

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département génie de l'environnement

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie des Procédés et Environnement

Par : Merazga Ines

Sujet

**Étude cinétique et thermodynamique de l'adsorption d'un colorant par du
charbon actif commercial**

Soutenu publiquement, le 21 / 06 / 2026 , devant le jury composé de :

Mme Bekri Sarra	MCB	Univ-BBA	Présidente
Mme Abdoune Yamina	MCB	Univ-BBA	Examinatrice
Mme Banou Meriem	MCB	Univ-BBA	Encadrante

Dédicaces

C'est avec une profonde gratitude et une immense émotion que je dédie ce modeste travail, fruit de longues années d'études, de sacrifices et de persévérance, en premier lieu à mes très chers parents ; à mon tendre père **Abdelkrim**, mon modèle de rigueur et mon soutien inconditionnel, et à ma chère mère **Houria**, source de tendresse et de prières bienveillantes qui ont éclairé mon chemin. Je dédie également ce succès à mon cher époux **Islam**, mon pilier au quotidien, pour sa patience exemplaire, ses encouragements continus et son soutien indéfectible qui m'ont permis de mener à bien ce projet. Mes pensées et mon affection s'adressent tout particulièrement à mes frères **Zakaria** et **Abdelrahim** pour leur présence chaleureuse à mes côtés, ainsi qu'à tous les membres de ma grande et précieuse famille pour leurs vœux de réussite.

Remerciements

Avant tout, je remercie Allah Tout-Puissant de m'avoir accordé la santé, le courage et la persévérance nécessaires à la réalisation de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrante, Mme BANOU Meriem, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, sa patience et son soutien tout au long de la rédaction de ce mémoire. Ses sages conseils et ses commentaires pertinents ont grandement contribué à la réussite de ce travail.

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce mémoire et de consacrer une partie de leur temps à son examen.

Mes remerciements vont également à tous les professeurs du Département de Génie des Procédés pour la qualité de leur enseignement durant mes études universitaires.

J'exprime ma gratitude à tout le personnel du laboratoire pour son aide, sa disponibilité et ses conseils lors de la phase expérimentale.

Enfin, j'adresse mes plus vifs remerciements à mes parents, à mon époux, à ma famille ainsi qu'à mes amis pour leur soutien moral, leurs encouragements constants et leur confiance tout au long de mon parcours.

À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire, j'exprime ma profonde gratitude.

Merci à tous.

تهدف هذه الدراسة إلى إزالة صبغة أزرق الميثيلين من المحاليل المائية باستعمال الفحم النشط التجاري. تم دراسة تأثير عدة عوامل مثل كتلة المادة المازة وزمن التلامس ودرجة الحرارة. أظهرت النتائج فعالية الفحم النشط في إزالة الصبغة، مما يجعله مادة مناسبة لمعالجة المياه الملوثة.

الكلمات المفتاحية: الامتزاز، أزرق الميثيلين، الفحم النشط، معالجة المياه المستعملة.

Résumé

Cette étude porte sur l'adsorption du bleu de méthylène sur un charbon actif commercial afin d'évaluer son efficacité dans le traitement des eaux contaminées. L'influence de plusieurs paramètres, notamment la masse de l'adsorbant, le temps de contact, et la température, a été étudiée. Les résultats obtenus montrent que le charbon actif présente une bonne capacité d'élimination du colorant et constitue un adsorbant efficace pour le traitement des eaux usées.

Mots-clés : Adsorption, Bleu de méthylène, Charbon actif, Traitement des eaux usées.

Abstract

This study investigates the adsorption of methylene blue onto commercial activated carbon for wastewater treatment. The effects of several parameters, including adsorbent mass, contact time, temperature, were examined. The results demonstrate that activated carbon has a high adsorption capacity and is an effective adsorbent for dye removal from aqueous solutions.

Keywords: Adsorption, Methylene Blue, Activated Carbon, Wastewater Treatment.

Table des Matières

Dédicaces	iii
Remerciements	iv
Résumé	!
Table des matières	vi
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	viii
Introduction générale	01
Chapitre I : Généralités sur la pollution des eaux	
I.1 Introduction	03
I.2 Définition de la pollution	03
I.3 Origines de la pollution de l'eau	04
I.3.1 Pollution domestique	04
I.3.2 Pollution industrielle	04
I.4 Les différents types de pollution	05
I.4.1 Pollution biologique	06
I.4.2 Pollution chimique	07
I.4.3 Pollution physique	07
I.4.4 Pollution radioactive	07
I.4.5 Pollution thermique	08
I.4.6 Pollution mécanique	08
I.5 Méthodes de traitement	08
Chapitre II : Généralités sur les colorants et l'adsorption	13
II.1 Historique des colorants	13

II.2	Classification chimique des colorants	13
II.3	Les colorants et leurs impacts environnementaux	15
II.3.1	Bio-accumulation	15
II.3.2	Toxicité des colorants	16
II.4	Utilisation et application des colorants	17
II.5	Définition de l'adsorption	17
II.6	Types d'adsorption	18
II.7	Description du mécanisme d'adsorption	18
II.8	Généralités sur les adsorbants	20
II.9	Types d'adsorbants	20
II.10	Facteurs influençant le phénomène d'adsorption	22
II.11	Isothermes d'adsorption	22
II.12	Classification des isothermes d'adsorption	25
II.13	Facteurs caractérisant l'adsorbant	26
II.14	Cinétique de l'adsorption	27
II.15	Thermodynamique de l'adsorption	28
Chapitre III : Matériels et méthodes		
III.1	Introduction	30
III.2	Matériels	30
III.3	Produits	30
III.4	Appareils	30
III.5	Paramètres influençant l'adsorption	30
III.6	Présentation du bleu de méthylène	31
III.7	Application d'adsorption	32
III.8	Méthodes de dosage	32

III.9 Réalisation de l'adsorption	33
III.10 Étude cinétique	35
Chapitre IV : Résultats et discussion	
IV.1 Introduction	37
IV.2 Étude expérimentale d'adsorption du bleu de methylene	37
IV.3 Cinétique d'adsorption du bleu de methylene	41
IV.4 Isothermes d'adsorption	45
IV.5 Étude thermodynamique	53
Conclusion générale	58
Références bibliographiques	63

Liste des Figures

Figure I.1 : Les pollutions des eaux	03
Figure I.2 : Sources de contamination et transfert jusqu'au milieu littoral	07
Figure II.1 : Conséquences de la bioaccumulation après déversement de substances toxique	16
Figure II.2 : Description du mécanisme d'adsorption	19
Figure II.3 : Classification des isothermes d'équilibre d'adsorption selon Gilles et Smith	25
Figure IV.1: Courbe d'étalonnage du bleu de méthylène	37
Figure IV.2: Évolution du taux d'élimination en fonction du temps (min) et de la concentration initia(mg/L)	38
Figure IV.3: Évolution du taux d'élimination en fonction de la masse(g) , temps du contact	39
Figure IV. 4: Évolution du taux d'élimination en fonction de la masse(g), temps du contact	40
Figure IV. 5: Représentation graphique du modèle de pseudo premier ordre pour l'adsorption du bleu de méthylène sur différentes masses du charbon actif	41
Figure IV. 6: Représentation graphique du modèle de pseudo deuxième ordre pour l'adsorption du bleu de méthylène sur différentes masse du charbon actif	42
Figure IV. 7: Représentation graphique du modèle de la diffusion intra-particulaire pour l'adsorption du bleu de méthylène sur différentes masse du charbon actif	44
Figure IV. 8: Isotherme d'adsorption du bleu de méthylène sur différentes masse du charbon actif avec $m=0,01_0,02$ g	45
Figure IV. 9: Isotherme d'adsorption du bleu de méthylène sur différentes masses du charbon actif avec $m=0.03_0.04_0.05$ g	45
Figure IV.10: Isotherme de Langmuir pour l'adsorption du bleu de méthylène sur charbon actif avec $m=0,01g$ pour $V=100$ et $200mL$	46
Figure IV.11 : Isothermes de Freundlich pour l'adsorption du bleu de méthylène sur charbon actif avec $m=0,01g$ pour $V=100$ et $200mL$	47
Figure IV.12 : Isothermes de Temkin pour l'adsorption du bleu de méthylène sur charbon actif avec $m=0,01g$ pour $V=100$ et $200 mL$	48
Figure IV.13 : Taux d'élimination du bleu de méthylène à différentes temperature	49
Figure IV.14 : Le tracé de la variation de $\ln K_d$ en fonction de $1/T$	50

Liste des Tableaux

Tableau II.1 : Présentation des groupements chromophores et auxophores	13
Tableau III.1 : Caractéristiques physico-chimiques du bleu de methylene	31
Tableau IV. 1 : Paramètres cinétiques du modèle pseudo-premier ordre	41
Tableau IV. 2 : Paramètres cinétiques du modèle pseudo-deuxième ordre	42
Tableau IV. 3 : Paramètres du modèle de diffusion intra-particulaire	43
Tableau IV.4: Paramètres issues des trces d'isotherme de Langmuir	48
Tableau IV.5: Paramètres thermodynamiques d'adsorption du bleu de methylene	51

Introduction Générale

L'eau est une ressource naturelle essentielle à la vie et au développement socio-économique. Il est important de noter que l'activité industrielle et l'intensification des activités humaines entraînent une dégradation significative de la qualité de l'eau. Divers polluants, issus d'autres usages industriels, apparaissent. Les colorants présents dans certains milieux chimiques très stables présentent une biodégradabilité importante et des effets néfastes sur l'environnement et l'assainissement.

Le méthylène est l'un des colorants les plus utilisés dans les textiles, les produits pharmaceutiques et les produits chimiques. Sa présence dans les effluents industriels peut entraîner une pollution lumineuse des milieux aquatiques, perturber les processus biologiques et favoriser la production de substances toxiques par les organismes vivants. Il est donc nécessaire de développer des méthodes efficaces pour éliminer ce type de polluant avant que d'autres polluants ne s'accumulent dans l'environnement.

Parmi les différentes techniques utilisées pour traiter d'autres contaminants, l'adsorption se distingue par sa simplicité, sa grande efficacité et son faible coût. Le charbon actif, de par sa nature particulière, présente une grande surface spécifique, un faible degré de développement et une forte capacité d'adsorption des molécules polluantes.

Ce mémoire a été élaboré pour étudier l'adsorption du méthylène sur du charbon actif commercial, selon des approches cinétiques et thermodynamiques, fournissant la base pour analyser l'influence de différents paramètres opératoires, tels que la temps de contact, la masse d'adsorbant, le volume de solution, la température, sur les performances d'adsorption.

Ce mémoire est structuré en chapitres. Le premier chapitre présente des informations générales sur la pollution de l'eau et les différentes méthodes de traitement. Le chapitre suivant définit les colorants et le phénomène d'adsorption, ainsi que les principales isothermes connues. Le troisième chapitre décrit l'équipement utilisé, les protocoles expérimentaux adoptés, ainsi que le quatrième chapitre décrit les résultats obtenus et leurs interprétation.

Chapitre 1

Généralité de la pollution des eaux

I.1. Introduction

L'eau appelée aussi Oxyde de dihydrogène, est partout présente dans la nature. C'est un composé liquide incolore, inodore, sans saveur, mais avec des propriétés complexes à cause de sa polarisation et sa composition de différents sels minéraux, de pH neutre et c'est un excellent solvant entrant dans la composition de la majorité des organismes vivants.

I.2. Définition de la pollution

On peut présenter la pollution comme une modification physico chimique ou biologique d'un écosystème par introduction d'un élément qui crée des nuisances voire un danger pour le monde du vivant. La pollution est la conséquence de l'introduction de matières, en quantité suffisamment importante pour perturber son fonctionnement habituel à court ou à long terme. La plus grande perte de temps est due aux activités de l'être humain. Pour cerner correctement la notion de pollution par un effluent, il faut intégrer plusieurs facteurs qui caractérisent ce dernier et le site où elle est rejetée:

A- La nature des produits incriminés

B- Leurs concentrations dans l'eau

B- La sensibilité du milieu récepteur, c'est-à-dire, de l'écosystème qui recevra ces produits. **[1]**

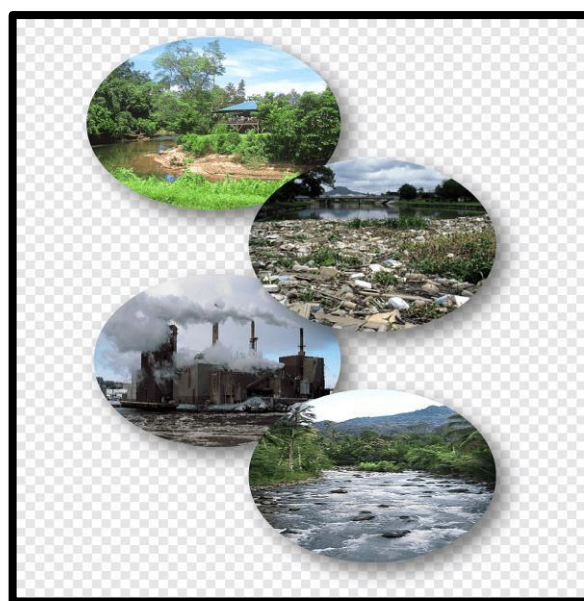


Figure I.1: les pollutions d'eaux [2]

La consommation d'eau polluée entraîne généralement de graves conséquences sur la santé. La pollution de l'eau peut également la rendre impropre à l'usage auquel elle est destinée.

I.3. Origines de la pollution de l'eau

La pollution permanente de l'eau est liée aux rejets industriels, aux eaux usées urbaines et à l'utilisation de pesticides et d'engrais en agriculture. Selon W. Wesley Eckenfelder (1982), la pollution de l'eau provient de quatre sources principales:

I.3.1. Pollution domestique

Les eaux usées domestiques sont acheminées par le réseau d'égouts jusqu'à la station d'épuration . Elles sont composées d'eau et d'excréments humains. Ces excréments contiennent des matières organiques et minérales biodégradables, dissoutes ou en suspension [4].

On distingue deux catégories d'eaux usées domestiques :

- a) Eaux grises : Elles comprennent les eaux de cuisine, de lessive et de toilettes. Elles sont riches en graisses.
- b) Eaux noires : Ce sont les eaux usées provenant des toilettes. Elles sont riches en matières azotées et en bactéries fécales.

I. 3.2. Pollution industrielle

Provenant des industries, elle se caractérise par sa diversité selon l'usage de l'eau. La composition des eaux usées industrielles varie d'une industrie à l'autre. Elles peuvent contenir des matières organiques, du phosphore, de l'azote, des solvants, des métaux lourds, des hydrocarbures, etc. [5].

a) Pollution agricole

Elle résulte de l'élevage et de la culture des terres. Les eaux usées d'origine agricole constituent une cause potentielle de pollution diffuse [6]. Cette pollution est caractérisée par:

- Des concentrations élevées en sels minéraux (azote, phosphore, etc.) provenant des engrais et du fumier (élevage) ;
- La présence de produits de traitement chimique (pesticides, herbicides...) [6].

b) Pollution pluviale

Le ruissellement des eaux pluviales constitue une source importante de pollution des cours d'eau, notamment lors des orages.

Au contact direct de l'atmosphère et du sol, ces eaux seaturent d'impuretés avant d'atteindre les cours d'eau et de les polluer [8].

I.4. Les différents types de pollution

L'eau est une ressource indispensable aux activités humaines, mais elle constitue également un lieu de vie privilégié. À cause du cycle de l'eau, les écosystèmes aquatiques (les eaux continentales ou océaniques) sont susceptibles d'être contaminés par des pollutions accidentelles ou chroniques

En rejetant des effluents contaminés dans le milieu aquatique, les activités humaines industrielles, agricoles ou urbaines polluent les eaux. On peut distinguer trois grandes familles de pollution, la pollution physique, chimique et biologique.

Le déversement dans le milieu aquatique de substances ou d'effluents contaminés n'est pas la seule cause de pollution des eaux de surface ou souterraines.

➤ En effet, l'eau de pluie permet aux polluants rejetés dans l'atmosphère de retomber sur les sols et lessiver les zones polluées par ruissellement et/ou infiltration, ces xénobiotiques peuvent alors rejoindre le milieu aquatique.

La pollution des eaux de surface s'est très diversifiée à partir de nombreuses activités humaines comme la déforestation, l'érosion due aux activités humaines, la construction de barrages, la canalisation de rivières, le comblement de zones humides, l'extraction de granulats [9].

I.4.1. Pollution biologique

Par définition, une pollution biologique est issue du milieu lui-même. C'est par le surdéveloppement de micro-organismes ou de végétaux micro- ou macroscopiques qu'un déséquilibre du milieu environnant peut entraîner une mortalité élevée chez les autres organismes présents. Ce surdéveloppement est généralement la conséquence d'une action humaine: enrichissement en nitrates d'un milieu (rejets organiques), développement de virus ; de bactéries, modification de la température d'un milieu (rejet d'eau chaude), introduction d'espèces invasives, etc. [9]

a) Pollution organique

Il s'agit d'effluents chargés de matières organiques fermentescibles (biodégradables), provenant des industries agroalimentaires (laiteries, abattoirs, sucreries, etc.). Ils entraînent une consommation d'oxygène dissous dans ces eaux, provoquant la mort des poissons par asphyxie et le développement (dépôts de matières organiques au fond des rivières) d'une fermentation anaérobie (putréfaction), générant des nuisances olfactives [9].

b) Pollution microbiologique

- ✓ La pollution microbiologique résulte de la présence dans l'eau de micro-organismes qui sont véhiculés par l'eau et sont responsables de beaucoup de maladies hydriques (Figure 2).
- ✓ L'eau peut être un milieu favorable aux développements des bactéries et virus nuisibles à la santé humaine des populations qui l'utilisent pour leurs besoins.
- ✓ Les bactéries pathogènes (*Vibrionacea*, *Enterobacteriaceae*, etc.) sont responsables des principales maladies hydriques.
- ✓ Les parasites sont eux aussi la cause de plusieurs autres maladies (hépatite infectieuse, méningite, etc.).



Figure I. 2. Sources de contamination et transfert jusqu'au milieu littoral [10]

I.4.2. Pollution chimique

La pollution chimique de l'eau résulte du rejet de certaines substances minérales toxiques dans les cours d'eau, telles que les nitrates, les phosphates, l'ammoniac et d'autres sels, ainsi que des ions métalliques. Ces substances ont un effet toxique sur la matière organique, la rendant plus dangereuse. Les polluants chimiques sont actuellement classés en cinq catégories : produits chimiques indésirables, pesticides, produits apparentés, détergents, colorants et autres éléments toxiques.

I.4.3. La pollution physique

Il s'agit d'un autre type de pollution, comme la pollution thermique due aux températures élevées, qui entraîne une diminution des niveaux d'oxygène dissous et une réduction de la solubilité des gaz, et la pollution radioactive, où la radioactivité dans les eaux naturelles peut être d'origine naturelle ou artificielle (énergie nucléaire).

I.4.4. Pollution radioactive

Il s'agit de la pollution causée par la radioactivité artificielle potentielle des rejets provenant de l'utilisation de l'énergie nucléaire sous toutes ses formes (installations et centrales d'extraction d'uranium, traitement des déchets radioactifs). Les éléments radioactifs s'incorporent aux molécules des organismes vivants. Plus on se situe dans la chaîne alimentaire, plus les organismes sont sensibles aux [9, 10].

I.4.5. Pollution thermique

Le rejet de la chaleur dans l'environnement constitue de nos jours une forme de pollution physique du milieu naturel susceptible de provoquer de véritables bouleversements biocénétiques car elle agit sur un facteur écologique primordial : la température du milieu. L'augmentation de la température de l'eau réduit la teneur en oxygène et augmente la vitesse de réactivité chimique.

I.4.6. Pollution mécanique

Elle résulte des décharges de déchets et de particules solides apportés par les eaux résiduaires industrielles, ainsi que les eaux de ruissellement. Ces polluants sont soit les éléments grossiers soit du sable ou bien les matières en suspension [9, 10]

I.5. Méthodes de traitement

L'eau est puisée, traitée, transportée, distribuée et puis utilisée. Après utilisation, cette eau est plus ou moins contaminée. Cette eau polluée retourne à la nature via les égouts, éventuellement après être passée par une station d'épuration, via un avaloir, ou directement dans un cours d'eau. L'eau effectue tout un voyage, que nous appelons le cycle de l'eau. Il est très important que suffisamment d'eau soit encore pure, après avoir été utilisée, ou qu'elle le redevienne, afin de pouvoir être à nouveau utilisée plus tard. Parce que l'eau n'est pas inépuisable [10].

a) Traitement Physique

- Séparation par gravité: Utilisation de décanteurs pour séparer les solides en suspension de l'eau par gravité.
- Filtration: Passage de l'eau à travers des filtres pour retenir les particules. Des dispositifs comme les filtres à bandes peuvent être utilisés pour piéger les matières en suspension.
- Flottation: Introduction de bulles d'air pour faire flotter les matières grasses ou les solides légers qui sont ensuite écrémés.
- Tamisage: Utilisation de tamis pour retenir les déchets de grande taille.
- Sédimentation: Utilisation de bassins de sédimentation pour permettre aux particules plus lourdes que l'eau de se déposer.

- Échange ionique: Utilisation de résines échangeuses d'ions ou de fibres spécifiques pour éliminer certains ions métalliques.

b) Traitement Chimique

- Précipitation: Ajout de réactifs chimiques pour former des précipités avec certaines substances dissoutes, qui peuvent ensuite être filtrées ou décantées.
- Adsorption: Utilisation de charbon actif ou d'autres matériaux adsorbants pour retirer les contaminants organiques ou les métaux lourds.
- Coagulation/Floculation: Ajout de coagulants pour agglomérer les particules fines en floccs plus gros, facilitant leur enlèvement. Des bio-polymères, comme ceux préparés par le Polymatique B, peuvent être utilisés dans ce processus.
- Chloration/Ozonation: Utilisation de chlore ou d'ozone pour désinfecter l'eau en tuant les bactéries et les virus.
- Neutralisation: Ajustement du pH de l'eau usée pour neutraliser les acides ou les bases.
- Électrocoagulation: Utilisation de courant électrique pour coaguler et flotter les contaminants.

c) Traitement biologique

- Boues activées: Utilisation de microorganismes pour dégrader les substances organiques. L'aération est souvent utilisée pour favoriser la croissance des bactéries aérobies.
- Lits bactériens : Passage de l'eau usée à travers un lit de matériau supportant la croissance microbienne pour la dégradation biologique des polluants.
- Lagunage: Utilisation de bassins peu profonds où l'eau est exposée à la lumière solaire, à l'oxygène et aux microorganismes pour une dégradation naturelle des polluants.
- Digestion anaérobie: Dégradation des matières organiques en l'absence d'oxygène, produisant du biogaz qui peut être récupéré comme source d'énergie.

d) Méthodes combinées et avancées

- Osmose Inverse: Utilisation de membranes semi-perméables pour séparer les contaminants de l'eau. Cette technique est souvent précédée d'un adoucissement de l'eau, par exemple via

adoucisseurs .

- Nanofiltration et Ultrafiltration: Utilisation de membranes avec des pores de taille nanométrique pour éliminer les contaminants.
- Désorption thermique: Utilisation de la chaleur pour vaporiser les contaminants volatils. **[10]**

Chapitre 2

Généralités sur les colorants

II.1. Historique des colorants

En 1876, Witt observa que certaines substances colorées contenaient un groupement caractéristique qu'il nomma "chromophore". Il remarqua que l'introduction d'un chromophore dans un hydrocarbure, qui est à l'origine une substance incolore, conférait une teinte à ce dernier. L'hydrocarbure devenait alors un chromogène, c'est-à-dire une molécule affichant une coloration plus ou moins marquée. Les chromophores sont des structures chimiques qui incluent des groupes possédant des doubles liaisons (voir Tableau II.1). Ainsi, la présence d'un chromophore, impliquant une double liaison chromophorique, est directement responsable de la couleur d'une molécule. Par ailleurs, lorsqu'un chromogène intègre un second groupement fonctionnel appelé auxochrome, il peut se transformer en colorant. Les auxochromes jouent un rôle essentiel en permettant la fixation des colorants sur différents supports. Ils ont également la propriété d'accentuer l'intensité de la coloration. Parmi les exemples courants d'auxochromes, on retrouve les groupes amine ($-\text{NH}_2$) et hydroxyle ($-\text{OH}$). [12]

Tableau II.1 Présentation des groupements chromophores et auxochromes [12].

Groupements chromophores	Groupements auxochromes
Azo ($-\text{N}=\text{N}-$)	Amine primaire ($-\text{NH}_2$)
Nitroso ($-\text{N}=\text{O}$)	Amine secondaire ($-\text{NHR}$)
Carbonyl ($=\text{C}=\text{O}$)	Amine tertiaire ($-\text{NR}_2$)
Vinyl ($-\text{CH}=\text{CH}-$)	Hydroxyl ($-\text{OH}$)
Nitro ($-\text{NO}_2$)	Alkoxy ($-\text{OR}$)
Sulphure ($>\text{C}=\text{S}$)	Donneurs d'électrons ($-\text{CL}$)

II.2 Classification chimique des colorants

Dans cette méthode, les colorants sont regroupés selon certains dispositifs structuraux chimiques communs. Suivant cette méthode de classification un colorant textile peut être classé selon son groupement chromophore qui lui confère la couleur ou selon son groupement auxochrome qui permet sa fixation [13].

a) Colorants azoïques

Ces colorants sont caractérisés par la présence, au sein de la molécule, d'un groupe azo ($-N=N-$) reliant deux groupes alkyle ou aryle identiques ou différents. [14]

b) Colorants du triphénylméthane

Dérivés du méthane, ces colorants possèdent des groupes phényle à la place des atomes d'hydrogène, liés à un atome de carbone central. En principe, à partir du diphénylméthane ou du triphénylméthane, on obtient un colorant en introduisant, en position para par rapport à l'atome de carbone central, au moins deux auxochromes aminés ou hydroxylés, puis en procédant à une oxydation en milieu acide. [15].

c) Colorants anthraquinoniques

Sur le plan commercial, ces colorants sont les plus importants après les colorants azoïques, offrant une large gamme de teintes jaunes, orangées et rouges. En revanche, les colorants anthraquinoniques, dans les nuances de bleu et de turquoise, offrent une meilleure tenue des couleurs et une plus grande intensité. Par conséquent, ces deux types de colorants se complètent parfaitement pour créer une palette de couleurs complète. Contrairement à d'autres colorants [16].

d) Les colorants indigoïde

Les colorants indigoïdes tirent leur appellation de l'indigo dont ils dérivent. Ces colorants peuvent être utilisés comme additifs dans les produits pharmaceutiques ainsi que dans les diagnostics médicaux. [17]

e) Les colorants phtalocyanines

Les phtalocyanines se caractérisent par une structure complexe intégrant un atome métallique en position centrale. Les colorants appartenant à ce groupe sont synthétisés à partir de la réaction du dicyanobenzène avec un halogénure métallique tel que le cuivre, le nickel, le cobalt, le platine (Cu, Ni, Co, Pt, etc.). [18]

f) Les colorants xanthènes

Sont des composés qui constituent les dérivés de la fluorescéine halogénée. Ils sont dotés d'une intense fluorescence. Leur propriété de marqueurs lors d'accident maritime ou de traceurs d'écoulement pour des rivières souterraines est malgré tout bien établie. Ils sont aussi utilisés comme colorant en alimentaire, cosmétique, textile et impression. [19]

g) Les colorants nitrés et nitrosés

Les colorants nitrés et nitrosés constituent une catégorie restreinte de colorants, à la fois peu nombreux et relativement anciens. Malgré leur ancienneté, ils sont encore employés aujourd'hui en raison de leur coût très bas, rendu possible par la simplicité de leur structure moléculaire. Celle-ci se distingue principalement par la présence d'un groupe nitro (-NO₂) en position ortho par rapport à un groupement électrodonneur tel qu'un hydroxyle ou des groupes aminés. [20]

II.3 Les colorants et leurs impacts environnementaux

Ils contribuent aux problèmes de pollution liés à la génération d'une quantité considérable d'eau usée contenant des colorants résiduels. Le rejet de ces eaux résiduaires dans l'écosystème est une source dramatique de pollution, d'eutrophisation et de perturbation non esthétique dans la vie aquatique et par conséquent présente un danger potentiel de bioaccumulation qui peut affecter l'homme par transport à travers la chaîne alimentaire.

II.3.1 Bio-accumulation

Si un organisme ne dispose pas de mécanismes spécifiques, soit pour empêcher la résorption d'une substance, soit pour l'éliminer une fois qu'elle est absorbée, alors cette substance s'accumule. Les espèces qui se trouvent à l'extrémité supérieure de la chaîne alimentaire, y compris l'homme, se retrouvent exposées à des teneurs en substances toxiques pouvant aller jusqu'à cent mille fois plus élevées que les concentrations initiales dans l'eau (illustration du phénomène de bioaccumulation de colorant). [21].

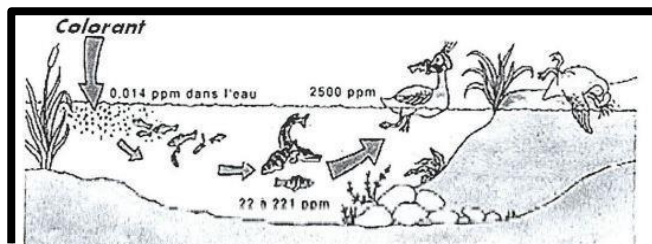


Figure II.1 Conséquences de la bioaccumulation après déversement de substances toxiques (colorants) dans un cours d'eau [21].

II.3.2 Toxicité du colorants

Des études faites sur divers colorants commerciaux ont démontré que les colorants basiques sont les plus toxiques pour les algues [22]. Ce résultat a été prouvé par le test de mortalité des poissons effectués sur 3000 colorants commerciaux où il s'est avéré que les colorants basiques, et plus particulièrement ceux de la famille de triphénylméthane sont les plus toxiques. Par ailleurs, les poissons semblent être relativement sensibles aux colorants acides [23].

D'autre part, la mortalité examinée avec des rats a montré que seulement 1% sur 4461 colorants commerciaux présentent des valeurs de DL50 au dessous du poids corporel de 250 mg kg⁻¹ [24]. Par conséquent, la chance de la mortalité humaine due à la toxicité aiguë de colorant est probablement très basse. Cependant, il faut sensibiliser l'être humain quant à l'utilisation de certains colorants. En effet, il a été prouvé que quelques colorants dispersés peuvent causer des réactions allergiques, dermatologiques, etc.

En raison des effets mentionnés ci-dessus, il est clair que les colorants, essentiellement les azoïques (pourquoi colorants azoïques précisément?), ne devraient pas envahir notre environnement. Par conséquent, il est nécessaire de traiter les eaux résiduaires chargées de colorants jusqu'à leur minéralisation totale. [24]

Par ailleurs, l'exposition des travailleurs du textile aux colorants a suscité une attention particulière. Il a ainsi été constaté que l'augmentation du nombre de cancers de la vessie observée chez ces travailleurs est liée à leur exposition prolongée aux colorants azoïques.

La plupart des colorants azoïques ne sont pas toxiques initialement, à l'exception de ceux possédant un groupe amine libre. Cependant, la réduction de ces colorants (rupture de la

liaison azoïque) génère des amines aromatiques, connues pour être mutagènes et cancérogènes.

En revanche, la toxicité des amines aromatiques est fortement liée à la structure spatiale de la molécule, c'est-à-dire à la position des groupes amine. Par exemple,

la 2-naphtylamine est cancérogène, tandis que la 1-naphtylamine est beaucoup moins toxique.

La toxicité des colorants azoïques dépend donc de la nature et de la position des substituants. Elle est accrue par la présence de substituants sur le cycle aromatique, notamment les groupes nitro (-NO) et halogène (en particulier Cl). En revanche, la substitution par des groupes carboxyle ou sulfonate réduit la toxicité.[26].

II.4 Utilisation et application des colorants

Les colorants ont de multiples usages dans divers secteurs, parmi lesquels voici quelques applications cruciales :

Teinture et impression sur toutes sortes de fibres et tissus ;

- Coloration du bain de filage des fibres synthétiques ;
- Coloration du cuir et des fourrures ;
- Coloration du papier et du vélin ;
- Coloration des caoutchoucs, des feuilles et des substances plastiques ;
- Pigments pour toutes les méthodes de peinture ;
- Élaboration de teintes à base de chaux pour des précolorations et revêtements sur édifices ;
- Teintures pour l'impression des papiers peints ;
- Élaboration des encres ;
- Teintures des produits alimentaires ;
- Teintures destinées à des applications médicales et cosmétiques. [25].

II.5 Définition adsorption

L'adsorption est un phénomène de surface par lequel des molécules de gaz ou de liquides se fixent sur les surfaces solides des adsorbants selon divers processus plus ou moins intenses : on distingue souvent la chimisorption et la physisorption. Le phénomène inverse par lequel les molécules se détachent est la désorption. De plus, l'adsorption est un phénomène spontané et se produit dès qu'une surface solide est mise en contact avec un gaz ou un liquide. On

appelle généralement « adsorbat » la molécule qui s'adsorbe et « adsorbant » le solide sur lequel s'adsorbe la molécule. [28]

La fixation provient de l'établissement entre le solide et les molécules, de liaisons de Van Der Waals (type électrostatique de faible intensité avec des énergies d'interaction entre 5 et 40KJ/mol). [29]

II.6 Types d'adsorption

Selon la nature de la liaison adsorbat- adsorbant, on distingue deux types d'adsorption :

Adsorption physique : Dite physisorption. C'est un phénomène réversible résultant de l'existence des forces d'attractions électrostatique de type "Van der waals". L'énergie mise en jeu dans ce cas est faible. Elle est de l'ordre de 2 à 10 Kcal/ mol.

Adsorption chimique : Dite chimisorption. C'est un phénomène irréversible due à une liaison chimique forte de type covalente entre les atomes superficiels du solide et les molécules adsorbées, ce type d'adsorption met en jeu des énergies d'attractions élevées, qui conduisent à des chaleurs d'adsorption élevées, approchant souvent aux énergies de liaisons chimiques covalentes de l'ordre de 20 à 80 Kcal/ mol [30]

La différence entre la chimisorption et la physisorption se ramène à une différence entre les types de forces, liant les molécules de liquide à la surface du solide. L'adsorption physique est rapide et ne met en jeu aucune activation. En revanche, la chimisorption est, en général, lente et nécessite une énergie d'activation dans plusieurs cas. La physisorption se manifeste à des températures n'excédant pas trop le point d'ébullition de l'adsorbat, tandis que la chimisorption peut s'exercer à des températures plus élevées. [29].

II.7 Description du mécanismes de l'adsorption

Le processus se divise en deux grands mécanismes et se déroule généralement en quatre étapes distinctes.

a) Les deux types de mécanismes

- **Physisorption (Adsorption physique) :** Les molécules sont retenues par des forces intermoléculaires faibles (forces de Van der Waals). C'est un phénomène réversible.

- **Chimisorption (Adsorption chimique) :** Les molécules réagissent chimiquement avec la surface (création de liaisons covalentes ou ioniques). C'est un processus fort et généralement irréversible. [31]

b) Les étapes du processus cinétique

L'adsorption se produit principalement en quatre étapes. La figure II.2 représente un matériau (adsorbant) avec les différents domaines dans lesquels peuvent se trouver les molécules organiques ou inorganiques qui sont susceptibles de rentrer en interaction avec le solide.

Avant l'adsorption, le soluté passe par plusieurs étapes :

- 1)- Diffusion de l'adsorbât de la phase liquide externe vers celle située au voisinage de la surface de l'adsorbant.
- 2)- Diffusion extra granulaire de la matière (transfert du soluté à travers le film liquide vers la surface des grains).
- 3)- Transfert intra granulaire de la matière (transfert de la matière dans la structure poreuse de la surface extérieure des graines vers les sites actifs).
- 4)- Réaction d'adsorption au contact des sites actifs, une fois adsorbée, la molécule est considérée comme immobile. [29]

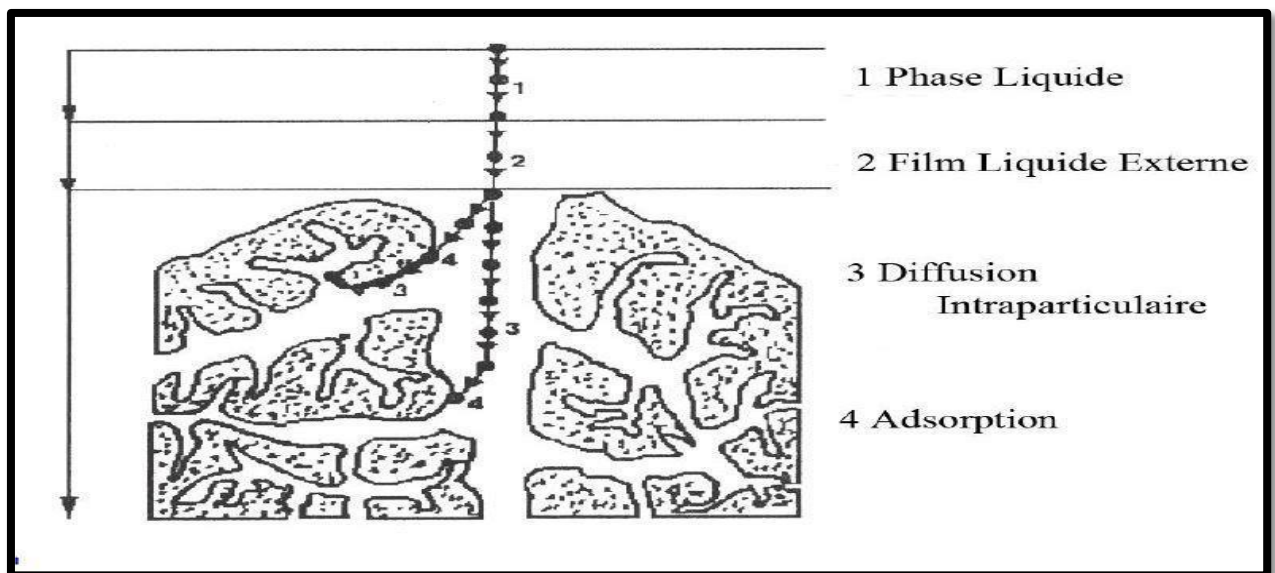


Figure II.2 Description du mécanisme de l'adsorption [29]

c) Cinétique d'adsorption

La cinétique d'adsorption sert à la description du processus d'adsorption d'un fluide sur une surface solide jusqu'à ce que l'équilibre d'adsorption soit atteint. Le mécanisme d'adsorption sur un solide poreux peut être décomposé en trois étapes essentielles .

1- Diffusion du soluté du volume de la solution vers la surface externe de l'adsorbant ;

2- Si l'adsorbant est poreux, le soluté pénètre à l'intérieur des pores de l'adsorbant et diffuse vers les sites actifs situés dans la structure interne du solide.

3- Fixation du soluté sur un site actif et ce par formation d'une liaison physique ou chimique [32]

II.8 Généralités sur les adsorbants

Le principal enjeu dans le processus d'adsorption réside dans la capacité à produire un adsorbant de qualité supérieure, présentant un fort taux d'adsorption, une sélectivité accrue, une vitesse élevée et la possibilité d'être recyclé.

Par conséquent, un adsorbant solide doit être défini par une structure microporeuse qui lui donne une vaste surface active par unité de masse.

Dans l'application pratique, les adsorbants employés sont soit organiques (végétale ou animale), soit inorganiques (minéraux), soit hybrides (composites).

On utilise les adsorbants tels quels ou suite à un processus d'activation destiné à accroître leur porosité (surface spécifique et volume des pores) et l'acidité des sites actifs. Parmi les matériaux couramment utilisés dans ce domaine figurent le charbon actif, les zéolites, la silice et les résines [33] [34]

II.9 Les types d'adsorbants

On distingue cinq grands types d'adsorbants « physiques » : les charbons actifs, les zéolithes, les alumines, les gels de silice, les argiles activées.

Il se fabrique environ 150 000 t.an⁻¹ de zéolithe, 400 000 t.an⁻¹ de charbons actifs, 75 000

t.an⁻¹ d'alumines activées, 400 000 t.an⁻¹ d'argiles et 25 000 t.an⁻¹ de gels de silice [34]

a) Les charbons actifs

Les charbons actifs sont préparés par pyrolyse d'une matière contenant du carbone, charbon ou matériau végétal, pour conduire à un charbon de bois qui est ensuite oxydé par la vapeur d'eau dans des conditions contrôlées pour créer une structure microporeuse. Il existe plusieurs centaines de qualités de charbons actifs, suivant le précurseur et les conditions de traitement. On peut aussi trouver des charbons actifs dits « chimiques », car activés à chaud en présence d'agents chimiques déshydratants, acide phosphorique ou chlorure de zinc. Les charbons actifs sont des adsorbants organophiles amorphes. Leur structure n'est donc pas régulière, contrairement à un cristal. Cette structure amorphe se traduit par une répartition continue de taille de pores dont l'étalement (l'écart entre les plus petites et les plus grandes valeurs) peut atteindre plusieurs ordres de grandeur.

b) Les zéolithes

Les zéolithes sont des alumino-silicates cristallisés microporeux de formule globale (AlO_2M , $n\text{SiO}_2$) où M représente le plus souvent un métal alcalin ou alcalino-terreux et $n \geq 1$. Il existe plus de 100 espèces de zéolithes, différant par la valeur de n et la structure cristallographique. La présence de cations dans les micropores génère des champs électriques de l'ordre de 10^{10} V.m^{-1} , ce qui fait de ces corps de puissants adsorbants polaires.

c) Les alumines activées

Les alumines activées sont obtenues par thermolyse flash du trihydroxyde d'aluminium $\text{Al}(\text{OH})_3$ qui conduit à un produit de composition approximative $\text{Al}_2\text{O}_3, 0.5 \text{ H}_2\text{O}$, possédant une structure poreuse résultant du départ de molécules d'eau. La surface des pores est couverte de groupements Al-OH , et l'adsorption se fait préférentiellement par liaison hydrogène. Les alumines activées sont des adsorbants amorphes, moyennement polaires et hydrophiles.

d) Les gels de silice

Les gels de silice sont préparés à partir de $\text{Si}(\text{OH})_4$ en phase aqueuse, obtenu par acidification d'un silicate de sodium, ou bien à partir d'un sol de silice (suspension dans un liquide, tel que l'eau, de microparticules (20 à 100 nm), appelées micelles, stables car trop petites pour décanter), ou bien par hydrolyse d'un alcoxy-silane. La solution fluide obtenue ne tarde pas à polymériser, ce qui conduit à un gel qui conserve sa structure lâche après rinçage et séchage. Les groupements Si-OH conduisent à des liaisons hydrogène. Il existe deux types de gels de

Charité silice : les microporeux, assez hydrophiles, et les macroporeux, versatiles, qui diffèrent par la taille des pores comme le nom l'indique. *Généralités sur les*

e) Les argiles activées

Les argiles activées sont des alumino-silicates de formule brute proche des zéolithes, mais de structure cristalline différente. Ce sont des produits naturels, utilisés surtout pour le séchage. [35]

II.10 Facteurs influençant le phénomène d'adsorption

a) Surface spécifique: La surface spécifique d'un adsorbant est définie comme le rapport surface/masse exprimé en m^2/g , elle est indépendante de la granulométrie du matériau et dépend plutôt de sa porosité. L'aire spécifique d'un solide est généralement déterminée par la méthode BET.

b) Porosité

Généralement, les matériaux adsorbants les plus couramment utilisés en pratique sont dotés d'une grande porosité. L'importance de ce paramètre réside dans la sélectivité géométrique des molécules à adsorber. Il semble que la plus grande diffusion dans les pores sera influencée par le diamètre des pores. Pour caractériser la porosité d'un matériau adsorbant, il faut déterminer sa porosité totale ainsi que les fractions dues aux macropores (supérieur à 50 nm), aux mésopores (entre 50 et 2 nm) et aux micropores (inférieur à 2 nm). Le volume des pores v_p exprimé en cm^3/g est déterminé par la méthode du porosimètre au mercure [36].

c) Température

L'adsorption est un phénomène Exothermique. Il décroît donc quand la température augmente. Généralement, l'adsorption physique s'effectue à des basses températures, alors que l'adsorption chimique demande des températures plus élevées ce qui implique qu'il faut fixer la température du processus dès le départ. En pratique, il n'y a pas de modification significative dans l'intervalle 5-20°C [37]

d) L'adsorbat

***Facteurs caractérisant l'adsorbat** La capacité d'adsorption d'une substance dépend de plusieurs facteurs comme : L'énergie de liaison de la substance à adsorber.

- ◆ La structure et la taille des molécules : un haut poids moléculaire réduit la diffusion et par conséquent la fixation de l'adsorbat.
- ◆ La solubilité des molécules à adsorber, moins une substance est soluble, mieux elle est adsorbée
- ◆ La concentration de l'adsorbat.

II.11 Isothermes d'adsorption

Le terme isotherme se réfère à l'illustration graphique d'un résultat issu d'une mesure, ou parfois à l'équation d'une courbe employée pour expliquer ce résultat. Les courbes d'adsorption représentent l'équilibre entre la concentration en phase liquide et la concentration en phase solide.

Ce que l'on obtient après un temps de contact présumé infini. Différents liens mathématiques aident à définir ce seuil et fournissent des renseignements sur la quantité maximale de soluté qui peut être adsorbée. La courbe dessinée reflète tous les agents qui provoquent une diminution de la concentration de l'adsorbat. Elle englobe ainsi divers phénomènes, tels que la complexation ou la précipitation en surface, l'échange d'ions et l'oxydoréduction. [38]

Nous allons présenter les modèles les plus couramment utilisés

a) Isotherme de Langmuir

L'isotherme de Langmuir est un modèle d'adsorption monocouche très simple et largement utilisé. Il décrit la plupart des réactions d'adsorption. Il est basé sur les hypothèses suivantes:

- Le nombre de sites d'adsorption sur la surface est limité .
- Un site ne peut adsorber qu'une seule molécule .
- La surface est recouverte au maximum par une couche .
- La réaction d'adsorption est réversible .
- La surface est énergiquement homogène .
- Il n'y a pas d'interaction entre les molécules adsorbées. [39]

Dans le cas de l'adsorption en solution, la relation connue sous l'appellation isotherme de Langmuir est le plus souvent formulée par :

$$q_e = \frac{q_{\max} K L C_e}{1 + K L C_e} \quad \text{Équation(1)}$$

Avec :

q_e: quantité adsorbée du soluté par unité de masse de solide à l'équilibre (mg/g).

C_e: concentration résiduelle de soluté à l'équilibre dans la solution (mg/l).

q_m: capacité maximum d'adsorption du solide (mg/g).

KL: constante de Langmuir liée à l'énergie de l'adsorption (l/mg).

La linéarisation de l'équation du modèle de Langmuir donne:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{\max} K L} + \frac{C_e}{q_{\max}} \quad \text{Équation (2)}$$

b) Isotherme de Freundlich

est une relation empirique proposée par Herbert Freundlich en 1909.

Il permet de représenter la charge d'un adsorbant en substance visée en équilibre avec la concentration de cette substance (ou sa pression partielle si c'est un gaz) dans le milieu environnant.

Il est utilisable de préférence aux faibles valeurs de concentration ou pression, loin des valeurs de saturation. [40]

Il peut être décrit par l'équation suivante:

$$qe = K_F C_e^{1/n} \quad \text{Équation (3)}$$

Où

qe: est la capacité d'adsorption de l'adsorbant (mg/g) à l'équilibre,

Ce: est la concentration d'adsorbat (mg/L) en solution à l'équilibre,

K_F : La constante de Freundlich, caractéristique du milieu - elle dépend de l'adsorbat, l'adsorbant et la température (L/g)

n: est le facteur d'hétérogénéité.

La forme linéaire de cette équation est la suivante:

$$\ln(qe) = \ln(K_F) + (1/n) \ln(Ce) \quad \text{Équation (4)}$$

Cela permet la détermination de K_F et de $1/n$, en représentant

$$\ln(qe) = f(\ln Ce) \quad \text{Équation (5)}$$

Une grande valeur de K_F , indique une capacité d'adsorption élevée. Une adsorption favorable est déduite lorsque la magnitude de $1/n$ varie entre 0 et 1, devenant plus hétérogène car sa valeur tend vers zéro. L'équation de Freundlich est caractérisée par une isotherme d'adsorption sans plateau, indiquant une multicouche l'adsorption), Il est généralement admis que des faibles valeurs de **n** ($0,1 < n < 0,5$) sont caractéristiques d'une bonne adsorption, alors que des valeurs plus élevées révèlent une adsorption modérée ($0,5 < n < 1$) ou faible ($n > 1$) [39].

II. 12 Classification des isothermes d'adsorption

Tous les systèmes adsorbant-adsorbât ne se comportent pas de la même manière. Expérimentalement, on distingue quatre classes principales nommées : S (Sigmoïde), L (Langmuir), H (Haute affinité) et C (partition Constante). [29] [41] [39]

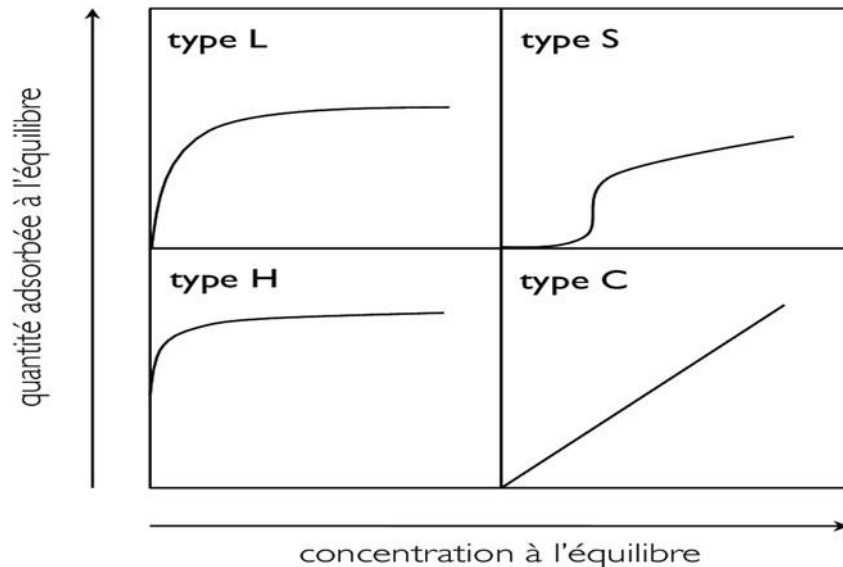


Figure II.3: classification des allures des isothermes d'équilibre d'adsorption selon leur allure (Giles et Smith, 1974).

II.12.1 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. Ce comportement est favorisé, d'une part, quand les molécules de soluté sont adsorbées verticalement comme c'est le cas des molécules possédant un seul groupe fonctionnel et d'autre part, quand les molécules se trouvent en compétition d'adsorption forte avec le solvant

II.12.2 Type L:

Les isothermes de classe L présentent, aux faibles concentrations de la solution, une concavité tournée vers le bas qui traduit une diminution des sites libres au fur et à mesure de la progression de l'adsorption. Ce phénomène se produit lorsque les forces d'attraction entre les molécules adsorbées sont faibles. Elle est souvent observée quand les molécules sont adsorbées à plat, ce qui minimise leur attraction latérale. Elle peut également apparaître quand les molécules sont adsorbées verticalement et lorsque la compétition d'adsorption entre le solvant et le soluté est faible. Dans ce cas, l'adsorption des molécules isolées est assez forte pour rendre négligeable les interactions latérales

II.12.3 Type C

Les isothermes de cette classe se caractérisent par une partition constante entre la solution et le substrat jusqu'à un palier. La linéarité montre que le nombre de sites libres reste constant au cours de l'adsorption. Ceci signifie que les sites sont créés au cours de l'adsorption. Ce qui implique que les isothermes de cette classe sont obtenues quand les molécules de soluté sont capables de modifier la texture du substrat en ouvrant des pores qui n'avaient pas été ouverts préalablement par le solvant

II.12.4 Type H

La partie initiale de l'isotherme est presque verticale, la quantité adsorbée apparaît importante à concentration quasiment nulle du soluté dans la solution. Ce phénomène se produit lorsque les interactions entre les molécules adsorbées et la surface du solide sont très fortes. L'isotherme de classe H est aussi observée lors de l'adsorption de micelles ou de polymères formées à partir des molécules de soluté

II.13 Cinétique de l'adsorption:

II.13.1 Modèle du pseudo-premier ordre

proposé initialement par Lagergren en 1889 par la relation suivant:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 \times (q_e - q_t) \quad \text{Équation (6)}$$

Où :

k₁ : la constante de vitesse pour une cinétique de pseudo première ordre.

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

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

II.13.2 Modèle de pseudo deuxième ordre

suggère l'existence d'une chimisorption, un échange d'électron par exemple entre molécule d'adsorbat et l'adsorbant solide[42].

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 \times (q_e - q_t)^2 \quad \text{Équation (7)}$$

Où :

k₂ : la constante de vitesse pour une cinétique de pseudo deuxième ordre (mg g⁻¹ min^{-1/2}),

q_t : la capacité d'adsorption à l'instant t ;

q_e : la capacité d'adsorption à l'équilibre (mg/g) [43].

II.13.3 Modèle de diffusion intra-particulaire

Ce modèle, est le facteur limitant du processus d'adsorption.

L'équation courante est [44]:

$$q_t = k_3 t^{1/2} + C \quad \text{Équation (8)}$$

Où :

K₃ est la constante du modèle de diffusion intra-particulaire (mg g⁻¹ min^{-1/2}),

C est une constante liée à l'épaisseur de la couche limite.

II.15 Thermodynamique d'adsorption :

Le critère principal qui permet de différencier la physisorption de la chimisorption est la chaleur d'adsorption ΔH .

Donnée par la relation de Gibbs Helmotz [45]:

Équation (9)

$$\Delta G = - RT \ln K_c$$

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

$$\ln K_c = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT}$$

$$K_c = \frac{C_e}{C_0 - C_e}$$

Avec :

K_c : constante d'équilibre .

ΔG : enthalpie libre (J/mol) .

ΔH : variation de l'enthalpie (J/mol) .

ΔS : variation de l'entropie (J/mol K) .

C_0 : concentration initiale de l'adsorbat (mg/L).

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

T : température absolue (K) .

R : constante des gaz parfaits (8,314 J/mol K).

Chapitre 3

Matériels et Méthodes

III .1 Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons les propriétés physico-chimiques du colorant étudié, le Bleu de Méthylène (BM), ainsi que les techniques de caractérisation et les protocoles expérimentaux appliqués à l'étude de son adsorption sur un charbon actif commercial. L'évolution de l'équilibre d'adsorption est suivie en fonction de différents paramètres opératoires tels que la masse d'adsorbant, le temps de contact et la température, puis modélisée selon des approches cinétiques et thermodynamiques du processus .

III.2 Matériels

- Érlenmeyer (100 et 200mL)
- Fiole jaugée (1L)
- Éprouvette graduée (100 mL)
- Seringues (5 mL)
- Spatule

III. 3 Produits

- Eau distillé
- Bleu de méthylène
- Charbon actif (commercial)

III.4 Appareils

- Agitateur magnétique chauffant
- Balance analytique électronique
- Thermomètre
- Spectrophotometre UV-vis «Shimadzu»

III.5 Parametres influencants l'adsorption

Pour évaluer les performances d'adsorption du bleu de méthylène sur charbon actif, nous avons opté pour une approche paramétrique en discontinu. Les conditions opératoires sont : le temps de contact, la masse de charbon actif, la concentration initiale, le volume de la solution et la température (T).

Protocole expérimental — cinétique et capacité d'adsorption

Une série de solutions de différentes concentrations a été préparée dans deux volumes distincts, de 100 mL et de 200 mL.

Une masse déterminée de charbon actif a ensuite été ajoutée à chaque solution. Les essais ont été réalisés à une température constante de 15 °C, sous agitation continue afin d'assurer le contact entre l'adsorbant et la solution.

Par ailleurs, cinq solutions de concentration identique ont été préparées, chacune contenant une masse différente de charbon actif : 0,01 g, 0,02 g, 0,03 g, 0,04 g et 0,05 g. À l'équilibre, la quantité de soluté adsorbée a été déterminée à partir de la différence entre la concentration initiale et la concentration résiduelle de la solution, selon la relation suivante : [46]

$$qt = \frac{C_i - C_e}{m} \cdot V \quad \text{Équation (10)}$$

Où :

qt : la quantité adsorbée (mg/g).

C_i : la concentration initiale de la solution de bleu de méthylène (mg/L).

C_e : la concentration résiduelle à l'équilibre (mg/L).

V : le volume de la solution (L).

m : la masse de l'adsorbant (g).[46]

III.6 Présentation du bleu de methylene:

Le bleu de méthylène, de formule chimique C₁₆H₁₈ClN₃S, est un composé organique hétérocyclique aromatique cationique. Découvert en 1876 par Heinrich Caro, il est largement utilisé comme colorant dans l'industrie textile, mais possède également des applications majeures en microbiologie et en médecine comme indicateur d'oxydoréduction et agent antiseptique [47].

Tableau III.1: Caractéristiques physico-chimiques du colorant (bleu de méthylène)

Propriété	Valeur
Formule chimique	C ₁₆ H ₁₈ ClN ₃ S
Masse molaire	319,85 g/mol
Solubilité	Soluble dans l'eau et l'alcool
Apparence	Poudre ou cristaux vert foncé, bleus en solution

III.7 Application d'adsorption

III.7.1 Préparation des d'une solution mère de bleu de méthylène

On prépare dans une fiole 1L de solution de bleu de méthylène en dissolvant 1g de ce bleu dans 1L d'eau distillée pour obtenir une concentration (1000mg/L).



Figure III.1: Solution mère de bleu de méthylène

III.7.2 Méthodes de dosage par Spectroscopie UV-Visible

Dans notre laboratoire , nous utilisons un spectrophotomètre (UV-120-02), Type : Helios Gamma piloté par un ordinateur. Les longueurs d'onde maximales sont obtenues entre 200 et 800 nm .C' est un appareil qui permet de mesurer directement les densités optiques.

III.8 Méthodes de dosage

III.8.1 Principe

Selon la loi de Beer-Lambert, l'absorbance A d'une solution est proportionnelle à sa concentration C [48]

$$A = \varepsilon \cdot L \cdot C \quad \text{Équation (11)}$$

Avec:

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

L : trajet optique (cm).

C : concentration de la solution (mg/L ou mol/L).

III.8.2 Détermination de la longueur d'onde maximale:

Avant de commencer cette étude, nous avons d'abord dû déterminer la longueur d'onde (λ_{max}) à laquelle l'absorbance est maximale. Grâce à la spectroscopie UV-visible, le spectrophotomètre analyse le spectre électromagnétique et génère une courbe qui met en évidence la zone d'activité maximale de la molécule de bleu de méthylène.

III.8.3 Établissement de la courbe d'étalonnage:

Pour réaliser la courbe d'étalonnage, nous préparons une série de solutions à différentes concentrations connues. Dans une série de 6 béchers de volume de 50 mL, on mélange différents volumes de solution mère du bleu de méthylène et de l'eau distillée. Ensuite analysées par spectrophotomètre. La courbe est une ligne droite qui représente la densité optique (DO) en fonction de la concentration initiale C_i .

III.9 Réalisation de l'adsorption:

Le procédé d'adsorption à l'interface solide-liquide est réalisé dans des bechers, contenant 100 et 200 mL de solution aqueuse du colorant et une masse déterminée de charbon actif. L'agitation est maintenue pendant un temps suffisant pour atteindre l'équilibre. La concentration finale du colorant est déterminée par spectrophotométrie UV-Visible.

L'efficacité du procédé est évaluée par taux d'élimination $R(\%)$ [48] :

$$R(\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad \text{Équation (12)}$$

La quantité de colorant fixée par gramme d'adsorbant est donnée par :

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) \cdot V}{m}$$

Équation (13)

Où :

qt : quantité de colorant adsorbé (mg/g),

C0, Ct : concentrations initiale et à l'instant t (mg/L),

V : volume de la solution (L),

m: masse d'adsorbant (g).

III.10 Étude cinétique

III.10.1 Effet de la concentration initial

Dans cette étude, l'effet de la concentration initiale de bleu de méthylène sur le processus d'adsorption a été étudié. Des solutions à 10, 20, 30 et 40–50 mg/L ont été préparées à partir d'une solution mère à 1000 mg/L. Cette série de solutions a permis d'évaluer les effets de différentes concentrations sur la réaction avec le charbon actif. Un volume et une masse spécifiques d'adsorbant (charbon actif) ont ensuite été utilisés dans chaque solution préparée.

III.10.2 Effet du temps de contact sur l'adsorption

L'expérience a été réalisée en maintenant la concentration initiale du bleu de méthylène à mg/L, pour un volume fixe. Les masses optimales d'adsorbant ont été utilisées : 0.01g, 0.02g, 0.03g, 0.04g, 0.05g.

Les temps de contact ont été étudiés à 15 °C, pour garantir un bon mélange et favoriser le contact entre les molécules de colorant et le charbon actif.

III.10.3 Effet de la masse de l'adsorbant

L'effet de la masse sur l'adsorption a été étudié en faisant varier la quantité d'adsorbant (charbon actif), tout en maintenant constante la concentration initiale du colorant bleu de méthylène. Un volume fixe de solution a été mis en contact avec différentes masses d'adsorbant (0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05 g), à température (15 °C).

III.10.4 L'effet de volume

L'effet de volume joue un rôle crucial dans l'adsorption du bleu de méthylène sur le charbon actif, nous avons utilisé deux volumes différents, 100 mL et 200 mL, et gardé les autres paramètres constants.

III.10.5 La température

La température est un paramètre thermodynamique qui peut influencer à la fois la vitesse et le mécanisme d'adsorption. Elle agit sur la mobilité des molécules en solution.

L'effet de la température sur l'adsorption du bleu de méthylène a été étudié à deux volumes différents 100 et 200 mL avec des températures différentes. Les autres conditions expérimentales ont été maintenues constantes.

Chapitre 4

Résultats et discussions

IV .1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus lors de l'étude de l'adsorption du bleu de méthylène sur un charbon actif commercial. Ces résultats ont été analysés et discutés.

IV.2 Étude expérimentales d'adsorption de bleu de méthylène

- Établissement de la courbe d'étalonnage

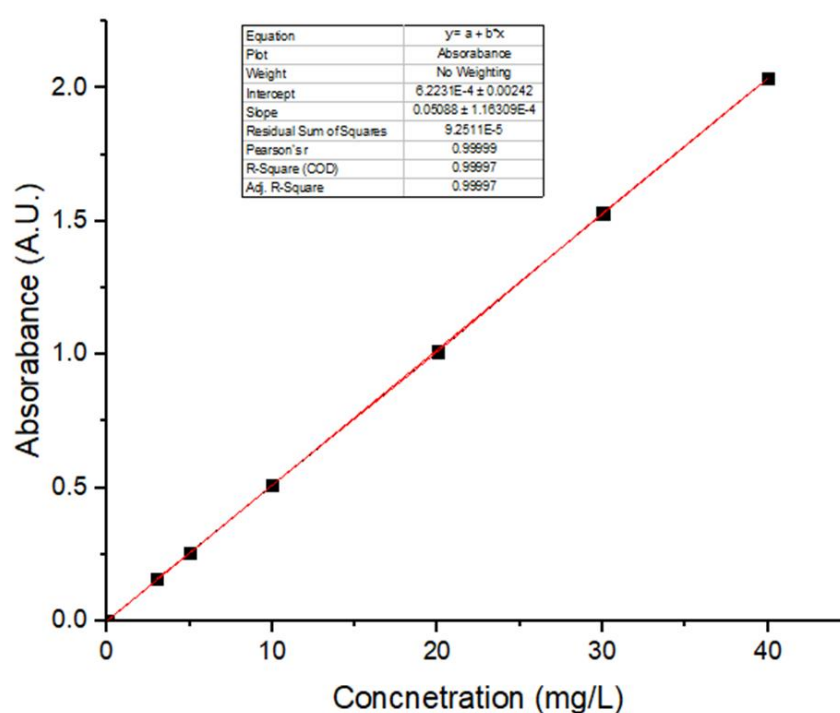


Figure IV.1 : Courbe d'étalonnage du colorant bleu de méthylène, $\lambda_{\max} = 664 \text{ nm}$

. Pour tracer les courbes d'étalonnage, on a mesuré l'absorbance des solutions aqueuses à des concentrations connues à des concentrations connues à la même longueur d'onde maximale du bleu de méthylène ($\lambda_{\max} = 664 \text{ nm}$).

- Effet de la concentration initiale

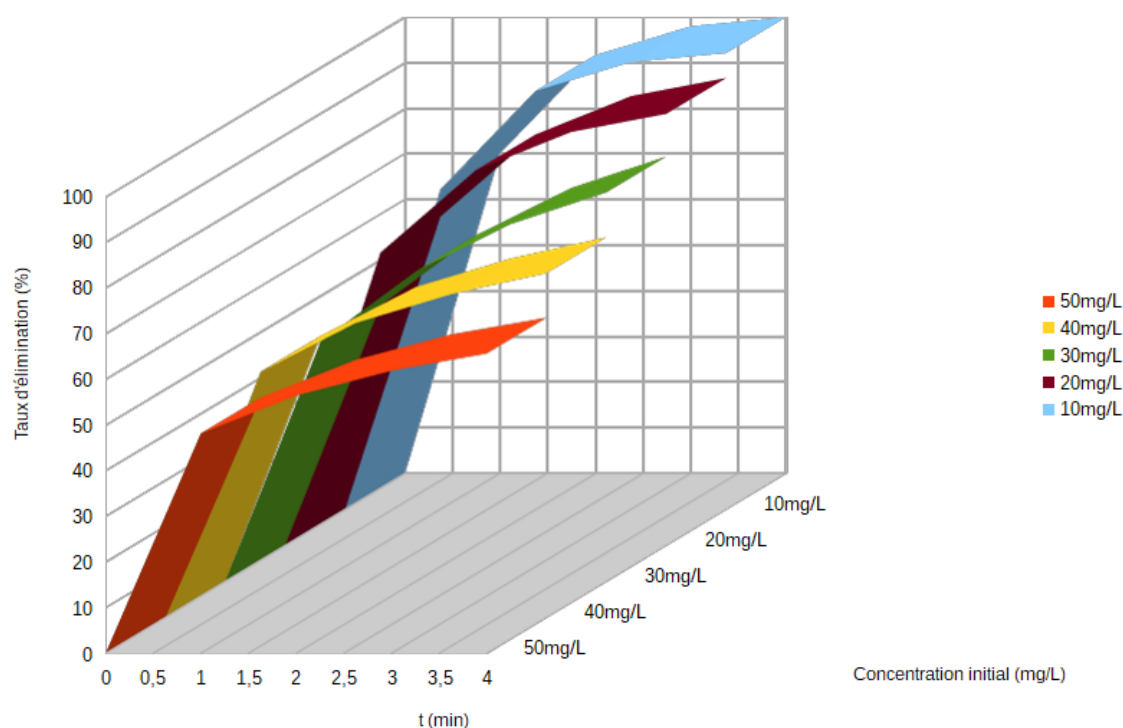


Figure IV.2 : Évolution du taux d'élimination en fonction du temps (min) et de la concentration initiale mg/L.

Les conditions opératoires sont : $t = 4$ min pour $V = 200$ mL à une température de 15°C .

La **figure IV.2** montre une cinétique rapide au début du processus, suivie d'une stabilisation progressive indiquant l'atteinte de l'équilibre. Cette phase rapide peut être attribuée à l'abondance initiale de sites actifs disponibles à la surface du charbon. L'équilibre est atteint plus rapidement pour $C_0 = 10$ mg/L, tandis qu'il est plus lent pour la concentration $C_0 = 50$ mg/L. Par ailleurs, l'efficacité d'élimination augmente globalement avec une faible concentration initiale de bleu de méthylène dans la solution. En effet, le taux d'élimination pour $t = 4$ min passe d'environ 66 % pour 50 mg/L à 100 % pour 10 mg/L.

- Effet de la masse d'adsorbant, temps de contact et le volume de la solution

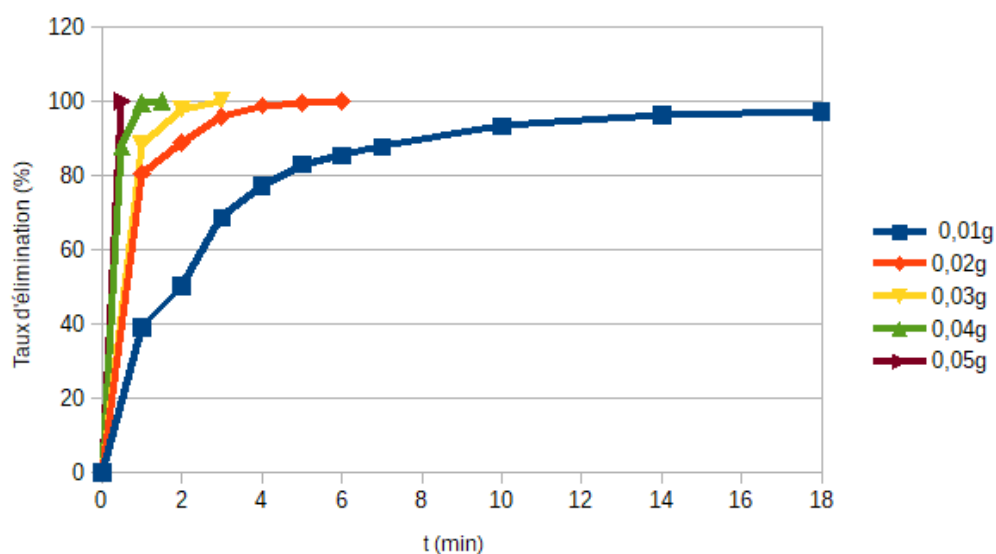


Figure IV. 3: Évolution du taux d'élimination en fonction de la masse(g) , temps du contact

.Les conditions opératoires sont : $C_0 = 20$ mg/L, à une température de 15°C et $V=100\text{mL}$

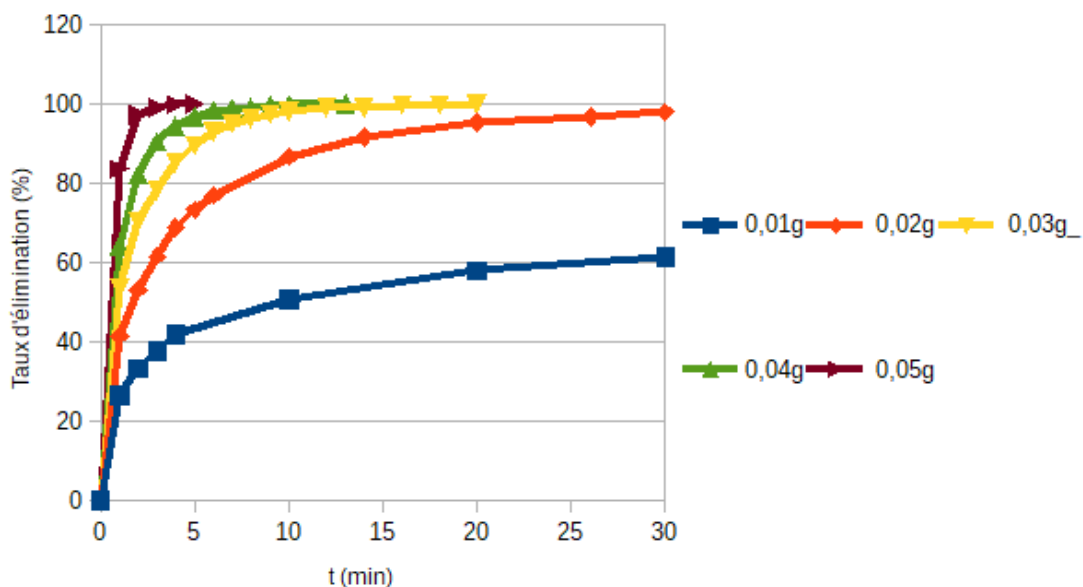


Figure IV. 4 : Évolution du taux d'élimination en fonction de la masse (g), temps du contact .

.Les conditions opératoires sont : $C_0 = 20$ mg/L, à une température de 15°C et $V=200\text{mL}$

D'après les figures, l'effet de la masse d'adsorbant sur l'adsorption est significatif. En effet, l'augmentation de la masse d'adsorbant influence à la fois le rendement d'adsorption et le temps d'équilibre. Pour des masses comprises entre 0,03 et 0,05 g, l'adsorption est très rapide, avec un temps d'équilibre d'environ 1 min, et le taux d'élimination atteint 100 %. En revanche, pour des masses inférieures à 0,03 g, le processus d'adsorption est plus lent, le temps d'équilibre étant d'environ 20 min.

Ainsi, plus le rapport V/m est élevé, plus le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre est important. D'après les mêmes figures, on constate que, malgré l'augmentation de la masse d'adsorbant, l'augmentation du volume de la solution entraîne une diminution du taux d'élimination ainsi qu'un allongement du temps d'équilibre. En effet, pour une masse d'adsorbant constante de 0,01 g, le passage d'un volume de 100 mL à 200 mL conduit à une diminution du taux d'élimination et à une augmentation du temps nécessaire pour atteindre l'équilibre. Cette tendance peut être attribuée à la diminution du nombre de sites actifs disponibles par unité de volume de solution, ce qui réduit l'efficacité globale du processus d'adsorption.

IV.3 Cinétique d'adsorption du bleu de méthylène

La cinétique d'adsorption du bleu de Méthylène par le charbon actif en poudre a été suivie en appliquant les modèles de pseudo premier ordre et deuxième ordre. L'adsorption a été étudiée en fonction du temps pour déterminer la quantité de colorant adsorbé à un intervalle de temps optimisé, des masses du charbon actif ont été introduites dans une série d'erbels et on y ajoute une solution de 200 ml du bleu de methylene avec une concentration initiale de 20 mg /L et L'ensemble est agité puis filtré et analysé par spectrophotométrie.

IV.3.1 Modèle du pseudo-premier ordre

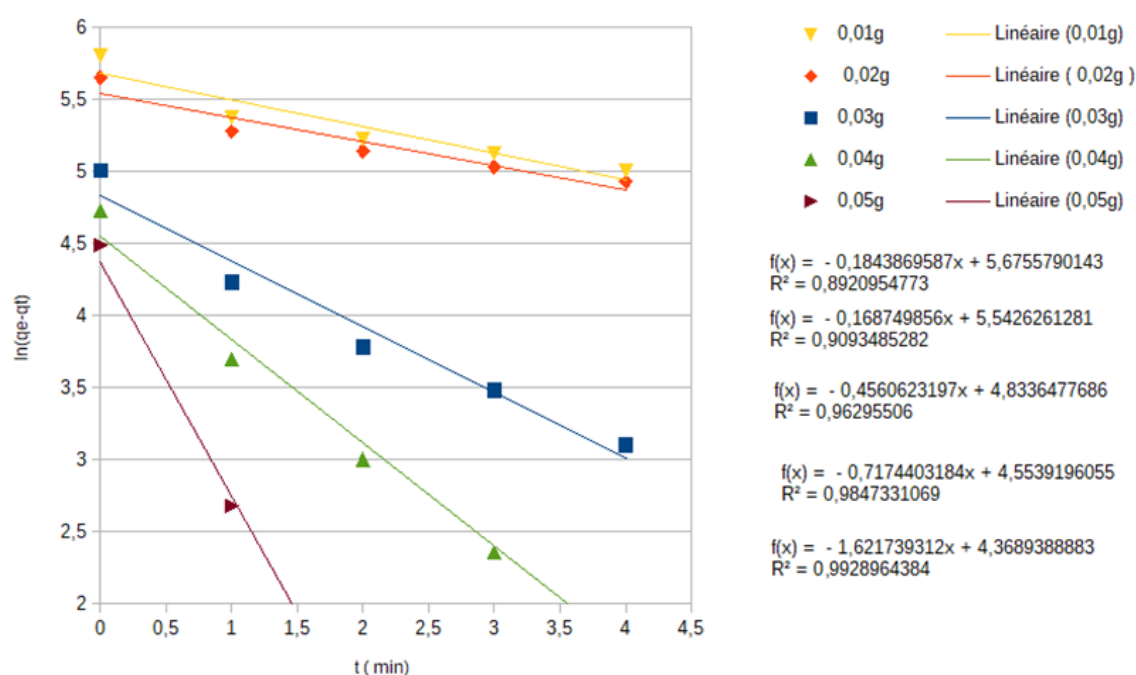


Figure IV.5: Représentation graphique de modèle de pseudo premier ordre pour l'adsorption du bleu de Méthylène sur différents masse du charbon actif

.Les conditions opératoires sont : $C_0 = 20$ mg/L, à une température de 15°C et $V=200\text{mL}$

Tableau IV. 1: Paramètres cinétiques du modèle pseudo-premier ordre

Masse (g)	q_e (exp)	q_e (calculée)	k_1 (g .mg ⁻¹ .min ⁻¹)	R^2
-----------	-------------	------------------	---	-------

0,01	182	291,45	0,1844	0,892
------	-----	--------	--------	-------

0,02	145,88	255,34	0,16875	0,910
0,03	127,33	125,67	0,45606	0,963
0,04	106,9	95,012	0,71744	0,985
0,05	182	78,96	1,6212	0,993

IV.3.2 Modèle du pseudo-deuxième ordre

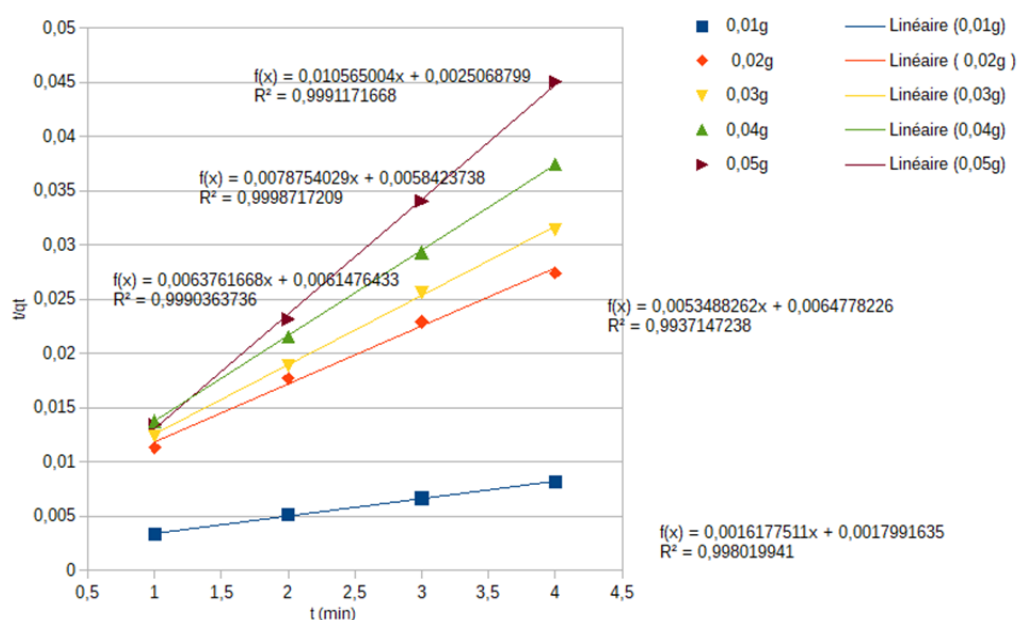


Figure IV.6: Représentation graphique de modèle de pseudo deuxième ordre pour l'adsorption du bleu de Méthylène sur différents masses du charbon actif

.Les conditions opératoires sont : $C_0 = 20$ mg/L, à une température de 15°C et $V=200\text{ml}$

Tableau IV. 2 : Paramètres cinétiques du modèle pseudo-deuxième ordre

Masse (g)	q_e (exp)	q_e (calculée)	k_2 (g .mg ⁻¹ .min ⁻¹)	R^2
-----------	-------------	------------------	---	-------

0,01	182	618,43	0,0022	0,9980
0,02	145,88	188,67	0,0044	0,9937
0,03	127,33	156,98	0,0066	0,9990
0,04	106,9	125	0,011	0,9987
0,05	88,88	100	0,04	0,9991

Les résultats présentés dans les figures montrent que l'adsorption du bleu de méthylène par le charbon actif en poudre est décrite de manière satisfaisante par le modèle cinétique de pseudo-deuxième ordre. Les coefficients de corrélation ($R^2 \approx 1$) obtenus pour l'ensemble des masses de charbon actif étudiées confirment la validité de ce modèle et son adéquation avec les données expérimentales.

L'adéquation de ce modèle suggère que la vitesse d'adsorption dépend principalement de la quantité de sites actifs disponibles à la surface du charbon actif ainsi que de l'interaction entre les molécules de bleu de méthylène et l'adsorbant. Par ailleurs, le fait que le modèle de pseudo-deuxième ordre soit valide pour toutes les masses utilisées indique que le mécanisme d'adsorption reste le même dans l'ensemble des conditions expérimentales étudiées.

IV.3.3 Modèle de diffusion intra-particulaire

Le modèle de la diffusion intraparticulaire a été utilisé pour modéliser les résultats obtenus à 15°C, pour différentes masses du charbon actif

Tableau IV. 3: Paramètres du modèle de diffusion intra-particulaire

Masse (g)	K_{int}	X	R^2
0,01	65,61	50,76	0,9984
0,02	57,6	31	0,9997
0,03	46,2	36,72	0,98187
0,04	34,61	40,42	0,95668
0,05	16,5	58	0,815

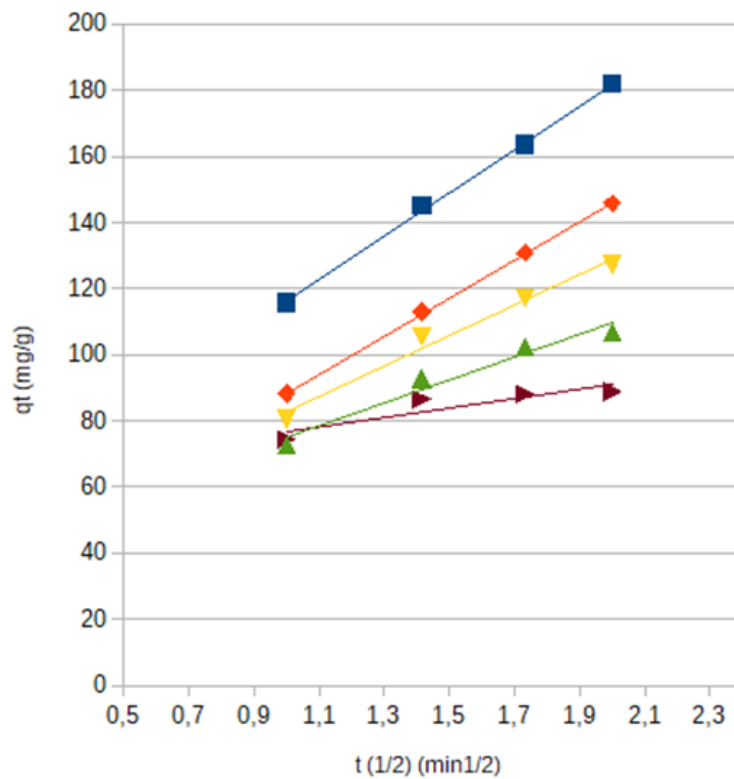


Figure IV.7: Représentation graphique de modèle de la diffusion intra-particulaire pour l'adsorption du bleu de Méthylène sur différents masse du charbon actif

.Les conditions opératoires sont : $C_0 = 20 \text{ mg/L}$, à une température de 15°C et $V=200\text{mL}$

On remarque que les droites du model intra particule ne passe pas par l'origine donc la diffusion intra particule est absent.

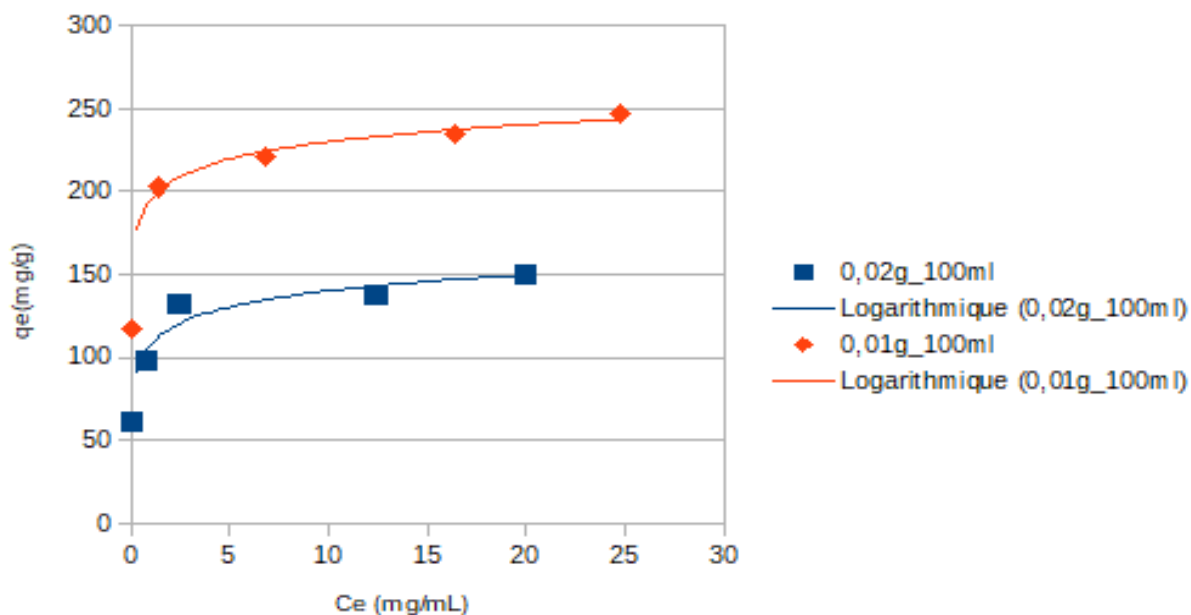


Figure IV.8: Isotherme d'Adsorption du bleu de Méthylène sur différentes masses de charbon actif avec $m=0,01_0,02$ g

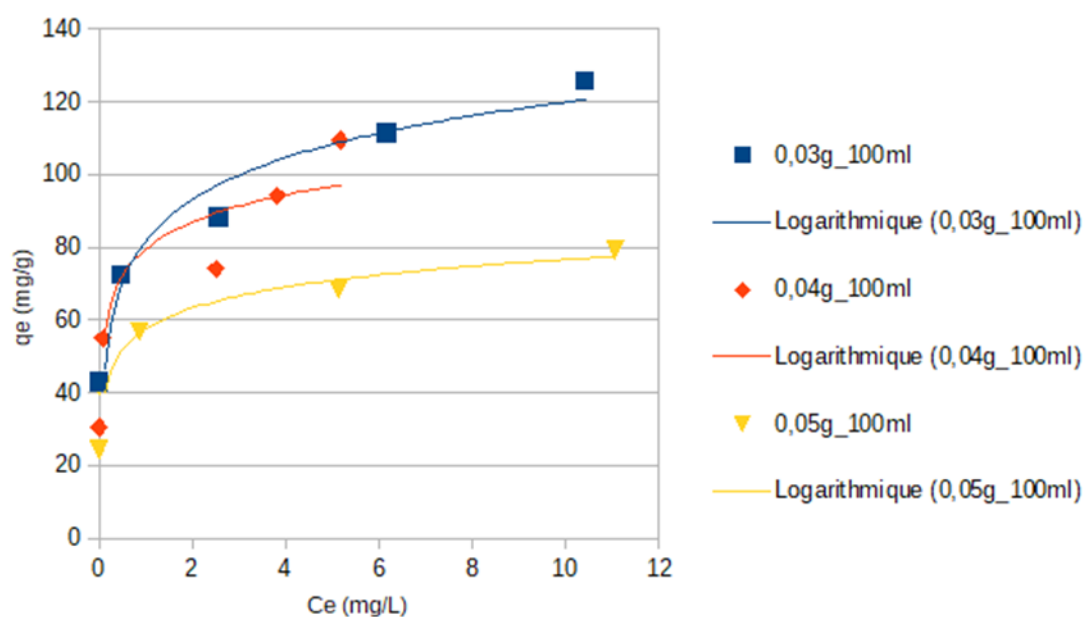


Figure IV.9: Isotherme d'Adsorption du bleu de Méthylène sur différentes masses de charbon actif avec $m=0,03_0,04_0,05$ g

D'après les figures (IV.4.1 et IV.4.2), on remarque que la capacité d'adsorption augmente avec la concentration d'équilibre jusqu'à un palier de saturation ou la capacité d'adsorption atteint son équilibre L'allure de l'isotherme suit le **type H** suivant la norme de Giles.

IV.3.4 Modèle de Langmuir

Le trace des courbes = $f(C_e)$ permet de déterminer les valeurs de q_e et K_L .

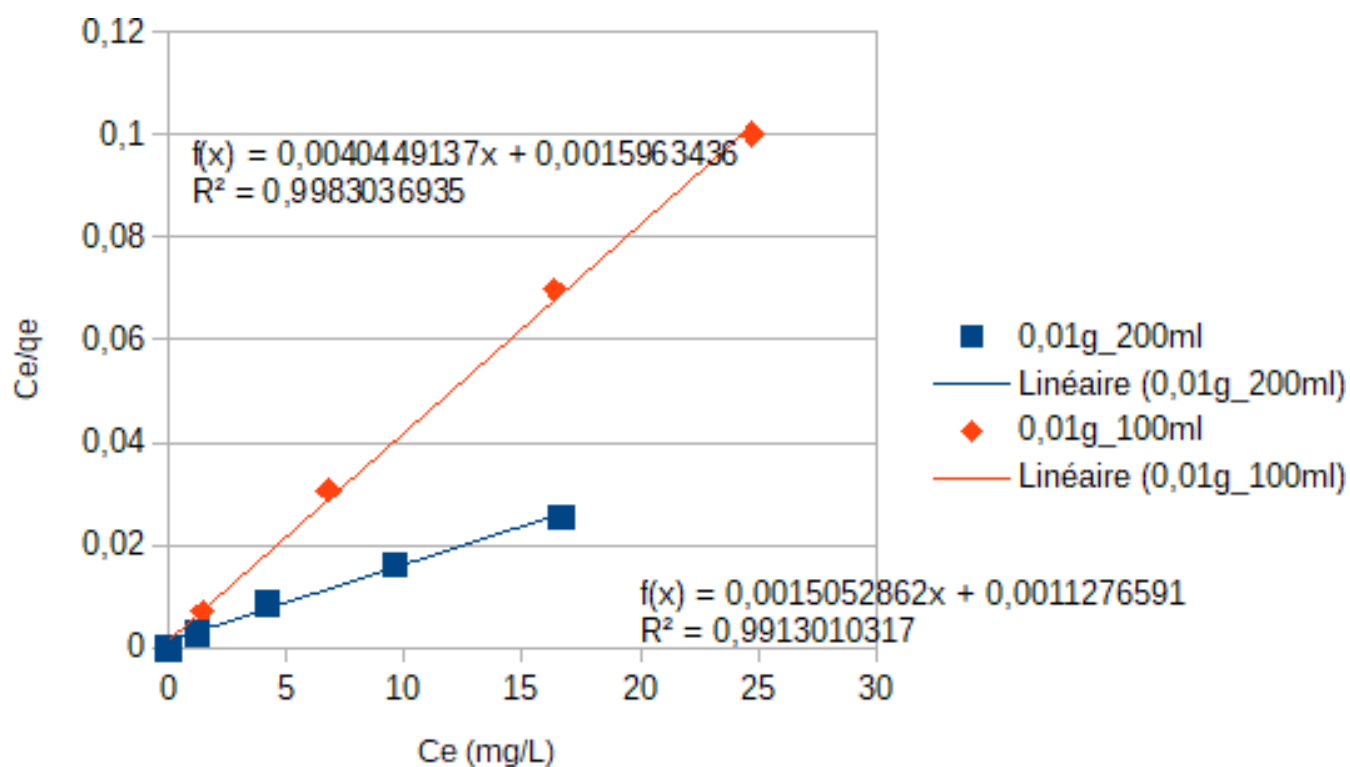


Figure IV.10: Isotherme de Langmuir pour l'adsorption du bleu de méthylène sur le charbon actif avec $m=0,01g$ pour $V=100$ et 200 mL

IV.3.5 Modèle de Freundlich

Le tracé de des courbes $\ln q_e = f(\ln C_e)$ permet de déterminer les valeurs des constantes K_F et n de Freundlich.

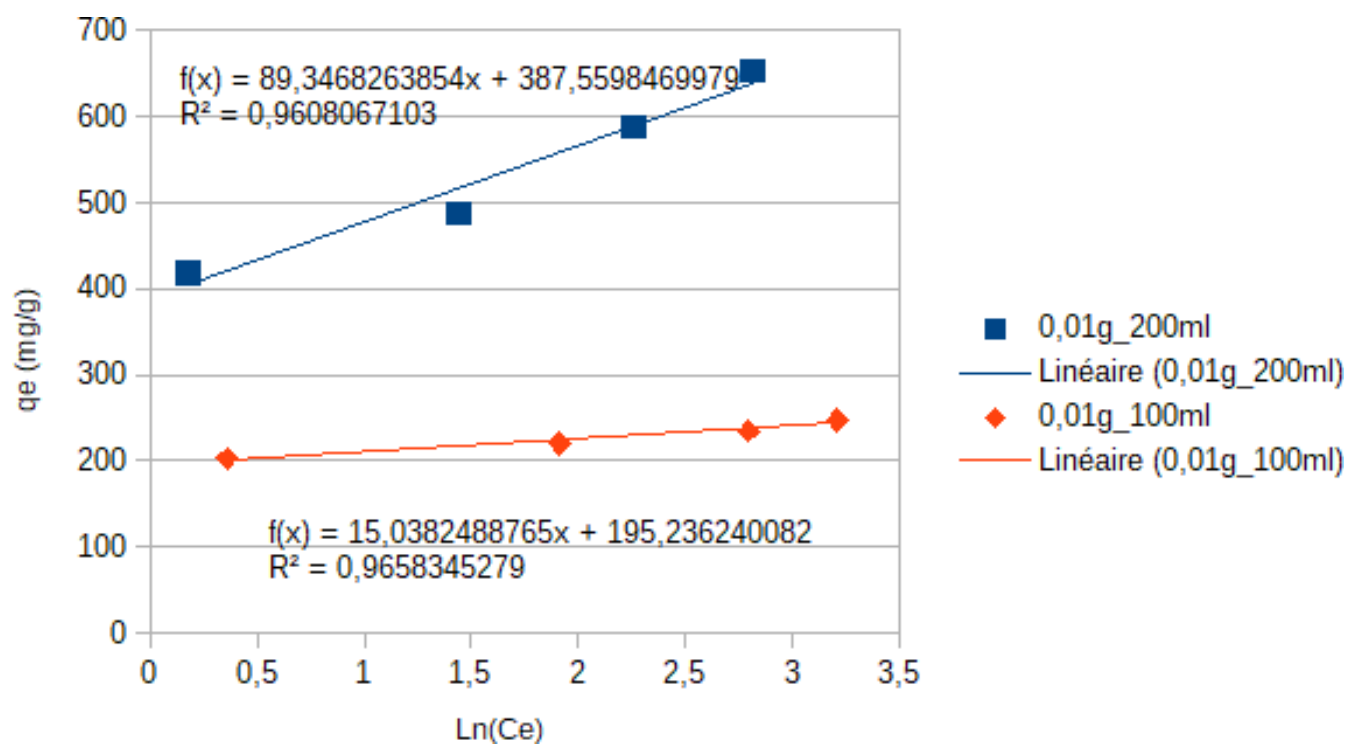


Figure IV.11 : Isothermes de Freundlich pour l'adsorption du bleu de méthylène sur charbon actif avec $m=0,01$ g pour $V=100$ et 200 mL

III.2.1 Modèle de Temkin

Le tracé de la courbe $q_e = f(\ln C_e)$ permet de déterminer les valeurs des constantes K_T et B_T de Temkin.

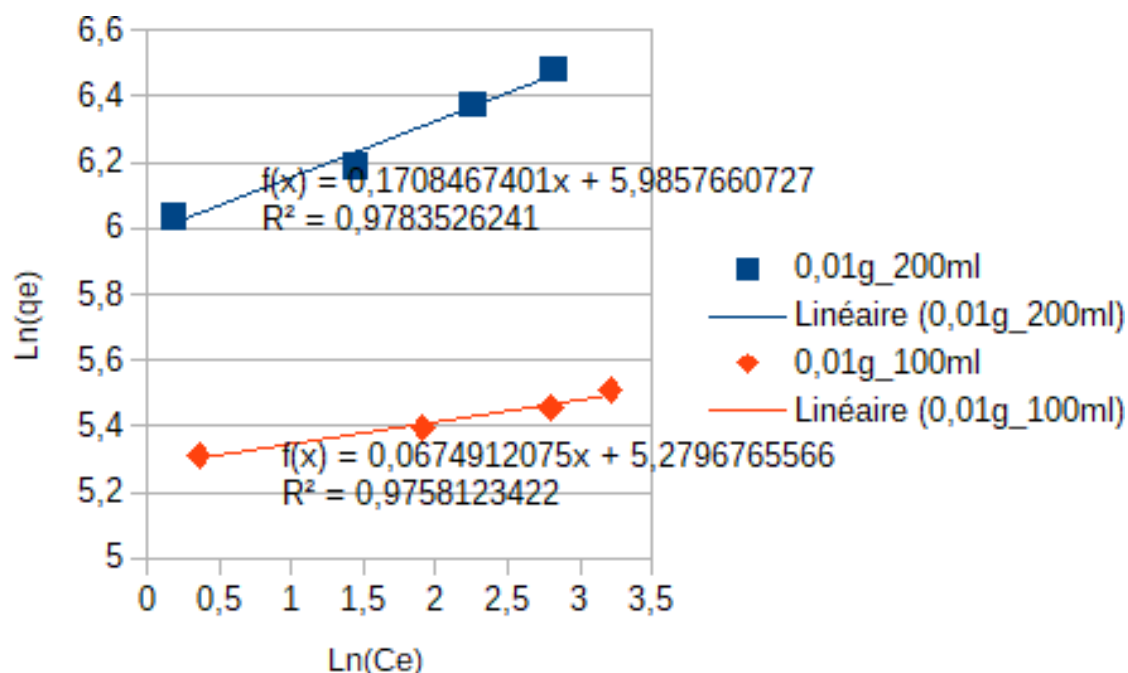


Figure IV.4.5 : Isothermes de Temkin pour l'adsorption du bleu de methylene sur charbon actif avec $m=0,01g$ pour $V=100$ et 200 mL

Tableau IV.4 : Paramètres issues des trces d'isotherme de Langmuir (**figure IV.4.3**)

Volume (mL)	Masse (g)	Coefficient de Correlation	Paramètres	
		R^2	K_L	b
100mL	0,01	0,998	2,54	247,22
200mL	0,01	0,991	0,1335	664,34

On observe que les isothermes d'adsorption sont simulés correctement par le modèle linéaire de Langmuir avec des coefficient de corrélation ~ 1 . Puisque c'est le modèle le plus proche et le plus crédible qui décrit mieux nos résultats expérimentaux et représente bien le processus d'adsorption de Bleu de méthylène.

III.3 ÉTUDE THERMODYNAMIQUE

IV.5 .1 L'effet de la température

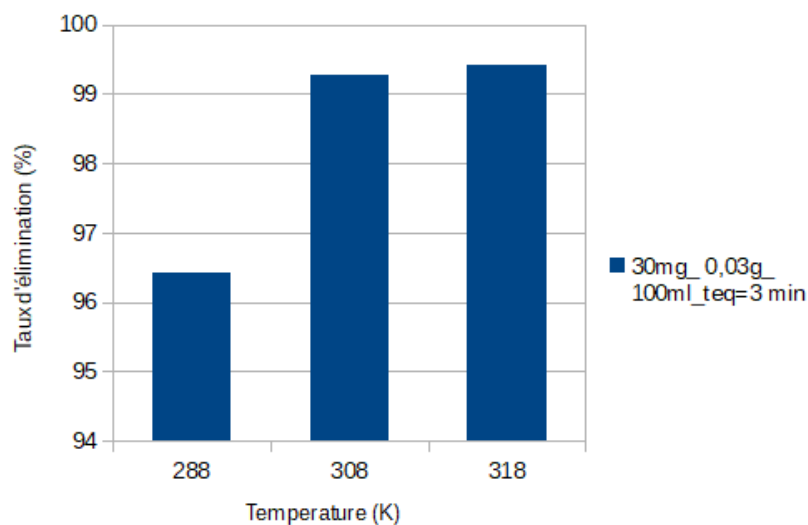


Figure IV.13 : Taux d'élimination du bleu de méthylène à différentes températures.

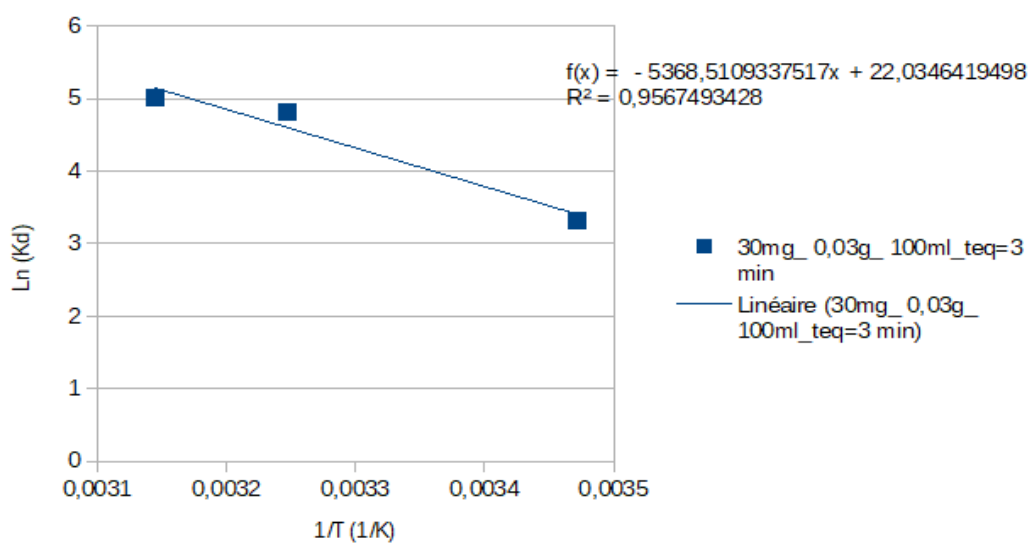


Figure IV.14: Le tracé de la variation de $\ln K_d$ en fonction de $1/T$

La vitesse d'adsorption et la capacité d'élimination du bleu de méthylène par le charbon actif. Ces résultats confirment le rôle favorable de la température dans le processus d'adsorption étudié et indiquent que les conditions optimales sont obtenues à 45 °C.

IV.5 .2 Paramètres thermodynamiques d'adsorption du bleu de méthylène

Le tracé de la droite (**Figure IV.14**) représentant la variation de $\ln K_d$ en fonction de $1/T$ nous permet de déduire les valeurs expérimentales des fonctions thermodynamiques. La valeur de ΔH° est déduite à partir de la pente de la droite et ΔS° à partir de l'ordonnée à l'origine. Concernant la valeur de ΔG , elle est calculée pour une température donnée en utilisant l'équation et en remplaçant ΔH° et ΔS° par leurs valeurs déduites graphiquement.

Tableau IV.5: Paramètres thermodynamiques d'adsorption du bleu de méthylène (30 mg/L, 100mL)

ΔS (J/mol .K)	ΔH (kJ/mol)	ΔG (kJ/mol)
183,19	44,634	0,044

Suivant les résultats de l'enthalpie et l'entropie ΔH et ΔS on peut dire que l'adsorption est endothermique avec une certaine désordre à l'interface adsorbant-adsorbat lors de la fixation des molécules de bleu de méthylène. Le ΔG calculé indique que le processus d'adsorption est **non spontané** dans les conditions expérimentales considérées. Cela signifie que l'adsorption n'est pas thermodynamiquement favorable et nécessite un apport d'énergie pour se produire.

IV.6 Conclusion

L'étude expérimentale réalisée a permis de mettre en évidence l'efficacité du charbon actif commercial pour l'élimination du bleu de méthylène par adsorption. Les résultats obtenus montrent que les performances d'adsorption dépendent fortement des conditions opératoires étudiées. L'augmentation de la masse d'adsorbant et du temps de contact favorise l'élimination du colorant jusqu'à l'atteinte de l'équilibre . Par ailleurs, le volume de la solution, la température influencent également le comportement du système adsorbant–adsorbat.

Conclusion Générale

L'étude réalisée dans le cadre de la dépollution des eaux a permis d'évaluer la réactivité et l'efficacité du charbon actif commercial dans le processus d'adsorption du bleu de méthylène en solution aqueuse.

Cette étude expérimentale a porté sur l'influence de plusieurs paramètres opératoires, notamment la masse de l'adsorbant, le temps de contact, la concentration initiale du colorant, le volume de la solution et la température, afin de déterminer les conditions optimales d'adsorption et de mieux comprendre les interactions entre l'adsorbant et l'adsorbat.

Les principaux résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

- Une rétention importante du bleu de méthylène a été observée après seulement 4 minutes de contact entre l'adsorbant et l'adsorbat, ce qui témoigne de la rapidité du processus d'adsorption.
 - Les conditions optimales ont été obtenues pour une masse de charbon actif de 0,01 g et un volume de solution de 200 mL.
 - La capacité d'adsorption ainsi que le rendement d'élimination du bleu de méthylène augmentent avec la température et atteignent leurs valeurs maximales à 45 °C.
 - L'étude cinétique a montré que le modèle de pseudo-deuxième ordre décrit convenablement le mécanisme d'adsorption pour les différentes masses de charbon actif et les différents volumes étudiés. Les capacités d'adsorption calculées sont très proches des valeurs expérimentales, avec des coefficients de corrélation élevés ($R^2 \approx 1$).
 - L'étude des isothermes d'adsorption a révélé que le modèle de Langmuir représente le mieux les résultats expérimentaux. La capacité maximale d'adsorption obtenue est de 664,34 mg·g⁻¹ avec un coefficient de corrélation proche de l'unité, ce qui indique une adsorption en monocouche sur une surface homogène.
 - Les paramètres du modèle de Freundlich, notamment une valeur de n supérieure à 1, confirment l'existence d'une affinité favorable entre le charbon actif et les molécules de bleu de méthylène.
 - L'étude thermodynamique a montré que l'adsorption du bleu de méthylène sur le charbon actif est un processus endothermique ($\Delta H^\circ > 0$). Les valeurs obtenues pour
-

ΔG° et ΔS° indiquent respectivement que le processus est non spontané dans les conditions expérimentales étudiées et qu'il s'accompagne d'une augmentation du désordre à l'interface solide-solution.

En conclusion, les résultats obtenus démontrent que le charbon actif commercial utilisé possède une excellente capacité d'adsorption vis-à-vis du bleu de méthylène. Son efficacité élevée, sa rapidité d'action et sa forte capacité de rétention en font un matériau prometteur pour le traitement des eaux contaminées par les colorants organiques et pour les applications liées à la lutte contre la pollution des milieux aquatiques.

Références bibliographiques

- [1] MOLETTA, R., Gestion des problèmes environnementaux dans les industries agroalimentaires, 2e éd., Paris : Lavoisier, 2006.
- [2] KECK, G. et VERNUS, E., « Déchets et risques pour la santé », Techniques de l'Ingénieur, Paris, 2000.
- [3] ESPÉRANCE, O. H. et al., « Pollution des eaux à usages domestiques dans les milieux urbains défavorisés des pays en développement : Synthèse bibliographique », International Journal of Biological and Chemical Sciences, vol. 10, n° 5, 2016, pp. 2392-2412.
- [4] GHERARA, N., Étude des performances de la station d'épuration des eaux usées de la région Haoud Berkaoui, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2019.
- [5] SALHI, S. et BISSATI, S., « Contribution à l'étude de la pollution des sols agricoles par les nitrates dans la région de Hassi Ben Abdallah (Exploitation de l'ITDAS) », Revue des BioRessources, vol. 6, n° 2, 2016.
- [6] SYLVIE, B. et JEAN-LUC, B.K., « Quels polluants trouve-t-on dans les eaux pluviales en milieu urbain ? », Gestion des eaux pluviales en ville, 2022.
- [7] TOUATI, L., Cours de pollution des eaux, Écologie Fondamentale et Appliquée, Université Frères Mentouri Constantine 1, 2021-2022.
- [8] AFREEN, N. et al., « Wastewater Treatment: A Short Assessment on Available Techniques », Alexandria Engineering Journal, vol. 76, 2023.
- [9] HUNGER, K., Industrial Dyes: Chemistry, Properties and Applications, Wiley-VCH, 2003.
- [10] BERKANE, N., Développement et caractérisation de nouveaux adsorbants pour l'élimination des polluants organiques en solution aqueuse, Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2019.
- [11] WAHL, H., « Colorants », Encyclopaedia Universalis, vol. 4, Encyclopaedia Universalis, 1980, p. 714.

[12] GUENDOZ, S., Adsorption des colorants textiles Écarlate Solophenyl BLEU et Vert Cibacron par la biomasse sèche de lentilles d'eau, Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2014, p. 18.

[13] KADIRVELU, K., KAVIPRIYA, M., KARTHIKA, C., RADHIKA, M., VENNEMAIN, N. et PATTABHI, S., Bioresource Technology, 2003, p. 129.

[14] NAIDJA, L' Élimination du colorant Orange II en solution aqueuse par voie photochimique et par adsorption, Mémoire de Magister en Chimie, Université Mentouri Constantine, 2010, p. 9.

[15] HALIMA Chenini, Étude de la dégradation par voie photochimique du polluant organique « Orange G » en milieu aqueux homogène et hétérogène, Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, pp. 5-8.

[16] SERVAIS, P., La matière organique dans les milieux naturels, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1999, p. 49.

[17] GREENE, J.C. et BAUGHMAN, G.L., « Effects of 46 Dyes on Population Growth of Freshwater Green Alga *Selenastrum capricornutum* », Textile Chemistry and Coloration, 1996, p. 23.

[18] CLARKE, A.E. et ANLIKER, R., Organic Dyes and Pigments, in The Handbook of Environmental Chemistry, Springer-Verlag, Berlin, 1980.

[19] SPECHT, K. et PLATZEK, T., « Textile Dyes and Finishes: Remarks to Toxicological and Analytical Aspects », Deutsche Lebensmittel-Rundschau 1995, p. 352.

[20] NAIT, M.N., Application des tiges de dattes dans l'adsorption de polluants organiques, Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaadia, Souk-Ahras, 2014, p. 12.

[21] KERMICHE, C., Étude de l'adsorption du bleu de méthylène sur charbon préparé à partir des coques de noyaux d'olives, Mémoire de Master, Filière Génie des Procédés, 2019, p. 18.

[22] BENHAMOU, A., Procédés d'Adsorption, Cours de Master 1 Génie des Procédés de l'Environnement, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, p. 5.

[23] BOULAAJOUL, S., Étude cinétique de l'adsorption statique du 4-nitrophénol sur charbon actif commercial (NC60), Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2013, p. 10.

[24] MARSTEAU, S., Traitement des gaz dangereux captés sur les lieux de travail, Institut national de recherche et de sécurité (INRS), Paris, 2005, pp. 1-2.

[25] ABID, A. et GUIRIDA, B., Étude de l'efficacité d'un charbon actif à base de noix de dattes sur l'adsorption des métaux (calcium), Mémoire de Master, Université de Ouargla, 2011, pp. 7-9.

[26] LE CLOIREC, P., Étude des interactions soluté-charbon actif : Modélisation de réactions biotiques et abiotiques, thèse de doctorat ès Sciences Physiques, ENSCR, Université de Rennes, France, 1985, p. 18.

[27] BOUSSAID, M., Étude de l'adsorption du diclofénac sur divers adsorbants en eau distillée : Effet des paramètres opératoires, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2020, p. 21.

[28] TIEN, C., Adsorption Calculations and Modeling, Butterworth-Heinemann, Boston, 1994.

[29] DEKHILI, M., Élimination de l'ammonium sur un charbon préparé à partir des noyaux de dattes sur solutions synthétiques, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2022, p. 20.

[30] TYCZKOWSKI, A., Détermination des surfaces spécifiques de quelques produits poreux, Projet de fin d'études, École Nationale Polytechnique, El Harrach, Alger, 1985, p. 3.

[31] TSOLCHA, O.N., et al., « Utilization of Biomass Derived from Cyanobacteria-Based Agro-Industrial Wastewater Treatment and Raisin Residue Extract for Bioethanol Production », Water, vol. 13, n° 4, 2021, p. 486.

[32] JIAO, S., et al., « A Facile Method to Prepare Silver Doped Graphene Combined with Polyaniline for High Performances of Filter Paper Based Flexible Electrode », *Nanomaterials*, vol. 9, n° 10, 2019.

[33] MOREAU, S., Adsorption et adsorbants : L'adsorption et l'environnement, Article scientifique, Groupe Air Liquide, École Normale Supérieure (ENS), Paris, 2003, p. 2.

[34] MICROMERITICS, Introduction to Chemical Adsorption: Analytical Techniques and Their Applications to Catalysis, Ressource en ligne, consulté en 2026.

[35] ÉCOLE DES MINES D'ALBI, Introduction à l'adsorption, Support pédagogique en ligne, consulté en 2026.

[36] PROCESSUS, Modélisation des isothermes d'adsorption, Ressource électronique, consulté en 2026.

[37] THOMAS, J.M. et THOMAS, W.J., Principles and Practice of Heterogeneous Catalysis, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Allemagne, 2015.

[38] RUTHVEN, D.M., Principles of Adsorption and Adsorption Processes, John Wiley & Sons, New York, États-Unis, 1984.

[39] RAFATULLAH, M., SULAIMAN, O., SULAIMAN, R. et AHMAD, A., « Adsorption of Methylene Blue on a Low-Cost Adsorbent: A Review », *Journal of Hazardous Materials*, vol. 177, n° 1-3, 2010, pp. 70-80.

[40] FOO, K.Y. et HAMEED, B.H., « Insights into the Modeling of Adsorption Isotherm Systems », *Chemical Engineering Journal*, vol. 156, 2010, pp. 2-10.

[41] GILES, C.H., SMITH, D. et HUITSON, A., « A General Treatment and Classification of the Solute Adsorption Isotherm », *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 47, n° 3, 1974, pp. 755-765.