (2014) 352–361.
- [5] BROUK Alaa eddine ; Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 Guelma ; Juillet 2021.
- [6] Ala Abdessemed ; memoire de magister ; universite mentouri-constantine ; juin 2009 .
- [7] FEDDAL Imène ; these de doctorat ; universite djillali liabes, sidi bel abbes ; novembre 2016 .
- [8] ben houit. o, khenblouchi. d ; Mémoire de Master ; Université de Ghardaïa ; 2021.
- [9] Medekhel Abdallah ; Mémoire de master ; Université Echahid Hamma Lakhdar -El Oued ; Juin 2018
- [10] Ben saffedine. F ; Mémoire de master ; Université Amar Thelidji- Laghouat ; Juin 2015
- [11] Daham. Et Mahfoudi. H ; Mémoire de master ; Université Amar Thelidji- Laghouat ; Juin 2015
- [12] Bouit Sabiha et Amira Djahida ; Mémoire de master ; Université Mohammed Seddik Benyahia – Jijel ; juillet 2021.
- [13] Chemirik. D, Boumedine H ; Mémoire de master ; Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem ; Juin 2015
- [14] Boudaoud Asma ; Thèse du doctorat ; Université Amar Telidji –Laghouat ; avril 2019.
- [15] Rager T, Geoffroy A, Hilfiker R, Storey J. The crystalline state of methylene blue: A zoo of hydrates. Physical chemistry chemical physics : PCCP. 2012;14:8074-82.
- [16] Saadallah K, Chifaa AD, Mebrouk D, Maryam B, Mokhtar B, Soror S, et al. Potential of the

Références bibliographiques

Algerian pine tree bark for the adsorptive removal of methylene blue dye: Kinetics, isotherm and mechanism study. *Journal of Dispersion Science and Technology*.1-19.

[17] Waghmare C, Ghodmare S, Ansari K, Alfaisal FM, Alam S, Khan MA, et al. Adsorption of methylene blue dye onto phosphoric acid-treated pomegranate peel adsorbent: Kinetic and thermodynamic studies. *Desalination and Water Treatment*. 2024;318:100406.

[18] Loutfi M, Mariouch R, Mariouch I, Belfaquir M, ElYoubi MS. Adsorption of methylene blue dye from aqueous solutions onto natural clay: Equilibrium and kinetic studies. *Materials Today: Proceedings*. 2023;72:3638-43.

[19] Radoor S, Karayil J, Jayakumar A, Parameswaranpillai J, Lee J, Siengchin S. Ecofriendly and low-cost bio adsorbent for efficient removal of methylene blue from aqueous solution. *Scientific Reports*. 2022;12(1):20580.

[20] Alghamdi WM, El Mannoubi I. Investigation of Seeds and Peels of *Citrullus colocynthis* as Efficient Natural Adsorbent for Methylene Blue Dye. *Processes*. 2021;9(8):1279.

[21] Ahmad MA, Eusoff MA, Oladoye PO, Adegoke KA, Bello OS. Optimization and batch studies on adsorption of Methylene blue dye using pomegranate fruit peel based adsorbent. *Chemical Data Collections*. 2021;32:100676.

[22] Seidmohammadi A, Asgari G, Dargahi A, Leili M, Vaziri Y, Hayati B, et al. A comparative study for the removal of methylene blue dye from aqueous solution by novel activated carbon based adsorbents. *Progress in Color, Colorants and Coatings*. 2019;12(3):133-44.

[23] Sulthana, R., et al., Bioremediation of Brilliant Green cationic dye from water using Nutraceutical Industrial Coriander Seed Spent as an adsorbent: adsorption isotherms, kinetic models, and thermodynamic studies. *International Journal of Phytoremediation*, 2025. 27(1): p. 1-12.

[24] Vemula, M., Exploring the Potential of *Coriandrum sativum* Seed Powder for the Adsorptive Removal of Malachite Green Dye. *Reviews and Advances in Chemistry*, 2024. 14(3): p. 252-260.

[25] de Souza, C.C., et al., Activated carbon of *Coriandrum sativum* for adsorption of methylene blue: Equilibrium and kinetic modeling. *Cleaner Materials*, 2022. 3: p. 100052.

[26] Mukherjee, H. and S. Mukherjee, Sequestration of Brilliant Green Dye by coriander leaf: isotherm and kinetic studies. *Trends in Sciences*, 2022. 19(7): p. 3070-3070.

Références bibliographiques

- [27] Kadiri, L., et al., Adsorption properties of coriander seeds: Spectroscopic kinetic thermodynamic and computational approaches. *Journal of Molecular Liquids*, 2021. 343: p. 116971.
- [28] Taqui, S.N., et al., Valorization of Nutraceutical Industrial Coriander Seed Spent by the Process of Sustainable Adsorption System of Acid Black 52 from Aqueous Solution. *International Journal of Environmental Research*, 2019. 13(4): p. 639-659.
- [29] Kadiri, L., et al., Coriandrum Sativum seeds as a green low-cost biosorbent for methylene blue dye removal from aqueous solution: spectroscopic kinetic and thermodynamic studies. *J. Chem*, 2018. 7(3): p. 204-216.
- [30] Kadiri, L., et al., Coriandrum Sativum seeds as a green low-cost biosorbent for methylene blue dye removal from aqueous solution: spectroscopic kinetic and thermodynamic studies. *J. Chem*, 2018. 7(3): p. 204-216.
- [31] Shamkhi, H.J. and T.K. Hussein, Adsorption of lead, zinc, and nickel ions from wastewater using coriander seeds as an adsorbent. *Journal of Ecological Engineering*, 2022. 23(1).
- [32] Hafsa N. « Adsorption d'un colorant (bleu de Méthylène) par bisorbants » Université Ahmed Draïa ; Adrar.
- [33] Kadiri, L., et al., Coriandrum Sativum seeds as a green low-cost biosorbent for methylene blue dye removal from aqueous solution: spectroscopic kinetic and thermodynamic studies. *J. Chem*, 2018. 7(3): p. 204-216.
- [34] Shamkhi, H.J. and T.K. Hussein, Adsorption of lead, zinc, and nickel ions from wastewater using coriander seeds as an adsorbent. *Journal of Ecological Engineering*, 2022. 23(1).
- [35] AGA Sara ; thèse de doctorat ; université Ferhat Abbas – Setif 1 ; juin 2022.
- [36] Gaoui Sarah, Dib Mebarka ; Mémoire de master ; Université Amar Telidji – Laghouat ; juin 2022
- [37] AD Chifaa ; THÈSE DE DOCTORAT D/LMD ; Université Amar Telidji – Laghouat ; 2017
- [38] MACHROUHA, Amina & TAIBI, Zineb ; Mémoire de master ; Université Amar Telidji – Laghouat ; juin 2020.
- [39] Olasehinde EF, Abegunde SM, Adebayo MA. Adsorption isotherms, kinetics and

Références bibliographiques

thermodynamic studies of methylene blue dye removal using *Raphia taedigera* seed activated carbon. 2020.

[40] Yadav S, Asthana A, Chakraborty R, Jain B, Singh AK, Carabineiro SAC, et al. Cationic Dye Removal Using Novel Magnetic/Activated Charcoal/ β -Cyclodextrin/Alginate Polymer Nanocomposite. *Nanomaterials*. 2020;10(1):170.

[41] Bouyahia C, Rahmani M, Bensemlali M, El Hajjaji S, Slaoui M, Bencheikh I, et al. Influence of extraction techniques on the adsorption capacity of methylene blue on sawdust: Optimization by full factorial design. *Materials Science for Energy Technologies*. 2023;6:114-

[42] Koroma JM, Pu K-b, Zhang H, Bai J-r, Almouctar MS, Wang Y-h. Methylene blue adsorption on *Parinari excelsa* biochar in aqueous solution. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*. 2021;233:351-60.

عنوان المذكرة: استخدام مادة صديقة للبيئة لامتزاز صبغة كاتيونية في محلول مائي

المؤطر: د. عاد شفاء والسيدة ك. سعدالله

الاسم : محمد

اللقب : عاد

الاسم : محمد

اللقب : عنتر

ملخص: تتناول هذه الدراسة استخدام مادة حيوية مستخلصة من بذور الكزبرة كمواد ممتصة مستدامة لإزالة صبغة الأزرق الميثيلين من المياه. توضح النتائج التجريبية فعالية هذه المادة في الامتزاز، مما يجعلها خيارًا اقتصاديًا لمعالجة مياه الصرف. تم دراسة العوامل الرئيسية مثل كمية الممتص، والتركيز الابتدائي للصبغة، ومدة التلامس، ودرجة حموضة المحلول، ودرجة الحرارة، وقوة الأيونات بشكل منهجي. تم الوصول إلى حالة التوازن في الامتزاز خلال 45 دقيقة، مع زيادة في تركيز الصبغة تعزز من قدرة الامتزاز. تم تحقيق الإزالة المثلى عند درجة حموضة قلوية تقارب 10. تتبع حركية الامتزاز نموذج الرتبة الثانية الزائفة بشكل جيد، بينما نصف مساوية فريدلش بيانات التوازن بشكل أفضل، مع تسجيل قدرة امتصاص قصوى تبلغ 3.95 ملغم/غرام. **كلمات مفتاحية:** الامتزاز، الأزرق الميثيلين، بذور الكزبرة، الحركية والمتساويات الحرارية

Memory title: Use of an eco-friendly material for the adsorption of a cationic dye in aqueous solution

Name: AD

First name: Mohamed

Directed by: Dr. AD Chiffaa & Mrs.Saadallah Kelthoum

Name: Antar

First name: Med Bachir

Abstract: This research explores the use of coriander seed-based biomass as a sustainable adsorbent for eliminating methylene blue dye from water. The experimental findings demonstrate the material's effective adsorption capabilities, positioning it as an economical option for wastewater treatment. Key factors such as adsorbent dosage, initial dye concentration, contact duration, solution pH, temperature, and ionic strength were systematically examined. Adsorption equilibrium was achieved within 45 minutes, with higher dye concentrations enhancing uptake. Optimal removal occurred at alkaline pH levels around 10. The adsorption kinetics conformed well to the pseudo second-order model, while the Freundlich isotherm provided the best fit for equilibrium data, revealing a maximum adsorption capacity of 3.95 mg/g.

Key words: adsorption, Methylene blue, coriander seeds, kinetics and isotherms.

Titre du mémoire : Utilisation d'un matériau écologique pour l'adsorption d'un colorant cationique en solution aqueuse

Nom : AD

Prénom : Mohamed

Encadreur : Dr. AD Chiffaa & Mme K. Saadallah

Nom : Antar

Prénom : Med Bachir

Résumé : Cette recherche examine l'utilisation de biomasse à base de graines de coriandre comme adsorbant durable pour l'élimination du bleu de méthylène dans l'eau. Les résultats expérimentaux démontrent l'efficacité de ce matériau en adsorption, en faisant une solution économique pour le traitement des eaux usées. Les principaux paramètres tels que la dose d'adsorbant, la concentration initiale du colorant, la durée de contact, le pH de la solution, la température et la force ionique ont été étudiés systématiquement. L'équilibre d'adsorption a été atteint en 45 minutes, avec une augmentation de la concentration en colorant favorisant la capacité d'adsorption. L'élimination optimale s'est produite à un pH alcalin proche de 10. La cinétique d'adsorption suit bien le modèle pseudo-second ordre, tandis que l'isotherme de Freundlich décrit au mieux les données d'équilibre, révélant une capacité maximale d'adsorption de 3,95 mg/g.

Mots clés : adsorption, Bleu de méthylène, graines de coriandre, cinétique et isotherme.