

N° d'ordre :

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOD MAMMARI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE CHIMIE



DOMAINE : SCIENCES DE LA MATIERE
FILIERE : CHIMIE
MEMOIRE DE MASTER
SPECIALITE : CHIMIE D'ENVIRONNEMENT

THEME

*Étude de l'adsorption du Bleu de Méthylène sur un
biomatériau (Cactus)*

Présenté par : M^{lle} IAOUADARENE Sara

Soutenu publiquement, le 25 / 06 / 2024, devant le Jury composé de :

M^{me} AZIRI	<i>SABRINA</i>	<i>MCB</i>	UMMTO	Présidente
M^{me} ABERKANE	<i>Dihia</i>	MAB	UMMTO	Encadrante
M^{me} BOZETINE	<i>Hakima</i>	MCA	UMMTO	Co-Encadrante
Mr LATEB	Yacine	MAA	UMMTO	Examineur



REMERCIEMENT

Je souhaite exprimer mes sincères remerciements à tous les membres du **laboratoire de Chimie Appliquée et Génie Chimique (LCAGC)**, chercheurs et ingénieurs, avec qui j'ai eu le plaisir de collaborer.

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement ma promotrice, **Mme ABERKANE Dihia**, pour son soutien précieux, ses conseils avisés et ses orientations tout au long de la réalisation de mon travail de recherche.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers ma co-promotrice, **Mme BOZETINE**, pour son encadrement attentif et ses précieuses contributions à l'élaboration de mon mémoire.

Un grand merci à **Mme AZIRI**, présidente de ce jury, pour avoir accepté de présider cette soutenance avec bienveillance et rigueur.

Je suis reconnaissante envers **M. LATEB** d'avoir accepté d'évaluer mon travail. C'est pour moi un privilège de pouvoir vous présenter mes recherches et de bénéficier de vos commentaires éclairés.

DEDICACE

Je dédie ce travail :

A mon père,

Je te remercie du fond de cœur pour ton soutien indéfectible tout au long de mon parcours académique. Tes sacrifices et ta confiance en moi m'ont permis de croire en mes capacités et de réaliser mes ambitions. Ce mémoire est autant le fruit de mon travail que le reflet de ton amour et de ta bienveillance .

A ma mère chérie,

Ange gardien et source d'inspiration inépuisable , je te dédie ce mémoire en signe de reconnaissance infinie pour ton amour inconditionnel et ton soutien indéfectible .Grace à ta force et à tes encouragements, j'ai pu surmonter les obstacles et réaliser mes rêves .

A mes frères,compagnons de route et amis de toujours,

Je vous dédie ce mémoire en souvenir de tous les moments de complicité et de partage que nous avons vécus ensemble.

Merci d'avoir toujours été là pour moi, pour me faire rire et pour me remonter le moral lorsque j'en avais besoin .Ce mémoire est une célébration de notre fraternité et de l'amour indéfectible qui nous lie .

A mes sœurs,modèles de réussite et d'inspiration,

Je vous admire pour vos parcours respectifs et pour la force de caractère dont vous faites preuve au quotidien .Ce mémoire est dédié à l'exemple que vous me donnez et à l'envie que j'ai de vous ressembler.

J'espère qu'un jour ,je pourrai vous rendre fières de moi autant que vous me rendez fière aujourd'hui .

A mes chers amis proches où loin ,

Merci à tous

Sara

SOMMAIRE

Sommaire

Liste des abréviations.

Liste des figures.

Liste des tableaux.

Introduction générale..... 1

CHAPITRE I : ADSORPTION

I.1. Définition de l'adsorption 3

I.2. Les type d'adsorption..... 3

 I.2.1. Adsorption chimique..... 3

 I.2.2. Adsorption physique 3

I.3. Principe de l'adsorption..... 3

 I.3.1. Diffusion externe 4

 I.3.2. Diffusion interne 4

 I.3.3. Diffusion de surface 4

I.4. Cinétique d'adsorption..... 5

 I.4.1 Modèle du pseudo-premier ordre..... 5

 I.4.2 Modèle du pseudo-second..... 5

 I.4.3 Modèle d'Elovich..... 6

 I.4.4 Modèle de diffusion intraparticulaire..... 6

I.5. Modélisation des isothermes d'adsorption..... 6

 I.5.1 Modèle de Langmuir..... 7

 I.5.2. Modèle de Freundlich..... 7

 I.5.3 Modèle de Temkin 8

I.6. Facteurs influençant l'adsorption..... 8

 I.6.1. PH de la solution 9

 I.6.2. Surface spécifique 9

 I.6.3. Nature de l'adsorbat 9

 I.6.4. Concentration de l'adsorbat..... 9

I.6.5. Porosité	9
I.6.6. L'effet de température	9
I.7. Paramètres thermodynamiques d'adsorption.....	10
I.8 Exemples d'applications industrielles de l'adsorption.....	11
I.8.1. Application de l'adsorption en phase gazeuse	11
I.8.2. Application de l'adsorption en phase liquide.....	12
I.9 Capacité d'adsorption	12

CHAPITRE II: GENERALITES SUR LES COLORANTS

II.1. Définition des colorants	13
II.2. Classification	13
II.2.1. Classification chimique	13
II.2.2. Classification tinctoriale	13
II.3. Utilisation et application des colorants	14
II.4. Procédés d'élimination des colorants	14
II.4.1. Méthodes physiques	14
II.4.1.1. Filtration sur membrane	14
II.4.1.2. Coagulation–floculation	15
II.4.1.3. Adsorption.....	15
II.4.2. Méthodes chimiques.....	15
II.4.3. Méthodes biologiques	15
II.5. Toxicités des colorants.....	16
II.5.1. Dangers évidents.....	16
II.5.1.1. Eutrophisation.....	16
II.5.1.2. Sous oxygénation.....	16
II.5.1.3. Couleur, turbidité, odeur.....	16
II.5.2. Dangers à long terme.....	16
II.5.2.1. Persistance.....	16
II.5.2.2. Bioaccumulation.....	17
II.5.2.3. Cancer.....	17
II.5.2.4. Sous-produits de chloration.....	17

II.6. Bleu de méthylène.....	17
II.6.1. Toxicité du bleu de méthylène	18

CHAPITRE III: MATERIEL ET METHODES

III.1. Matériels	19
III.2. Produits chimiques utilisés	19
III.3. Préparation	20
III.4. Caractérisation.....	20
III .4.1. Spectroscopie Infrarouge à Transformé de Fourier (IRTF)	20
III.4.2. Le pH du point de charge nulle (pHpzc)	21
III .4.3. La teneur en humidité	21
III.4.4. La teneur de cendre	21
III.5. Caractérisation de l'adsorbat (BM).....	22
III .5.1. Bleu de méthylène BM	22
III.5.2. Courbe d'étalonnage	22
III.6. Spectrophotométrie UV-Visible.....	23
III.7. Optimisation des paramètres expérimentaux	24
III .7.1. Effet de la masse d'un adsorbant.....	24
III .7.2. Effet du pH	24
III.7.3. Effet de la concentration initiale du colorant.....	24
III .7.4. Effet de la température.....	25
III.7.5. Effet de la vitesse d'agitation	25
III .7.6. Effet de temps de contact	25
III.8. Essai d'adsorption de bleu de méthylène sur cactus.....	25

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Caractérisation de l'adsorbant	26
IV.1.1. Caractéristiques physico-chimiques.....	26
IV.1.2 pH de charge nulle de cactus.....	26
IV.1.3. Analyse par spectrométrie Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF).....	27

IV.2. Influence des paramètres d'adsorption.....	28
IV.2.1. Effet du temps de contact.....	28
IV.2.2. Effet du pH.....	29
IV.2.3. Effet de la dose de l'adsorbant.....	30
IV.2.4. Effet de la vitesse d'agitation.....	31
IV.2.5. Effet de la température.....	32
IV.3. Etude des isothermes d'adsorption.....	35
IV.4. Modélisation des isothermes d'adsorption.....	35
IV.4.1. Modèle de Langmuir.....	36
IV.4.2. Modèle de Freundlich.....	36
IV.4.3. Modèle de Temkin.....	37
IV.5. Modèles Cinétiques.....	39
IV.5.1. Modèle cinétique du premier ordre.....	39
IV.5.2. Modèle cinétique du second ordre.....	39
IV.5.3. Modèle d'Elovich.....	40
IV.5.4. Modèle de diffusion intra-particulaire.....	41
Conclusion générale.....	42
Références bibliographiques.....	

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

β : constante de désorption ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$).

ϵ : Coefficient d'extinction molaire de la substance en solution ($\text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$).

ΔH° : Variation de l'enthalpie standard ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$).

ΔG° : Variation de l'énergie libre standard ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$).

ΔS° : Variation de l'entropie standard ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

A: absorbance (sans unité).

b_T : chaleur d'adsorption ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$).

C_0 : concentration initiale du substrat ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

C_e : concentration à l'équilibre ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

C_t : concentration résiduelle du colorant (BM) à l'instant t ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

l : longueur du trajet optique où se trouve l'espèce absorbante (cm).

T: Transmittance.

I : Intensité du rayon transmis.

I_0 : Intensité du rayon incident.

k_{id} : constante de vitesse de diffusion intraparticulaire ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{mn}^{1/2}$).

K_L : constante de Langmuir ($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$).

K_F : constante de Freundlich ($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$).

K_T : constante de Temkin ($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$).

pH_{pzc} : pH au point zéro charge.

q_t : capacité d'adsorption au temps t ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$).

q_e : Quantité adsorbée à l'équilibre ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$).

q_m : Quantité maximale d'adsorption ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$).

R^2 : Coefficient de corrélation.

t : temps (min).

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

T : température (°C).

V : Volume de la solution (L).

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 :	Mécanisme du transport d'un adsorbant au sein d'un grain de solide.....	4
Figure II.1:	Structure chimique du bleu de méthylène.....	19.
Figure III.1 :	Photos du traitement des raquettes de cactus fraîches jusqu'au broyage.....	21
Figure III.2:	Exemple de courbe d'étalonnage de la solution de bleu de méthylène.....	24.
Figure III.3 :	L'appareil UV-visible utilisé.....	25
Figure IV.1 :	Détermination du pH_{pzc} pour le cactus.....	29
Figure IV.2 :	Spectre Infra-Rouge de la poudre de cactus	29
Figure IV.3:	Effet du temps de contact sur le rendement d'adsorption du BM par le cactus	31
Figure IV.4 :	Effet du pH initial sur le rendement d'adsorption du BM par le cactus.....	32
Figure IV.5 :	Effet de la dose de cactus sur le rendement d'adsorption du BM.....	33
Figure IV.6:	Effet de la vitesse d'agitation sur le rendement d'adsorption du BM par le cactus	34
Figure IV.7 :	Effet de la Température sur le rendement d'adsorption du BM par le cactus..	35
Figure IV.8 :	Variation de $\ln(K_C)$ en fonction de $1/T$	35
Figure IV.9 :	Isotherme d'adsorption du colorant BM sur le cactus.....	37
FigureIV.10:	Isothermes d'adsorption du BM selon le modèle deLangmuir.....	38
FigureIV.11:	Isothermes d'adsorption du BM selon le modèle de Freundlich.....	38
Figure IV.12:	Isothermes d'adsorption du BM selon le modèle de Temkin.....	40
Figure IV.13:	Graphe $\ln(q_e - q_t)$ en fonction du temps de contact.....	41
Figure IV.14:	Graphe t/q_t en fonction du temps de contact.....	42
Figure IV15:	Graphe q_t en fonction de $\ln(t)$	42
Figure IV.16:	Graphes q_t en fonction de $t^{1/2}$	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.1:	Caractéristiques des produits chimiques utilisés.....	20
Tableau III.2:	Les propriétés physico-chimiques du BM.....	23
Tableau IV.1	Caractéristiques physico-chimiques de la poudre de cactus.....	28
Tableau IV.2 :	Paramètres thermodynamiques calculés dans l'intervalle de la température étudié.....	36
Tableau IV.3 :	Valeurs des constantes de Freundlich.....	39
Tableau IV.4 :	Valeurs des constantes de Tamkin.....	40

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, les principales sources de pollution environnementale sont principalement liées à la production et à l'utilisation d'énergies diverses, ainsi qu'aux activités industrielles et agricoles. Parmi les polluants significatifs, on trouve les colorants une fois dissous dans l'eau, peuvent être difficiles à traiter en raison de leur origine synthétique et de leur structure moléculaire complexe, les rendant stables et peu biodégradables (Lei Yu et al., 2014; Robinson et al., 2001). Ces substances représentent un risque pour la santé et un problème environnemental majeur, justifiant la nécessité de limiter leur présence par des méthodes de traitement appropriées.

L'élimination de ces polluants des effluents industriels est couramment réalisée par diverses techniques physiques, chimiques et biologiques, telles que la floculation, la précipitation, l'échange d'ions, la filtration sur membrane, l'irradiation et l'ozonation. Cependant, ces méthodes peuvent être coûteuses (Robinson et al., 2001). L'adsorption reste l'une des techniques les plus couramment utilisées. De nombreux travaux ont été menés sur l'élimination des colorants des solutions aqueuses par adsorption sur divers matériaux solides, notamment la poudre de cactus (Choy et al., 1999; Kannan et al., 2002).

De nombreux chercheurs à travers le monde explorent l'utilisation de matériaux précurseurs peu coûteux disponibles localement, tels que les déchets agricoles, pour cette application (Kifuani et al., 2018). Dans cette étude, nous avons évalué l'efficacité d'un adsorbant, la poudre de cactus, pour l'élimination d'un colorant textile basique, le bleu de méthylène (BM).

Ce manuscrit se divise en deux parties principales : une partie théorique et une partie expérimentale.

La partie théorique est structurée autour de trois chapitres : Le premier offre une synthèse détaillée de la théorie de l'adsorption. Le deuxième chapitre présente des généralités sur les colorants. Enfin, le troisième chapitre explore l'application des cactus.

La partie expérimentale se compose également de deux chapitres : Le premier chapitre expose le matériel et les protocoles expérimentaux utilisés. Le deuxième chapitre porte sur l'analyse et la discussion des résultats expérimentaux obtenus, notamment la caractérisation de l'adsorbant (la poudre de cactus) à travers des techniques telles que la Spectroscopie Infrarouge

à Transformée de Fourier (IRTF) et des analyses physico-chimiques comme le taux de cendres, d'humidité et le pH du point de zéro charge (pH_{pzc}).

En conclusion, nous résumons les principaux résultats obtenus et proposons des perspectives pour de futures recherches.

PREMIERE PARTIE
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE I : ADSORPTION

I.1. Définition de l'adsorption

L'adsorption est le mécanisme selon lequel les molécules d'une substance, connue sous le nom d'adsorbat (qu'il s'agisse d'un gaz ou d'un liquide), se fixent à la surface d'un matériau solide, appelé adsorbant. Ce processus est influencé par les propriétés de la surface du solide ainsi que par les caractéristiques physico-chimiques de l'adsorbat ([Bouacherine, 2013](#)).

I.2. Types d'adsorption

L'adsorption peut être classée en deux types distincts : physique ou chimique, en fonction des interactions qui se manifestent entre l'adsorbat et la surface de l'adsorbant.

I.2.1. Adsorption chimique

L'adsorption chimique également appelée chimio-sorption, se caractérise par la formation de liaisons chimiques covalentes plus permanentes entre l'adsorbat et la surface de l'adsorbant. Cette forme d'adsorption se distingue par des énergies d'adsorption plus élevées, généralement entre 20 et 100 Kcal.mol⁻¹, par opposition aux quelques Kcal.mol⁻¹ observés dans l'adsorption physique. De plus, elle se traduit par une fixation irréversible de l'adsorbat sur des sites d'adsorption très spécifiques, et elle est particulièrement favorisée à des températures élevées. Dans ce type d'adsorption, le temps de rétention est prolongé et seule la première couche liée à la surface adsorbante est chimiquement adsorbée ; les couches subséquentes, le cas échéant, sont retenues par physisorption ([Jozja, 2003](#)).

I.2.2. Adsorption physique

L'adsorption physique, également appelée physisorption, se produit généralement à des températures basses. Dans ce processus, les molécules s'adsorbent sur plusieurs couches, formant des multicouches, avec des énergies d'adsorption souvent inférieures à 20 Kcal.mol⁻¹. Les interactions entre les molécules du soluté, également appelé adsorbât, et la surface du solide, l'adsorbant, sont principalement assurées par des forces électrostatiques telles que les dipôles, les liaisons hydrogène ou les forces de Van der Waals ([Slasli, 2002](#)).

I.3. Principe de l'adsorption

Le transfert de masse des molécules se produit de la phase fluide vers le cœur de l'adsorbant. Ce processus se déroule à l'intérieur d'un grain d'adsorbant. Les matériaux adsorbants sont dotés de grandes surfaces spécifiques, souvent développées sur des supports poreux industriels. Lors de l'adsorption d'une espèce chimique, telle qu'une molécule de polluant présente dans une solution aqueuse, ce processus prend place ([Yunus Önal, 2006](#)).

I.3.1. Diffusion externe

Cela suppose le déplacement du soluté, qu'il s'agisse de molécules de la phase liquide ou gazeuse, depuis la solution vers la surface externe de l'adsorbant. Le transfert de matière est influencé par le mouvement du liquide sur la surface de l'adsorbant.

I.3.2. Diffusion interne

Les molécules du liquide entrent à l'intérieur des pores de l'adsorbant, et leur diffusion à travers ces pores est déterminée par le gradient de concentration du soluté.

I.3.3. Diffusion de surface

Cela désigne l'attachement des particules à la surface des pores de l'adsorbant.

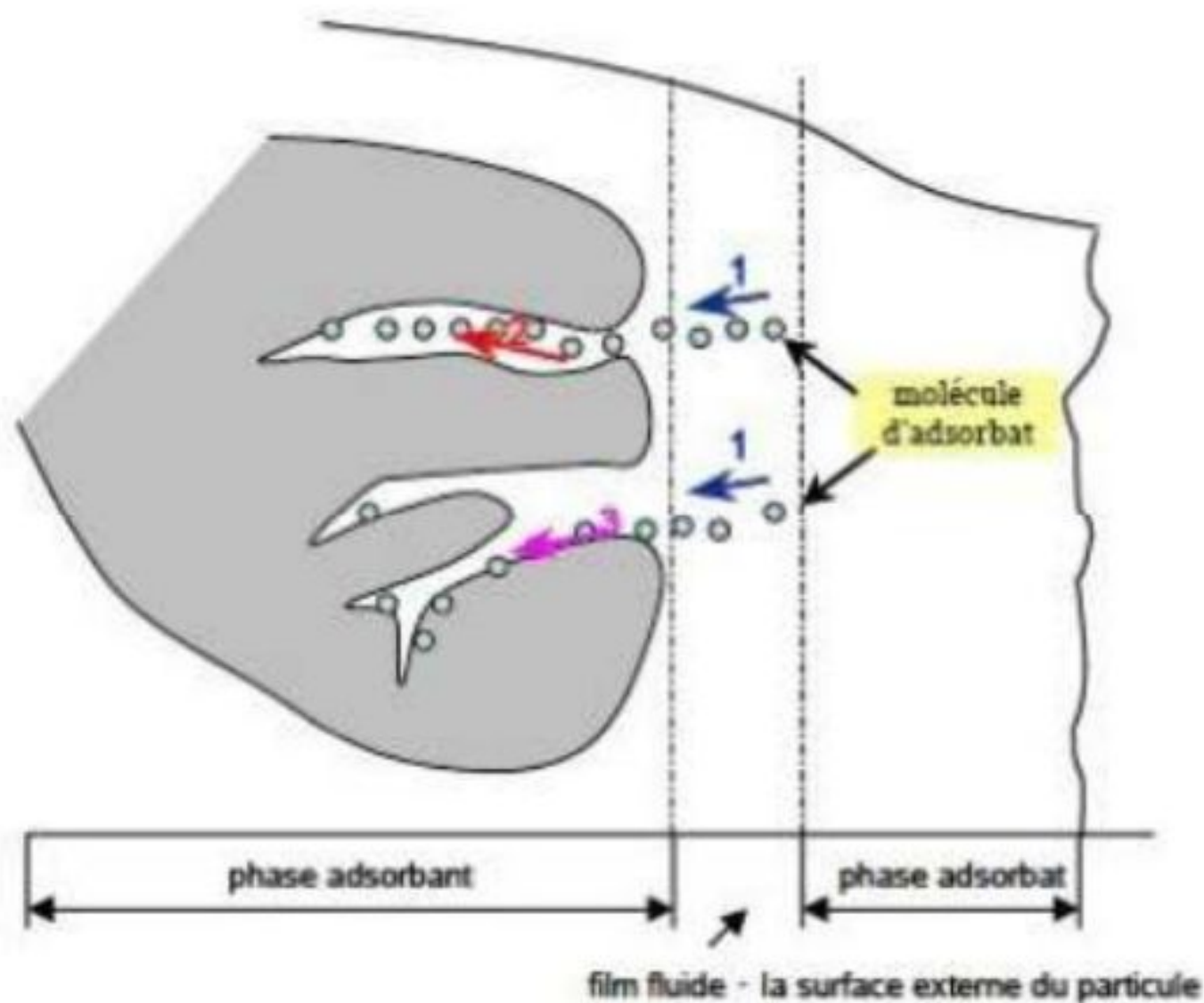


Figure I.1 : mécanisme du transport d'un adsorbat au sein d'un grain de solide.

I.4. Cinétique d'adsorption

L'étude cinétique des processus d'adsorption offre des informations sur le mécanisme d'adsorption et sur la manière dont les solutés se déplacent de la phase liquide à la phase solide. De nombreux modèles cinétiques sont documentés dans la littérature. Dans ce qui suit, nous exposons les modèles les plus fréquemment employés pour l'adsorption des solutés en solution liquide (Greanga, 2004).

I.4.1 Modèle du pseudo-premier ordre (Temkin et Pyzhev, 1940)

L'expression de ce modèle est généralement formulée de la manière suivante :

$$\frac{dq}{dt} = K_1(q_e - q_t) \quad \text{I.1}$$

K_1 : constante du vitesse de pseudo-premier ordre ($\text{mg.g}^{-1}.\text{min}^{-1}$)

q_e : quantité adsorbé à l'équilibre (mg.g^{-1})

q_t : quantité d'adsorption au temps t (mg.g^{-1})

I.4.2 Modèle du pseudo-second ordre (Ho, 2006)

Ce modèle permet de décrire la cinétique d'adsorption en supposant une adsorption rapide du soluté sur les sites à haute énergie, suivie d'une adsorption plus lente sur les sites à faible énergie. L'expression de ce modèle est généralement formulée comme suit :

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

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

q_e : quantité adsorbé à l'équilibre (mg.g^{-1})

q_t : quantité d'adsorption au temps t (mg.g^{-1})

I.4.3 Modèle d'Elovich

Ce modèle décrit principalement l'adsorption chimique sur des adsorbants très hétérogènes, mais il ne donne aucun mécanisme d'interaction précis pour l'adsorbat - adsorbant (Low, 1960). Ce modèle est représenté par l'équation suivante :

$$\frac{dq_t}{dt} = \alpha e^{-\beta q_t} \quad \mathbf{I.3}$$

avec:

q_t : capacité d'adsorption au temps t (mg g^{-1}).

a : taux d'adsorption initiale ($\text{mg g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$).

β : constante de désorption ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$), liée à la surface externe et à l'énergie d'activation de la chimisorption.

I.4.4 Modèle de diffusion intraparticulaire

Le modèle de diffusion intra-particulaire ou le modèle de Weber et Morris suppose que le processus de diffusion est la seule étape limitante, et donc c'est l'étape la plus lente qui contrôle l'adsorption (Weber et Morris, 1963). Il est représenté par l'équation suivante:

$$q_t = k_{id} t^{1/2} + C \quad \mathbf{I.4}$$

Avec :

q_t : capacité d'adsorption au temps t ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$).

k_{id} : constante de vitesse de diffusion intraparticulaire ($\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{mn}^{1/2})^{-1}$).

t : temps (min).

C : constante qui donne une idée de l'épaisseur de la couche limite (mg g^{-1}).

I.5. Modélisation des isothermes d'adsorption

Divers modèles mathématiques ont été développés pour décrire les interactions entre l'adsorbant et l'adsorbat. Pour notre étude, nous avons choisi d'utiliser trois des modèles empiriques les plus populaires : le modèle de Freundlich, Langmuir et celui de Temkin . En général, ces modèles offrent une représentation satisfaisante des isothermes d'adsorption (Chitour, 2004).

I.5.1 Modèle de Langmuir (Langmuir, 1918)

Le modèle de Langmuir repose sur les hypothèses suivantes :

- L'adsorbant possède une surface idéalement uniforme, où tous les sites d'adsorption ont des propriétés d'adsorption équivalentes.
- Aucune interaction n'existe entre le soluté adsorbé et celui en solution.
- L'adsorption est limitée à une monocouche.

L'équation qui exprime le modèle de Langmuir est la suivante :

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad \mathbf{I.5}$$

Avec q_e : Quantité adsorbée à l'équilibre (mol.g⁻¹).

q_m : Quantité adsorbée par la monocouche (mg.g⁻¹).

C_e : Concentration du polluant à l'équilibre (mg.L⁻¹).

K_L : Constante de Langmuir (L.mg⁻¹).

Cette équation peut être linéarisée comme suit :

$$\frac{C_e}{q_m} = \frac{1}{q_m} C_e + \frac{1}{q_m K_L} \quad \mathbf{I.6}$$

En traçant $(C_e/q_e)=f(C_e)$, on déduit la pente $(1/q_m)$ et l'ordonnée à l'origine $(1/K_L.q_m)$.

Ce qui permet de déterminer les deux paramètres caractéristiques de l'équilibre : K_L et q_m .

I.5.2. Modèle de Freundlich (Freundlich, 1906)

Le modèle de Freundlich suppose que la surface de l'adsorbant est hétérogène, avec une distribution non uniforme de l'énergie des sites d'adsorption sur la surface. La forme non linéaire de ce modèle est exprimée par l'équation suivante :

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad \mathbf{I.7}$$

Avec q_e : Quantité de la monocouche (mg.g⁻¹).

C_e : Concentration à l'équilibre (mol.L⁻¹).

K_F : Constante de Freundlich (L.mg⁻¹)

n : Constante reliée à l'affinité entre l'adsorbant et l'adsorbat.

Les constantes caractéristiques K_F et $1/n$ du système adsorbant/adsorbat étudié sont déduits expérimentalement à partir des points de l'isotherme en utilisant la forme linéaire de l'équation précédente :

$$\ln q_e = \ln K_F + 1/n \ln C_e \quad \mathbf{I.8}$$

En traçant $\ln q_e = f(\ln C_e)$, on déduit la pente ($1/n$) et l'ordonnée à l'origine ($\ln K_F$).

1.5.3 Modèle de Temkin

Le modèle de Temkin suppose que la chaleur d'adsorption varie linéairement avec le degré de recouvrement, en raison des interactions entre les molécules adsorbées sur une surface uniforme. Alors que sur une surface non uniforme, cet effet peut se superposer à ceux dus à l'hétérogénéité de la surface.

Le modèle de Temkin est une application de la relation de Gibbs pour les adsorbants dont la surface est considérée comme énergétiquement homogène. L'isotherme de Temkin est représentée par l'équation suivante (Temkin, 1940) :

$$q_e = \frac{RT}{b_T} \ln(k_T C_e) \quad \text{I.9}$$

avec

q_e : quantité du colorant adsorbé à l'équilibre (mg.g^{-1}),

C_e : concentration du colorant à l'équilibre (mg.L^{-1}),

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

T : température absolue (K),

b_T : chaleur d'adsorption (kJ.mol^{-1}),

K_T : constante de Temkin (L.mg^{-1}).

1.6. Facteurs influençant l'adsorption

L'adsorption des molécules de liquides par les solides peut être influencée par de nombreux facteurs, parmi lesquels :

1.6.1. pH de la solution

Le pH est un paramètre essentiel à prendre en compte dans les processus d'adsorption des colorants puisqu'il agit sur l'état d'ionisation de la surface de l'adsorbant en contact avec les molécules d'adsorbat (Qlihaa et al., 2016).

1.6.2. Surface spécifique

La surface spécifique se réfère à la surface accessible par unité de masse d'adsorbant. Il est évident que l'objectif est de donner aux adsorbants une grande surface spécifique (Ayari et al., 2004).

I.6.3. Nature de l'adsorbat

Une bonne adsorption nécessite une affinité initiale entre le solide et le soluté. En général, les solides polaires ont une préférence pour adsorber d'autres substances polaires, tandis que les solides non polaires ont une préférence pour les substances non polaires. De plus, l'affinité pour le substrat augmente avec la masse moléculaire de l'adsorbat (Mazouz et Khelaifia, 2018).

I.6.4. Concentration de polluant

L'adsorption d'une substance augmente avec l'accroissement de sa concentration dans la solution. Cependant, cette croissance n'est pas proportionnelle car elle se produit lentement. Une bonne adsorption nécessite une affinité entre le solide et le soluté.

Si les dimensions des pores de l'adsorbant sont inférieures aux diamètres des molécules de l'adsorbat, l'adsorption de ce composé ne se produit pas, même si la surface de l'adsorbant a une grande affinité pour ce composé. (Dali-Youcef et al., 2006)

I.6.5. Porosité

La porosité désigne l'ensemble des vides (pores) présents dans un matériau solide, ces vides étant remplis de fluides (liquide ou gaz). Elle est étroitement liée à la distribution de la taille des pores et reflète la structure interne des adsorbants microporeux. Une structure poreuse peut être de deux types :

- Fermée, lorsque les pores ne sont pas connectés entre eux,
- Ouverte, lorsque les pores sont interconnectés, formant ainsi des canaux très fins. (Masschelein, 1996).

I.6.6. Température

L'adsorption est un phénomène endothermique ou exothermique suivant le matériau adsorbant et la nature des molécules adsorbées selon le mécanisme d'adsorption (chimisorption ou physisorption).

L'augmentation de la température conduit, en effet, d'une part à une augmentation des vitesses (notamment pour les étapes de diffusion), mais aussi à une désorption plus importante, ce qui se traduit globalement par une diminution des capacités d'adsorption (Baudu et al 2001).

I.7. Paramètres thermodynamiques d'adsorption

Les paramètres thermodynamiques tels que les variations standard de l'enthalpie libre (ΔG°), de l'enthalpie (ΔH°) et de l'entropie (ΔS°), ont été calculées à l'aide des équations suivantes (Y Önal et al, 2007) :

$$K_C = \frac{q_e}{C_e} \quad \text{I.10}$$

avec :

q_e : quantité d'adsorbat fixée par unité de masse de solide à l'équilibre (mg.g^{-1}), elle est définie par la relation (15) :

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)}{m} \times V \quad \text{I.11}$$

OÙ :

C_e : Concentration en adsorbat dans le sumageant à l'équilibre (mg.L^{-1})

V : Volume de la solution (L)

Ce qui donne :

$$K_C = \frac{(C_0 - C_e)}{C_e} \times \frac{V}{m} \quad \text{I.12}$$

La variation de l'enthalpie libre ΔG° d'un système subissant une transformation à température et pression constantes est donnée par l'équation suivante :

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T \cdot \Delta S^\circ \quad \text{I.13}$$

La variation de l'énergie libre peut être également exprimée en fonction du coefficient de distribution K_C .

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \cdot \ln K_C \quad \text{I.14}$$

A l'équilibre $\Delta G = 0$, par conséquent :

$$\Delta G^\circ = -RT \cdot \ln K_C \quad \text{I.15}$$

La combinaison des équations (I.13) et (I.14) conduit à l'équation (I.16) correspondant à la loi de Van Hoff :

$$\ln K_C = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad \text{I.16}$$

La droite obtenue en portant $\ln K_C$ en fonction de $1/T$ permet de déterminer les valeurs de ΔS° , ΔH° et ΔG° du processus d'adsorption (Delaveau, 1994).

I.8. Exemples d'applications industrielles de l'adsorption

Les applications de l'adsorption sont vastes. Dans le domaine de la catalyse hétérogène, par exemple, le phénomène d'adsorption des substances qui interagissent avec un catalyseur solide joue souvent un rôle décisif, que ce soit en milieu gazeux ou en solution.

I.8.1 Application de l'adsorption en phase gazeuse

L'adsorption en phase gazeuse trouve de nombreuses applications, telles que le séchage à l'air ou au gaz, le fractionnement d'hydrocarbures mixtes et la récupération de solvants volatils tels que le benzène et l'acétone. Dans ces cas, les adsorbants solides sont largement utilisés pour purifier le gaz de ses impuretés. Il convient de souligner en particulier l'application du charbon actif dans les masques à gaz, qui a été rendue possible grâce aux travaux de Kojevniko qui ont permis de sauver des milliers de vies humaines (Kojevnikov, 2004),

I.8.2 Application de l'adsorption en phase liquide

Les applications industrielles liées au traitement des solutions diluées, notamment pour la purification et l'extraction, sont multiples. Parmi les préoccupations majeures, on peut citer :

- La décoloration des jus sucrés.
- L'épuration de divers produits pétroliers, graisses animales et légumes.
- Le traitement de l'eau, incluant l'élimination des métaux lourds, des odeurs ext...
- La dessiccation des produits biologiques industriels. (Hamdaoui, 2006)

I.9. Capacité d'adsorption (BELLIR, 2002.)

La capacité d'adsorption d'un adsorbant est la quantité de substrat adsorbée par unité de masse d'adsorbant à une température donnée. Cette capacité est influencée par de nombreux paramètres, tant pour l'adsorbat (comme la taille des molécules, la solubilité dans l'eau, etc.) que pour l'adsorbant (tels que la surface spécifique, la structure et le type de particules le constituant, etc.). En général, elle peut être exprimée par la relation suivante :

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \quad \text{I.17}$$

Où : q_e : capacité d'adsorption du support (mg.g^{-1}).

C_0 : concentration initiale du substrat (mg.L^{-1}).

C_e : concentration à l'équilibre (mg.L^{-1}).

V : volume de la solution (L).

m : masse du support (g).

CHAPITRE II : LES COLORANTS

II.1. Définition des colorants

Un colorant est une substance capable de teindre durablement une matière. Ces substances, qu'elles soient d'origine naturelle ou synthétique, se présentent sous forme de composés chimiques colorés, principalement organiques. Leur utilisation s'étend à divers domaines tels que la teinture des textiles, la fabrication d'encres, de peintures, de vernis, ainsi que la coloration des produits alimentaires, entre autres. Les colorants possèdent des groupements, appelés chromophores, qui déterminent leur couleur distinctive, ainsi que des groupements auxochromes qui facilitent leur fixation sur les substrats (Li et al., 2013).

II.2. Classification

La classification des colorants repose principalement sur deux approches distinctes : la classification chimique, qui se base sur leur structure moléculaire, et la classification tinctoriale, qui prend en compte leurs méthodes d'application sur les divers substrats (Babakhouya, 2010).

II.2.1. Classification chimique

Cette classification des colorants repose sur la nature du groupement chromophore qu'ils contiennent (Guivarch, 2004), les familles des colorants les plus utilisés selon cette classification sont :

- Les azoïques ;
- Les anthraquinoniques ;
- Les indigoïdes ;
- Les xanthines ;
- Les phtalocyanines ;
- Les nitrés et nitrosés ;

II.2.2. Classification tinctoriale

Alors que la classification chimique intéresse principalement les fabricants de matières colorantes, les teinturiers privilégient souvent le classement par domaines d'application. Ainsi, ils se renseignent sur la solubilité du colorant dans le bain de teinture, son affinité avec les différentes fibres textiles et le mécanisme de sa fixation. Cette approche conduit à distinguer différentes catégories tinctoriales, cette fois définies par les auxochromes représentées dans la liste suivante (Naidja et Malouki, 2010) :

- Les colorants à mordant ;
- Les colorants acides ou anioniques ;
- Les colorants basiques ou cationiques ;
- Les pigments ;
- Les colorants de cuve ;
- Les colorants dispersés ;

II.3. Utilisation et application des colorants

L'industrie des colorants constitue un marché économique important en raison de la variété des produits industriels pouvant être colorés, principalement (Hadj djilani et al., 2021) :

- Pigments (utilisés dans l'industrie des matières plastiques).
- Encres, papier (utilisés dans l'imprimerie).
- Colorants alimentaires (utilisés dans l'industrie agroalimentaire).
- Pigments pour peintures, matériaux de construction, céramiques (utilisés dans l'industrie du bâtiment).
- Colorants capillaires (utilisés dans l'industrie des cosmétiques).
- Colorants et conservateurs (utilisés dans l'industrie pharmaceutique).
- Colorants pour carburants et huiles (utilisés dans l'industrie automobile, etc.).
- Colorants textiles pour vêtements, décoration, bâtiments, transport, etc.
- Colorants textiles à usage médical.

II.4. Procédés d'élimination des colorants

II.4.1. Méthodes physiques

II.4.1.1. Filtration sur membrane

Dans ce processus, les polluants sont retenus par une membrane semi-perméable dont le diamètre des pores est plus petit que celui des molécules à éliminer. Cette technique est largement utilisée dans le dessalement de l'eau de mer. Selon la qualité de l'eau désirée, on distingue la microfiltration, l'ultrafiltration, la nanofiltration et l'osmose inverse. La nanofiltration est principalement utilisée dans le traitement des bains de teinture de colorants réactifs en agissant comme un filtre moléculaire, tandis que la microfiltration retient les matériaux colloïdaux tels que les colorants dispersés ou de cuve grâce à une "membrane écran" (Weber et Adams, 1995).

II.4.1.2. La coagulation–floculation

La coagulation-floculation est un processus physico-chimique où des particules colloïdales ou des solides en suspension fine sont transformés en floccs plus visibles et séparables à l'aide de flocculants chimiques. Ces floccs formés sont ensuite séparés par décantation, filtration, puis évacués (Lafleur et al., 2008).

Cette technique est couramment utilisée pour le traitement des eaux usées de l'industrie textile afin de réduire davantage la demande chimique en oxygène (DCO) et d'éliminer la couleur (Papić et al., 2000).

Les principaux coagulants utilisés pour déstabiliser les particules en suspension et produire des floccs comprennent le sulfate d'aluminium (alun) $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, l'aluminate de sodium NaAlO_2 , le chlorure ferrique ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), le sulfate ferreux ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), et le sulfate ferrique ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) (Hammami, 2008).

II.4.1.3. L'adsorption

L'adsorption est un procédé de traitement largement utilisé pour éliminer une grande variété de composés toxiques présents dans notre environnement. Il est principalement appliqué dans le traitement de l'eau et de l'air (Febrianto et al., 2009).

II.4.2. Méthodes chimiques

Les techniques d'oxydation chimique sont souvent adoptées lorsque les procédés biologiques se révèlent inefficaces. Elles peuvent également être utilisées en amont de ces procédés biologiques. L'oxydation chimique est fréquemment employée pour traiter les eaux usées contenant des polluants non biodégradables et/ou toxiques, ainsi que des concentrations élevées que d'autres procédés ne peuvent pas transformer en produits biodégradables et/ou non toxiques. Ce processus fait intervenir des oxydants puissants tels que l'ozone (O_3), le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), l'oxygène (O_2) et le chlore (Cl_2) (Hammami, 2008).

II.4.3. Méthodes biologiques

La présence de polluants organiques dans les eaux ou dans le sol a toujours été une réalité, et leur élimination par des microorganismes constitue le moyen biologique que la nature utilise pour l'épuration des milieux naturels. Ces processus se déroulent selon deux modes : les

traitements en aérobie (effectués en présence d'oxygène) et les traitements en anaérobie (effectués en absence d'oxygène) (Abdessemed, 2009).

II.5. Toxicités des colorants

II.5.1. Dangers évidents

II.5.1.1. Eutrophisation

L'action des microorganismes sur les colorants entraîne la libération de nitrates et de phosphates dans le milieu naturel. L'accumulation excessive de ces ions minéraux peut devenir toxique pour la vie aquatique et compromettre la qualité de l'eau potable. Leur absorption par les plantes aquatiques favorise leur croissance excessive, ce qui entraîne une diminution de l'oxygène dissous par inhibition de la photosynthèse dans les parties les plus profondes des cours d'eau et des eaux stagnantes (Zhenwang et al., 2000).

II.5.1.2. Sous oxygénation

Lorsque des quantités significatives de matière organique sont introduites dans l'eau par des déversements ponctuels, les mécanismes naturels de régulation ne parviennent plus à compenser la demande en oxygène due à l'activité bactérienne. Selon (Higarashi et Jardim, 2002), la dégradation de 7 à 8 mg de matière organique par des micro-organismes suffit à épuiser tout l'oxygène contenu dans un litre d'eau.

II.5.1.3. Couleur, turbidité, odeur

L'accumulation de matières organiques dans les cours d'eau entraîne des conséquences telles que des mauvais goûts, une prolifération bactérienne, des odeurs désagréables et des colorations anormales. Selon (Zhenwang et al., 2000), une coloration peut être perceptible par l'œil humain. Au-delà de leur aspect esthétique indésirable, les agents colorants peuvent perturber la transmission de la lumière dans l'eau, ce qui compromet la photosynthèse des plantes aquatiques (Moro, 2018).

II.5.2. Dangers à long terme

II.5.2.1. Persistance

Les colorants organiques synthétiques sont caractérisés par leur résistance à la dégradation naturelle par des processus biologiques. Cette résistance est directement liée à leur réactivité chimique :

- Les composés insaturés ont tendance à être moins durables que les composés saturés.
- Les alcanes sont moins persistants que les composés aromatiques.

- La persistance des composés aromatiques augmente avec le nombre de substituants.
- Les substituants halogénés augmentent davantage la persistance des colorants que les groupes alkyles (Chebli, 2018).

II.5.2.2. Bioaccumulation

Lorsqu'un organisme ne possède pas de mécanismes spécifiques pour prévenir la résorption ou pour éliminer une substance une fois qu'elle est absorbée, cette substance tend à s'accumuler. Les espèces situées au sommet de la chaîne alimentaire, y compris l'homme, peuvent être exposées à des concentrations de substances toxiques jusqu'à mille fois supérieures aux concentrations initiales dans l'eau (Brown, 1987).

II.5.2.3. Cancer

Bien que la plupart des colorants ne soient pas directement toxiques, une part importante de leurs métabolites peut l'être. Leurs effets mutagènes, tératogènes ou cancérigènes peuvent survenir après la dégradation de la molécule initiale en sous-produits d'oxydation, tels que les amines cancérigènes pour les colorants azoïques et les dérivés leuco pour les triphénylméthanes (Mansour et al., 2011).

II.5.2.4. Sous-produits de chloration

Le chlore, souvent utilisé pour éliminer les microorganismes pathogènes, réagit avec la matière organique pour produire des trihalométhanes (THM) qui peuvent être présents à des concentrations élevées, atteignant parfois plusieurs centaines de mg/L. Ces sous-produits de la chloration sont associés au risque de développer des cancers du foie, des poumons, des reins et de la peau chez l'être humain (Guechi, 2013).

II.6. Bleu de méthylène

Le colorant bleu de méthylène également appelé chlorure de méthylthioninium, est un composé organique dont la formule chimique est $C_{14}H_{14}N_5SCl$, avec une masse molaire de 319,85 g/mol. Il appartient à la famille des xanthines. Ce composé se présente sous forme de poudre cristalline ou de cristaux allant du vert au bleu-vert. Il est basique, soluble dans l'eau, et largement utilisé en biologie et en médecine, pour la coloration des tissus et comme indicateur colorimétrique. Outre ses applications colorantes, le bleu de méthylène possède des propriétés antiseptiques et antifongiques, et est utilisé dans le traitement de diverses affections médicales, telles que les infections urinaires et les intoxications au cyanure. Ce composé est souvent choisi

comme modèle représentatif des polluants organiques de taille moyenne. Sa structure chimique est représentée dans la figure II-1 (Zhenwang et al., 2000).

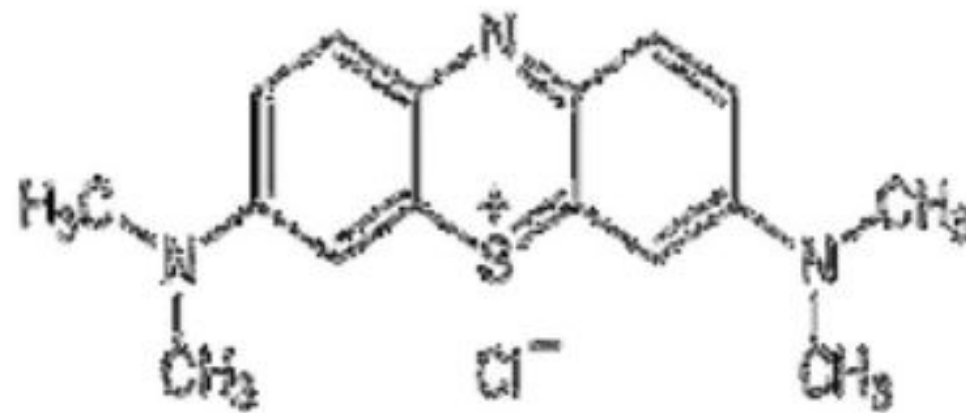


Figure II.1: Structure chimique du bleu de méthylène

II.6.1. Toxicité du bleu de méthylène

Les données toxicologiques recueillies sur l'utilisation du bleu de méthylène chez l'homme durant de nombreuses années n'ont jusqu'à présent révélé aucun danger associé à son usage en tant que médicament, à condition que la dose totale administrée reste inférieure à 7 mg/kg. Toutefois, des effets indésirables tels que des douleurs thoraciques, une dyspnée, de l'anxiété, des tremblements, une hypertension et même une coloration de la peau peuvent survenir en cas de doses élevées. Bien que le bleu de méthylène ne soit pas considéré comme fortement dangereux, il peut avoir des répercussions nocives sur les organismes vivants et les milieux aquatiques. Une exposition aiguë à ce produit peut entraîner divers effets indésirables, tels que :

- Irritation cutanée et lésions oculaires permanentes en cas d'exposition externe.
- Respiration rapide ou difficile et augmentation de la fréquence cardiaque lors d'une inhalation.
- Irritation gastro-intestinale, nausées, transpiration abondante, confusion mentale, cyanose et nécrose des tissus humains en cas d'ingestion (Zhenwang et al., 2000).

DEUXIEME PARTIE
METHODOLOGIE
EXPERIMENTALE

CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES

III.1. Matériel

- ✓ pH mètre
 - ✓ Étuve
 - ✓ Balance
 - ✓ Spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)
 - ✓ Spectrophotomètre UV-visible
 - ✓ Agitateur magnétique
 - ✓ Verrerie : Voici une liste du matériel en verre couramment utilisé
- Bêchers (60, 80 mL)
 - Fioles (50, 100, 250, 500, 1000 mL)
 - Pipettes (1, 10 mL)
 - Tubes à essais
 - Barreaux magnétiques
 - Pissette, Spatule...

III.2. Produits chimiques utilisés

Les produits chimiques employés et leurs caractéristiques sont présentés dans le tableau III.1.

Tableau III.1: Caractéristiques des produits chimiques utilisés

Produit chimique	Formule chimique	Masse molaire (g mol ⁻¹)	Purité (%)	Marque
Chlorure D'hydrogène	HCL	36,46	35-38	HONEYWELL
Hydroxyde de sodium	NaOH	40	98	PANREAC
Chlorure de sodium	NaCl	58,44	99,5	BIOCHEM CHMOPHARMA

III.3. Préparation de biomatériau

Les raquettes de cactus sont récoltées dans la région de Boghni, située dans la wilaya de Tizi Ouzou. Après avoir été débarrassées de leurs épines, les raquettes fraîches ont été lavées à l'eau du robinet, coupées en petits dés, puis séchées dans une étuve à 80°C pendant 24 heures. Après le séchage, elles ont été à nouveau lavées, d'abord à l'eau chaude du robinet, puis à l'eau distillée, avant d'être séchées à nouveau à 80°C pendant 24 heures. Enfin, elles ont été broyées et tamisées.



Des raquettes fraiche



Après la coupure



Séchage à 80C°



Cactus après broyage

Figure III.1 : Photos du traitement des raquettes de cactus fraîches jusqu'au broyage

III.4. Caractérisation

III.4.1. Spectroscopie Infrarouge à Transformé de Fourier (IRTF)

La Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF) est une méthode d'analyse basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Elle

permet *via* la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques, d'effectuer l'analyse des fonctions chimiques présentes dans le matériau. Les spectres infrarouges se situent dans la partie comprise entre 4000 et 400 cm^{-1} (Hesse, M. et al. 1997).

III.4.2. Le pH du point de charge nulle (pH_{pzc})

Le point de charge nulle est une caractéristique très importante à déterminer dans les phénomènes d'adsorption, il correspond au pH pour lequel la surface du solide est nulle. Ce paramètre nous permet de prévoir la possibilité de l'adsorption de ces molécules dans un domaine de pH donné en effet pour des $\text{pH} < \text{pH}_{\text{pzc}}$, la surface de l'adsorbant est chargée positivement et pour des $\text{pH} > \text{pH}_{\text{pzc}}$, elle est chargée négativement. Sa détermination est effectuée selon le protocole suivant :

Nous avons préparé des solutions NaCl 0,01 M à différents pH (2, 4, 6, 8, 10 et 12), puis nous avons prélevé 50 mL de chaque solution à laquelle nous avons ajouté 0,15 g de poudre de cactus. Après 24h d'agitation, le pH_f est mesuré. Le pH_{pzc} est le point d'intersection du graphe portant ($\text{pH}_f - \text{pH}_i$) en fonction du pH_i avec l'axe des abscisses (Boudrahem et al. 2019).

III.4.3. La teneur en humidité

Le taux d'humidité est un rapport exprimé en pourcentage, déterminé par le séchage de l'adsorbant dans une étuve. On met 10 g de poudre dans un creuset en céramique et on le pèse. Ensuite, on le sèche dans une étuve à 103 °C jusqu'à ce que son poids reste constant. À sa sortie de l'étuve, on le refroidit à température ambiante puis on le repèse (Ahmed et al 2012). Le taux d'humidité (H%) peut être calculé par la formule suivante :

$$H \% = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad \text{IV.1}$$

Où :

m_1 : La masse du creuset rempli avant séchage en (g).

m_2 : La masse du creuset rempli après séchage en (g).

III.4.4. La teneur de cendre

C'est la quantité de matière inorganique présente dans la matière végétale. Pour déterminer la valeur de cendre, un échantillon de 2 g de poudre de cactus est placé dans un four à 550°C pendant 2 heures.

La teneur en cendres est ensuite calculée comme suit :

$$\text{cendre \%} = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad \text{IV.2}$$

Où :

m_1 : la masse d'adsorbant (g).

m_2 : la masse d'adsorbant après la calcination (g).

III.5. Caractérisation de l'adsorbat (BM)

III.5.1. Bleu de méthylène BM

Le Bleu de méthylène (ou chlorure de méthylthioninium) est un composé organique dont le nom en nomenclature systématique est 3,7-bis-(diméthylamino) phenazathionium. Il est le colorant le plus couramment utilisé dans la teinture du coton, du bois et de la soie (Baghriche et al., 2008.), ses propriétés physicochimiques sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau III.2: Les propriétés physico-chimiques du BM

Propriétés	BM
Apparence	Cristaux bleu
Formule brute	$C_{16}H_{18}N_3ClS$
Solubilité dans l'eau à 20 °C	50 g.L ⁻¹
Point de fusion °C	180
PH	5,9

III.5.2. Courbe d'étalonnage

Pour calculer la concentration du BM après l'adsorption, on utilise les courbes d'étalonnage. On commence par établir une droite d'étalonnage (Absorbance) = f(C) à partir de solutions de concentrations connues du composé à doser (Figure III.2). Après l'adsorption, on mesure l'absorbance de la solution, puis, à partir de la courbe d'étalonnage, on détermine sa concentration.

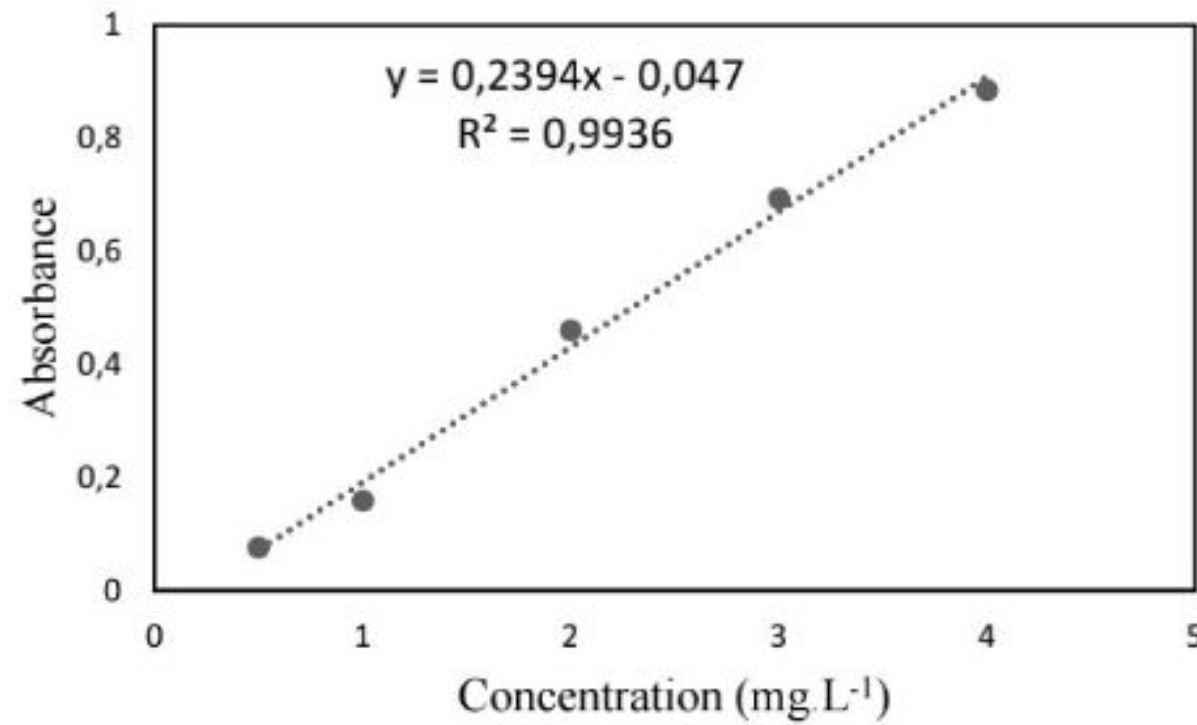


Figure III.2: courbe d'étalonnage de la solution de bleu de méthylène.

III.6. Spectrophotométrie UV-Visible

La technique est basée sur la propriété des molécules d'absorber des radiations lumineuses de longueur d'onde déterminée. Absorbance d'une espèce chimique est donnée par la loi de Beer-Lambert ([Malik et al., 2007](#)).

$$A = \log(I_0/I) = \epsilon.l.C = - \log (T) \quad \text{IV.3}$$

Où:

A: Absorbance (sans unité).

I_0 : Intensité du rayon incident .

I : Intensité du rayon transmis.

T : Transmittance de la solution.

ϵ : Coefficient d'extinction molaire de la substance en solution (L.mg⁻¹.cm⁻¹) .

l : longueur du trajet optique où se trouve l'espèce absorbante (cm).

C : la concentration molaire de la substance absorbante (mg.L⁻¹).



Figure III.3 : L'appareil UV-visible utilisé.

III.7. Optimisation des paramètres expérimentaux

III.7.1. Effet de la masse de l'adsorbant

Pour étudier l'impact du rapport solide /liquide sur la capacité d'adsorption du BM, nous avons varié la quantité initiale de cactus tout en maintenant constante la concentration du colorant dans la solution à 50 mg.L^{-1} .

III.7.2. Effet du pH

Nous avons étudié l'influence du pH sur l'adsorption du bleu de méthylène (BM) et son taux d'élimination en utilisant notre adsorbant à base de cactus. Pour ce faire, des échantillons de cactus pesant $0,05 \text{ g}$ chacun ont été introduits dans des béchers de 60 mL contenant 50 mL de solutions de bleu de méthylène à une concentration de 50 mg.L^{-1} . Le pH de ces solutions a été ajusté à différents niveaux ($2, 4, 5, 7$ et 10) en ajoutant quelques gouttes de solutions concentrées de HCl ou de NaOH $0,1 \text{ M}$. Les mélanges ont été agités pendant 60 minutes à une vitesse de 300 tr.min^{-1} à une température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Ensuite, les concentrations résiduelles du colorant ont été mesurées à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible à la longueur d'onde $\lambda_{\text{max}} = 664 \text{ nm}$.

III.7.3. Effet de la concentration initiale du colorant

L'effet de la concentration initiale du colorant à adsorber a été établie en fixant la quantité de cactus à $0,05 \text{ g}$ dans 50 mL de différentes solutions de BM, avec des concentrations initiales variant entre $20, 40, 60, 80, 100$ et 120 mg.L^{-1} . Ces solutions ont été préparées en diluant une

solution mère concentrée à 1 g.L^{-1} . Le mélange a été agité à une vitesse de 300 tr.min^{-1} pendant une période de contact de 60 minutes (temps d'équilibre), à une température ambiante de $25 \pm 1^\circ\text{C}$. Les résultats obtenus dans cette étude ont été utilisés pour tracer les isothermes d'adsorption et évaluer la pertinence des modèles de Langmuir, Freundlich et Temkin.

III.7.4. Effet de la température

L'effet de la température a été examiné sur une plage de 30 à 70°C . Les expériences ont été menées en utilisant des mélanges de 50 mL de solutions colorées à une concentration de 50 mg.L^{-1} , avec 0,05 g de cactus dans des béchers de 60 mL, maintenus à une température de 25°C . Ces mélanges ont été soumis à une agitation constante de 300 tr.min^{-1} pendant une durée d'une heure.

III.7.5. Effet de vitesse d'agitation

Nous avons étudié l'effet de la vitesse d'agitation sur adsorption de bleu de méthylène selon différentes vitesses : 100, 200, 300 et 400 tr.min^{-1}

Pour chaque expérience d'adsorption une quantité donnée d'absorbant est mise en contact avec 50 ml d'une solution de bleu de méthylène avec pH initial connue.

III.7.6. Effet de temps de contact

Des échantillons de cactus chacun ont été introduits dans des béchers de 60 mL contenant 50 mL de solutions de bleu de méthylène à une concentration de 50 mg.L^{-1} . Les mélanges ont été agités aux temps différents à une vitesse de 300 tr.min^{-1} à une température de 25°C .

III.8. Essai de bleu de méthylène sur cactus

Nos essais d'adsorption du BM ont été réalisées dans des erlenmeyers couverts par du papier aluminium afin d'éviter la contamination de nos solutions par d'autres éléments et la modification du pH. Le mélange hétérogène est soumis à une agitation magnétique permanente à l'aide d'un barreau magnétique, sur une plaque chauffante, afin d'assurer le contact entre l'absorbat et l'adsorbant.

Le taux d'élimination (%) est donné dans la relation suivante :

$$\text{Taux d'élimination (\%)} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad \text{IV.4}$$

Avec :

C_0 : Concentration initiale du colorant (BM) (mg L^{-1}) ;

C_t : Concentration résiduelle du colorant (BM) à l'instant t (mg L^{-1}) ;

C_e : Concentration résiduelle du colorant (BM) à l'équilibre t_e (mg.L^{-1}).

CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1. Caractérisation de l'adsorbant

IV.1.1. Caractéristiques physico-chimiques

Dans le tableau IV.1, sont rassemblées quelques caractéristiques physico-chimiques de la poudre cactus.

Tableau IV.1 : Caractéristiques physico-chimiques de la poudre de cactus.

Caractéristique	Valeur
Taux d'humidité (%) massique	10,72
Taux de cendres (%)	32,92
Taux de matière volatile (%)	66,36

Les résultats obtenus montrent que notre adsorbant a des valeurs moyennes de taux d'humidité et de cendres.

IV.1.2 pH de charge nulle des adsorbants

Le point de charge nulle (pH_{pzc}), caractéristique de la somme des charges électriques à la surface, est un élément important du pH. Il représente l'intersection de la courbe du $\text{Ph}_i\text{-Ph}_f$ en fonction du pH initial avec l'axe des abscisses comme illustré dans la figure IV.1. À partir de cette figure, nous avons déduit que le pH_{pzc} est égal à 6.

Par conséquent, pour une solution avec un pH inférieur au pH_{pzc} , la surface de l'adsorbant est chargée positivement, tandis que pour une solution avec un pH supérieur au pH_{pzc} , la surface de l'adsorbant est chargée négativement. Cela favorise l'attraction électrostatique des polluants cationiques (Mekatel et al., 2021).

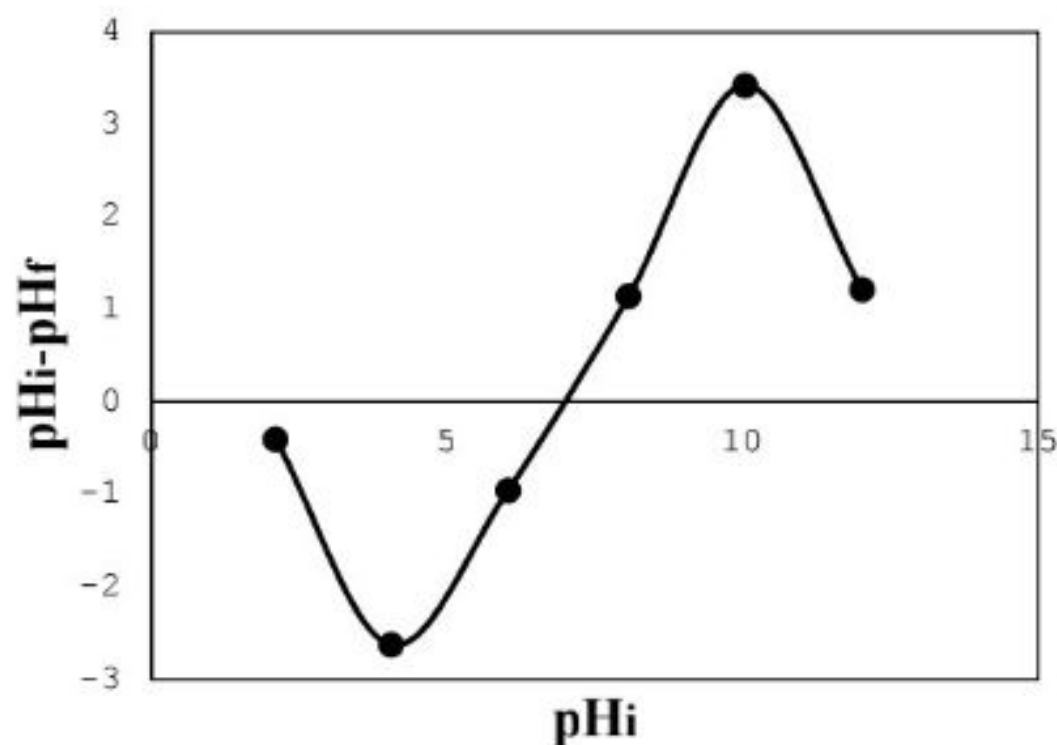


Figure IV.1: Détermination du pH_{pzc} pour le cactus

IV.1.3. Analyse par spectrométrie Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF)

La spectrométrie infrarouge nous permet d'identifier les groupements fonctionnels à la surface de l'adsorbant. Le spectre infrarouge de la poudre de cactus est représenté sur la figure IV.2.

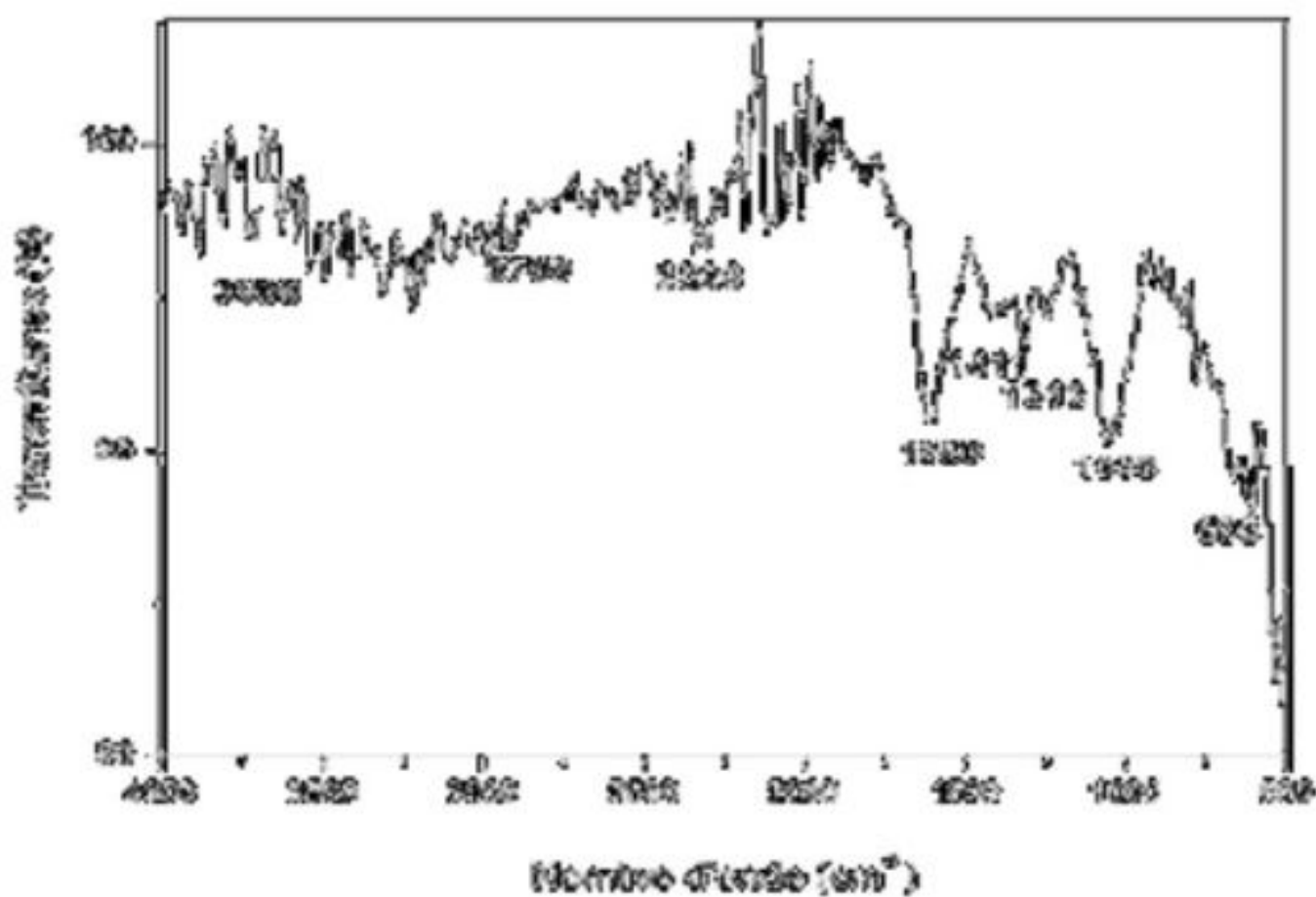


Figure IV.2 : Spectre Infra-Rouge de la poudre de cactus

Le spectre présente des bandes larges et superposées dans la plage de longueurs d'onde de 3600 à 3000 cm^{-1} , résultant de l'élongation des liaisons O-H. Les bandes à 2320 cm^{-1} et à 2700 cm^{-1} correspondent respectivement aux vibrations d'élongation asymétrique de CH_2 et à l'élongation symétrique de $-\text{CH}_3$ des acides aliphatiques.

À 1590 cm^{-1} , on observe la vibration d'élongation des groupements carboxyliques, tandis que la bande à 1319 cm^{-1} est attribué à la vibration d'élongation des groupements -OH des composés phénoliques. Les pics à 1411 cm^{-1} résultent des vibrations de valence symétrique ou asymétrique des groupements carboxyliques des pectines. Quant à la bande à 1098 cm^{-1} , elle pourrait être générée par la vibration des groupements C-O-C, ainsi que des polysaccharides. Les pics d'absorption situés en dessous de 698 cm^{-1} peuvent être associés aux bioligands azotés (Sakr et al., 2015).

IV.2. Influence des paramètres d'adsorption

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés aux paramètres susceptibles d'influencer l'élimination du colorant BM. Ces paramètres incluent le temps de contact entre le BM et le cactus, le pH initial de la solution de BM, la vitesse d'agitation, la température et la concentration en BM et le rapport solide/liquide.

IV.2.1. Influence du temps de contact

Pour déterminer le temps nécessaire à l'établissement de l'équilibre d'adsorption, nous avons choisi d'étudier l'effet du temps de contact en tant que premier paramètre.

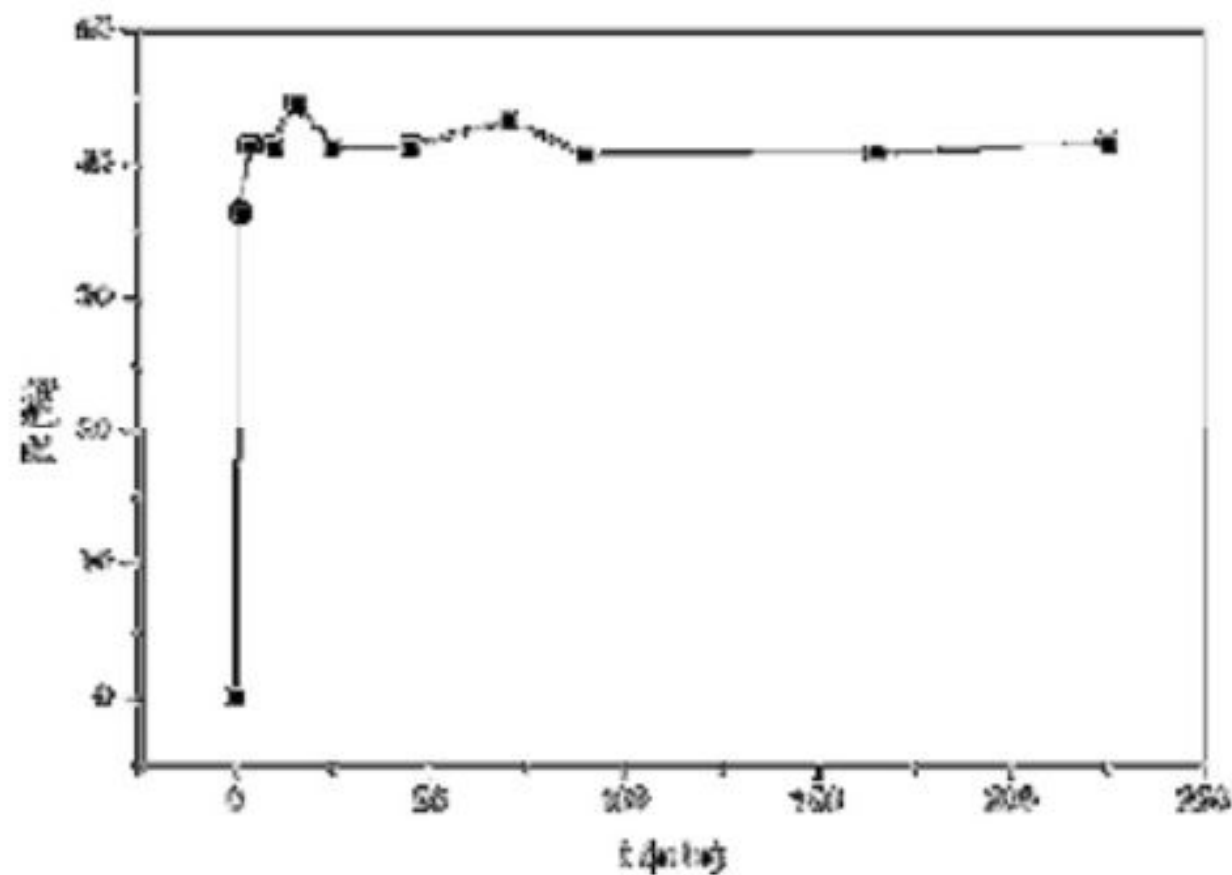


Figure IV.3: Effet du temps de contact sur le rendement d'adsorption du BM par le cactus ($C_0=50\text{ mg.L}^{-1}$, $S/L=1\text{ g/L}$, $\text{pH}_i=6$, $T=25^\circ\text{C}$).

La figure IV.3 présente deux étapes distinctes : une première phase rapide dans l'intervalle de 0 à 10 minutes, avec un rendement d'adsorption de 43%, suivie d'une seconde phase d'équilibre, s'étendant de 10 à 225 minutes, où le rendement atteint 45% et reste constant.

La phase rapide initiale est probablement due à la grande disponibilité des sites d'adsorption à la surface absorbante. À mesure que ces sites sont occupés par l'adsorbat, le processus d'adsorption devient moins efficace et plus lent, comme rapporté dans des études antérieures (Iqbal et Saeed, 2007). Ce type d'adsorption diphasique est également observé dans d'autres travaux de recherche (Zhou et al., 2018; Chan et al., 2016).

Dans la suite de notre étude, nous avons opté pour un temps de contact de 60 minutes afin d'assurer que l'équilibre est atteint ($t_e=60\text{ min}$).

IV.2.2. Influence du pH

La figure IV.4 montre une augmentation du taux d'élimination du BM entre les pH 2 et 4, passant de 29 % à 44 %. Cependant, pour les valeurs de pH allant de 4 à 10, le taux d'élimination reste presque constant (environ 45 %).

Cela peut être expliqué du fait qu'à des faibles valeurs du pH, la surface de l'adsorbant serait entourée par les ions H^+ ce qui diminue l'interaction des ions du bleu de méthylène (polluant cationique) avec les sites de l'adsorbant, par contre au pH élevé, la concentration en

H^+ diminue ce qui engendre une bonne interaction entre les ions du colorant et les sites de la surface (Sakr et al., 2015).

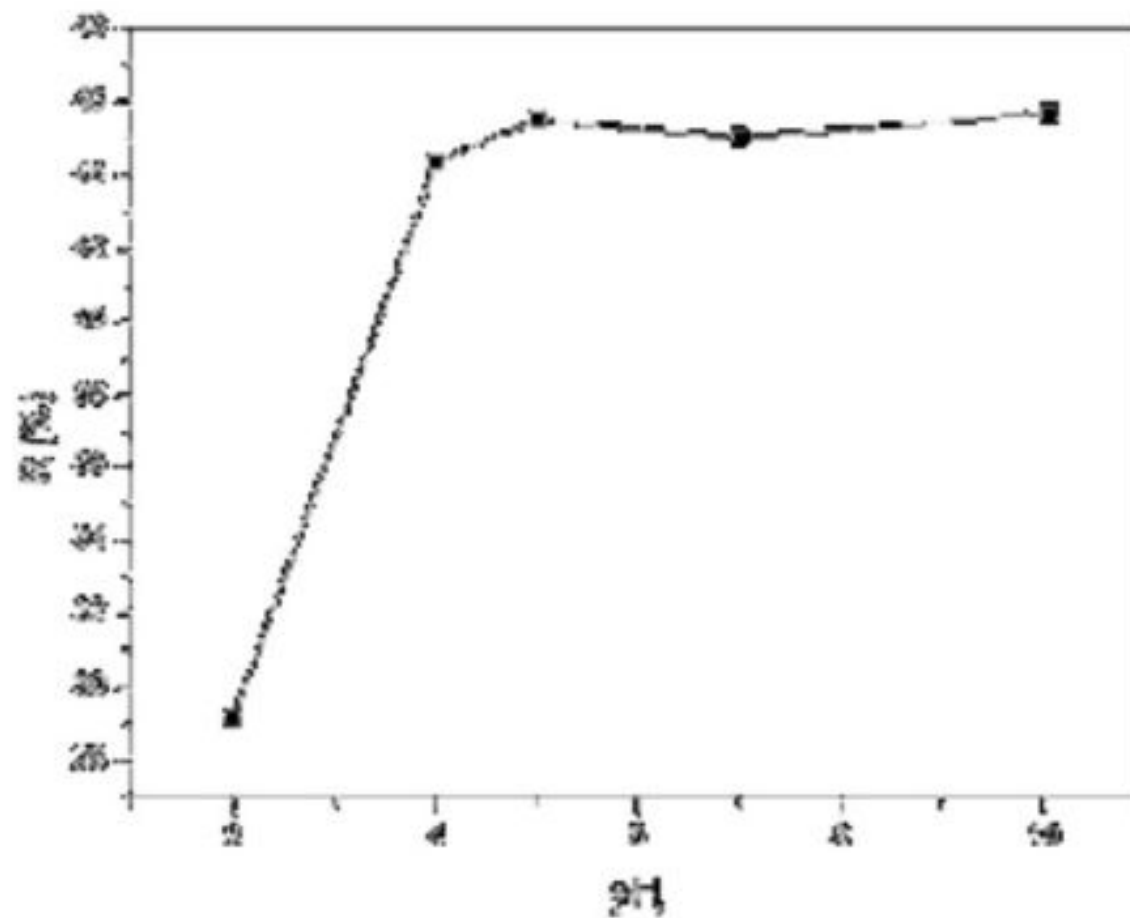


Figure IV.4 : Effet du pH initial sur le rendement d'adsorption du BM par la poudre de cactus ($C_0= 50 \text{ mg.L}^{-1}$, $S/L= 1\text{g/L}$, $t_e= 60 \text{ min}$, $T= 25^\circ\text{C}$).

IV.2.3. Effet de la dose de l'adsorbant

L'étude de ce paramètre a été réalisée en variant les doses de l'adsorbant respectivement à 0,2 ; 0,4 ; 0,6 ; 1 ; 1,4 ; 1,8 ; 2; 2,4 g/L. Les autres paramètres sont restés constants : la concentration de la solution de BM à 50 mg.L^{-1} , la vitesse d'agitation à 300rpm, un pH de 6, et un temps d'équilibre de 1 heure. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure IV.5.

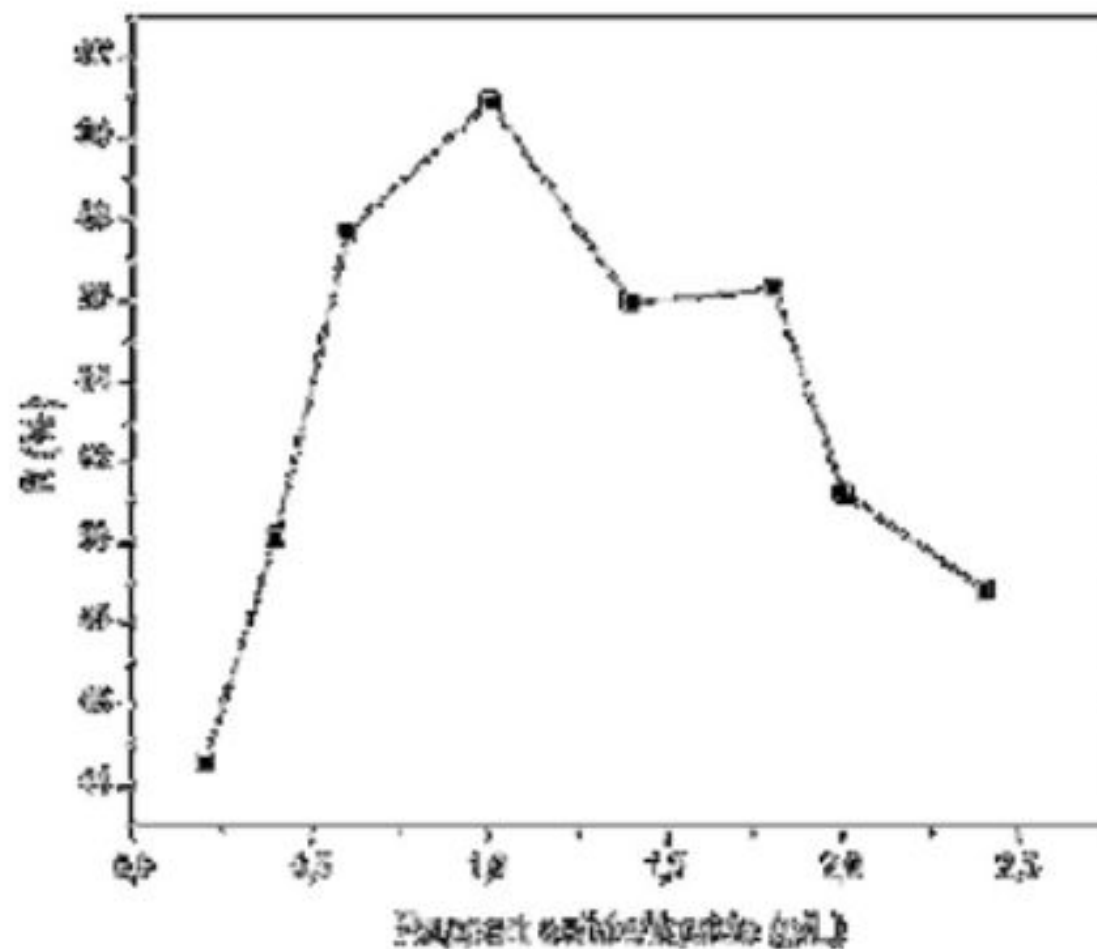


Figure IV.5 : Effet de la dose de cactus sur le rendement d'adsorption du BM

($C_0 = 50 \text{ mg.L}^{-1}$, $t_e = 60 \text{ min}$, $\text{pH}_i = 6$, $T = 25^\circ\text{C}$).

Les résultats obtenus montrent, d'une part, que le rendement augmente avec l'augmentation de la dose de l'adsorbant jusqu'à atteindre une valeur limite. Ceci est principalement attribué à l'augmentation de la surface adsorbante disponible et donc des sites actifs présents à la surface de la poudre de cactus (Akar et al., 2009; Saha et al., 2010).

D'autre part, l'ajout d'adsorbant permet d'augmenter le nombre de sites d'adsorption, mais les cations du colorant ont plus de difficultés à approcher ces sites en raison de l'encombrement. De plus, une grande quantité d'adsorbant crée des agglomérations de particules, ce qui entraîne une réduction de la surface totale d'adsorption et, par conséquent, une diminution de la quantité d'adsorbant par unité de masse d'adsorbant (Bennani et al., 2010).

IV.2.4. Influence de la vitesse d'agitation

Il ressort des résultats que le taux d'élimination passe respectivement de 49 % à 54,5 % lorsque la vitesse d'agitation augmente de 100rpm à 300rpm, puis diminue par la suite. La faible quantité de colorant adsorbée à une vitesse d'agitation de 100rpm est due à une mauvaise dispersion de la poudre de cactus, ce qui entraîne une diminution de la surface d'échange entre la poudre de cactus et le BM.

En revanche, lorsque la vitesse d'agitation est trop élevée, supérieure à 300rpm, cela entraîne la formation de grands tourbillons au sein de la solution, ce qui diminue la surface de contact entre le BM et la poudre de cactus (Zhang et al., 2017).

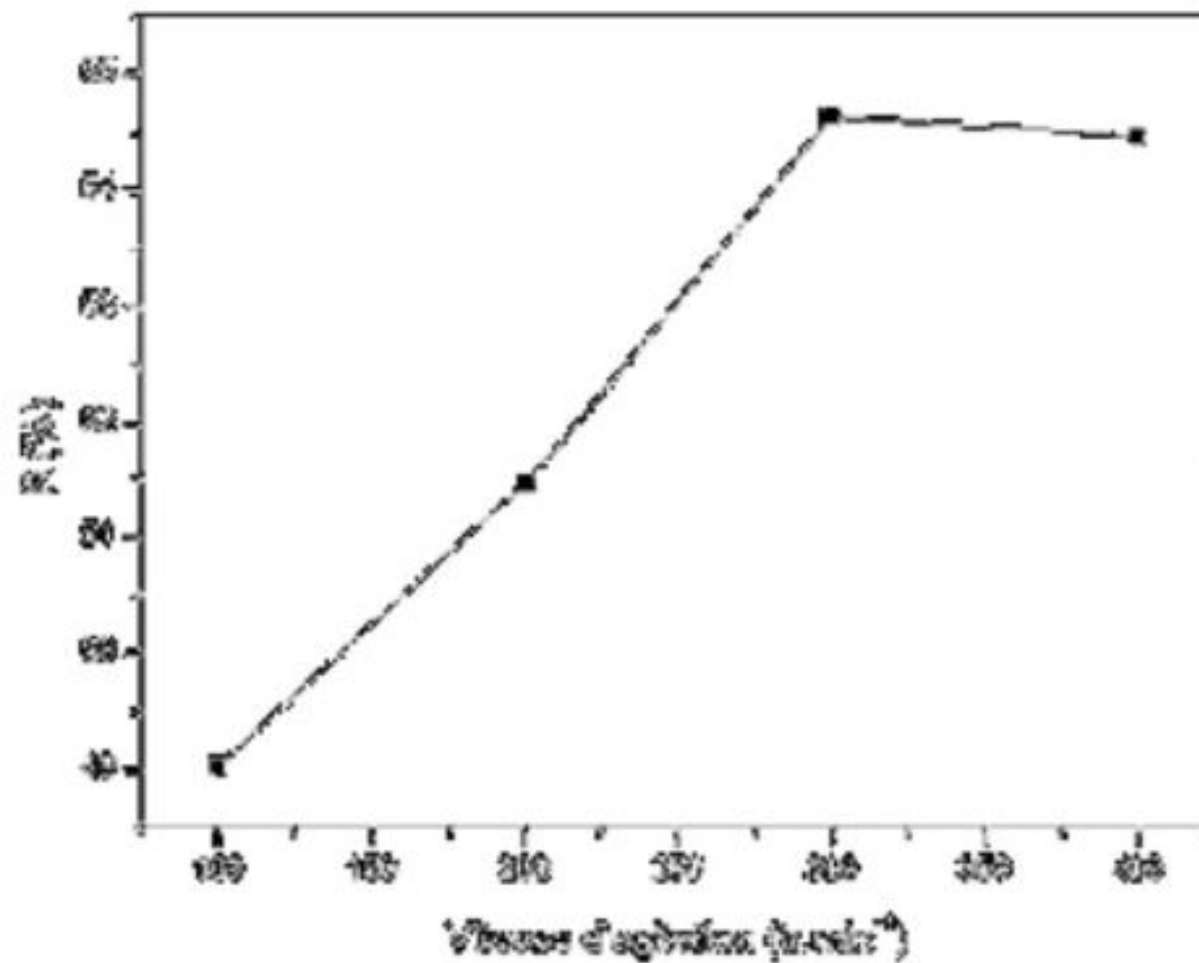


Figure IV.6: Effet de la vitesse d'agitation sur le rendement d'adsorption du BM par le cactus ($C_0 = 50 \text{ mg.L}^{-1}$, $S/L = 1 \text{ g/L}$, $t_e = 60 \text{ min}$, $\text{pH}_i = 6$, $T = 25^\circ\text{C}$).

IV.2.5. Influence de la température

Les résultats obtenus montrent une diminution du taux d'élimination avec l'augmentation de la température. L'augmentation de la température défavorise le déroulement du phénomène d'adsorption. Cela peut être dû à l'affaiblissement des forces d'interaction entre les sites actifs de l'adsorbant et de l'adsorbat (Mushtaq et al., 2016).

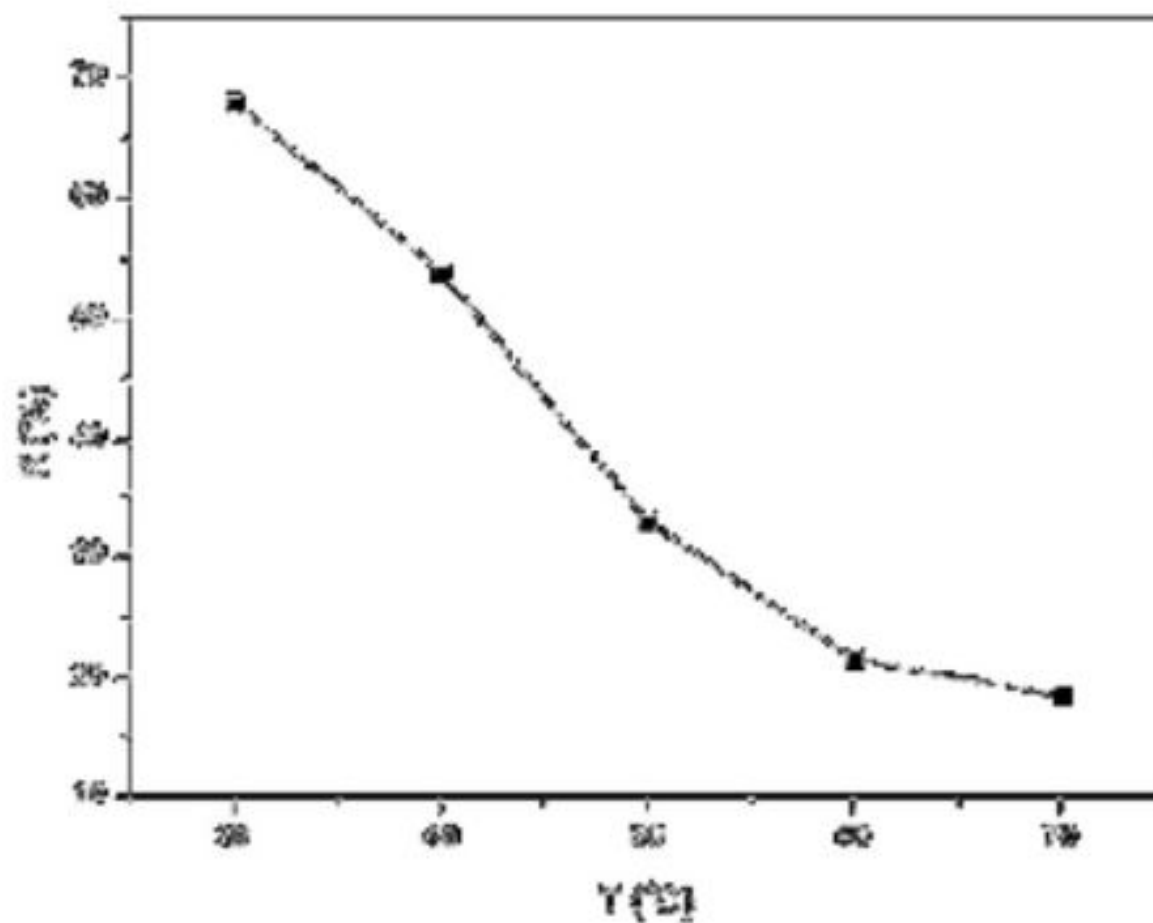


Figure IV.7 : Effet De la Température sur le rendement d’adsorption du BM par le cactus

($C_0= 50 \text{ mg.L}^{-1}$, $S/L= 1\text{g/L}$, $\text{pH}_i= 6$, $t_e=60 \text{ min}$).

Les valeurs des paramètres thermodynamiques calculées à partir de cette courbe sont répertoriées dans le Tableau IV.2.

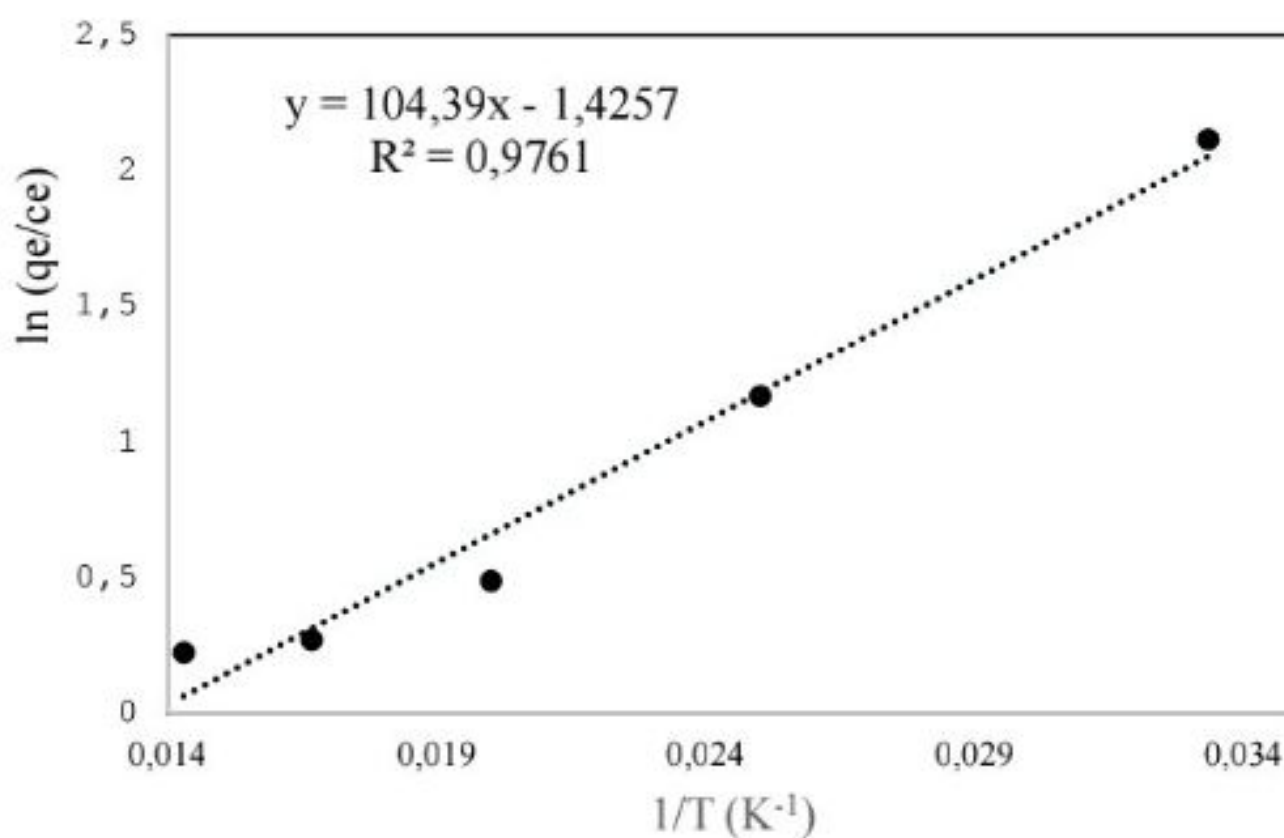


Figure IV.8 : Variation de $\ln (q_e /c_e)$ en fonction de $1/T$.

Tableau IV.2 : Paramètres thermodynamiques calculés dans l'intervalle de la température étudié.

T (K)	ΔH° (J.mol ⁻¹)	ΔS° (J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)	ΔG° (J.mol ⁻¹)
303,15	- 868,292	- 11,856	2721,977
313,15			2852,699
323,15			2982,419
333,15			3112,138
343,15			3241,857

À partir des résultats obtenus, on déduit que :

- La valeur négative de ΔH° indique que la réaction chimique est exothermique. Cela signifie que la réaction libère de la chaleur lorsqu'elle se produit.
- La valeur négative de ΔS° , montre qu'il y'a une diminution du désordre moléculaire à l'interface BM/cactus.
- Les valeurs positives de ΔG° indiquent que l'adsorption du BM sur le cactus n'est pas spontanée
- Des résultats similaires ont été trouvés dans des travaux relatifs à l'adsorption de colorants sur des matériaux naturels ([Belaid et al., 2011](#); [Aarfane et al., 2014](#)).

IV.3. Etude des isothermes d'adsorption

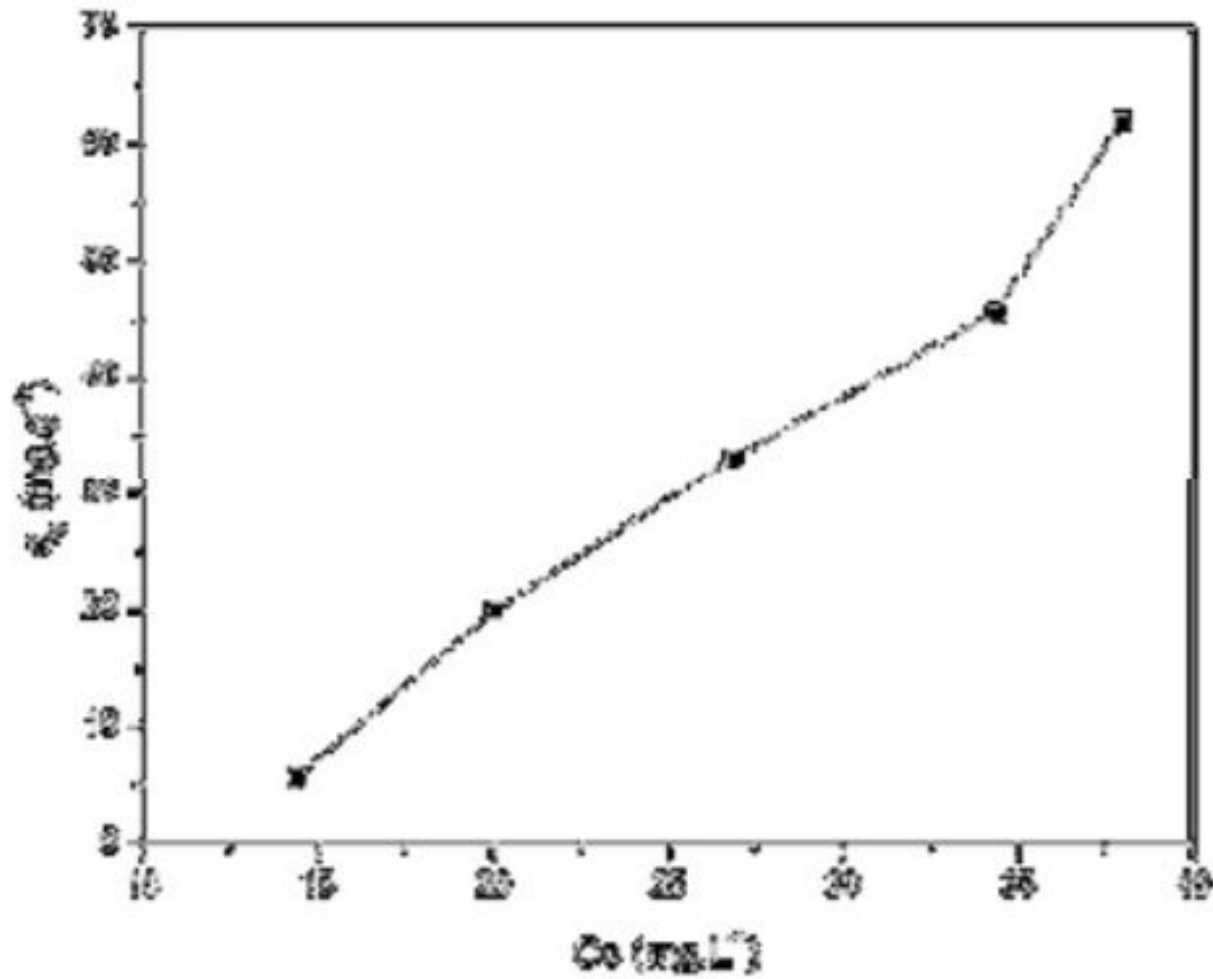


Figure IV.9 : Isotherme d'adsorption du colorant BM sur le cactus

($pH_i = 6$, $S/L = 1g/L$ à $25^\circ C$ et $t_e = 60$ min).

L'isotherme obtenue est de type S. Les isothermes de cette classe présentent, à faible concentration, une concavité tournée vers le haut. Les molécules adsorbées favorisent l'adsorption ultérieure d'autres molécules (adsorption coopérative). Ceci est dû aux molécules qui s'attirent par des forces de Van der Waals, et se regroupent en îlots dans lesquels elles se tassent les unes contre les autres (Giles et al., 1974).

IV.4. Modélisation des isothermes d'adsorption

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés à la modélisation des isothermes d'adsorption du BM sur la poudre de cactus à l'aide de différents modèles : le modèle de Langmuir, le modèle de Freundlich, le modèle de Temkin..

IV.4.1. Modèle de Langmuir

La courbe (C_e/q_e) en fonction de C_e représentée dans la figure IV.10, ne présente pas de linéarité, ce qui indique que l'adsorption du colorant BM par la poudre de cactus ne correspond pas au modèle de Langmuir.

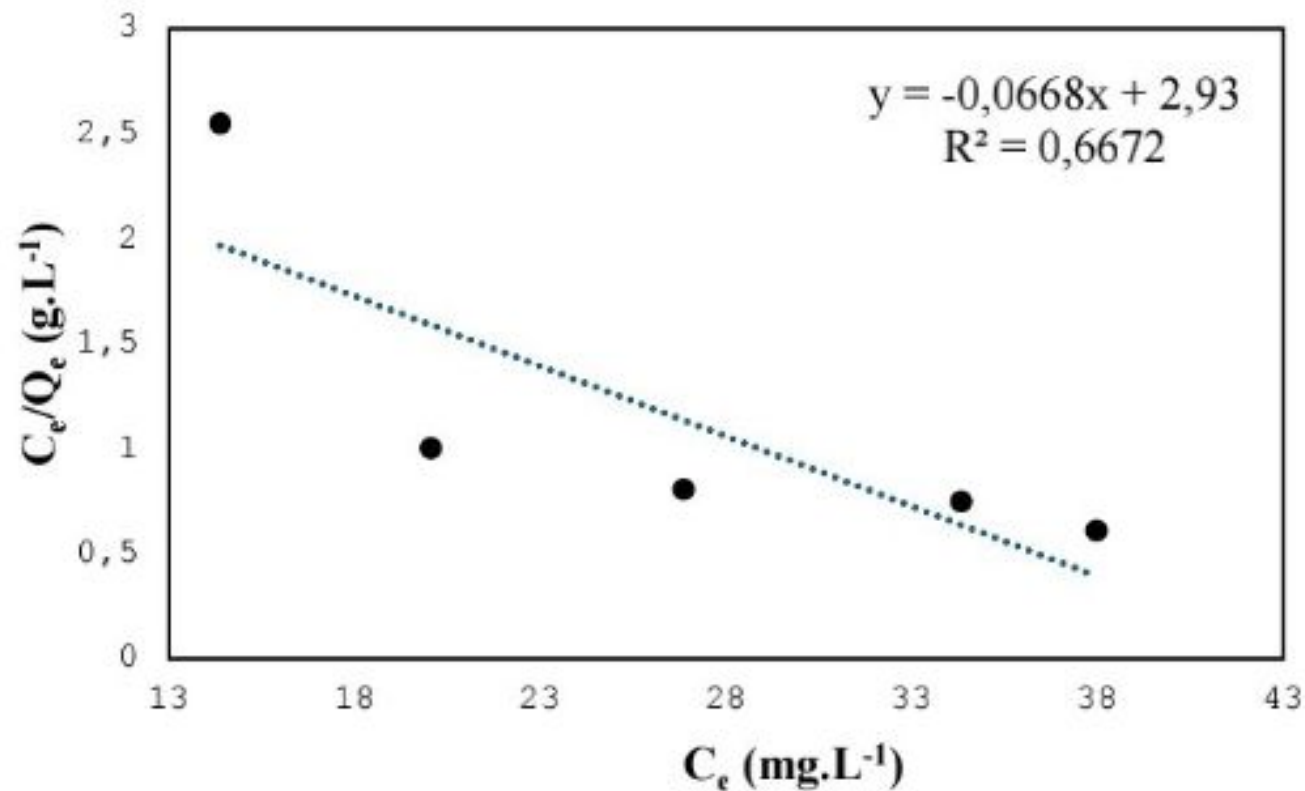


Figure IV.10: Isotherme d'adsorption du BM selon le modèle de Langmuir.

IV.4.2. Modèle de Freundlich

Le modèle de Freundlich sous sa forme logarithmique, appliqué aux résultats expérimentaux d'adsorption du BM par la poudre de cactus est représenté sur la figure IV.11.

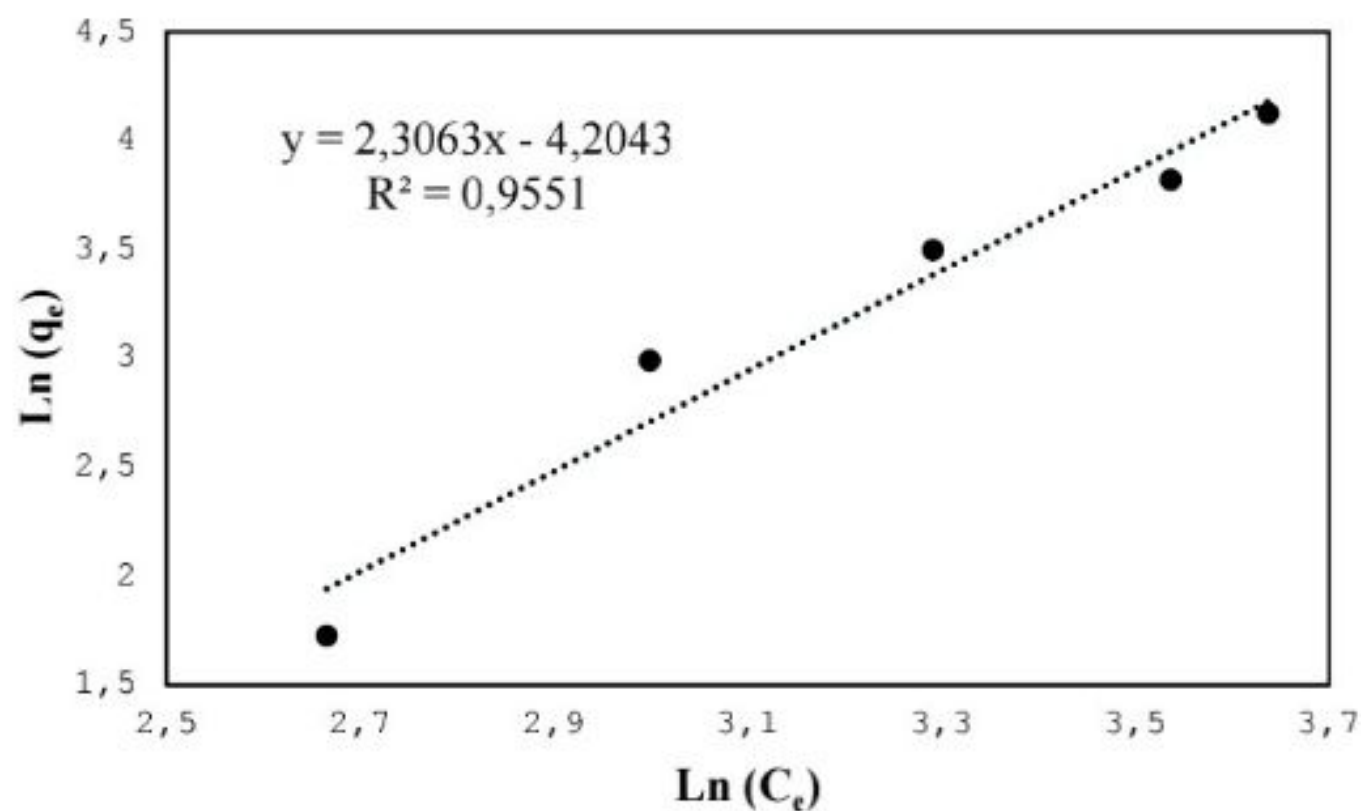


Figure IV.11: Isotherme d'adsorption du BM selon le modèle de Freundlich.

La courbe $\ln(q_e)$ en fonction de $\ln(C_e)$ montre une bonne linéarité, dont la pente et l'ordonnée à l'origine permettent d'obtenir les paramètres $1/n$ et K_F . Les résultats obtenus après calculs sont représentés dans le tableau IV.3.

Tableau IV.3 : Valeurs des constantes de Freundlich

T(°C)	K_F	n	1/n	R^2
25	0,0147	0,4338	2,30631	0,9551

La valeur de coefficient de corrélation de Freundlich R^2 (0,9551) montre que l'adsorption de BM par poudre de cactus obéit au modèle d'adsorption de Freundlich impliquant une adsorption en multicouche (Zhang et al., 2015).

Dans le modèle de Freundlich, les paramètres K_F et n ont les significations suivantes :

K_F : est une constante d'adsorption qui représente la capacité d'adsorption de l'adsorbant. Plus K_F est élevé, plus la capacité d'adsorption de l'adsorbant est grande.

n : est un coefficient d'hétérogénéité qui caractérise l'homogénéité de la surface d'adsorption. Un n plus proche de 1 indique une adsorption homogène, tandis qu'une valeur plus éloignée de 1 indique une adsorption plus hétérogène.

Ainsi, dans notre cas, $K_F = 0,0147$ indique une capacité d'adsorption relativement faible de la poudre de cactus pour le BM, tandis que $n = 0,4338$ suggère une certaine hétérogénéité dans les sites d'adsorption sur la surface de la poudre de cactus.

IV.4.3. Modèle de Temkin

L'application du modèle de Temkin sous sa forme linéaire, en portant (q_e) en fonction de $\ln(C_e)$, est représentée sur la figure IV.12.

Le tracé de la transformée de Temkin montre que la courbe est linéaire. Cela confirme que l'adsorption du BM par la poudre de cactus obéit au modèle de Temkin.

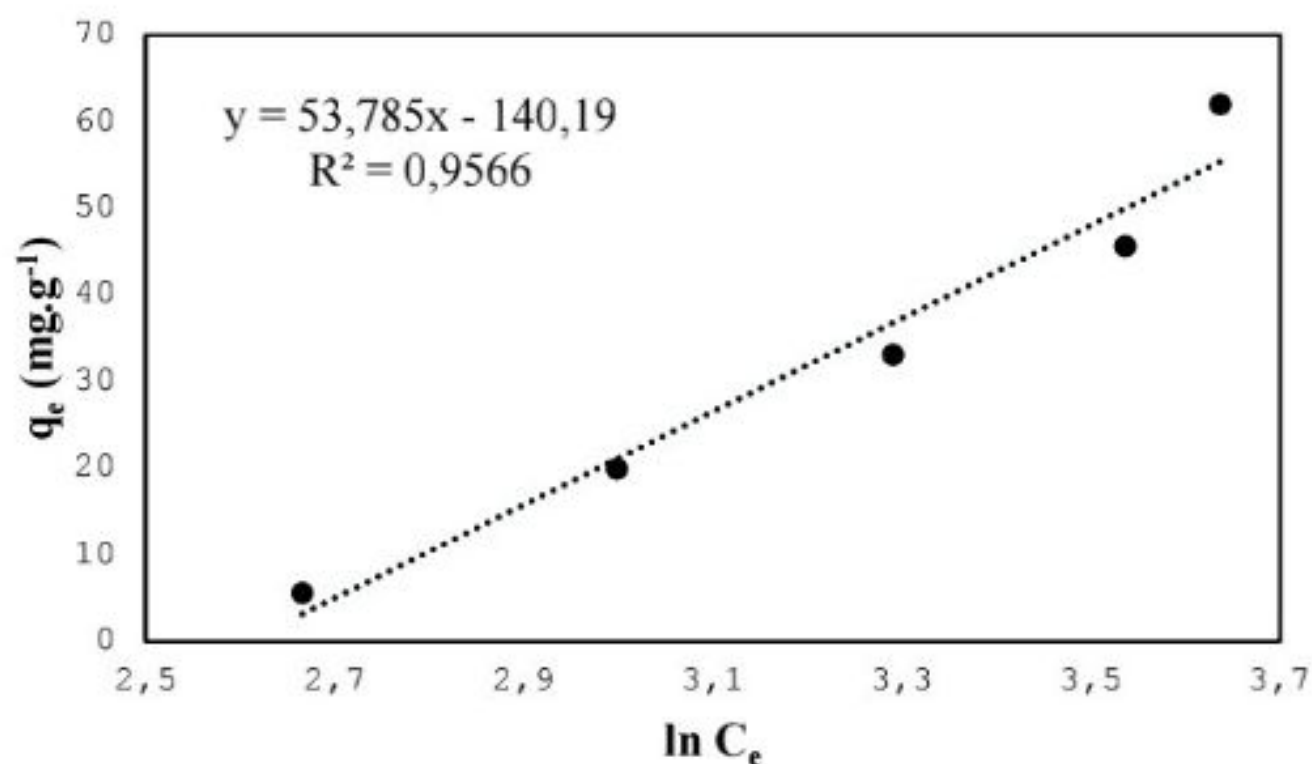


Figure IV.12 : Isotherme d'adsorption du BM selon le modèle de Temkin.

On a calculé les constantes de Temkin en utilisant les valeurs de la constante universelle des gaz parfaits $R=8,314$ ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), et la température T en kelvins (K), ainsi que les valeurs de la pente et de l'ordonnée à l'origine de l'équation de la droite linéaire de Temkin. Les valeurs obtenues sont résumées dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4 : Valeurs des constantes de Tamkin

$T(^{\circ}\text{C})$	K_T ($\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$)	b_T ($\text{Kj}\cdot\text{mol}^{-1}$)	R^2
25	0,000472	46,02	0,9566

La valeur b_T représente la chaleur d'adsorption moyenne par molécule adsorbée sur la surface de l'adsorbant. Dans notre cas, b_T est d'environ $46,02$ $\text{Kj}\cdot\text{mol}^{-1}$. Cela indique une forte interaction entre la poudre de cactus et le BM. Une valeur élevée de b_T suggère que l'adsorption du BM par la poudre de cactus est accompagnée d'une quantité importante de chaleur libérée ou absorbée, ce qui peut être attribué à des forces d'interaction importantes entre les molécules d'adsorbant et d'adsorbat.

La valeur K_T représente la constante d'équilibre d'adsorption dans le modèle de Temkin. Dans ce cas, K_T est d'environ $0,000472$ $\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$. Une valeur plus élevée de K_T indiquerait une forte affinité de l'adsorbant pour l'adsorbat. Cependant, une valeur relativement faible de K_T

peut indiquer que l'adsorption du BM par la poudre de cactus est moins efficace à des concentrations plus élevées en solution.

IV.5. Modèles Cinétiques

IV.5.1. Modèle cinétique du premier ordre

Ce modèle repose sur le tracé de la droite $\ln (q_e - q_t)$ en fonction du temps (t). Les résultats obtenus en appliquant le modèle cinétique du pseudo-premier ordre sont représentés sur la figure IV.13.

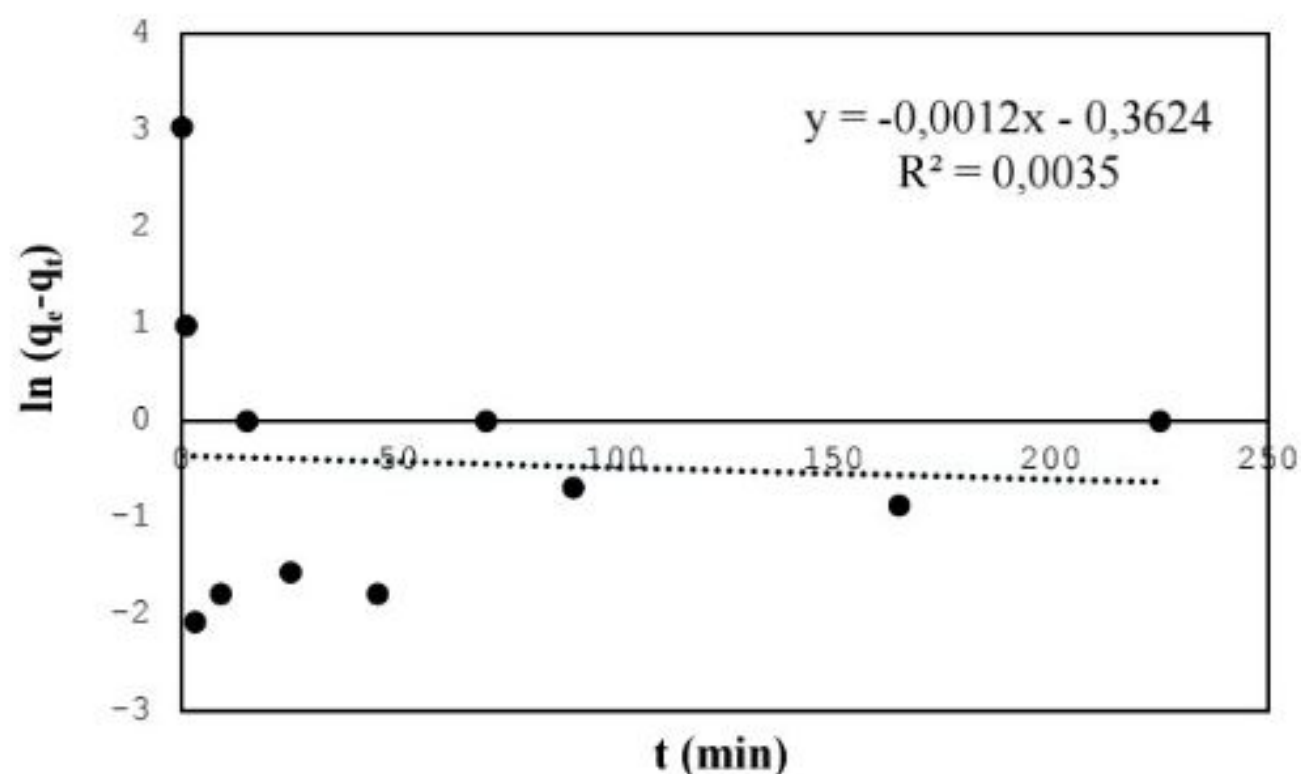


Figure IV.13 : Graphe $\ln (q_e - q_t)$ en fonction du temps de contact.

On remarque que les points de la courbe ne sont pas linéaires, par conséquent, la cinétique d'adsorption du colorant BM par la poudre de cactus, ne suit pas le modèle de premier ordre.

IV.5.2. Modèle cinétique du second ordre

L'étude de la cinétique du deuxième ordre est définie par la linéarité de courbe t/q_t en fonction du temps. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure IV-14.

Les résultats obtenus d'après le tracé sur la figure nous montrent que la valeur du coefficient de corrélation R^2 très proche de 1, ce qui signifie que l'adsorption de BM par la poudre de cactus obéit au modèle cinétique de second ordre.

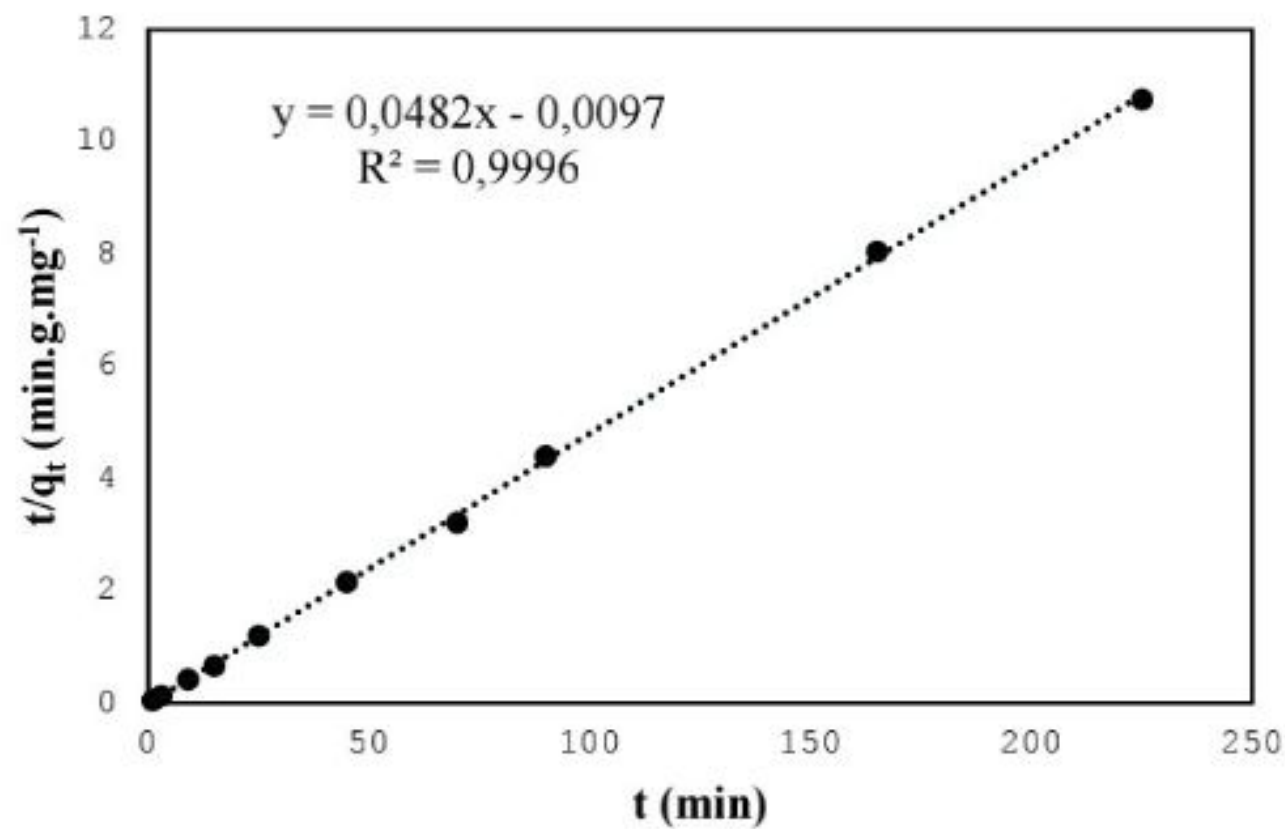


Figure IV -14 : Graphe t/q_t en fonction du temps de contact.

Ces résultats indiquent que l'adsorption étudiée suit un modèle cinétique de second ordre avec une forte corrélation entre les données expérimentales et le modèle théorique. La vitesse d'adsorption est relativement rapide.

IV.5.3. Modèle d'Elovich

L'étude de ce modèle n'est pas définie par la linéarité de courbe (q_t) en fonction du $\ln(t)$. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure IV.15.

On remarque que les points de la courbe ne sont pas linéaires, par conséquent, l'adsorption du colorant BM par la poudre de cactus, ne suit pas le modèle d'Elovich.

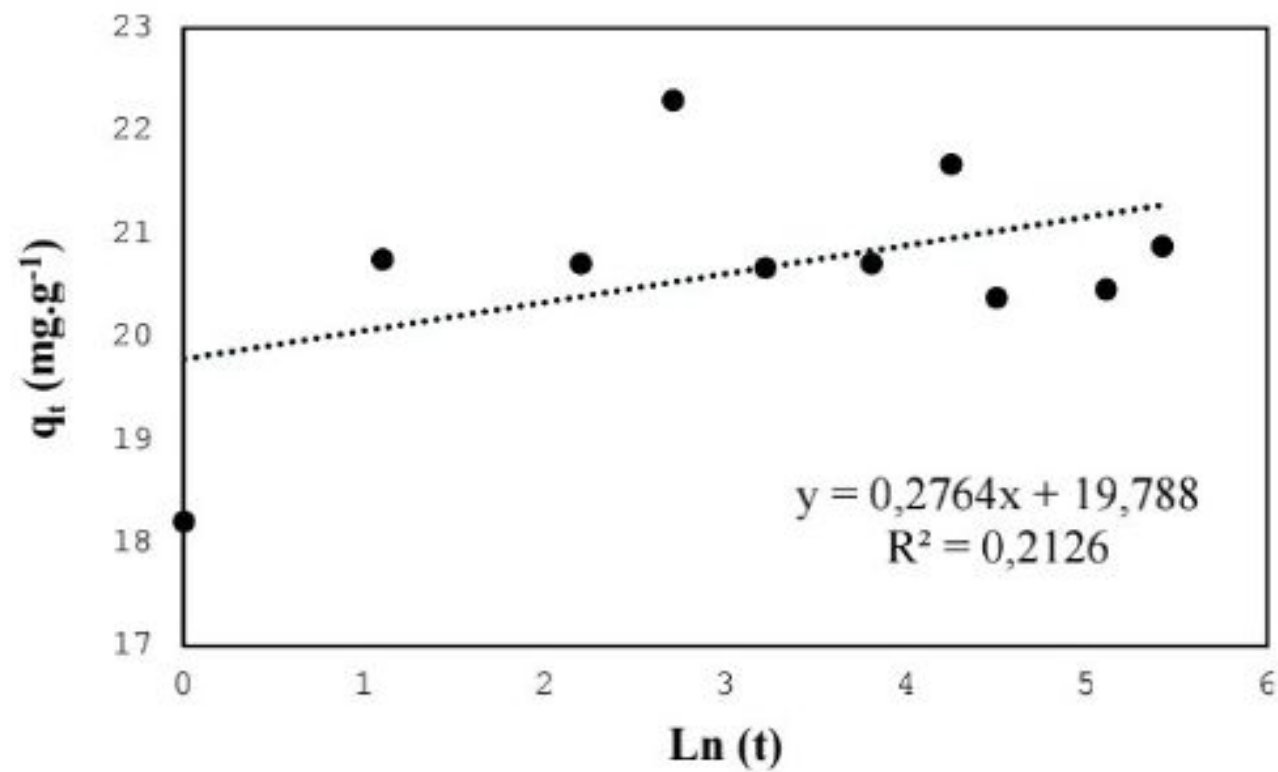


Figure IV.15 : Graphe q_t en fonction de $\ln(t)$

IV.5.4 Modèle de diffusion intra-particulaire

Ce modèle repose sur le tracé de la droite q_t en fonction du $t^{1/2}$. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure IV.16 .

On remarque que les points de la courbe ne sont pas linéaires, par conséquent, l'adsorption du colorant BM par la poudre de cactus, ne suit pas le modèle de diffusion intra particulaire.

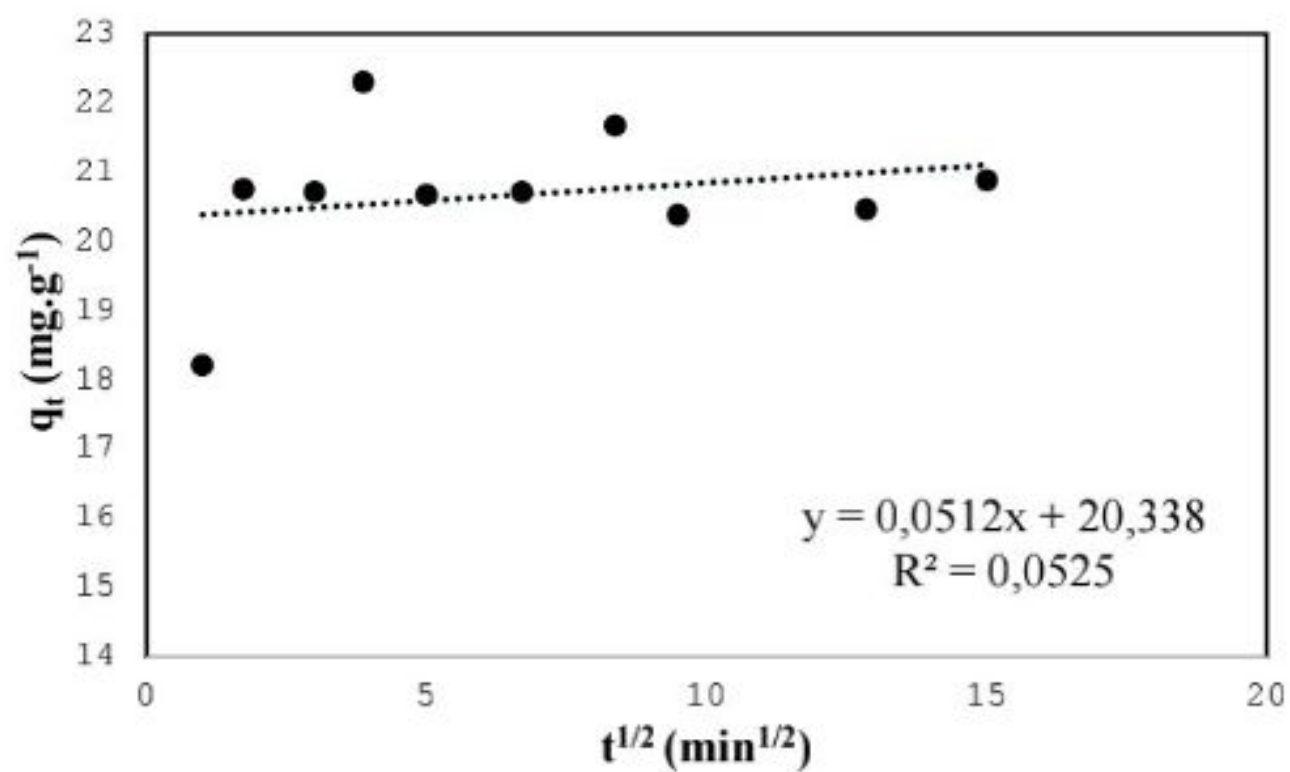


Figure IV.16 : Graphes q_t en fonction de $t^{1/2}$

CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressés à l'élimination du bleu de méthylène par le cactus. L'objectif visé par notre étude est la valorisation du déchet agricole, le cactus raquette.

L'étude de la caractérisation physico chimique effectuée sur la poudre de cactus a montré que :

- Les taux de cendres et d'humidité sont modérés et le pH_{pzc} est égale à 6.
- L'analyse par spectrophotométrie infrarouge à transformée de Fourier a révélé des bandes d'absorption principales attribuées aux groupements carboxyliques, acides aliphatiques.

L'étude de l'influence de plusieurs paramètres physico-chimiques sur la capacité d'adsorption du bleu de méthylène sur la poudre de cactus a montré que :

- La vitesse d'adsorption est très rapide au début du processus d'adsorption et devient de plus en plus lente à l'approche de la saturation.
- La quantité de colorant adsorbé augmente avec l'accroissement de la dose de la poudre de cactus.
- L'adsorption des colorants est influencée par la vitesse d'agitation, elle est optimale pour une vitesse d'agitation de 300 trs/min.
- L'adsorption du colorant BM, est optimale à pH 6.
- L'étude thermodynamique a révélé que l'adsorption du colorant BM est exothermique, non spontanée.
- Le traitement des valeurs expérimentales pour les différents modèles cinétiques a donné un coefficient de corrélation hautement significatif pour le modèle de second ordre.
- L'application des modèles d'adsorption de Temkin, Freundlich et Langmuir aux résultats expérimentaux a montré que : l'adsorption du bleu de méthylène, sur la poudre de cactus se rapproche plus du modèle de Freundlich, et Temkin qui donnent les meilleures corrélations avec les résultats expérimentaux avec des valeurs des coefficients de corrélation qui sont proches de 1.

D'une façon globale, l'utilisation de la poudre de cactus comme adsorbant du bleu de méthylène a donné des résultats peu satisfaisants avec un rendement d'élimination d'environ 54 %.

En guise de perspectives, nous proposons l'utilisation de la poudre de cactus sur d'autres types de colorants (anioniques et neutres). Il serait aussi intéressant de prévoir des traitements chimiques et physiques capables d'améliorer sa capacité d'adsorption.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

1. Ahmed, M. J., & Dhedan, S. K. (2012). Equilibrium isotherms and kinetics modeling of methylene blue adsorption on agricultural wastes-based activated carbons. *Fluid Phase Equilibria*, 317, 9-14.
2. Akar, G., & Clifton, K. J. (2009). Influence of individual perceptions and bicycle infrastructure on decision to bike. *Transportation Research Record*, 2140(1), 165-172.
3. Angulo-Bejarano, P. I., Martínez-Cruz, O., & Paredes-López, O. (2014). Phytochemical content, nutraceutical potential and biotechnological applications of an ancient Mexican plant: nopal (*Opuntia ficus-indica*). *Current Nutrition & Food Science*, 10(3), 196-217.
4. Ayari, F., Srasra, E., & Trabelsi-Ayadi, M. (2004). Application des modèles de Langmuir et Freundlich aux isothermes d'adsorption des métaux lourds par l'argile purifiée. *Journal de Physique IV (Proceedings)*. 122, 229-234.

B

5. Babakhouya, N. (2010). Récupération des métaux lourds par l'utilisation des adsorbants naturels. Thèse de doctorat, université de Boumerdès-Algérie.
6. Baghriche, O., Djebbar, K., & Sehili, T. (2008). Étude cinétique de l'adsorption d'un colorant cationique (vert de méthyle) sur du charbon actif en milieu aqueux. *Sciences & Technology. A, Exactes Sciences*, B(27), 57-62.
7. Belaid, K. D., & Kacha, S. (2011). Étude cinétique et thermodynamique de l'adsorption d'un colorant basique sur la sciure de bois. *Revue des Sciences de l'Eau*, 24(2), 131-144.
8. Beltrá, M., Andreu-Coll, L., Roche, E., Médico, A., López-Lluch, D., Carbonell-Barrachina, Á. A., ... & Garcia-García, E. (2024). Mineral content of a lyophilized extract from the fruit *Opuntia ficus indica* (L.) Mill. *European Food Research and Technology*, 250(3), 821-827.
9. Bendhifi, M., Baraket, G., Zourgui, L., Souid, S., & Salhi-Hannachi, A. (2013). Assessment of genetic diversity of Tunisian Barbary fig (*Opuntia ficus indica*) cultivars by RAPD markers and morphological traits. *Scientia Horticulturae*, 158, 1-7.
10. Bouacherine, S. (2013). Élimination des polluants spécifiques par adsorption sur charbon actif et argile traitée et non traitée. Thèse de doctorat, Université de Souk Ahras-Algérie.
11. Brown, D. (1987). Effects of colorants in the aquatic environment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 13(2), 139-147.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

C

12. Chebli, D. (2018). Traitement des eaux usées industrielles: Dégradation des colorants azoïques par un procédé intégré couplant un procédé d'oxydation avancée et un traitement biologique. Thèse de doctorat, Université de Sétif-Algérie.
13. Cheikhyoussef, N., Cheikhyoussef, A., Ramadan, M. F., & Hussein, A. A. (2021). *Opuntia* spp. seed oil. In *Opuntia spp.: Chemistry, bioactivity and industrial applications*, 635-656.
14. Cherif Benismail, M., Mokhtari, M., & Arba, M. (2000). The cactus pear (*Opuntia* spp.) in Morocco: Main species and cultivar characterization. In *IV International Congress on Cactus Pear and Cochineal*, 103-109.
15. Chitour C. Physico-chimie des surfaces « l'adsorption gaz-solide et liquide solide», Tomes 2, office des publications Universitaires, Edition n°4556,09/2013
16. Choy, K. K., G. McKay, et al. (1999). Sorption of acid dyes from effluents using activated carbon. *Resources, Conservation and Recycling*, 27(1-2), 57-71.
17. Cookson, J. T. (1978). Adsorption mechanisms: The chemistry of organic adsorption on activated carbon. In *Carbon adsorption handbook*, 241-279.

D

18. Dali-Youcef, Z., Bouabdasselem, H., & Bettahar, N. (2006). Élimination des composés organiques par des argiles locales. *Comptes rendus. Chimie*, 9(10), 1295-1300.
19. Delaveau, P. (1994). Myrte (*Myrtus communis* L. Myrtaceae). *Actualités Pharmaceutiques*, 326, 66-67.
20. Deniz, F., & Saygideger, S. D. (2011). Removal of a hazardous azo dye (Basic Red 46) from aqueous solution by princess tree leaf. *Desalination*, 268(1-3), 6-11.

F

21. Febrianto, J., Kosasih, A. N., Sunarso, J., Ju, Y.-H., Indraswati, N., & Ismadji, S. (2009). Equilibrium and kinetic studies in adsorption of heavy metals using biosorbent: A summary of recent studies. *Journal of Hazardous Materials*, 162(2-3), 616-645.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

22. Freundlich, H. M. F. (1906). Over the adsorption in solution. *J. Phys. Chem.*, 57(385471), 1100-1107.

G

23. Greanga, M. (2004). Procédé AD-OX d'élimination de polluants organiques non biodégradables. Thèse doctorat, École doctorale : Transferts, Dynamique des Fluides, Énergétique et Procédés-France.
24. Guechi, E.-K. (2013). Enlèvement de colorants à partir de solutions aqueuses par des matériaux sorbants non conventionnels et à faible coût. Thèse de doctorat, université Badji Mokhtar- Annaba-Algérie.
25. Guivarch, E. (2004). Traitement des polluants organiques en milieux aqueux par procédé électrochimique d'oxydation avancée "Electro-Fenton": Application à la minéralisation des colorants synthétiques. Thèse de doctorat, Université de Marne-la-Vallée-France.

H

26. Habibi, Y. (2004). Contribution à l'étude morphologique, ultrastructurale et chimique de la figue de barbarie. Les polysaccharides pariétaux: caractérisation et modification chimique. Thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
27. Hadj Djilani, K. C., Bedraoui, K., & Sahmi, A. (2021). Étude paramétrique de l'électro-photo-fenton pour le traitement des rejets liquides. Mémoire de master, Université Djilali Bounaâma de Khemis Miliana-Algérie.
28. Hamdaoui, O. (2006). Batch study of liquid-phase adsorption of methylene blue using cedar sawdust and crushed brick. *Journal of Hazardous Materials*, 135(1-3), 264-273.
29. Hammami, S. (2008). Étude de dégradation des colorants de textile par les procédés d'oxydation avancée. Application à la dépollution des rejets industriels. Thèse de doctorat, Université de Marne la Vallée-France.
30. Higarashi, M. M., & Jardim, W. F. (2002). Remediation of pesticide contaminated soil using TiO₂ mediated by solar light. *Catalysis Today*, 76(2-4), 201-207.
31. Ho, Y.-S. (2006). Review of second-order models for adsorption systems. *Journal of Hazardous Materials*, 136(3), 681-689.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

32. Howe, K. L., Bolt, B. J., Cain, S., Chan, J., Chen, W. J., Davis, P., ... & Sternberg, P. W. (2016). WormBase 2016: Expanding to enable helminth genomic research. *Nucleic Acids Research*, 44(1), 774-780.

I

33. Iqbal, M., & Saeed, A. (2007). Biosorption of reactive dye by loofa sponge-immobilized fungal biomass of *Phanerochaete chrysosporium*. *Process Biochemistry*, 42(7), 1160-1164.

J

34. Järvisalo, M. J., Rönnemaa, T., Volanen, I., Kaitosaari, T., Kallio, K., Hartiala, J. J., ... & Raitakari, O. T. (2002). Brachial artery dilatation responses in healthy children and adolescents. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 282(1), 87-92.
35. Jozja, N. (2003). Étude de matériaux argileux albanais. Caractérisation "multi-échelle" d'une bentonite magnésienne. Thèse de doctorat, Université d'Orléans-France.

K

36. Karim, A. B., Mounir, B., Hachkar, M., Bakasse, M., & Yaacoubi, A. (2010). Élimination du colorant basique «Bleu de Méthylène» en solution aqueuse par l'argile de Safi. *Revue des Sciences de l'Eau*, 23(4), 375-388.
37. Kannan, N., & Meenakshisundaram, M. (2002). Adsorption of Congo Red on various activated carbons. A comparative study. *Water, Air, and Soil Pollution*, 138(1-4), 289-305.
38. Khan, N., Afaq, F., Saleem, M., Ahmad, N., & Mukhtar, H. (2006). Targeting multiple signaling pathways by green tea polyphenol-epigallocatechin-3-gallate. *Cancer Research*, 66(5), 2500-2505.
39. Kifuani, K. M., Mayeko, A. K. K., et al. (2018). Adsorption d'un colorant basique, Bleu de Méthylène, en solution aqueuse, sur un bioadsorbant issu de déchets agricoles de *Cucumeropsis mannii* Naudin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 12(1), 558-575.
40. Kojevnikov, A. B. (2004). *Stalin's great science: The times and adventures of Soviet physicists* (Vol. 2). World Scientific.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

L

41. Lafleur, C., Fortier, J., Kharoune, L., & Kharoune, M. (2008). Évaluation d'un procédé de coagulation-floculation au chitosane pour l'enlèvement du phosphore dans les effluents piscicoles. Rapport commandité par la SODIM (Société de développement de l'industrie maricole inc), 80-84.
42. Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, 40(9), 1361-1403.
43. Lei Yu, Yong-ming Luo. (2014). The adsorption mechanism of anionic and cationic dyes by Jerusalem artichoke stalk-based mesoporous activated carbon. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2, 220-229.
44. Li, H., Yang, L., Tang, R., Hou, Y., Yang, Y., Wang, H., ... Li, Z. (2013). Organic dyes incorporating N-functionalized pyrrole as conjugated bridge for dye-sensitized solar cells: Convenient synthesis, additional withdrawing group on the π -bridge and the suppressed aggregation. *Dyes and Pigments*, 99(3), 863-870.
45. Louacini, B. K., Dellal, A., Halbouche, M., & Ghazi, K. (2012). Effect of incorporation of the spineless *Opuntia ficus indica* in diets on biochemical parameters and its impact on the average weight of ewes during the maintenance. 8(4), 352-359.

M

46. Malik, R., Ramteke, D. S., & Wate, S. R. (2007). Adsorption of malachite green on groundnut shell waste based powdered activated carbon. *Waste Management*, 27(9), 1129-1138.
47. Mansour, H. B., Boughzala, O., Dridi, D., Barillier, D., Chekir-Ghedira, L., & Mosrati, R. (2011). Les colorants textiles sources de contamination de l'eau: CRIBLAGE de la toxicité et des méthodes de traitement. *Revue des Sciences de l'Eau*, 24(3), 209-238.
48. Masschelein, W. J. (1996). *Processus unitaires du traitement de l'eau potable*. Cebedoc.
49. Mazouz, M., & Khelaifia, L. (2018). Evaluation du pouvoir d'adsorption d'une chabon actif commercial. Mémoire de master, université Oum-El-Bouaghi-Algérie.
50. Mekatel, E., Dahdouh, N., Samira, A., Nibou, D., & Trari, M. (2021). Removal of Maxilon Red dye by adsorption and photocatalysis: Optimum conditions, equilibrium, and kinetic studies. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 40(1), 93-110.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

51. Mohamed-Yasseen, Y., Barringer, S. A., & Splittstoesser, W. E. (1996). A note on the uses of *Opuntia spp.* In Central/North America. *Journal of Arid Environments*, 32(3), 347-354.
52. Moro, C. (2018). La décontamination de quelques colorants par des argiles et des composites. Thèse de doctorat, université de Tlemcen-Algérie.
53. Mushtaq, M., Bhatti, H. N., Iqbal, M., & Noreen, S. (2016). *Eriobotrya japonica* seed biocomposite efficiency for copper adsorption: Isotherms, kinetics, thermodynamic and desorption studies. *Journal of Environmental Management*, 176, 21-33.

N

54. Naidja, L., & Malouki, A. (2010). Elimination du colorant orange II en solution aqueuse, par voie photochimique et par adsorption. Thèse de doctorat, université de Tlemcen-Algérie.
55. Nharingo, T., & Moyo, M. (2016). Application of *Opuntia ficus-indica* in bioremediation of wastewaters: A critical review. *Journal of Environmental Management*, 166, 55-72.
56. Ntanos, F. (2001). Plant sterol-ester-enriched spreads as an example of a new functional food. 103(2), 102-106.

O

57. Olivares-Pérez, A., Toxqui-López, S., & Padilla-Velasco, A. L. (2012). Nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a holographic material. *Materials*, 5(11), 2383-2402.
58. Önal, Y. (2006). Kinetics of adsorption of dyes from aqueous solution using activated carbon prepared from waste apricot. *Journal of Hazardous Materials*, 137(3), 1719-1728.
59. Önal, Y., Akmil-Başar, C., & Sarıcı-Özdemir, Ç. (2007). Investigation kinetics mechanisms of adsorption malachite green onto activated carbon. *Journal of Hazardous Materials*, 146(1-2), 194-203.

P

60. Papić, S., Koprivanac, N., & Božić, A. L. (2000). Removal of reactive dyes from wastewater using Fe (III) coagulant. *Coloration Technology*, 116(11), 352-358.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

61. Pimienta-Barrios, E., & Nobel, P. S. (1995). Reproductive characteristics of pitayo (*Stenocereus queretaroensis*) and their relationships with soluble sugars and irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 120(6), 1082-1086.
62. Psomiadou, E., & Tsimidou, M. (2001). Pigments in Greek virgin olive oils: Occurrence and levels. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81(7), 640-64

Q

63. Qlihaa, A., Dhimni, S., Melrhaka, F., Hajjaji, N., & Srhiri, A. (2016). Caractérisation physico-chimique d'une argile Marocaine [Physico-chemical characterization of a Moroccan clay]. *Journal of Materials and Environmental Science*, 7(5), 1741-1750.

R

64. Ramadan, M. F., Kroh, L. W., & Mörsel, J. T. (2003). Radical scavenging activity of black cumin (*Nigella sativa* L.), coriander (*Coriandrum sativum* L.), and niger (*Guizotia abyssinica* Cass.) crude seed oils and oil fractions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(24), 6961-6969.
65. Robinson, T., McMullan, G., et al. (2001). Remediation of dyes in textile effluent: A critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*, 77(3), 247-255.

S

66. Saidi, F. Z. (2013). Elimination du bleu de méthylène par des procédés d'oxydation avancée. *Mémoire de magister, Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen-Algérie*.
67. Saha, S., Moorthi, S., Pan, H. L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., ... & Goldberg, M. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), 1015-1058.
68. Sakr, F., Sennaoui, A., Elouardi, M., Tamimi, M., & Assabbane, A. (2015). Étude de l'adsorption du Bleu de Méthylène sur un biomatériau à base de Cactus. *Journal of Materials and Environmental Science*, 6(2), 397-406.
69. Salleh, M. A. M., Mahmoud, D. K., Karim, W. A. W. A., & Idris, A. (2011). Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: A comprehensive review. *Desalination*, 280(1-3), 1-13.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

70. Slasli, M. A. (2002). Modélisation de l'adsorption par les charbons microporeux: Approches théorique et expérimentale. Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel-Suisse.
71. Solozhenko, E., Soboleva, N., & Goncharuk, V. (1995). Decolourization of azodye solutions by Fenton's oxidation. *Water Research*, 29(9), 2206-2210.
72. Stintzing, F. C., Herbach, K. M., Mosshammer, M. R., Carle, R., Yi, W., Sellappan, S., ... & Felker, P. (2005). Color, betalain pattern, and antioxidant properties of cactus pear (*Opuntia spp.*) clones. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(2), 442-451.
73. Sudzuki, H., Berger, S., & Muñoz Serrano, M. C. (1993). El cultivo de la tuna (Cactus Pear).

T

74. Temkin, M. J., & Pyzhev, V. (1940). Recent modifications to Langmuir isotherms. *Acta Physicochimica URSS*, 12, 217-222.
75. Tilahun, Y., & Welegerima, G. (2018). Pharmacological potential of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*): A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(3), 1360-1363.

W

76. Weber, E. J., & Adams, R. L. (1995). Chemical-and sediment-mediated reduction of the azo dye disperse blue 79. *Environmental science & technology*, 29(5), 1163-1170.

Z

77. Zhang, Z., Wang, J., Liu, D., Li, J., Wang, X., Song, B., ... & Song, Y. (2017). Hydrolysis of polyaluminum chloride prior to coagulation: Effects on coagulation behavior and implications for improving coagulation performance. *Journal of Environmental Sciences*, 57, 162-169.
78. Zhang, H., Wang, J., Zhou, B., Zhou, Y., Dai, Z., Zhou, Q., ... & Luo, Y. (2018). Enhanced adsorption of oxytetracycline to weathered microplastic polystyrene: Kinetics, isotherms and influencing factors. *Environmental Pollution*, 243, 1550-1557.
79. Zhang, Y., & Lin, X. (2015, June). Disco: Distributed optimization for self-concordant empirical loss. In *International Conference on Machine Learning*, 362-370.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

80. Zhenwang, L., ZhenLu, C., & Jianyan, L. (2000). The PT dye molecular structure and its chromophoric luminescences mechanism. *The 15th World Conference on Non-Destructive Testing*. 15-21.

Résumé

L'objectif visé dans le cadre de notre étude est la valorisation d'un déchet agricole (Cactus) dans l'élimination d'un polluant organique, le colorant bleu de méthylène (BM), qui joue un rôle néfaste sur le plan environnemental. Les résultats obtenus ont montré que : Le taux d'élimination de colorant adsorbée augmente avec l'accroissement de sa concentration ; l'adsorption est optimale à pH 6, une vitesse d'agitation de $300 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$, une concentration de la suspension de la poudre de Cactus de 0,05 g, une concentration du bleu de méthylène de $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ et à 25°C . L'adsorption est de nature physique, exothermique et non spontanée. La cinétique d'adsorption est régie par le modèle de second ordre et l'isotherme d'adsorption est de type S. L'application des modèles d'adsorption de Temkin, Freundlich et Langmuir aux résultats expérimentaux a montré que : l'adsorption du bleu de méthylène sur la poudre de cactus se rapproche plus du modèle de Freundlich et Temkin.

Mots clés : Adsorption, Bleu de méthylène , déchets agricoles, cactus .

Abstract

The objective of our study is the recovery of agricultural waste (Cactus) in the elimination of an organic pollutant, (BM), which plays a harmful role in the environment. The results obtained showed that: The amount of adsorbed dye increases with increasing concentration; adsorption is optimal at pH 6, a stirring speed of 300 rpm, a concentration of the suspension of the Cactus powder of 0,05 g, a concentration of BM of $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and at 25°C . Adsorption is physical, exothermic, and non-spontaneous. The adsorption kinetics are governed by the second order model and the adsorption isotherm is type S. The application of the adsorption models of Temkin, Freundlich and Langmuir to the experimental results has shown that: the adsorption of BM on cactus powder is more like Freundlich's and Temkin model.

Keywords: Adsorption, methylene blue, agricultural waste, cactus.