



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des procédés

Option: Génie chimique

THÈME

Application d'un charbon actif modifié pour l'élimination du Bleu de Méthylène et de l'Acide Rouge 14 en solution aqueuse : étude cinétique, isotherme et thermodynamique

Présenté par

- 1- Ameer Yamna
- 2- Hammou Ahlem

Soutenu le 28/06/2026 devant le jury composé de :

Présidente :	MEKIBES Zohra	MCB	Université de Mostaganem
Examinatrice :	DELALI Halima	MAA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	ENZEKRI BENALLOU Mokhtar	MCA	Université de Mostaganem
Co-rapporteur :	ALLAL Mohamed	Doctorant	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2025/2026



Remerciements

Le plus grand remerciement revient à **Allah Azza Wa Jall**, qui nous a donné la force, la patience et la bonne santé pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à remercier vivement tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent à **Mme MEKIBES Zohra**, présidente du jury, pour l'honneur qu'elle nous a fait en acceptant de présider cette soutenance.

Je remercie également **Mme DELALI Halima**, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre encadreur, **M. BENZEKRI BENALLOU Mokhtar**, pour son aide précieuse, ses conseils avisés, sa disponibilité et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous exprimons également notre profonde reconnaissance à notre co-encadrant, **M. ALLAL MOHAMED**, doctorant à l'Université de Mostaganem, pour son aide précieuse, son suivi et ses orientations méthodologiques.

Nous remercions vivement tous les enseignants du département de Génie des Procédés pour la qualité de la formation qu'ils nous ont assurée durant notre parcours universitaire, ainsi que l'ensemble des membres du laboratoire de l'Université de Mostaganem pour leur professionnalisme, leur disponibilité et le cadre scientifique enrichissant qui ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail.



Dédicace

C'est avec fierté et admiration, après une vie pleine d'affection d'encouragements tout au long de mes années d'études, que j'ai l'honneur et le plaisir de dédier ce mémoire :

À ma très chère mère, **Selma**,

À la femme qui a fait de sa vie un sacrifice silencieux pour construire la mienne, supportant ses propres douleurs pour m'épargner la moindre souffrance.

À celle qui a tout donné sans jamais rien attendre, qui a remplacé mes larmes par des sourires et mes peurs par de l'espoir, à l'amour le plus pur et le plus inconditionnel de ma vie...

À mon cher père, **Djemal**,

À mon pilier dans la vie, toujours présent pour me soutenir, m'encourager et me guider vers le meilleur sans jamais faillir, à celui qui a été ma force et mon équilibre, que Dieu le protège, lui accorde santé, bonheur et longue vie.

À mes chères sœurs, **Zahira, Nassima et Nihed**, merci d'avoir toujours été à mes côtés. Votre amour et votre présence m'ont donné le courage d'avancer.

À ma chère binôme, **Hammou Ahlem**, plus qu'une binôme, une véritable sœur de cœur. Merci pour ton soutien, ta patience et tous les moments partagés qui ont rendu ce parcours plus beau et plus léger.

À toutes les personnes qui me sont chères et qui occupent une place précieuse dans ma vie, je vous exprime ma profonde gratitude du fond du cœur.

Ameur Yamna



Dédicace

Je remercie Allah, avant toute chose et après toute chose, de m'avoir accordé la force, la patience et le courage nécessaires pour accomplir ce travail. Lui qui m'a accompagnée dans toutes les épreuves et difficultés rencontrées au cours de ma vie ; c'est grâce à Sa volonté et à Sa miséricorde que je suis arrivée à cette étape. Je dédie ce modeste travail aux êtres les plus chers à mon cœur :

À mon père, **Hadj,**

Qui n'a jamais cessé de me soutenir et de m'encourager depuis mon enfance, et qui a toujours été pour moi un véritable exemple, un soutien et une source de force tout au long de ma vie. Que Dieu le protège, le préserve et le garde toujours comme lumière et soutien dans ma vie.

À ma chère mère, **Fatima,**

À celle qui a toujours été une source d'amour, de patience et de réconfort. Merci pour tes prières, ton soutien et tous les sacrifices consentis pour mon bonheur et ma réussite. Qu'Allah te protège, t'accorde une longue vie remplie de santé et de sérénité.

À mes chers frère et sœur, **Amine et Zahira,**

Merci pour votre amour, votre soutien précieux et tous les beaux moments partagés ensemble. Je vous souhaite une vie pleine de bonheur, de réussite et de sérénité.

À ma binôme, **Ameur Yamna,**

Pour tous les efforts partagé, les moments de travail, de patience et de persévérance qui ont marqué notre parcours universitaire ensemble.

Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à mon soutien et à ma réussite, je dédie le fruit de mes efforts et de mon travail, en espérant un avenir plein de réussite et de bonheur.

Hammou Ahlem

Liste des figures

Figure I-1: Charbon actif en poudre.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure I-2 : Charbon actif en grains.....	- 5 -
Figure I-3 : Charbon actif extrudé.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure I-4 : Schéma de principe de l'adsorption sur le charbon actif.	Erreur ! Signet non défini.
Figure II-1: Structure chimique du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14.	..- 10 -
Figure II-2: Les étapes de modification du charbon actif.....	..- 20 -
Figure III-1 : Courbe d'étalonnage de l'acide rouge 14.	- 20
-	
Figure III-2 : Courbe d'étalonnage du bleu de méthylène	- 18 -
Figure III-3 : Taux d'élimination du Bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 en fonction de dose d'adsorbant	- 18 -
Figure III-4 : Taux d'élimination du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 en fonction du pH.....	- 19 -
Figure III-5 : L'effet du temps de contact sur l'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14	- 24 -
Figure III-6 : Isotherme d'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 sur le charbon actif.....	..- 21 -
Figure III-7 : Modèle de Langmuir pour l'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 sur le charbon actif	- 25 -
Figure III-8 : Modèle de Freundlich pour l'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 sur le charbon actif	- 25 -
Figure III-9 : Modèle de Temkin pour l'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 sur le charbon actif	- 26 -
Figure III-10 : Le modèle cinétique de pseudo-premier ordre pour l'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 sur le charbon actif.....	- 28 -
Figure III-11 : Le modèle cinétique de pseudo-deuxième ordre pour l'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 sur le charbon actif.....	- 29 -
Figure III-12: Evolution de $\ln(Kd)$ en fonction de $(1/T)$ pour l'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 sur le charbon actif.....	- 30 -

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Comparaison entre CAP et CAG **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau II-1: Matériels et produits utilisés. **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau II-2: Propriétés physico-chimiques du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14
..... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III-1 : Résultats obtenus des isothermes d'adsorption du bleu de méthylène et de
l'acide rouge 14 pour les modèles de Langmuir, de Freundlich et de Temkin. **Erreur !
Signet non défini.**

Tableau III-2: Résultats obtenus par cinétique de pseudo-premier et de pseudo-deuxième
ordre pour l'adsorption d'acide rouge 14 et de bleu de méthylène sur le charbon actif.- 25
-

Tableau III-3: Résultats obtenus de la thermodynamique d'adsorption de l'acide rouge 14 et
du bleu de méthylène sur le charbon actif..... - 27 -

Résumé

Ce mémoire traite de l'élimination de deux colorants organiques, le bleu de méthylène (BM) et l'acide rouge 14 (AR 14), en solution aqueuse par l'adsorption sur un charbon actif modifié. L'influence de plusieurs paramètres opératoires, notamment le pH, le temps de contact et la concentration initiale des colorants, ont été étudiés afin d'évaluer les performances du matériau adsorbant. Les résultats cinétiques ont montré que le modèle du pseudo-second ordre décrit le mieux le processus d'adsorption pour les deux colorants, suggérant que la vitesse d'adsorption est principalement gouvernée par les interactions entre les molécules adsorbées et les sites actifs de la surface. L'étude des isothermes d'adsorption a révélé que le modèle de Langmuir est le mieux adapté aux données expérimentales pour les deux colorants, indiquant une adsorption en monocouche sur une surface homogène. Les capacités maximales d'adsorption obtenues sont de 125 mg g⁻¹ pour le Bleu de Méthylène et de 107,5 mg g⁻¹ pour l'Acide Rouge 14. Par ailleurs, l'étude thermodynamique a montré que l'adsorption est spontanée ($\Delta G < 0$) et endothermique ($\Delta H > 0$) pour les deux colorants. Les résultats obtenus confirment l'efficacité du charbon actif modifié pour l'élimination des colorants organiques en milieu aqueux, avec une meilleure affinité pour le Bleu de Méthylène que pour l'Acide Rouge 14.

Mots-clés : Adsorption, Charbon actif modifié, Bleu de Méthylène, Acide Rouge 14, Isotherme, Cinétique, Thermodynamique.

Abstract

The present work focuses on the removal of two organic dyes, Methylene Blue (MB) and Acid Red 14 (AR14), from aqueous media using Al-Sr-modified activated carbon as an adsorbent. The influence of several operating parameters, including pH, contact time, and initial dye concentration, was evaluated to assess the adsorption performance of the prepared adsorbent. Kinetic studies revealed that the adsorption process for both dyes was best described by the pseudo-second-order model, suggesting that the adsorption rate is mainly governed by surface interactions between the dye molecules and the active sites of the

adsorbent. Equilibrium data were better fitted by the Langmuir isotherm model, indicating monolayer adsorption on a homogeneous surface. The maximum adsorption capacities were found to be 125 mg g⁻¹ for Methylene Blue and 107.5 mg g⁻¹ for Acid Red 14. Thermodynamic analysis showed that the adsorption process was spontaneous ($\Delta G < 0$) and endothermic ($\Delta H > 0$) for both dyes. Overall, the obtained results demonstrate the effectiveness of Al-Sr-modified activated carbon as a promising adsorbent for the removal of organic dyes from contaminated water, with a higher adsorption affinity toward Methylene Blue than Acid Red 14.

Keywords: Adsorption, Modified activated carbon, Methylene blue, Red 14 acid, Isothermal, Kinetics, Thermodynamics.

الملخص

يركّز هذا العمل على إزالة صبغتين عضويتين هما أزرق الميثيلين والأحمر الحمضي 14 من الأوساط المائية باستعمال فحم نشط معدل بالألمنيوم والسترونتيوم (Al-Sr) كمادة ممتزة. تم تقييم تأثير عدة عوامل تشغيلية، بما في ذلك الرقم الهيدروجيني (pH)، وزمن التلامس، والتركيز الابتدائي للصبغة، من أجل دراسة كفاءة الامتزاز للمادة المحضّرة.

أظهرت الدراسات الحركية أن عملية الامتزاز لكلا الصبغتين تتوافق بشكل أفضل مع نموذج الرتبة الثانية الكاذبة، مما يشير إلى أن معدل الامتزاز يخضع أساساً للتفاعلات السطحية بين جزيئات الصبغة والمواقع الفعالة على سطح المادة الممتزة. كما بيّنت نتائج التوازن أن البيانات التجريبية تتوافق بشكل أفضل مع نموذج لانغموير، مما يدل على حدوث امتزاز أحادي الطبقة على سطح متجانس.

وقد بلغت السعة القصوى للامتزاز 125 ملغ/غ لأزرق الميثيلين و107.5 ملغ/غ للأحمر الحمضي 14. وأظهرت الدراسة الديناميكية الحرارية أن عملية الامتزاز تلقائية ($\Delta G < 0$) وماصة للحرارة ($\Delta H > 0$) بالنسبة لكلا الصبغتين.

بصفة عامة، تؤكد النتائج المتحصل عليها فعالية الفحم النشط المعدل بـ Al-Sr كمادة ممتزة واعدة لإزالة الأصباغ العضوية من المياه الملوثة، مع إظهار ألفة امتزاز أعلى تجاه أزرق الميثيلين مقارنة بالأحمر الحمضي 14.

الكلمات المفتاحية: الامتزاز، الفحم النشط المعدل، أزرق الميثيلين، الأحمر الحمضي 14، متساويات الامتزاز، الحركية، الديناميكا الحرارية.

Table des matières

Remerciments

Dédicace

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

Abstract

المخلص

Introduction Générale.....	- 1 -
I.1 Généralité.....	- 3 -
I.2 Définition de l'adsorption.....	- 3 -
I.3 Types d'absorption	- 3 -
I.3.1 L'adsorption chimique.....	- 3 -
I.3.2 L'adsorption physique	- 4 -
I.4 Les facteurs influençant sur l'adsorption.....	- 4 -
I.5 Adsorbants	- 4 -
I.5.1 Définition d'un adsorbant.....	- 4 -
I.5.2 Les principaux adsorbants	Erreur ! Signet non défini.
I.6 Définition de CAC	Erreur ! Signet non défini.
I.7 Sources des charbons actifs	- 5 -
I.8 Différentes formes du charbon actif	- 5 -
I.8.1 Charbon actif en poudre (CAP).....	- 5 -
I.8.2 Charbon actif en grain (CAG)	- 6 -
I.8.3 Charbon actif en extrudé.....	- 7 -
I.9 Propriétés des charbons actifs.....	- 7 -
I.10 Préparation du charbon actif	- 8 -
I.11 Interprétation du phénomène d'adsorption sur charbon actif	- 9 -
I.12 La régénération du charbon actif	- 9 -
I.13 Domaine d'utilisation charbon actif.....	- 10 -
II.1 Généralité.....	- 11 -

II.2 Matériels et produit	- 11 -
II.3 Les colorants étudiés	- 11 -
II .3.1 Bleu méthylène	- 11 -
II.3.2 Acide rouge 14.....	- 12 -
II.4 Mode opératoire	- 12 -
II.5 Application de l'adsorption	- 13 -
II.5.1 Etude des paramètres influençant l'adsorption	- 14 -
II.6 Modèle mathématique aux isothermes de l'adsorption	- 15 -
II.6.1 Modèle de Langmuir.....	- 15 -
II.6.2 Modèle de Freundlich	- 16 -
II.6.3 Modèle de Temkin	- 16 -
II.7 Cinétique d'adsorption	- 17 -
II.7.1 Modèle cinétique de pseudo premier ordre.....	- 17 -
II.7.2 Modèle cinétique de pseudo second ordre	- 17 -
II.8 Thermodynamique de l'adsorption	- 18 -
III.1 Généralité	- 19 -
III.2 La courbe d'étalonnage	- 19 -
III.3 Effet du dose.....	- 21 -
III.4 Effet de pH	- 22 -
III.5 Effet du temps de contact	- 23 -
III.6 Isotherme d'adsorption.....	- 24 -
III.7 Cinétique d'adsorption	- 27 -
III.8 Thermodynamique	- 30 -
Conclusion générale et recommandations.....	- 32 -
Bibliographie	

.....**Erreur ! Signet non défini.**

Introduction Générale

La contamination des ressources hydriques par les effluents industriels représente aujourd'hui l'un des défis environnementaux majeurs à l'échelle mondiale. L'augmentation rapide des activités industrielles, notamment dans les secteurs du textile, du papier, de l'impression, des cosmétiques, de l'agroalimentaire et de la chimie, s'accompagne d'une production croissante d'eaux usées contenant divers contaminants organiques et inorganiques. Parmi ces polluants, les colorants synthétiques constituent une catégorie particulièrement préoccupante en raison de leur forte stabilité chimique, de leur résistance à la biodégradation et de leur persistance dans les milieux aquatiques. Selon les estimations, près de 10 à 15 % des colorants utilisés dans les procédés industriels sont rejetés dans l'environnement au cours des étapes de fabrication et d'utilisation, contribuant ainsi à la dégradation de la qualité des eaux superficielles et souterraines [1,2].

La présence de colorants dans les écosystèmes aquatiques entraîne plusieurs conséquences néfastes. Même à de faibles concentrations, ces composés réduisent la pénétration de la lumière dans l'eau, limitant ainsi les processus photosynthétiques et perturbant l'équilibre biologique des milieux récepteurs. Par ailleurs, certains colorants ou leurs produits de dégradation peuvent présenter des propriétés toxiques, mutagènes ou cancérigènes, constituant un risque pour les organismes vivants et la santé humaine [3,4]. Face à ces enjeux environnementaux et sanitaires, le développement de technologies efficaces pour le traitement des effluents colorés est devenu une priorité dans le domaine du génie de l'environnement.

Divers procédés physicochimiques, chimiques et biologiques ont été développés pour l'élimination des colorants présents dans les eaux usées, tels que la coagulation-floculation, l'oxydation avancée, les procédés membranaires, la biodégradation et l'électrocoagulation. Toutefois, plusieurs de ces méthodes présentent des limitations liées à leur coût élevé, à la production de sous-produits secondaires ou à leur faible efficacité vis-à-vis de certains polluants récalcitrants [5]. Dans ce contexte, l'adsorption s'est imposée comme l'une des techniques les plus prometteuses grâce à sa simplicité de mise en œuvre, sa grande efficacité, sa flexibilité opérationnelle et son faible coût d'exploitation [6].

Le charbon actif demeure l'un des adsorbants les plus utilisés pour le traitement des eaux en raison de sa surface spécifique élevée, de sa structure poreuse développée et de la présence de

nombreux groupes fonctionnels susceptibles d'interagir avec les molécules polluantes. Cependant, malgré ses excellentes propriétés adsorbantes, les performances du charbon actif peuvent être davantage améliorées par différentes méthodes de modification physique ou chimique. Ces modifications visent à accroître le nombre de sites actifs, à modifier les propriétés de surface et à renforcer les interactions entre l'adsorbant et les polluants ciblés [7,8].

Dans cette perspective, le présent travail porte sur l'étude de l'élimination de deux colorants organiques représentatifs, le Bleu de Méthylène (BM), un colorant cationique largement utilisé dans les industries textiles et pharmaceutiques, et l'Acide Rouge 14 (AR14), un colorant anionique fréquemment rencontré dans les effluents industriels. L'adsorption de ces colorants est réalisée à l'aide d'un charbon actif commercial modifié par des composés à base d'aluminium et de strontium (Al-Sr). L'incorporation de ces éléments vise à améliorer les propriétés physicochimiques du matériau adsorbant et à favoriser l'élimination simultanée de polluants de charges différentes.

L'objectif principal de cette étude consiste à évaluer les performances adsorbantes du charbon actif modifié vis-à-vis du Bleu de Méthylène et de l'Acide Rouge 14 en solution aqueuse. Une attention particulière est accordée à l'influence de différents paramètres opératoires tels que le pH de la solution, la dose d'adsorbant, le temps de contact et la concentration initiale des colorants. Les mécanismes d'adsorption sont également analysés à travers l'étude des isothermes d'équilibre, de la cinétique et des paramètres thermodynamiques afin de mieux comprendre les interactions mises en jeu entre les molécules adsorbées et la surface du matériau.

Pour atteindre ces objectifs, ce mémoire est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre présente les concepts fondamentaux relatifs à l'adsorption, aux propriétés du charbon actif ainsi qu'une synthèse bibliographique sur les colorants. Le deuxième chapitre décrit les matériaux utilisés, les méthodes de préparation du charbon actif modifié Al-Sr et le protocole expérimental adopté pour les essais d'adsorption. Le troisième chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats expérimentaux, en mettant l'accent sur l'effet des paramètres opératoires ainsi que sur la modélisation cinétique, isotherme et thermodynamique du phénomène d'adsorption.

I.1. Généralités

La pollution des eaux par les colorants issus des rejets industriels constitue un problème environnemental majeur. Ces composés peuvent altérer la qualité des ressources hydriques et perturber les écosystèmes aquatiques. Parmi les méthodes de traitement disponibles, l'adsorption est reconnue pour son efficacité dans l'élimination des polluants. Le charbon actif est l'un des adsorbants les plus utilisés grâce à sa grande capacité de rétention. Ce chapitre présente les notions essentielles relatives à l'adsorption et au charbon actif.

I.2. Définition de l'adsorption

L'adsorption est un phénomène de surface qui se produit lorsqu'une substance présente dans une phase liquide ou gazeuse se fixe à la surface d'un solide. Ce processus résulte des interactions entre les molécules du fluide, appelées adsorbat, et la surface du matériau adsorbant. L'adsorption est largement utilisée dans de nombreux domaines, notamment le traitement des eaux, la séparation des mélanges et la purification des substances, en raison de son efficacité pour l'élimination des polluants [9].

I.3. Types d'adsorption

Selon la nature des interactions entre les molécules adsorbées et la surface de l'adsorbant, l'adsorption est généralement distinguée en deux types : l'adsorption physique et l'adsorption chimique.

I.3.1. L'adsorption chimique

L'adsorption chimique (chimisorption) est un phénomène au cours duquel les molécules de l'adsorbat se fixent à la surface de l'adsorbant par des liaisons chimiques fortes. Ce type d'adsorption implique une interaction spécifique entre les deux espèces et peut entraîner des modifications chimiques des molécules adsorbées [10]. Il se produit généralement à des températures élevées et se caractérise par une forte énergie d'adsorption.

I.3.2. L'adsorption physique

L'adsorption physique, ou physisorption, résulte de faibles interactions entre l'adsorbat et la surface de l'adsorbant, principalement les forces de Van der Waals. Elle se caractérise par un processus rapide, réversible et généralement non spécifique. Ce type d'adsorption se produit sans modification de la structure chimique des molécules et est favorisé à basse température. En raison de la faible énergie des interactions (5 à 40 kJ mol⁻¹), elle peut conduire à la formation d'une ou de plusieurs couches à la surface du matériau adsorbant [11].

I.4. Les facteurs influençant l'adsorption

- ❖ La température influence directement le processus d'adsorption. En général, une augmentation de la température entraîne une diminution de la quantité adsorbée, car l'adsorption est souvent un phénomène exothermique. Cependant, certains systèmes peuvent présenter un comportement différent selon la nature de l'adsorbant et de l'adsorbat [12].
- ❖ Le pH du milieu modifie la charge de surface de l'adsorbant ainsi que la forme ionique de l'adsorbat. Il joue ainsi un rôle déterminant dans les interactions entre les deux et dans l'efficacité du processus d'adsorption [13].
- ❖ La porosité désigne la structure poreuse de l'adsorbant. La taille des pores (micropores, mésopores et macropores) détermine l'accessibilité des molécules aux sites actifs, ce qui influence directement la performance d'adsorption [14].
- ❖ La surface spécifique d'un adsorbant correspond à la surface totale disponible pour la fixation des molécules d'adsorbat. Plus cette surface est élevée, plus le nombre de sites actifs est important, ce qui améliore la capacité d'adsorption du matériau [15].

I.5. Adsorbants

I.5.1. Définition d'un adsorbant

Un adsorbant est un matériau solide présentant une structure poreuse et une grande surface spécifique. Cette caractéristique, pouvant atteindre de 100 à plus de 1000 m² g⁻¹, lui permet de fixer efficacement différentes molécules à sa surface.

I.5.2. Charbon actif

Le charbon actif est l'un des adsorbants les plus largement utilisés en raison de ses performances élevées en matière d'adsorption.

Le charbon actif, également appelé charbon activé, est un matériau carboné de couleur noire, se présentant sous forme de poudre ou de granulés. Il possède une structure fortement poreuse lui conférant une très grande surface spécifique, pouvant dépasser $1500 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$. Cette caractéristique explique sa forte capacité d'adsorption et son large usage dans le traitement des eaux [16].

I.6. Sources des charbons actifs

Les charbons actifs peuvent être obtenus à partir de différentes matières premières :

- **Origine végétale :** Elle regroupe principalement les déchets agricoles non valorisés, tels que les noyaux de fruits, la paille, les enveloppes de céréales (comme le blé), ainsi que le bois sous forme de copeaux ou de sciure provenant d'essences comme le bouleau.
- **Origine animale :** Les charbons actifs d'origine animale sont principalement obtenus à partir d'ossements, mais peuvent également être issus de tissus animaux.
- **Origine minérale :** Ils sont généralement produits à partir de matières carbonées fossiles, telles que la houille, le coke et la tourbe, qui sont utilisées comme précurseurs pour la fabrication du charbon actif [17].

I.7. Différentes formes du charbon actif

Le charbon actif existe sous plusieurs formes, selon les besoins d'utilisation et les procédés d'application :

I.7.1. Charbon actif en poudre (CAP)

Les charbons actifs en poudre (CAP) (**Figure I-1**) se présentent sous forme de particules fines dont la granulométrie est généralement inférieure à $100 \mu\text{m}$. Ils possèdent une grande surface externe et une faible résistance à la diffusion, ce qui leur confère une cinétique d'adsorption

rapide. Grâce à ces propriétés, le CAP est largement utilisé pour le traitement des polluants en phase liquide et gazeuse.



Figure I-1: Charbon actif en poudre.

I.7.2. Charbon actif en grain (CAG)

Le charbon actif en grains est constitué de particules dont la taille est comprise entre 0,3 et 5 mm. Il présente une grande surface interne due à la présence de nombreux pores de petite taille, tandis que sa surface externe reste relativement faible. Ainsi, lors de l'adsorption, les molécules doivent diffuser à l'intérieur des pores, ce qui rend la diffusion interne un facteur déterminant dans ce type de charbon (**Figure I-2**) [18].



Figure I-2: charbon actif en grain.

Tableau I-1 : Comparaison entre CAP et CAG [19].

	Charbon actif en poudre (CAP)	Charbon actif en grain (CAG)
Taille (µm)	1 – 100	300 – 5000

Cinétique d'adsorption	Rapide	Plus lente
Régénération	Difficile et n'est pas réalisée industriellement vue les pertes de matière	Possible et elle est réalisée à l'échelle industrielle
Applications	Généralement en phase liquide	Phases liquide et gazeuses

I.7.3. Charbon actif extrudé

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



Figure I-3: Charbon actif extrudé.

I.8. Propriétés des charbons actifs

Plusieurs paramètres permettent de caractériser les charbons actifs et de définir leurs conditions d'utilisation. Les principaux sont présentés ci-dessous [20].

❖ Volume poreux et taille des pores

les pores des charbons actifs se répartissent en trois catégories :

- **Micropores** : diamètre inférieur à 1 nm.
- **Mésopores** : diamètre compris entre 1 et 25 nm.
- **Macropores** : diamètre supérieur à 25 nm.

Le volume poreux total varie généralement entre 0,5 et 1 cm³ g⁻¹ ce qui représente environ 50 à 70 % du volume total.

- ❖ **Surface spécifique :** La surface spécifique correspond à la surface totale développée à l'intérieur de la structure poreuse du matériau. En raison de sa forte porosité, elle est généralement élevée et comprise entre 500 et 2000 m² g⁻¹, selon le type et le mode de préparation du charbon actif. Les micropores et mésopores contribuent principalement à cette surface, ce qui explique que la capacité d'adsorption est directement liée à la surface spécifique.
- ❖ **Taille des grains et dureté :** La granulométrie influence fortement la cinétique d'adsorption. Des particules de petite taille favorisent un transfert plus rapide des molécules vers l'intérieur du matériau. Cependant, elles peuvent entraîner une augmentation de la perte de charge lors de l'écoulement du fluide. La dureté, quant à elle, correspond à la résistance du charbon actif au tassement, à l'abrasion et aux contraintes mécaniques lors des opérations de manipulation et de lavage.
- ❖ **Densité :** La densité diminue généralement avec l'augmentation du degré d'activation, un charbon fortement activé étant plus léger. Elle constitue un indicateur du niveau d'activation et influence à la fois les performances de traitement et le coût du matériau. Dans le traitement de l'eau, la densité du charbon actif varie généralement entre 0,20 et 0,60 g cm⁻³ avec des performances souvent jugées optimales pour des valeurs supérieures à 0,35 g cm⁻³.

I.9. Préparation du charbon actif

La préparation du charbon actif comprend généralement trois étapes principales :

- ❖ **Choix du matériau :** On sélectionne des matières riches en carbone et peu coûteuses, telles que le bois, les coques de noix de coco, le charbon, ou encore certains déchets industriels (résidus de café, boues, etc.), dans une logique de valorisation des déchets.
- ❖ **Carbonisation :** Cette étape consiste en un chauffage en l'absence d'oxygène, généralement à une température inférieure à 800 °C, afin d'éliminer les composés volatils et les éléments non carbonés. Le matériau obtenu est encore peu poreux et présente une faible capacité d'adsorption.
- ❖ **Activation :** Cette étape permet de développer la porosité du matériau par activation physique ou chimique, améliorant ainsi ses propriétés d'adsorption.

Le produit final obtenu est un charbon actif à structure poreuse développée et à forte capacité d'adsorption [21].

I.10. Phénomène d'adsorption sur charbon actif

L'adsorption sur charbon actif correspond au transfert des particules dissoutes (adsorbat) depuis une phase liquide vers la surface d'un solide adsorbant. Ce mécanisme permet la rétention des polluants présents dans l'eau à traiter.

Ce phénomène se déroule en plusieurs étapes successives :

- **Étape 1** : transfert des particules depuis la phase liquide (eau libre) vers la couche hydrique proche de la surface (eau liée). Ce transfert est très rapide.
- **Étape 2** : migration de l'eau liée contenant les particules jusqu'à la surface externe du charbon actif. Ce transfert est rapide.
- **Étape 3** : diffusion des particules de la surface externe vers les pores internes du charbon actif, sous l'effet d'un gradient de concentration. Cette étape est plus lente.
- **Étape 4** : Adsorption des particules dans un micropore du charbon actif (transfert très rapide) [22].

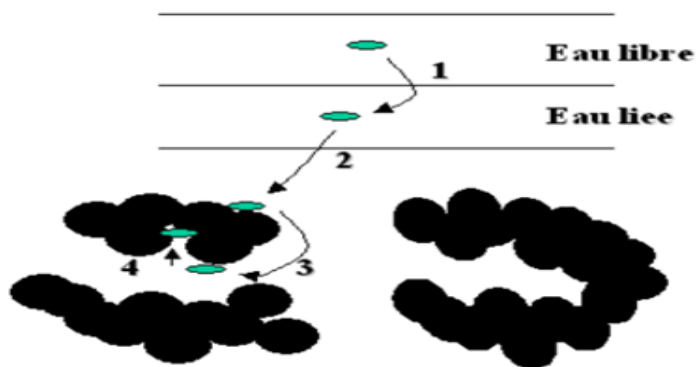


Figure I-4: schéma de principe de l'adsorption sur charbon actif [23].

I.11. La régénération du charbon actif

Le charbon actif peut être régénéré après saturation de ses pores par les polluants. Cette opération a pour objectif de restaurer ses performances d'adsorption en éliminant les composés fixés à sa surface. Elle se déroule en deux étapes :

- **La désorption** : élimination des espèces adsorbées à la surface du charbon.

- **La réactivation** : restauration partielle de la structure poreuse et des propriétés adsorbantes du matériau [24].

I.12. Domaine d'utilisation charbon actif

Le charbon actif est largement utilisé dans différents secteurs industriels et environnementaux, notamment pour :

- La récupération des solvants ;
- Le traitement et le conditionnement de l'air ;
- Le traitement des eaux potables et des eaux usées ;
- La décoloration et la purification de produits industriels, comme par exemple la décoloration du sucre de canne, ainsi que l'élimination des impuretés et des colorants [25].

II.1. Généralités

Ce chapitre présente l'étude expérimentale menée afin d'évaluer les performances d'adsorption d'un charbon actif modifié pour l'élimination de colorants organiques en solution aqueuse. L'influence de différents paramètres opératoires, notamment la dose d'adsorbant, le pH du milieu et le temps de contact, est étudiée en vue de déterminer les conditions optimales d'adsorption et d'analyser l'effet de la modification métallique sur l'amélioration des capacités adsorbantes du charbon actif.

II.2. Matériels et produits

Les différents matériels et produits utilisés au cours de cette étude sont regroupés dans le tableau II.1.

Tableau II-1: Matériels et produits utilisés.

Les matériels	Les produits
Balance	Eau distillée
Etuve	HNO ₃
Agitateurs magnétiques	SrCl ₂ .6H ₂ O
Barreaux magnétiques	AlCl ₃ .6H ₂ O
Thermomètre	NaOH
pH-mètre	HCl
Spectrophotomètre UV-vis	C ₆ H ₈ O ₇
Bécher	CH ₃ CH ₂ OH
Pipettes graduées	Bleu de méthylène
	Rouge acide 14

II.3. Les colorants étudiés

II.3.1. Bleu de méthylène

Le bleu de méthylène (chlorure de méthylthioninium) est un colorant organique cationique de synthèse appartenant à la famille des thiazines, largement utilisé dans plusieurs domaines industriels et biologiques. En raison de sa stabilité chimique et de sa forte coloration, il est fréquemment retrouvé dans les effluents industriels et constitue un polluant modèle dans les études d'adsorption. De nombreuses recherches ont été consacrées à son élimination par

différents adsorbants, notamment les charbons actifs. Sa structure chimique est représentée dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable. (a)**.

II.3.2. Acide rouge 14

Le rouge acide 14, également connu sous les noms de Carmoisine, Azorubine ou E122, est un colorant anionique synthétique appartenant à la famille des colorants azoïques. Il est largement utilisé dans l'industrie alimentaire, cosmétique et pharmaceutique en raison de son pouvoir colorant rouge stable. Sa structure chimique est présentée dans la **Figure II-2 (b)**.

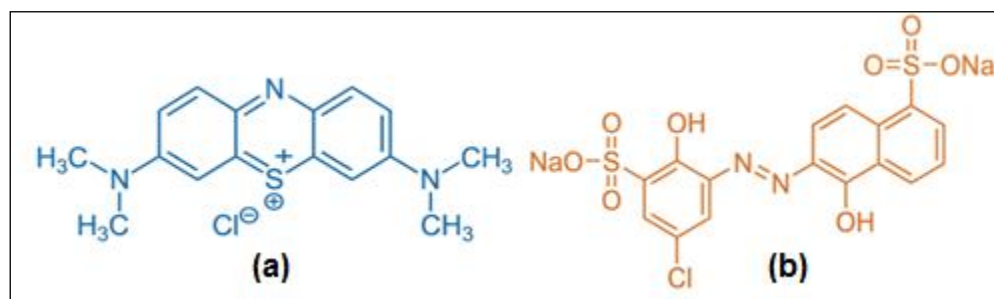


Figure II-1: Structure chimique du bleu de méthylène (a) et de l'acide rouge 14 (b).

Tableau II-2: Propriétés physico-chimiques du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 [26].

Propriétés	Bleu de méthylène	Acide rouge 14
Formule Brut	$C_{16}H_{18}ClN_3S$	$C_{20}H_{12}N_2Na_2O_7S_2$
La masse molaire	$319,85 \text{ g mol}^{-1}$	$502,44 \text{ g mol}^{-1}$
Etat physique	Solide (poudre)	Solide (poudre)
Aspect	Poudre bleu foncé	Rouge foncé à marron
Odeur	Inodore	Inodore
Solubilité	Très soluble dans l'eau et l'alcool	Très soluble dans l'eau
Absorbance maximale	665 nm	515 nm

II.4. Préparation du matériau adsorbant

La modification du charbon actif a été réalisée en plusieurs étapes. Dans un premier temps, 10 g de charbon actif sont mis en contact avec 250 mL d'une solution d'acide nitrique (HNO_3) de concentration 2 M sous agitation pendant 4 heures. Le solide est ensuite filtré, lavé à l'eau distillée jusqu'à obtention d'un pH neutre ($\text{pH} \approx 7$), puis séché à l'étuve pendant 12 heures, afin d'obtenir un charbon actif modifié par l'acide nitrique.

La deuxième étape du procédé consiste en la préparation de deux solutions en dissolvant 7,2 g de $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ et 5,08 g de $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dans 150 mL d'eau distillée chacun, puis en les agitant pendant 10 minutes avant mélange. La solution obtenue est ensuite chauffée à 70 °C, puis 9,5 g d'acide citrique sont ajoutés progressivement sous agitation pendant 20 minutes afin d'assurer la complexation. Ensuite, 10 mL d'éthylène glycol sont introduits goutte à goutte sous agitation pendant 30 minutes.

Le charbon actif est ensuite incorporé et la suspension est soumise à une sonication pendant 20 minutes afin d'améliorer l'imprégnation. Le mélange est maintenu à 70 °C pendant 1 heure, puis le pH est ajusté à 8 à l'aide de NH_4OH .

Le solide obtenu est ensuite séché à 100 °C pendant 12 heures, puis calciné en deux étapes successives : 250 °C pendant 1 h 30 min, puis 350 °C pendant 3 heures.

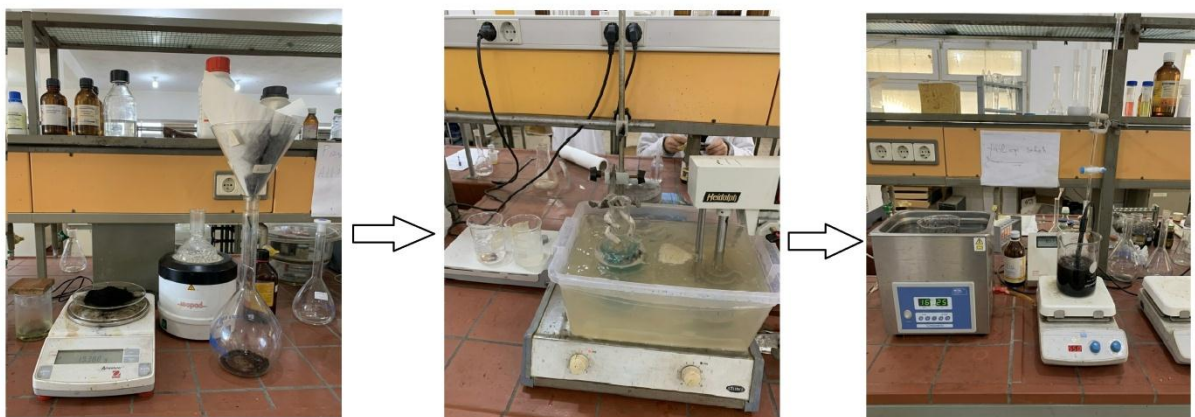


Figure II-2: Les étapes de modification du charbon actif.

II.5. Application de l'adsorption

Deux solutions mères des colorants bleu de méthylène et acide rouge 14, de concentration 1000 mg L^{-1} , sont préparées séparément en dissolvant 1 g de chaque colorant dans 1 L d'eau distillée. Les solutions sont ensuite agitées jusqu'à obtention d'un mélange homogène.

II.5.1. Étude des paramètres influençant l'adsorption

1. Effet de la dose

L'influence de la dose d'adsorbant sur l'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 a été étudiée à partir de solutions de concentration 50 mg L^{-1} . Les essais ont été réalisés dans des flacons contenant 25 mL de chaque solution colorée. Différentes masses d'adsorbant (0,01 ; 0,02 ; 0,025 ; 0,03 et 0,035 g) ont été ajoutées successivement, puis les mélanges ont été maintenus sous agitation continue pendant 2 heures. À l'issue des essais, les échantillons ont été analysés par spectrophotométrie afin de déterminer l'absorbance résiduelle et le rendement d'élimination des deux colorants.

2. Effet du pH

L'influence du pH sur l'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 a été étudiée à partir de solutions de concentrations respectives de 100 mg L^{-1} et 60 mg L^{-1} . Les essais ont été réalisés dans des flacons contenant 25 mL de chaque solution colorée, en présence de 0,025 g d'adsorbant pour le bleu de méthylène et de 0,02 g pour l'acide rouge 14. Les suspensions ont été agitées pendant 2 h, tandis que le pH du milieu a été ajusté à 2, 4, 5, 6, 8 et 10 à l'aide de solutions de HCl et de NaOH (0,1 N). Cette étude a permis d'évaluer l'effet du pH sur les performances d'adsorption des deux colorants.

3. Effet du temps

L'effet du temps de contact sur l'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 a été étudié à partir de solutions de concentrations respectives de 100 mg L^{-1} et 80 mg L^{-1} . Le pH des solutions a été ajusté à 6 pour le bleu de méthylène et à 2 pour l'acide rouge 14. Pour chaque essai, 25 mL de solution colorée ont été mis en contact avec 0,025 g de charbon actif pour le bleu de méthylène et 0,02 g pour l'acide rouge 14. Des prélèvements ont été effectués à différents temps de contact (5, 10, 20, 30, 45, 60, 90 et 120 min) afin de suivre l'évolution du processus d'adsorption.

4. Isothermes d'adsorption

L'étude des isothermes d'adsorption a été réalisée en utilisant des solutions de bleu de méthylène et d'acide rouge 14 de différentes concentrations initiales obtenues par dilution. Les concentrations variaient de 100 à 600 mg L⁻¹ pour le bleu de méthylène et de 80 à 350 mg L⁻¹ pour l'acide rouge 14.

Pour chaque expérience, 25 mL de solution colorée ont été mis en contact avec le charbon actif dans des flacons séparés. Une masse d'adsorbant de 0,025 g a été utilisée pour le bleu de méthylène et de 0,02 g pour l'acide rouge 14. Le pH des solutions d'acide rouge 14 a été ajusté à 2. Les mélanges ont ensuite été maintenus sous agitation continue pendant 60 min pour le bleu de méthylène et 90 min pour l'acide rouge 14 afin d'atteindre l'équilibre d'adsorption.

À l'issue des essais, les solutions ont été analysées par spectrophotométrie afin de déterminer les concentrations à l'équilibre. Les résultats obtenus ont permis de calculer les quantités adsorbées et d'étudier l'ajustement des données expérimentales aux modèles d'isothermes de Langmuir, Freundlich et Temkin.

II.6. Modélisation mathématique des isothermes d'adsorption

II.6.1. Modèle de Langmuir

Le modèle de Langmuir suppose que l'adsorption se produit sur une surface homogène possédant des sites actifs identiques. Il considère que chaque site ne peut adsorber qu'une seule molécule et que l'adsorption conduit à la formation d'une monocouche. L'équation de Langmuir s'écrit comme suit [27] :

$$q_e = \frac{q_m \times K_L \times C_e}{1 + (K_L \times C_e)} \quad (\text{II} - 1)$$

q_e : la quantité adsorbée à l'équilibre (mg g⁻¹) ;

C_e : la concentration de la solution à l'équilibre (mg L⁻¹) ;

q_m : la quantité adsorbée nécessaire pour former une monocouche (mg g⁻¹) ;

K_L : la constante de Langmuir liée à la chaleur d'adsorption en (L mg⁻¹).

L'équation de Langmuir peut être linéarisée afin de déterminer la capacité maximale b et la constante de Langmuir K_L :

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{q_m \times K_L} \quad (012)$$

II.6.2. Modèle de Freundlich

Le modèle de Freundlich est un modèle empirique utilisé pour décrire l'adsorption sur des surfaces hétérogènes. Il suppose que les sites d'adsorption possèdent des énergies différentes et que l'adsorption peut se produire en multicouches. L'équation de Freundlich est donnée par [28]:

$$q_e = K_F \times C^{\frac{1}{n}} \quad (II - 3)$$

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C \quad (II - 4)$$

K_F et n sont les constantes du modèle de Freundlich.

$\frac{1}{n}$: Indicateur de l'intensité ou de la favorabilité de l'adsorption. Il reflète l'intensité de l'adsorption ou l'hétérogénéité de la surface [29].

II.6.3. Modèle de Temkin

L'isotherme de Temkin tient compte des interactions entre l'adsorbat et l'adsorbant en supposant que la chaleur d'adsorption diminue linéairement avec le taux de recouvrement de la surface. Ce modèle permet ainsi de mieux décrire certains systèmes réels d'adsorption. La relation mathématique est exprimée par [30]:

$$q_e = \frac{R \times T}{b_T} \log(K_T \times C_e) \quad (II - 5)$$

$$q_e = \frac{R \times T}{b_T} (\log K_T + \log C_e) \quad (II - 6)$$

$$B_T = \frac{R \times T}{b_T} \quad (II - 7)$$

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

T: Température absolue (K) ;

K_T : Constante d'équilibre associée à l'énergie de liaison maximale (L mg^{-1}) ;

B_T : Constante en lien avec la chaleur d'adsorption.

II.7. Cinétique d'adsorption

Parmi les modèles cinétiques les plus couramment utilisés pour décrire le processus d'adsorption, on peut citer les modèles suivants :

II.7.1. Modèle cinétique de pseudo-premier ordre

Le modèle cinétique de pseudo-premier ordre, proposé par Lagergren en 1889, est couramment utilisé pour décrire la cinétique d'adsorption. L'expression de ce modèle est donnée par [31] :

$$\frac{dq_t}{dt} = K_1(q_e - q_t) \quad (\text{II} - 8)$$

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - K_1 t \quad (\text{II} - 9)$$

K_1 : la constante de vitesse pour une cinétique de pseudo-premier ordre ;

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

q_e : la capacité d'adsorption à l'équilibre en (mg g^{-1}).

II.7.2. Modèle cinétique de pseudo-second ordre

Le modèle de pseudo-second ordre est couramment utilisé pour décrire la cinétique d'adsorption. Il suppose que le processus dépend de la disponibilité des sites actifs et qu'il est souvent associé à une adsorption de nature chimique. L'équation de ce modèle s'écrit comme suit [32]:

$$\frac{dq_t}{dt} = K_2(q_e - q_t)^2 \quad (\text{II} - 10)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 \times q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (\text{II} - 11)$$

K_2 : la constante de vitesse pour une cinétique de pseudo-second ordre ;

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

II.8. Thermodynamique de l'adsorption

- **Coefficient de distribution :**

Il est défini comme étant le rapport des quantités fixées par gramme de solide sur la quantité de soluté restant en solution par volume de solution. Il caractérise l'affinité du soluté pour l'adsorbant. Il est défini par l'expression suivante [33]:

$$K_d \equiv \frac{(C_0 - C_e)}{C_e} \times \frac{V}{m} \quad (\text{II} - 12)$$

Avec :

K_d : Coefficient de distribution (L g^{-1}) ;
 C_0 : Concentration initiale de l'adsorbat (mg L^{-1}) ;
 C_e : Concentration à l'équilibre de l'adsorbat (mg L^{-1}) ;
 m : masse d'adsorbant (g) ;
 V : Volume de l'adsorbat (L).

- **Les paramètres thermodynamiques :**

Les paramètres thermodynamiques, notamment l'énergie libre de Gibbs (ΔG), l'enthalpie (ΔH) et l'entropie (ΔS), ont été déterminés à l'aide des équations suivantes :

$$\Delta G = -RT \cdot \ln K_e \quad (\text{II} - 13)$$

$$\ln K_d = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT} \quad (\text{II} - 14)$$

La variation d'enthalpie (ΔH) et d'entropie (ΔS) peut être déterminée à partir de la pente et de l'ordonnée à l'origine de la droite obtenue à partir de l'équation de Van't Hoff, représentant ΔG en fonction de la température (T).

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (\text{II} - 15)$$

III.1. Généralités

Ce chapitre est consacré à la présentation et à l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus lors des essais d'adsorption réalisés sur le charbon actif modifié. L'étude vise à évaluer l'efficacité du matériau pour l'élimination du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14, en analysant l'influence de différents paramètres expérimentaux. Les résultats sont exploités afin de mieux comprendre le comportement du processus d'adsorption ainsi que les interactions entre les colorants et la surface de l'adsorbant.

III.2. La courbe d'étalonnage

La courbe d'étalonnage de chaque colorant, représentant l'absorbance en fonction de la concentration du colorant organique ($Abs = f(C)$), est présentée dans les figures suivantes :

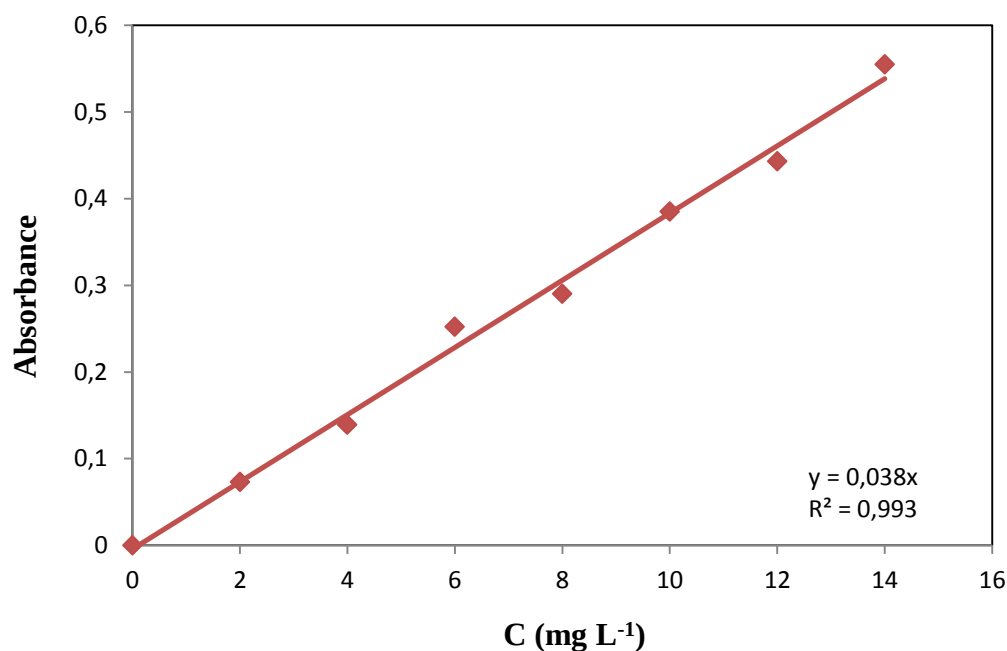


Figure III-1 : Courbe d'étalonnage de l'acide rouge 14.

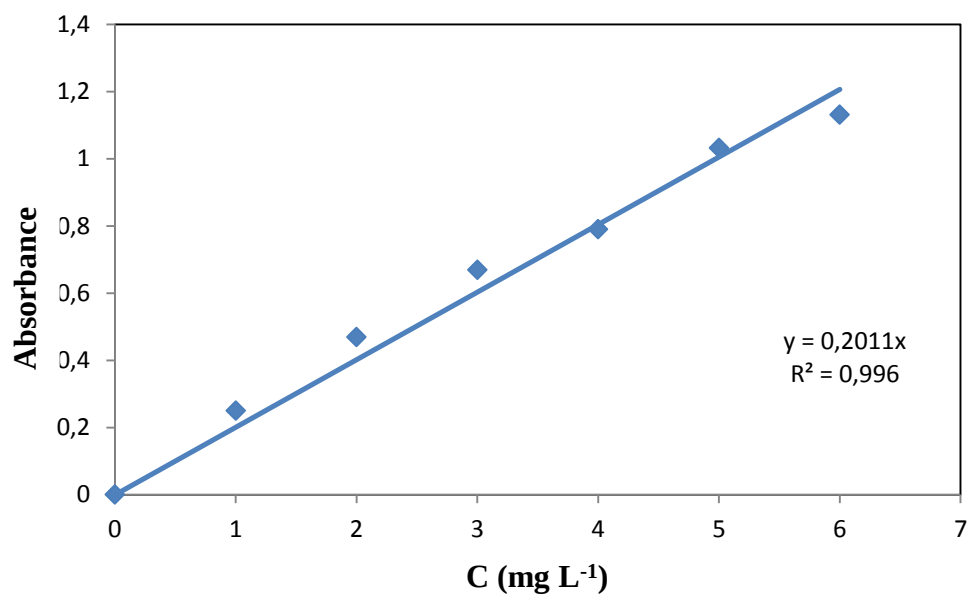


Figure III-2 : Courbe d'étalonnage du bleu de méthylène.

On observe que les courbes obtenues sont linéaires, avec des coefficients de corrélation de 0,9937 pour l'acide rouge 14 et de 0,996 pour le bleu de méthylène, ce qui indique un excellent ajustement à la loi de Beer-Lambert.

III.3. Effet de la dose

La Figure III-3 présente l'effet de la dose d'adsorbant sur le taux d'élimination du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14.

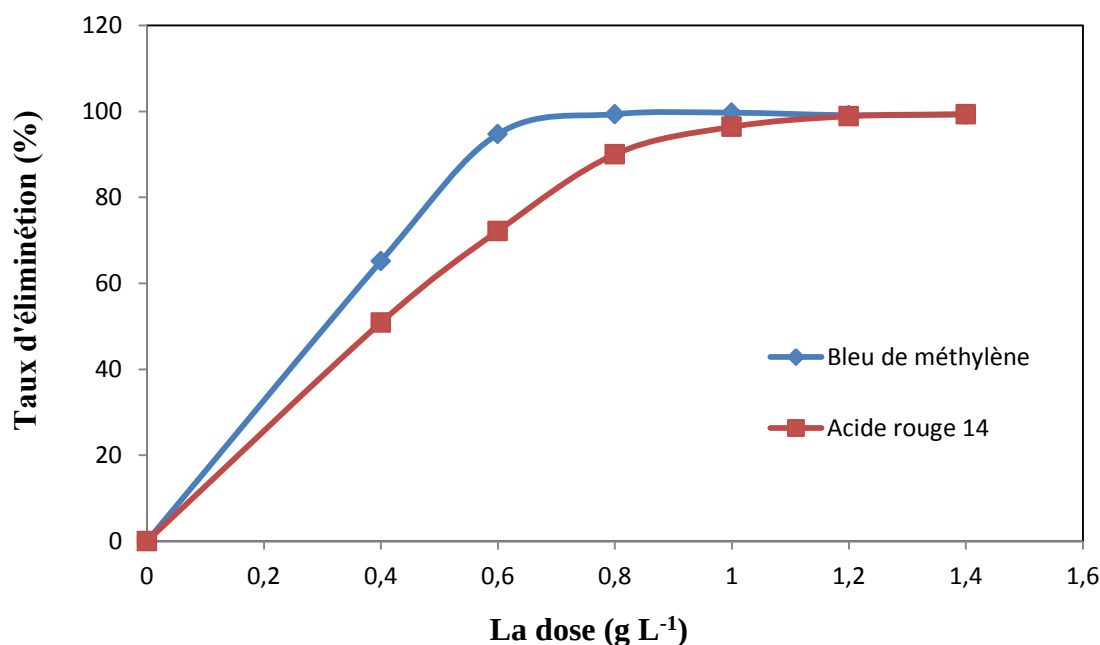


Figure III-3 : Taux d'élimination du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 en fonction de la dose d'adsorbant.

D'après la figure III-3, on observe que le taux d'élimination des deux colorants augmente avec l'augmentation de la dose d'adsorbant. L'évolution des courbes montre ensuite une tendance à la stabilisation vers un plateau, ce qui traduit la saturation progressive des sites actifs disponibles à la surface de l'adsorbant.

- ✓ Le point optimal pour l'acide rouge 14 est de 1 g L⁻¹, ce qui correspond à une masse de 0,025 g.
- ✓ Le point optimal pour le bleu de méthylène est de 0,8 g L⁻¹, correspondant à une masse de 0,02 g.

III.4. Effet de pH

La Figure III-4 indique l'effet du pH sur le taux d'élimination du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14.

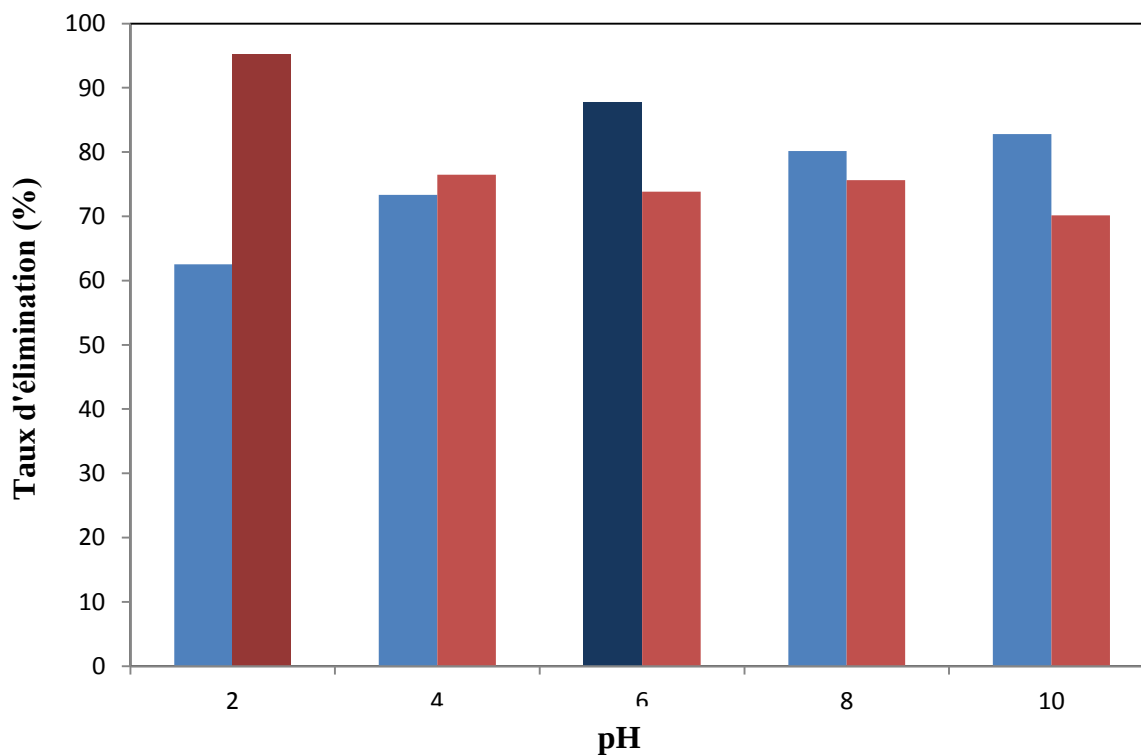


Figure III-4 : Taux d'élimination du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 en fonction du pH.

D'après la **figure III-4**, les résultats montrent que le pH joue un rôle essentiel dans le processus d'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14.

- ✓ Pour le bleu de méthylène, le taux d'élimination maximal est obtenu à $\text{pH} = 6$ (87,66 %).
- ✓ Pour l'acide rouge 14, le taux d'élimination maximal est observé à $\text{pH} = 2$ (95,13 %).

III.5. Effet du temps de contact

La Figure III-5 indique l'effet du temps de contact sur le taux d'élimination du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14.

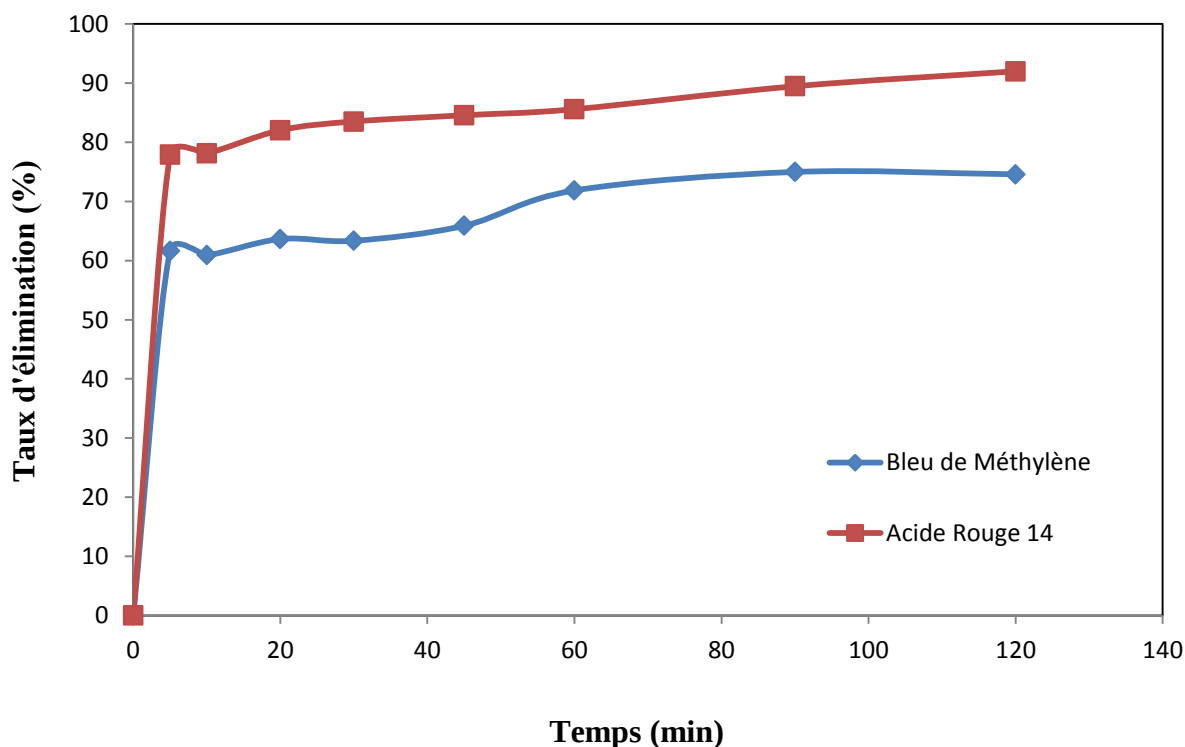


Figure III-5 : Effet du temps de contact sur l'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14.

D'après la **Figure III-5**, le taux d'élimination augmente rapidement au début, puis tend à se stabiliser avec le temps, ce qui s'explique par la saturation progressive des sites actifs d'adsorption et la diminution du nombre de sites libres disponibles. Cette évolution traduit également l'établissement progressif d'un équilibre entre les phases solide et liquide.

Le temps de contact optimal est de 90 min pour l'acide rouge 14 (89,47 %) et de 60 min pour le bleu de méthylène (71,85 %).

Par ailleurs, cette différence de comportement peut être attribuée à la nature des interactions électrostatiques entre les molécules de colorants et la surface de l'adsorbant, ainsi qu'à leur accessibilité aux sites actifs du matériau.

III.6. Isotherme d'adsorption

Les résultats des isothermes d'adsorption, regroupés dans les Figures III-6 à III-9 ainsi que dans le Tableau III-2, permettent d'étudier et de comparer le comportement d'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 sur le charbon actif selon les modèles appliqués.

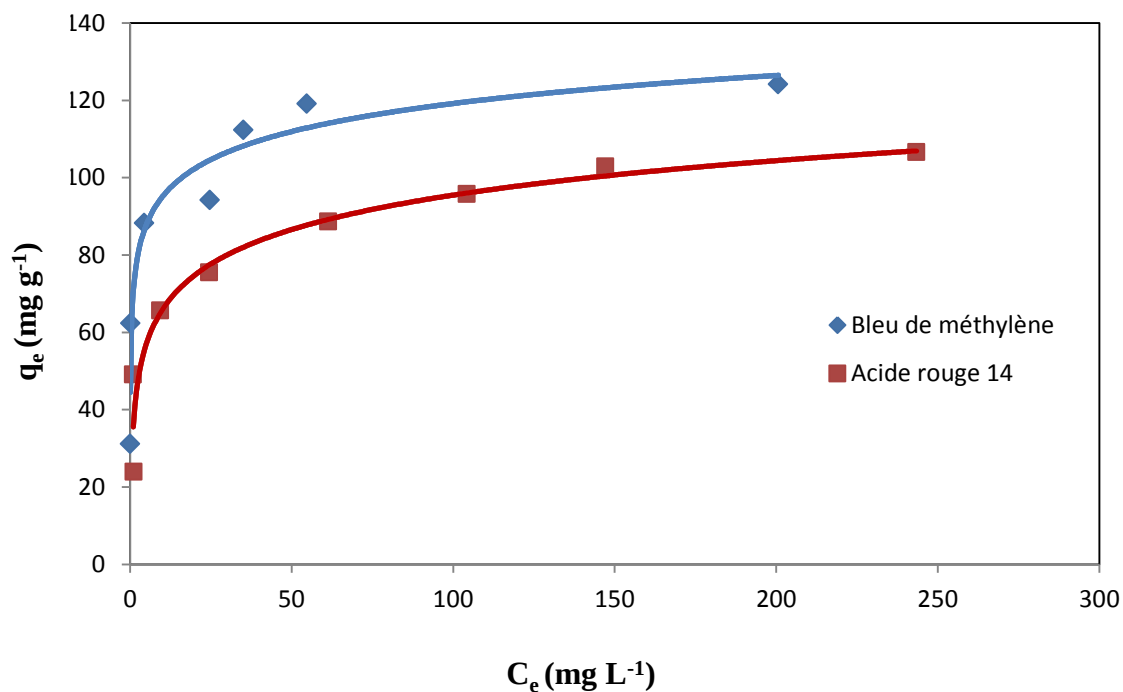


Figure III-6 : Isotherme d'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 sur le charbon actif.

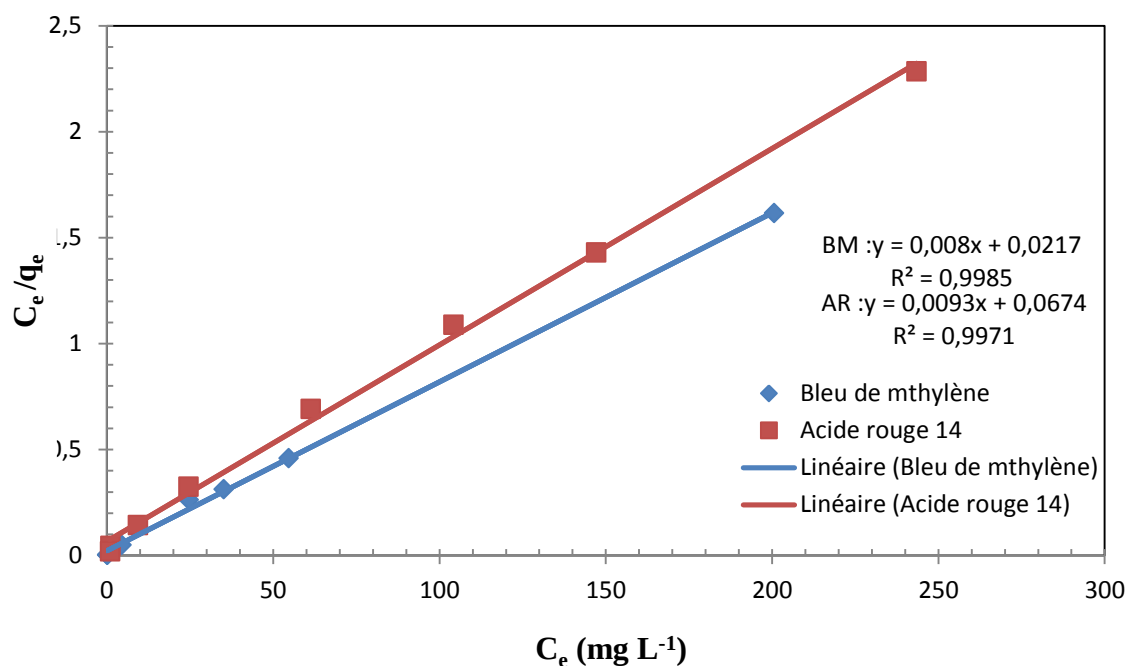


Figure III-7 : Modèle de Langmuir pour l'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 sur le charbon actif.

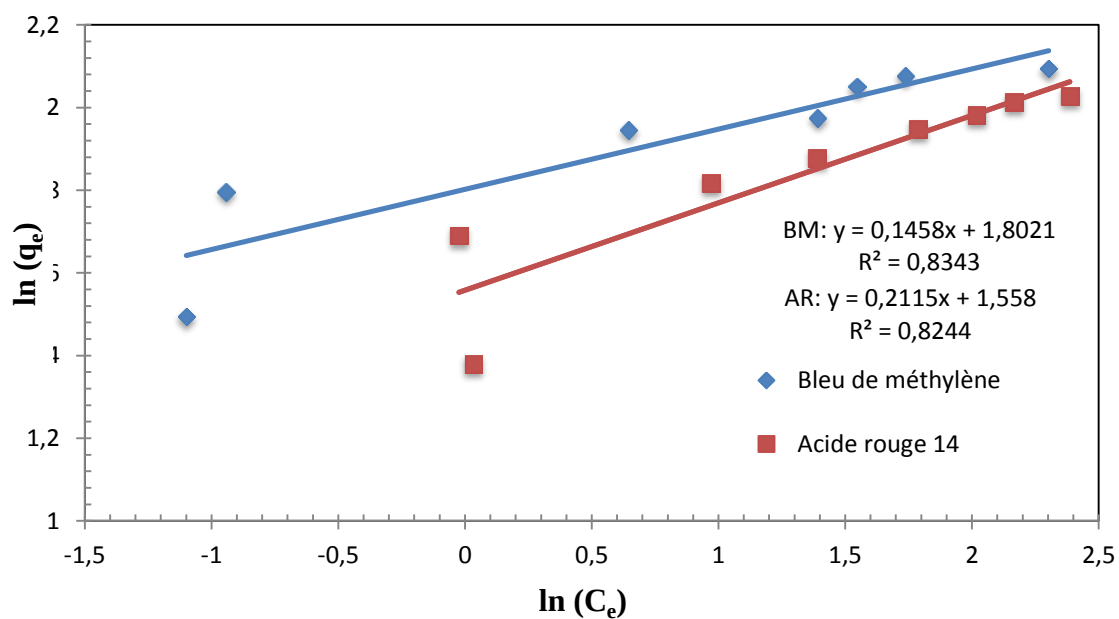


Figure III-8 : Modèle de Freundlich pour l'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 sur le charbon actif.

Tableau III-1: Résultats des isothermes d'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 selon les modèles de Langmuir, Freundlich et Temkin.

		Bleu de méthylène	Acide rouge 14
Modèle de Langmuir	$q_{\max} \text{ (mg g}^{-1}\text{)}$	125,0	107,5
	$K_L \text{ (L mg}^{-1}\text{)}$	0,3686	0,1379
	R^2	0,9985	0,9971
Modèle de Freundlich	n	6,8587	4,7281
	$K_F \text{ (L mg}^{-1}\text{)}$	63,401	36,140
	R^2	0,8343	0,8244
Modèle de Temkin	B_T	91,479	83,718
	$K_T \text{ (L mg}^{-1}\text{)}$	884,708	16,813
	R^2	0,9191	0,9358

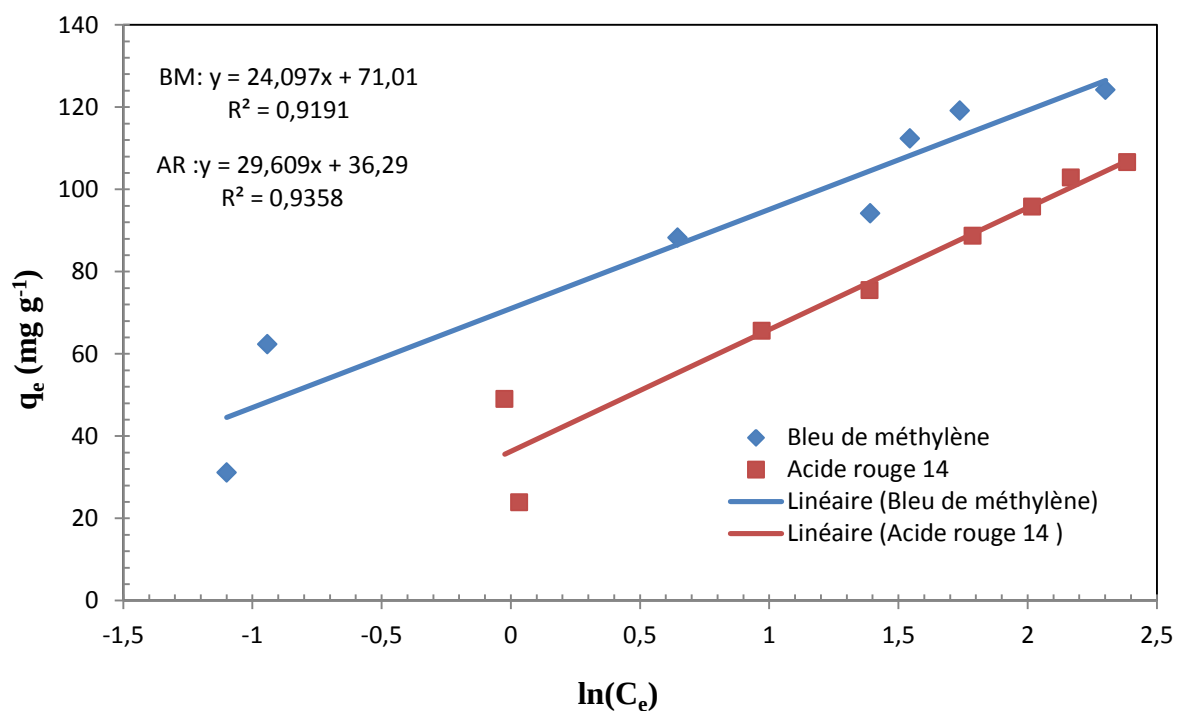


Figure III-9 : Modèle de Temkin pour l'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 sur le charbon actif.

D'après la **Figure III-6**, la quantité adsorbée (q_e) augmente rapidement avec la concentration à l'équilibre (C_e), puis atteint progressivement un palier. Cette évolution traduit la saturation progressive des sites actifs disponibles à la surface du charbon actif.

Les résultats présentés dans le **Tableau III-1** montrent que :

Le modèle de Langmuir décrit le mieux le processus d'adsorption pour les deux colorants, avec des coefficients de corrélation très élevés ($R^2 = 0,9985$ pour le bleu de méthylène et $R^2 = 0,9971$ pour l'acide rouge 14). Cela confirme une adsorption en monocouche sur une surface homogène. La capacité maximale d'adsorption est plus élevée pour le bleu de méthylène (125 mg g^{-1}) que pour l'acide rouge 14 ($107,5 \text{ mg g}^{-1}$), traduisant une affinité plus importante pour ce colorant.

Les paramètres du modèle de Freundlich montrent des valeurs de $n > 1$, ce qui indique que l'adsorption est favorable dans les conditions expérimentales étudiées. Cependant, les coefficients de corrélation relativement faibles ($R^2 = 0,82\text{--}0,83$) suggèrent que ce modèle ne décrit pas de manière optimale le comportement du système et reste moins adapté que le modèle de Langmuir.

Le paramètre B_T du modèle de Temkin est positif et les coefficients de corrélation sont acceptables ($R^2 = 0,91\text{--}0,93$). Cela indique la présence d'interactions entre les molécules de colorant et la surface du charbon actif, ainsi qu'une diminution progressive de la chaleur d'adsorption avec l'occupation des sites actifs.

Dans l'ensemble, l'étude des isothermes montre que le charbon actif utilisé présente une bonne capacité de rétention vis-à-vis des deux polluants étudiés. L'adsorption suit principalement le modèle de Langmuir, ce qui indique une formation de monocouche sur des sites actifs spécifiques. Par ailleurs, le matériau se révèle plus performant pour l'élimination du bleu de méthylène, avec une capacité maximale d'adsorption de 125 mg g^{-1} .

III.7. Cinétique d'adsorption

Les modèles cinétiques de pseudo-premier ordre et de pseudo-deuxième ordre ont été appliqués afin de décrire l'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 sur le charbon actif. Les résultats obtenus sont présentés dans le **Tableau III-2**, tandis que les ajustements correspondants sont illustrés par les **Figures III-10** et **III-11**.

D'après les données du **Tableau III-2**, le modèle de pseudo-deuxième ordre présente les meilleurs coefficients de corrélation (R^2), avec des valeurs de 0,9938 pour le bleu de méthylène et de 0,9987 pour l'acide rouge 14. En comparaison, le modèle de pseudo-premier ordre affiche des coefficients de corrélation plus faibles, particulièrement dans le cas du bleu de méthylène ($R^2 = 0,8767$).

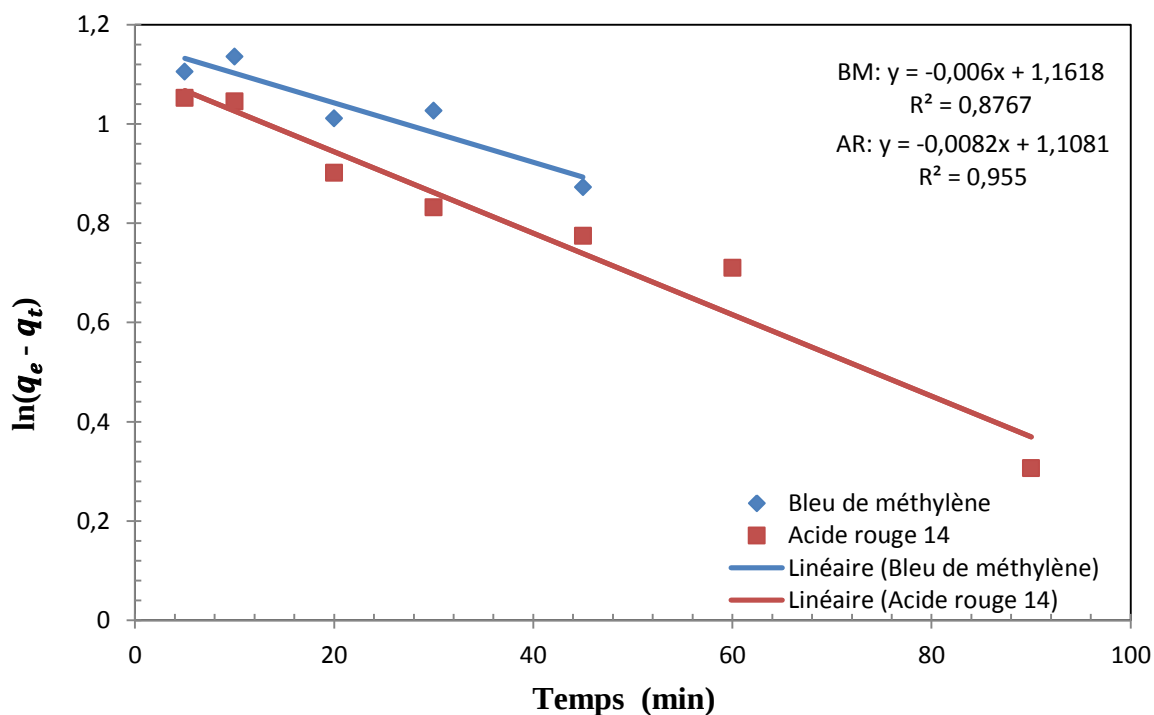


Figure III-10 : Cinétique d'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 selon le modèle de pseudo-premier ordre sur le charbon actif.

Tableau III-2 : Paramètres des modèles cinétiques appliqués à l'adsorption des deux colorants sur le charbon actif.

		Bleu de méthylène	Acide rouge 14
Modèle cinétique pseudo-premier ordre	$q_{e-exp}(mg\ g^{-1})$	89,82	73,61
	$q_{e-cal}(mg\ g^{-1})$	14,51	12,83
	$K_1\ (min^{-1})$	0,006	0,0082
	R^2	0,8767	0,955
Modèle cinétique deuxième ordre	$q_{e-exp}(mg\ g^{-1})$	89,82	73,61
	$q_{e-cal}(mg\ g^{-1})$	90,09	74,07

	$K_2 \text{ (min}^{-1}\text{)}$	0,005	0,0049
	R^2	0,9938	0,9987

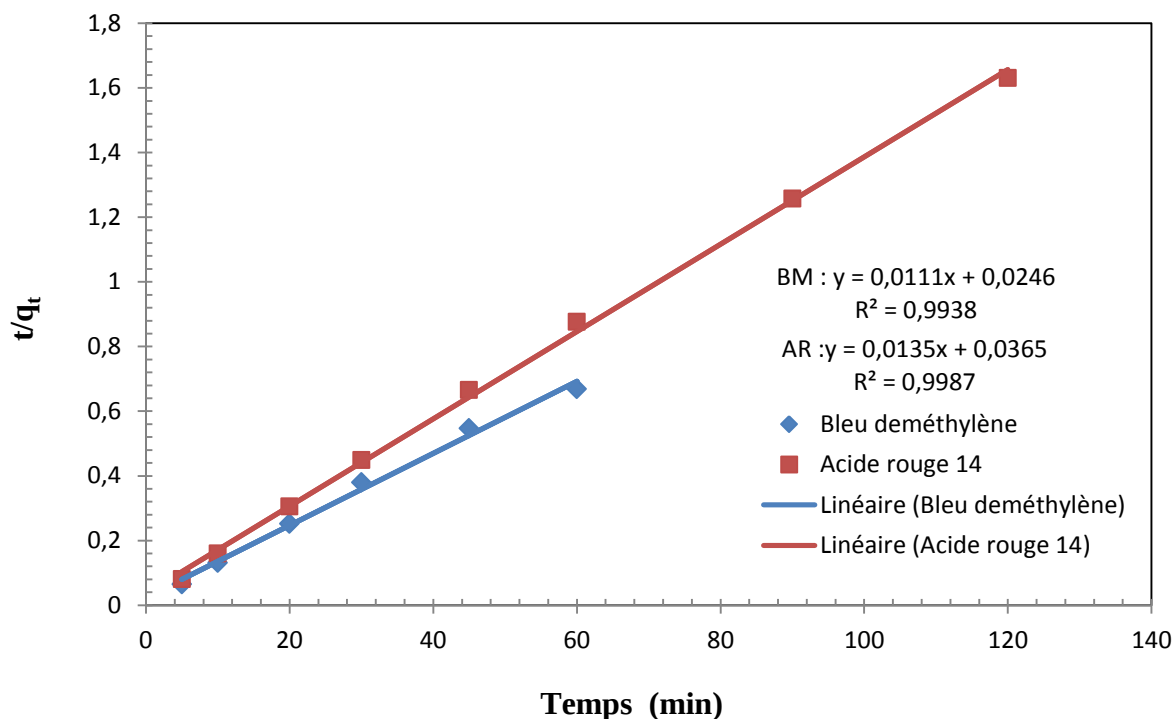


Figure III-11 : Cinétique d'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 selon le modèle de pseudo-deuxième ordre sur le charbon actif.

De plus, les capacités d'adsorption à l'équilibre calculées par le modèle de pseudo-deuxième ordre sont en excellent accord avec les valeurs expérimentales. Pour le bleu de méthylène, la capacité expérimentale de $89,818 \text{ mg g}^{-1}$ est très proche de la valeur calculée de $90,09 \text{ mg g}^{-1}$. De même, pour l'acide rouge 14, les valeurs expérimentales et calculées sont respectivement de $73,61$ et $74,07 \text{ mg g}^{-1}$. En revanche, le modèle de pseudo-premier ordre conduit à des écarts importants entre les valeurs expérimentales et calculées, ce qui traduit une moins bonne description de la cinétique d'adsorption.

Ainsi, les résultats obtenus montrent que le modèle de pseudo-deuxième ordre est le plus approprié pour représenter la cinétique d'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 sur le charbon actif. Cette adéquation est attestée par les valeurs élevées de R^2 ainsi que par

la bonne concordance entre les capacités d'adsorption expérimentales et calculées, suggérant que ce modèle décrit de manière satisfaisante le processus d'adsorption des deux colorants dans les conditions étudiées.

III.8. Thermodynamique

Les résultats thermodynamiques de l'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 sur le charbon actif sont présentés dans le **Tableau III-3**, tandis que la relation entre $\ln(K_d)$ et $(1/T)$ est illustrée dans la **Figure III-12**.

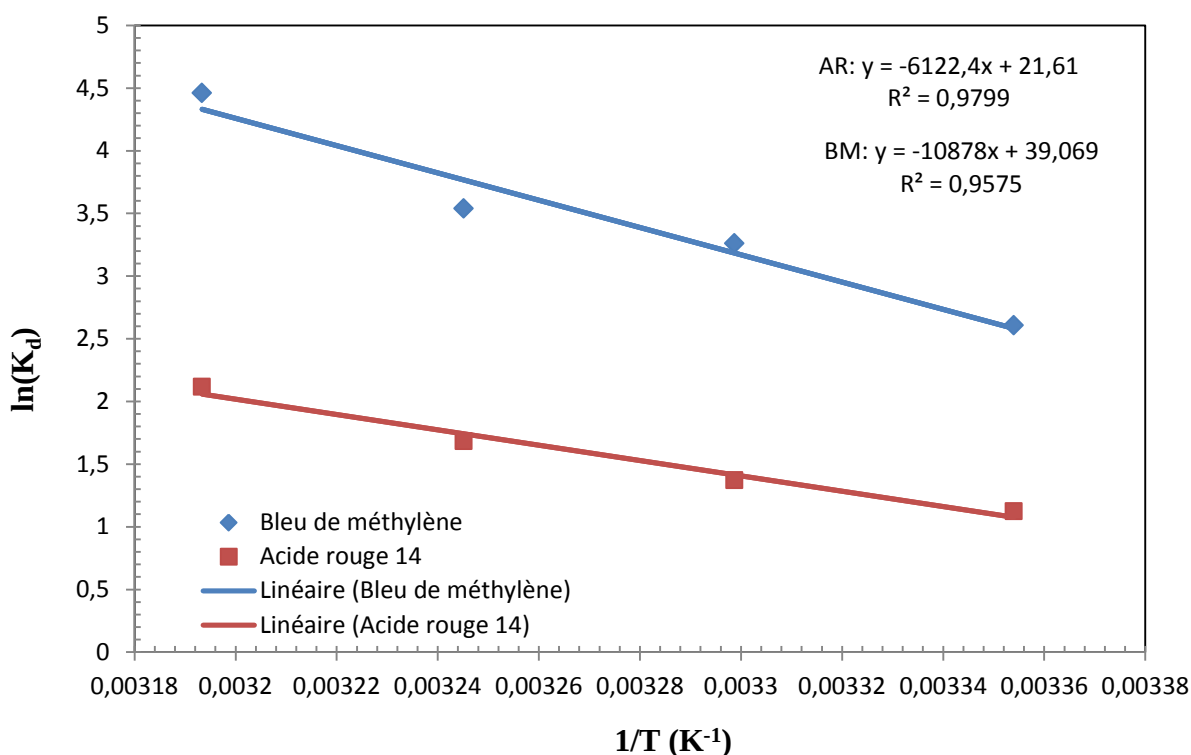


Figure III-12 : Évolution de $\ln(K_d)$ en fonction de $(1/T)$ pour l'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 sur le charbon actif.

Tableau III-3 : Résultats thermodynamiques de l'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 sur le charbon actif.

Températures (K)	ΔG (kJ mol ⁻¹)				ΔH (kJ mol ⁻¹)	ΔS (kJ mol ⁻¹ K ⁻¹)
	298,15	303,15	308,15	313,15		

Bleu de Méthylène	-6,462	-8,214	-9,061	-11,609	90,439	0,324
Acide Rouge 14	-2,786	-3,450	-4,306	-5,506	50,901	0,179

Les courbes obtenues montrent que $\ln(K_d)$ diminue lorsque $(1/T)$ augmente, ce qui signifie que K_d augmente avec la température. Ainsi, l'adsorption est favorisée par l'augmentation de la température.

Les bons coefficients de corrélation ($R^2 \approx 0,96-0,98$), présentés dans le **Tableau III-3**, confirment la validité du modèle thermodynamique utilisé.

Les valeurs positives de ΔH indiquent que l'adsorption est un processus endothermique, donc favorisé à haute température.

Les valeurs positives de ΔS suggèrent une augmentation du désordre à l'interface solide/solution, ce qui favorise le processus d'adsorption.

Les valeurs de ΔG sont négatives pour les deux colorants à toutes les températures, ce qui confirme que l'adsorption est spontanée. De plus, ΔG diminue lorsque la température augmente, indiquant une spontanéité plus importante à haute température.

En conclusion, l'adsorption du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 sur le charbon actif est spontanée, endothermique et favorisée par l'augmentation de la température.

Conclusion générale et recommandations

Ce travail montre que l'adsorption constitue une méthode efficace pour l'élimination du bleu de méthylène et de l'acide rouge 14 en solution aqueuse. Le charbon actif commercial modifié présente de bonnes performances d'adsorption pour ces deux colorants.

Les résultats montrent que les paramètres d'adsorption (pH, dose d'adsorbant et temps de contact) influencent le rendement du procédé. Les conditions optimales sont, pour le bleu de méthylène, une dose de $0,8 \text{ g L}^{-1}$, un pH de 6 et un temps de contact de 60 min, et pour l'acide rouge 14, une dose de 1 g L^{-1} , un pH de 2 et un temps de contact de 90 min.

La capacité d'adsorption à l'équilibre (q_e) est élevée, atteignant $89,82 \text{ mg g}^{-1}$ pour le bleu de méthylène et $73,61 \text{ mg g}^{-1}$ pour l'acide rouge 14, confirmant la bonne efficacité du charbon actif modifié.

L'étude des isothermes montre que le modèle de Langmuir décrit le mieux le processus, indiquant une adsorption en monocouche sur une surface homogène. L'analyse cinétique indique que le modèle du pseudo-deuxième ordre est le plus adapté, suggérant un mécanisme dominé par des interactions de nature chimique.

L'étude thermodynamique met en évidence que le processus est spontané et endothermique, et que son efficacité augmente avec la température.

En conclusion, le charbon actif modifié constitue un adsorbant prometteur pour le traitement des eaux contaminées par les colorants.

Recommandations

Il est recommandé de :

- ✚ étudier la régénération et la réutilisation du charbon actif ;
- ✚ tester le procédé sur des effluents industriels réels ;
- ✚ réaliser des essais à l'échelle pilote afin d'évaluer la faisabilité du procédé.

Références

- [1] G. Crini, E. Lichtfouse, Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17, 145–155, 2019.
- [2] I. Ali, M. Asim, T.A. Khan, Low cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater. *Journal of Environmental Management*, 113, 170–183, 2012.
- [3] D.A. Yaseen, M. Scholz, Textile dye wastewater characteristics and constituents. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 1193–1226, 2019.
- [4] P.S. Kumar, P.R. Yaashikaa, et al. Recent advances in dye removal technologies from wastewater. *Chemosphere*, 335, 139027, 2023.
- [5] E. Brillas, C.A. Martinez-Huitle, Advanced oxidation processes for wastewater treatment: recent progress and future perspectives. *Current Opinion in Electrochemistry*, 49, 101620, 2025.
- [6] G.Z. Kyzas, M. Kostoglou, Green adsorbents for wastewater treatment: A review. *Materials*, 14, 3496, 2021.
- [7] A.H. Jawad, A.S. Abdulhameed, Modified activated carbons for environmental remediation applications. *Journal of Water Process Engineering*, 60, 105113, 2024.
- [8] M. Danish, T. Ahmad, A review on utilization of wood biomass as a sustainable precursor for activated carbon production and application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 87, 1–21, 2018.
- [9] N. Sedira, Etude de l'adsorption des métaux lourds sur un charbon actif issu de Noyaux de dattes, Mémoire de magister, Université Mohamed Cherif Massaadia Souk Ahras, 2013.
- [10] L. Naidja, Elimination du colorant orange en solution aqueuse, par voie photochimique et par Adsorption, Université de Mentouri Constantine, 2010.
- [11] N. Gherbi, Etude expérimentale et identification du processus de rétention des cations métalliques par des matériaux naturels', Thèse de doctorat, Université de Constantine 2008.
- [12] F. Rouquerol, J. Rouquerol, K. S. W. Sing, P. Llewellyn et G. Maurin, "Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications", 2ème édition, Academic Press, 2014.
- [13] A. Dąbrowski, Adsorption-from theory to practice, *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 93, N° 1-3, pp. 135–224, 2001.

Références

- [14] S. Bouacherine, Éliminations des polluants spécifiques par adsorption sur charbon actif et argile traitée et non traitée, Mémoire de magister, Université Mohamed Chérif Messaadia Souk Ahras, 2013.
- [15] D. C. Dobbins, J. Thornton-Manning, D. D. Jones et T. W. Federle, "Mineralization potential for phenol in subsurface soils", Journal of Environmental Quality, Vol. 16, pp. 54,58, 1987.
- [16] I. Touil, S. Drise et R.Korichi, Etude comparative de la capacité d'adsorption de charbon magnétique et de charbon actif pour la rétention des métaux lourds, Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2022.
- [17] M. Gueye, Synthèse et étude des charbons actifs pour le traitement des eaux usées d'une tannerie", Mémoire de master, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) Ouagadougou, 2008.
- [18] L. Nadji, Adsorption d'un colorant azoïque par du charbon actif, Mémoire de Master, Université Mohamed Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arreridj, 2025.
- [19] H. Cherfaoui et N. Boussouar, Adsorption d'un polluant pharmaceutique (Amoxicilline) sur charbon actif, Mémoire d'Ingénieur d'État en Génie Chimique, École Nationale Polytechnique Alger, 2020.
- [20] J. Duchesne, Le charbon actif et le traitement de l'eau, Référence l2810, Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie des procédés, 2003.
- [21] S. Bouguerra et N. Bouchenafa, Effet de la modification de la surface du charbon actif sur l'adsorption du Zinc et du Cadmium, Mémoire de Master, Université M'Hamed Bougara Boumerdès, 2011.
- [22] H. Bouzid, Les procédés d'adsorption et séparation membranaire : principe et applications. Edition itinéraires Scientifiques.
- [23] A.DIF, A.BEN SACI et M. ZEID, mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2021.
- [24] M. Bahnes et M. Larbi, Etude de la régénération d'un charbon actif chargé en colorant synthétique", Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2022.
- [25] Y. Douba et K. Bouich, Modification de la surface d'un charbon actif commercial en vue de l'adsorption du bleu de méthylène, Mémoire de Master, Université M'Hamed Bougara Boumerdès, 2021.

- [26] S. Lakeb et T. Benmeridja, Adsorption du bleu de méthylène par deux adsorbants, Mémoire de master en Chimie Appliqué, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2021.
- [27] I. Langmuir, The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum, Journal of the American Chemical Society, 40, 1361–1403, 1918.
- [28] H. Freundlich, Über die Adsorption in Lösungen (Adsorption in solution), Zeitschrift für Physikalische Chemie, 57, 385–470, 1906.
- [29] K. Abdelhak, Activation d'un précurseur naturel en vue de l'élimination des polluants organiques dans les solutions simples et binaires, Mémoire de master, université de Mostaganem, 2016.
- [30] M. I. Temkin, V. Pyzhev, Kinetics of ammonia synthesis on promoted iron catalysts, Acta Physicochimica URSS, 12, 327–356, 1940.
- [31] C. E. Chitour, Chimie physique des phénomènes de surface, OPU Algiers, 1979.
- [32] N. Sid, Valorisation des déchets agroalimentaires (cas des coquilles de noix et noyaux d'olives) pour la préparation du charbon actif, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2019.
- [33] H. Berrahmoune et M. N. Belghoul, Mémoire de Master, Etude et caractérisation d'un biosorbant pour l'élimination d'un polluant organique, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2021.