

	الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية People's Democratic Republic of Algeria	
	وزارة التعليم العالي والبحث العلمي Ministry of Higher Education and Scientific Research	
	جامعة عبد الحميد بن باديس Abdelhamid Ibn Badis University – Mostaganem	
	كلية العلوم والتكنولوجيا Faculty of Sciences and Technology	
	قسم هندسة الطرائق	
	Department of Process Engineering	

N°d'ordre:M2..... /GP/2026

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière: Génie des Procédés

Spécialité : Génie chimique

Thème

**Étude du procédé d'adsorption de l'Azorubine sur charbon actif en
mode Batch**

Présenté par:

GHEZALI Fatima Zohra

Soutenu le 22/06/2026 devant le jury compose de:

President(e):	MEKIBES Zohra	MCB	Université de Mostaganem
Examineurs:	DOUARA Nadia	MCA	Université de Mostaganem
Encadrant(e):	BENZEKRI BENALLOU Mokhtar	MCA	Université de Mostaganem
Co-Encadrant(e):	BENABBOU Asmae	Dr	Université de Mostaganem

Année universitaire 2025/2026



Remerciement

*Je remercie **ALLAH**, le tout-puissant, d'avoir donné la force et le courage pour réaliser ce travail.*

*Mes plus récents remerciements s'adressent à Monsieur **M. BENZEKRI BENALLOU** (MCA à l'université de Mostaganem), qui m'a assuré l'encadrement avec compétence et responsabilité, ainsi que pour la confiance qu'elle m'a accordée et pour son soutien.*

*Je tiens à remercier également les membres du jury, madame **Z. MEKIBES** et madame **N. DOUARA**, enseignantes à l'université de Mostaganem et madame **A. BENABOU** (Co-encadrante) pour avoir accepté d'évaluer et de juger ce travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

J'associe à ces remerciements l'ensemble du personnel du laboratoire de recherche pour l'aide matériel et moyen qu'ils ont mis à notre disposition, pour mener à bien de recherche





DEDICACE

*Je dédie ce travail à mes chers parents «Mohamed, Karima»
pour leur patience, leur encouragement tout au long de ma vie.*

A mes sœurs et frères «et surtout Mohamed Bahae Eddine »

Atoute ma famille "GHEZALI et BENATHMAN"

*A mes amies Lydia, Rafika,
à tous les étudiants de master de chimie des matériaux 2025-2026
, je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer
Mon affection et mes pensées*



Résumé

Ce mémoire porte sur l'élimination du colorant Azorubine (Rouge Acide 14) par adsorption sur un charbon actif commercial. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'influence de différents paramètres opératoires, notamment le pH, le temps de contact, la dose d'adsorbant et la température, sur l'efficacité du procédé d'adsorption.

Les résultats expérimentaux montrent que les conditions optimales sont obtenues à $\text{pH} = 2$, avec un temps d'équilibre de 60 minutes. L'étude thermodynamique indique que le processus est spontané ($\Delta G^\circ < 0$) et exothermique ($\Delta H^\circ < 0$), ce qui traduit une meilleure efficacité à basse température.

L'analyse des isothermes révèle que le modèle de Langmuir décrit le mieux les données expérimentales ($R^2 = 0,9994$), suggérant une adsorption en monocouche sur une surface homogène. Par ailleurs, l'étude cinétique montre que le processus suit principalement le modèle du pseudo-second ordre ($R^2 = 0,9792$), indiquant une forte interaction entre l'adsorbant et l'adsorbat.

En conclusion, ces résultats confirment l'efficacité du charbon actif commercial pour le traitement des eaux contaminées par les colorants organiques.

Mots-clés : Charbon actif ; adsorption ; Azorubine (Rouge Acide 14) ; Isotherme de Langmuir ; Pseudo-second ordre ; thermodynamique d'adsorption.

Abstract

This thesis focuses on the removal of the dye Azorubine (Acid Red 14) by adsorption onto commercial activated carbon. The objective of this study is to evaluate the influence of various operating parameters, namely pH, contact time, adsorbent dose, and temperature, on the efficiency of the adsorption process.

The experimental results show that the optimal conditions are achieved at pH = 2, with an equilibrium time of 60 minutes. The thermodynamic study indicates that the process is spontaneous ($\Delta G^\circ < 0$) and exothermic ($\Delta H^\circ < 0$), which explains its higher efficiency at low temperatures.

Isotherm analysis reveals that the Langmuir model best fits the experimental data ($R^2 = 0.9994$), suggesting monolayer adsorption on a homogeneous surface. In addition, kinetic studies show that the process mainly follows the pseudo-second-order model ($R^2 = 0.9792$), indicating strong interactions between the adsorbent and the adsorbate.

In conclusion, these results confirm the effectiveness of commercial activated carbon for the treatment of water contaminated with organic dyes.

Keywords: Activated carbon; adsorption; Azorubine (Acid Red 14); Langmuir isotherm; pseudo-second-order; adsorption thermodynamics.

المخلص

تركز هذه الأطروحة على إزالة الصبغة الأزوروبين (الحمض الأحمر 14) عن طريق الامتزاز باستخدام الفحم النشط التجاري. يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير مختلف العوامل التشغيلية، مثل الأس الهيدروجيني (pH)، وزمن التلامس، وجرعة المادة المازة، ودرجة الحرارة، على كفاءة عملية الامتزاز.

أظهرت النتائج التجريبية أن الظروف المثلى تتحقق عند $\text{pH} = 2$ مع زمن توازن قدره 60 دقيقة. كما بينت الدراسة الديناميكية الحرارية أن العملية تلقائية ($\Delta G^\circ < 0$) وطاردة للحرارة ($\Delta H^\circ < 0$)، مما يفسر ارتفاع كفاءتها عند درجات الحرارة المنخفضة. أظهر تحليل متساويات الحرارة أن نموذج لانغموير هو الأنسب لوصف البيانات التجريبية ($R^2 = 0.9994$)، مما يشير إلى حدوث امتزاز في طبقة أحادية على سطح متجانس. كما بينت الدراسة الحركية أن العملية تتبع بشكل رئيسي نموذج الرتبة الثانية شبه الكاملة (Pseudo-second-order) ($R^2 = 0.9792$)، مما يدل على وجود تفاعل قوي بين المادة المازة والمادة الممتزة.

في الختام، تؤكد هذه النتائج فعالية الفحم النشط التجاري في معالجة المياه الملوثة بالأصبغ العضوية. الكلمات المفتاحية: الفحم النشط؛ الامتزاز؛ الأزوروبين (الحمض الأحمر 14)؛ متساوي حرارة لانغموير؛ نموذج الرتبة الثانية شبه الكاملة؛ الديناميكا الحرارية للامتزاز.

Sommaire

Remerciment

Dédicace

Résumé

Introduction Générale	1
CHAPITRE I: Etude bibliographique	2
I.1. Généralité sur les colorants	3
I.1.1. Définition.....	3
I.1.2. Classification des colorants	3
<i>I.1.2.1. Classification des colorants selon leurs natures</i>	3
<i>I.1.2.2. Classification chimique</i>	4
<i>I.1.3. Toxicité et impact environnemental</i>	5
<i>I.1.3.1. Toxicité sur la santé humaine</i>	5
I.1.3.2. Impacts environnementaux	6
I.2. Adsorption	6
I.2.1. Type d'adsorption	6
I.2.1.2. Adsorption chimique (chimisorption).....	6
I.2.2. Les facteurs influençant l'adsorption	7
I.2.2.1. La température du milieu	7
I.2.2.2. Le pH de la solution	7
I.2.2.4. La masse initiale de l'adsorbat	8
I.2.2.5. Le temps d'équilibre	8
I.2.3. Isothermes d'adsorption	8
I.2.3.1. Capacité d'adsorption	8
I.2.3.3. Modélisation des isothermes d'adsorption	8
I.2.4. Modèles cinétiques d'adsorption	10
I.2.4.2. Modèle de pseudo-deuxième ordre	11
I.2.4.3. Diffusion intraparticulaire	11
I.2.5. Étude des paramètres thermodynamiques	12
I.3. Le charbon actif	13
I.3.1. Définition	13
I.3.2. Classification de charbon actif	13
I.3.2.1. Charbon actif en poudre (CAP)	13
I.3.2.2. Charbon actif en grain (CAG)	14
I.3.2.3. Charbon actif en extrudé	14
II.1. Introduction	16
II.2. Choix des molécules étudiées	16
II.3. Méthode de dosage acide rouge 14	17

II.3.1. Dosage par spectrophotométrie.....	17
II.3.2. Détermination de la courbe d'étalonnage	18
II.4. Application à l'adsorption du Rouge Acide 14	19
II.4.1. L'effet de la dose de l'adsorbant sur l'adsorption.....	19
II.4.2. L'effet du pH sur l'adsorption du rouge acide 14	20
II.4.3. Détermination du temps d'équilibre.....	21
II.5. Thermodynamique d'adsorption de l'Azorubine	21
II.6. Isotherme d'adsorption de l'Azorubine	24
II.7. Modélisation de l'adsorption	24
II.8. Cinétique d'adsorption de l'Azorubine	27
Conclusion générale.....	30
Référence.....	31

Liste des tableaux

TABLEAU I.1 : COMPARAISON ENTRE L'ADSORPTION PHYSIQUE ET L'ADSORPTION CHIMIQUE ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.	
TABLEAU II.1 : LES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES D'AZORUBINE	16
TABLEAU II.2: ÉLABORATION DE LA COURBE D'ETALONNAGE POUR LA ROUGE ACIDE 14.....	18
TABLEAU II.3: PARAMETRES THERMODYNAMIQUES D'ADSORPTION DE ROUGE ACIDE 14.....	23
TABLEAU II.4: RESULTATS OBTENUS POUR L'ISOTHERME D'ADSORPTION DE L'AZORUBINE SELON LE MODELE DE LANGMUIR.....	26
TABLEAU II.4: RESULTATS OBTENUS POUR L'ISOTHERME D'ADSORPTION DE L'AZORUBINE SELON LE MODELE DE FREUNDLICH.....	26
TABLEAU II.4: RESULTATS OBTENUS POUR L'ISOTHERME D'ADSORPTION DE L'AZORUBINE SELON LE MODELE DE TEMKIN.	26
TABLEAU II.5: RÉSULTATS OBTENUE DE LA CINÉTIQUE D'ADSORPTION DE ROUGE ACIDE 14 DE PSEUDO 1ER ORDRE ET 2E ORDRE	28
TABLEAU II.6: RÉSULTATS OBTENUE DE LA CINÉTIQUE D'ADSORPTION DE ROUGE ACIDE 14 DE DIFFUSION INTRAPARTICULAIRE	29

Listes des figures

Figure I.1: Les colorants alimentaires et industriels.	3
Figure I.2: Structure chimique des colorants indigoïdes.	4
Figure I.3: Structure chimique des colorants phtalocyanines.	5
Figure I.4: Structure chimique des colorants azoïques.	5
Figure I.5: Structure du charbon.....	13
Figure I.6: charbon actif en poudre (CAP)	14
Figure I.7: charbon actif granulé (CAG).	14
Figure I.8: Charbon actif extrudé.....	15
Figure II.1: Structure chimique d'Azorubine (Acide rouge 14).	16
Figure II.2: La courbe d'étalonnage de Rouge Acide 14.....	18
Figure II.3: Taux d'élimination de Rouge Acide 14 en fonction de la dose d'adsorbant.	19
Figure II.4: Taux d'élimination de Rouge Acide 14 en fonction de pH.....	20
Figure II.5: Taux d'élimination de Rouge Acide 14 en fonction de temps.	21
Figure II.6: Taux d'élimination (%) d'Azorubine à différente température.	22
Figure II.7: Evolution de $\ln(K_d)$ en fonction de $1/T$ pour l'adsorption d'Azorubine.	23
Figure II.8: L'isotherme d'adsorption d'Azorubine $q_e=f(C_{eq})$	24
Figure II.9: Application du modèle de Langmuir pour l'adsorption d'Azorubine.....	25
Figure II.10: Application du modèle de Freundlich pour l'adsorption d'Azorubine.	25
Figure II.11: Application du modèle de Temkin pour l'adsorption d'Azorubine.	26
Figure II.12: Représentation graphique de la cinétique d'adsorption de l'azorubine selon le modèle pseudo- premier ordre.	27
Figure II.13: Représentation graphique de la cinétique d'adsorption de l'azorubine selon le modèle pseudo-deuxième ordre.	28
Figure II.14: Représentation graphique du modèle de diffusion intra-particulaire pour l'adsorption de l'Azorubine..	29

Introduction Générale

L'eau est un élément fondamental du développement des écosystèmes et des activités humaines. Toutefois, elle est de plus en plus exposée à une dégradation de sa qualité en raison des rejets issus des activités industrielles, urbaines et agricoles. Parmi ces sources de pollution, les effluents industriels, notamment ceux du secteur textile et agroalimentaire, constituent une problématique majeure en raison de leur forte charge en composés organiques colorés [1].

Les colorants synthétiques représentent une classe de polluants particulièrement préoccupante. Il est estimé qu'environ 5 à 25 % des colorants utilisés lors des procédés de teinture ne sont pas fixés sur les fibres et sont rejetés dans les eaux usées [2]. Ces composés confèrent aux effluents une coloration persistante et peuvent engendrer des effets néfastes sur la qualité des milieux aquatiques, en limitant la pénétration de la lumière et en perturbant les processus biologiques. Par ailleurs, la majorité des colorants organiques présentent une structure chimique stable et une faible biodégradabilité, ce qui rend leur élimination par les procédés conventionnels particulièrement difficile [3].

Face à cette problématique, le traitement des eaux usées colorées constitue un enjeu environnemental et sanitaire majeur. Plusieurs procédés de dépollution ont été développés, incluant les traitements physiques, chimiques et biologiques, tels que la coagulation-floculation, la biodégradation, la filtration membranaire, l'oxydation avancée, l'ozonation, l'échange d'ions ainsi que les procédés électrochimiques [4]. Cependant, ces techniques présentent parfois des limites en termes de coût, d'efficacité ou de production de sous-produits secondaires.

Dans ce contexte, l'adsorption s'impose comme une technique de traitement particulièrement efficace, simple à mettre en œuvre et largement utilisée pour l'élimination des polluants organiques présents dans les eaux contaminées [5]. Ce procédé repose sur le transfert et la fixation des molécules de soluté à la surface d'un matériau solide appelé adsorbant, via des interactions physiques et/ou chimiques.

Différents matériaux adsorbants ont été étudiés dans la littérature, notamment les argiles, les zéolites, les oxydes métalliques, les résidus agricoles activés ainsi que le charbon actif. Ce dernier demeure l'un des adsorbants les plus performants en raison de sa surface spécifique élevée, de sa porosité développée et de sa grande capacité d'adsorption.

Dans ce cadre, le présent travail vise à étudier le procédé d'adsorption de l'azorubine (Rouge Acide 14), un colorant azoïque largement utilisé, sur un charbon actif commercial en mode batch. L'objectif est d'évaluer les performances d'élimination de ce polluant ainsi que de comprendre les mécanismes régissant le processus d'adsorption.

Ce mémoire est structuré comme suit :

Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique portant sur les colorants, ainsi que sur les principes fondamentaux du phénomène d'adsorption et les propriétés des adsorbants.

Le deuxième chapitre présente la partie expérimentale, incluant la méthodologie adoptée pour l'étude de l'adsorption de l'azorubine sur charbon actif en mode batch, ainsi que l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus.

Enfin, une conclusion générale est proposée afin de synthétiser les principaux résultats.

CHAPITRE I: Etude bibliographique

I.1. Généralité sur les colorants

Les colorants sont des composés naturels ou synthétiques utilisés pour conférer une coloration durable à différents substrats, notamment les fibres textiles. Leur capacité de fixation repose sur leur affinité avec le support et sur des conditions d'application appropriées [6,7]. Sur le plan physico-chimique, ils se distinguent par leur aptitude à absorber les radiations dans le domaine du visible (400–700 nm), propriété liée à leur structure moléculaire comportant des systèmes conjugués et des groupements chromophores responsables de la couleur. Les colorants peuvent être classés selon leur origine ou leur structure chimique, qu'elle soit organique ou inorganique [8,9].



Figure I.1: Les colorants alimentaires et industriels.

I.1.1. Définition

Les colorants sont des substances organiques ou inorganiques possédant une couleur et une capacité de fixation sur un support tel qu'un textile [10]. Ils absorbent les rayonnements dans le domaine du visible (380–750 nm) grâce à leur structure moléculaire conjuguée. Cette absorption est liée à des transitions électroniques au sein de leurs systèmes chimiques. Leur structure comprend des chromophores responsables de la couleur et des auxochromes influençant l'intensité et la fixation.

I.1.2. Classification des colorants

La classification des colorants repose principalement sur leur structure chimique ainsi que sur leurs modes d'application et leurs domaines d'utilisation, notamment dans les secteurs textile, papetier, du bois et des plastiques. Elle permet de regrouper les colorants selon leurs propriétés physico-chimiques et leur affinité pour les substrats.

I.1.2.1. Classification des colorants selon leurs natures

- **Colorants naturels**

Les colorants naturels sont des substances colorées d'origine végétale, animale ou minérale [11]. Ils sont extraits de différentes sources telles que les plantes, les fruits, les écorces, les lichens, les

insectes ou les mollusques. L'extraction est réalisée par des procédés simples comme le broyage, l'infusion ou le chauffage. Ces colorants sont historiquement utilisés malgré leur faible stabilité et leur variabilité.

- **Colorants synthétiques**

Les colorants synthétiques sont des composés organiques issus principalement de la pétrochimie, notamment de dérivés aromatiques comme le benzène [12]. Ils sont obtenus par des réactions chimiques successives modifiant la structure de base. Ces transformations reposent sur la substitution d'atomes d'hydrogène par des groupements fonctionnels spécifiques. Elles permettent la formation d'intermédiaires chimiques conduisant au colorant final.

I.1.2.2. Classification chimique

La classification chimique des colorants est basée sur la nature du groupement chromophore responsable de la coloration de la molécule [13].

On peut citer les colorants suivants :

- **Les colorants indigoïdes**

Les colorants indigoïdes dérivent de l'indigo et constituent une famille importante de colorants organiques. Ils sont principalement utilisés dans l'industrie textile et trouvent aussi des applications en pharmacie, en alimentation et en diagnostic médical [14–16].

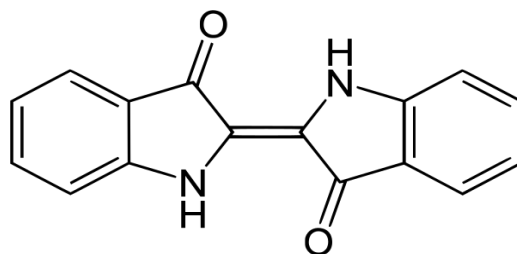


Figure I.2: Structure chimique des colorants indigoïdes [17].

- **Les colorants phtalocyanines**

Les colorants phtalocyanines possèdent une structure macrocyclique complexe centrée sur un atome métallique, généralement le cuivre. Ils sont obtenus à partir de dérivés du dicyanobenzène en présence de sels métalliques (Cu, Ni, Co, etc.) [18]. Ils se distinguent par leur grande stabilité chimique et leur forte intensité de coloration.

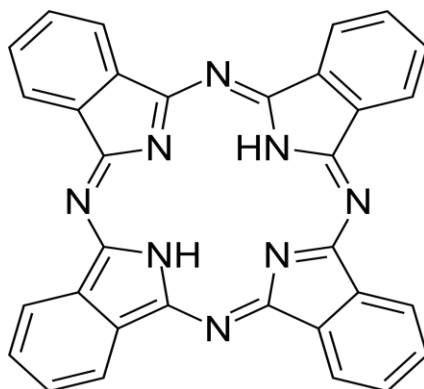


Figure I.3: Structure chimique des colorants phtalocyanines [19].

- **Les colorants azoïques**

Les colorants azotés sont les plus couramment utilisés dans l'industrie textile. Ce sont des composés organiques contenant un groupement azoté, généralement responsable de leur stabilité en tant que colorants textiles (Figure I.4) [20].

Ils présentent une bonne résistance à la lumière ainsi qu'aux milieux acides, basiques et à l'oxygène, ce qui explique leur large utilisation dans les procédés de teinture [21].

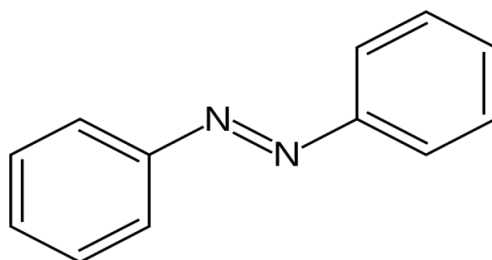


Figure I.4: Structure chimique des colorants azoïques [22].

- **Les colorants Tinctoriale**

Si la classification chimique présente un intérêt pour le fabricant de matières colorantes, le teinturier préfère le classement par domaines d'application, ainsi, il est renseigné sur la solubilité du colorant dans le bain de teinture, son affinité pour les diverses fibres et sur la nature de la fixation [23].

1.1.3. Toxicité et impact environnemental

Les colorants sont des composés peu biodégradables par les micro-organismes et peuvent présenter une toxicité ou une nocivité pour l'homme ainsi que pour les animaux, ce qui soulève des préoccupations environnementales importantes.

1.1.3.1. Toxicité sur la santé humaine

Les colorants présentent des effets toxiques sur la santé humaine [24]. Certains colorants aminés

peuvent provoquer des irritations cutanées et des dermites [25], tandis que les colorants de synthèse à base d'amines sont associés à des risques cancérogènes, notamment des tumeurs urinaires, en particulier de la vessie. Les colorants métallifères sont également très toxiques et peuvent perturber les réseaux d'assainissement ainsi que les traitements biologiques des stations d'épuration [26].

I.1.3.2. Impacts environnementaux

Les colorants représentent une source importante de pollution environnementale, notamment en raison des rejets d'eaux usées issues de l'industrie textile. La production mondiale est estimée à environ 700 000 tonnes par an, dont une part significative est rejetée dans les effluents industriels [27]. Les colorants azoïques sont particulièrement préoccupants car ils peuvent se dégrader en composés amines cancérogènes absorbés par l'organisme humain [28]. Par ailleurs, la chloration de l'eau peut générer des sous-produits toxiques tels que les trihalométhanes, associés à plusieurs cancers [29]. Enfin, leur élimination reste difficile en raison de leur faible biodégradabilité et de leur résistance aux traitements classiques.

I.2. Adsorption

L'adsorption est un phénomène de surface, physique ou chimique, au cours duquel des molécules présentes dans des effluents liquides ou gazeux se fixent à la surface d'un solide adsorbant à l'interface adsorbat-adsorbant [30]. Ce processus rapide conduit à un équilibre dépendant de la concentration du soluté et de la surface de l'adsorbant, et implique la diffusion moléculaire dans les pores. L'étude de l'adsorption repose sur les quantités adsorbées à l'équilibre (isothermes), les vitesses d'adsorption (cinétique) et les propriétés des molécules adsorbées en lien avec leur structure chimique et leur réversibilité en solution [31].

I.2.1. Type d'adsorption

Il est possible de distinguer deux types d'adsorption

I.2.1.1. Adsorption physique (physisorption)

L'adsorption physique est un processus rapide et réversible qui repose sur des forces faibles de Van der Waals entre l'adsorbat et la surface du solide. Elle est favorisée par les basses températures et ne provoque généralement pas de modification chimique de la substance adsorbée [32].

I.2.1.2. Adsorption chimique (chimisorption)

L'adsorption chimique implique la formation de liaisons chimiques fortes (covalentes ou ioniques) entre l'adsorbat et l'adsorbant. Elle peut être irréversible et s'accompagne souvent d'une

transformation chimique de l'espèce adsorbée, notamment dans les processus d'échange ionique [32].

Le tableau I.1 présente une comparaison détaillée entre la physisorption et la chimisorption, qui constituent les deux principaux mécanismes d'adsorption impliqués dans les processus d'interaction adsorbat–adsorbant.

Tableau I.1: Comparaison entre la physisorption et la chimisorption [32].

Propriétés	Physisorption	Chimisorption
Types de liaison	Liaison de van der Waals	Liaison chimique
Température du Processus	Relativement faible comparée à température d'ébullition de l'adsorbat	Plus élevée que la température d'ébullition de l'adsorbat
Individualité des molécules	L'individualité des molécules est conservée	De la traction de l'individualité des molécules
Desorption	Facile	Difficile
Cinétique	Rapide indépendant de température	Très lente
Chaleur d'adsorption	Inférieur à 10 kcal/mol	Supérieur à 10 kcal/mole
Énergie mise en jeu	Faible	Élevée
Type de formation	Formation en multicouches	Formation en monocouche

I.2.2. Les facteurs influençant l'adsorption

L'adsorption est influencée par plusieurs paramètres physico-chimiques, dont les plus importants sont les suivants :

I.2.2.1. La température du milieu

La température constitue un paramètre essentiel dans les processus d'adsorption. En effet, la physisorption, de nature exothermique, est favorisée à basses températures, tandis que la chimisorption, généralement endothermique, nécessite des températures plus élevées pour être optimisée. Par conséquent, le contrôle et la fixation de la température du système sont indispensables dès le début du processus d'adsorption [33].

I.2.2.2. Le pH de la solution

Le pH de la solution est un paramètre déterminant dans les processus d'adsorption, car il agit à la fois sur la surface de l'adsorbant et sur la forme chimique de l'adsorbat, influençant ainsi le mécanisme et l'efficacité de l'adsorption [34].

I.2.2.3. La dose d'adsorbant

La masse d'adsorbant est un paramètre essentiel dans les études d'adsorption. La détermination de

la quantité minimale nécessaire pour éliminer un polluant donné permet d'optimiser l'efficacité du processus tout en réduisant le coût d'utilisation de l'adsorbant [34].

I.2.2.4. La masse initiale de l'adsorbant

La concentration initiale de l'adsorbant est un facteur important qui influence la capacité d'adsorption, en modifiant le transfert de matière et les interactions entre le polluant et les sites actifs de l'adsorbant [35].

I.2.2.5. Le temps d'équilibre

Le temps d'équilibre constitue un paramètre essentiel dans les procédés d'adsorption, car il détermine la durée nécessaire pour atteindre l'équilibre adsorbant-adsorbant et influence directement l'efficacité et le coût des systèmes de traitement des eaux polluées [36].

I.2.3. Isothermes d'adsorption

L'isotherme d'adsorption représente la variation de la quantité (q_e) adsorbée sur un solide à l'équilibre en fonction de la concentration à l'équilibre (C_0) du composé adsorbable. A une température donnée, la quantité de molécules (adsorbant) adsorbées à l'équilibre s'exprime en nombre de moles ou en masse d'adsorbant par masse de solide [37].

I.2.3.1. Capacité d'adsorption

La capacité d'adsorption d'un adsorbant est définie comme étant la quantité de substrat (masse ou volume) adsorbée par unité de poids d'adsorbant pour une température donnée. Elle nécessite la prise en compte de nombreux paramètres aussi bien pour l'adsorbant (taille des molécules, solubilité dans l'eau ..., etc.) que pour l'adsorbant (surface spécifique, structure et type de particules le constituant.... etc.) [38].

Elle peut être généralement exprimée par la relation

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m} \dots \dots \dots \text{(eq. 1)}$$

Où :

q_e : capacité d'adsorption du support (mg/g).

C_0 : concentration initiale du substrat (mg/L).

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

V : volume de la solution (L).

m : masse du support (g).

I.2.3.3. Modélisation des isothermes d'adsorption

Le phénomène d'adsorption a été établi par plusieurs modèles mathématiques et empiriques, dont chacun repose sur des hypothèses et des approximations. Parmi les modèles largement utilisés on cite : Langmuir, Freundlich, Temkin.

- **Modèle de Langmuir**

Le model d'adsorption de Langmuir est défini par une capacité maximale d'adsorption qui est liée à la couverture des sites de surface par une monocouche. L'importance de l'isotherme de Langmuir est qu'il peut être théoriquement appliqué à une surface parfaitement uniforme, et lorsqu'il n'y a pas d'interactions entre les molécules adsorbées [39].

L'isotherme est représentée par l'équation suivante :

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_{max}} C_e + \frac{1}{K_L \times Q_{max}} \dots \dots \dots (\text{eq. 2})$$

Où :

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

q_e : quantité de substance adsorbée par unité de masse de l'adsorption (mg/g).

K_L : constante correspond à l'énergie d'adsorption.

Q_{max} : capacité maximale d'adsorption.

- **Modèle de Freundlich**

En 1962, Freundlich a proposé un autre modèle pour décrire l'adsorption en milieu gazeux ou liquide. Ce modèle est représenté par une équation à deux paramètres (K_F et n) et consiste en une distribution exponentielle des énergies des sites d'adsorption à la surface du support et se caractérise par une adsorption en sites localisés [40]. Ce modèle est décrit par :

$$q_e = K_F \times C_e^{1/n} \dots \dots \dots (\text{eq. 3})$$

Sachant que :

q_e : la quantité d'entités adsorbées par gramme d'adsorbant à l'équilibre (mg/g).

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

K_F : constante de Freundlich liée à la capacité d'adsorption $[(\text{mg/g})(\text{L/mg})^{1/n}]$.

n : constante caractérisant l'intensité de l'adsorption.

Lorsque : la valeur de n est : ($1 < n < 10$) cela indique une adsorption favorable, par contre si la valeur

est : ($n < 1$) une faible adsorption [41].

Les deux paramètres de Freundlich K_F et n peuvent être déterminés expérimentalement par le passage au logarithmique de l'expression pour donner :

$$\ln(q_e) = \ln(K_F) \times \frac{1}{n} \ln(C_e) \dots \dots \dots \text{(eq. 4)}$$

- **Modèle de Temkin**

L'isotherme de Temkin repose sur l'hypothèse que la chaleur d'adsorption des molécules adsorbées diminue linéairement avec l'augmentation du taux de recouvrement de la surface de l'adsorbant, en raison des interactions adsorbat-adsorbant. Initialement développée pour décrire l'adsorption des gaz sur les solides, cette isotherme a ensuite été adaptée aux systèmes en phase liquide [42, 43]. La forme de l'isotherme de Temkin à l'équilibre s'écrit :

$$q_e = \frac{R \times T}{b_T} \ln(K_T \times C_e) \dots \dots \dots \text{(eq. 5)}$$

Sous sa forme linéaire :

$$q_e = B_T \ln(K_T) + B_T \ln(C_e) \dots \dots \dots \text{(eq. 6)}$$

Avec : $B_T = \frac{R \times T}{b_T}$

K_T et b_T sont des constantes caractéristiques du système adsorbat/adsorbant. En posant (q_e) en fonction de $\ln(C_e)$ on obtient une droite de pente B_T et d'ordonnée à l'origine $b = B_T \times \ln(K_T)$, cela permet la détermination des deux paramètres de Temkin, K_T et B_T .

I.2.4. Modèles cinétiques d'adsorption

La cinétique d'adsorption est essentielle pour comprendre les mécanismes impliqués dans le processus adsorptif et évaluer la vitesse de fixation de l'adsorbat sur l'adsorbant. Son étude permet de déterminer le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre d'adsorption, d'identifier les étapes contrôlant la vitesse du phénomène et d'optimiser les conditions opératoires. Elle constitue ainsi un outil important pour la conception des procédés d'adsorption et le développement d'adsorbants plus performants [44]. Parmi les plus utilisés figurent le modèle du pseudo-premier ordre, le modèle du pseudo-second ordre et le modèle de diffusion intraparticulaire.

I.2.4.1. Modèle de pseudo-premier ordre

Le modèle cinétique du pseudo-premier ordre, proposé par **Lagergren (1898)**, suppose que la vitesse d'adsorption est proportionnelle au nombre de sites actifs disponibles sur la surface de

l'adsorbant. Il est décrit par la relation suivante [45] :

$$\frac{dq_t}{dt} = K_1 \times (q_e - q_t) \dots \dots \dots (\text{eq. 7})$$

Où :

K_1 : 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.

L'intégration de l'équation (7) donne :

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - K_1 \times t \dots \dots \dots (\text{eq. 8})$$

Le tracé de $[\ln(q_e - q_t)]$ en fonction du temps (t) est linéaire dans le cas d'une cinétique de pseudo-premier ordre, permettant de déterminer les paramètres cinétiques du modèle.

I.2.4.2. Modèle de pseudo-deuxième ordre

Le modèle du pseudo-deuxième ordre suggère la présence d'un mécanisme de chimisorption, impliquant notamment un échange d'électrons entre la molécule d'adsorbat et la surface de l'adsorbant solide [46].

$$\frac{dq_t}{dt} = K_2 \times (q_e - q_t)^2 \dots \dots \dots (\text{eq. 9})$$

Où :

K_2 : la constante de vitesse pour une cinétique de pseudo-deuxième ordre.

q_t : la capacité d'adsorption à l'instant t (mg/g).

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

L'intégration de l'équation (9) donne :

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{q_e} \times t + \frac{1}{K_2 \times q_e^2} \dots \dots \dots (\text{eq. 10})$$

I.2.4.3. Diffusion intraparticulaire

Le modèle de diffusion intraparticulaire, basé sur la théorie proposée par Weber et Morris, est utilisé pour identifier le mécanisme de diffusion. Selon cette approche, la quantité d'adsorbant adsorbée varie approximativement de manière proportionnelle à la racine carrée du temps de contact [47].

$$q_t = K_{id} t^{1/2} + C_{id} \dots \dots \dots (\text{eq. 11})$$

Où :

K_{id} : la constante de la diffusion intraparticulaire de Weber en (mg/g min^{1/2}).

q_t : la quantité adsorbée au temps t (mg/g).

C_i : représente la valeur de l'épaisseur de couche limite [48].

t : temps (min).

1.2.5. Étude des paramètres thermodynamiques

Les paramètres thermodynamiques (ΔG , ΔH , ΔS) permettent d'évaluer la spontanéité d'un processus d'adsorption. Ce phénomène peut être exothermique ou endothermique selon la valeur de ΔH , qui constitue également un critère essentiel pour distinguer la physisorption de la chimisorption. Ces paramètres sont généralement déterminés à partir de l'équation de Van't Hoff [49].

$$\ln K_d = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{R \times T} \dots \dots \dots (\text{eq. 12})$$

Et la relation thermodynamique de Gibbs-Helmholtz :

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \dots \dots \dots (\text{eq. 13})$$

Où :

K_d : Coefficient de distribution (L/g)

ΔH : Enthalpie (kJ/mol).

ΔS : Entropie (kJ/mol).

ΔG : Energie libre (kJ/mol).

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

Le tracé de la droite [$\ln(K_d)$] en fonction de $(1/T)$ permet de calculer les valeurs des paramètres thermodynamiques ΔH et ΔS à partir de l'ordonnée à l'origine et la pente.

Le coefficient de distribution correspond au rapport entre la quantité adsorbée à l'équilibre et la concentration du soluté dans la solution à l'équilibre [50].

Soit :

$$K_d = \frac{q_e}{C_e} = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m \times C_e} \dots \dots \dots (\text{eq. 14})$$

Où :

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

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

m : masse de l'adsorbant (g).

V : volume de la solution.

I.3. Le charbon actif

I.3.1. Définition

Le charbon actif est un matériau principalement constitué de matière carbonée à structure poreuse. Il présente une structure amorphe et une très grande surface spécifique, ce qui lui confère un fort pouvoir adsorbant [51].

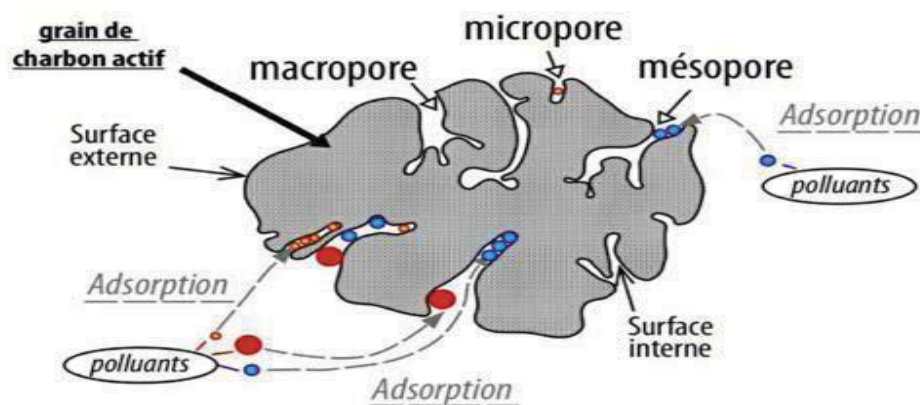


Figure I.5: Structure du charbon [41].

I.3.2. Classification de charbon actif

La classification des charbons actifs est principalement basée sur la taille de leurs particules, en raison de la complexité de leurs propriétés. Leur efficacité est essentiellement liée à leur capacité d'adsorption, qui dépend de la structure poreuse. Les formes les plus courantes sont les charbons actifs en poudre, en grains et extrudes [52].

I.3.2.1. Charbon actif en poudre (CAP)

Les charbons actifs en poudre présentent une granulométrie très fine, inférieure à 100 μm , avec un diamètre moyen compris entre 15 et 25 μm . Ils possèdent une grande surface spécifique et se caractérisent par une cinétique d'adsorption rapide. Ils sont principalement utilisés pour l'adsorption en phase liquide [52].



Figure I.6: charbon actif en poudre (CAP)

I.3.2.2. Charbon actif en grain (CAG)

Les charbons actifs peuvent également se présenter sous forme de grains, avec un diamètre supérieur à 0,5 mm. Ils possèdent une grande surface interne et une surface externe relativement faible. Toutefois, les phénomènes de diffusion intra-particulaire au sein des pores y sont prédominants, ce qui rend le mécanisme d'adsorption plus lent que dans le cas du charbon actif en poudre [53].



Figure I.7: charbon actif granulé (CAG).

I.3.2.3. Charbon actif en extrudé

Le charbon actif extrudé se présente sous forme cylindrique, avec des diamètres compris entre 0,8 et 5 mm. Il est principalement utilisé dans 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 [54].



Figure I.8: Charbon actif extrudé

CHAPITRE II: Etude expérimental

II.1. Introduction

Cette partie est consacrée à la description du protocole expérimental adopté pour l'étude de l'adsorption du colorant Azorubine. Elle porte sur l'influence de plusieurs paramètres, notamment la dose d'adsorbant, le pH, le temps de contact, la concentration initiale ainsi que la température et la cinétique du processus.

II.2. Choix des molécules étudiées

Le choix s'est porté sur le colorant Azorubine (Acide Rouge 14). Ce colorant a été sélectionné en raison de sa représentativité des colorants industriels. L'Acide Rouge 14 est un colorant synthétique rouge appartenant à la famille des colorants azoïques, utilisé dans divers produits alimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques pour ses propriétés colorantes. Son choix est également justifié par ses propriétés physico-chimiques favorables, sa facilité de détection ainsi que sa forte affinité avec le charbon actif commercial.

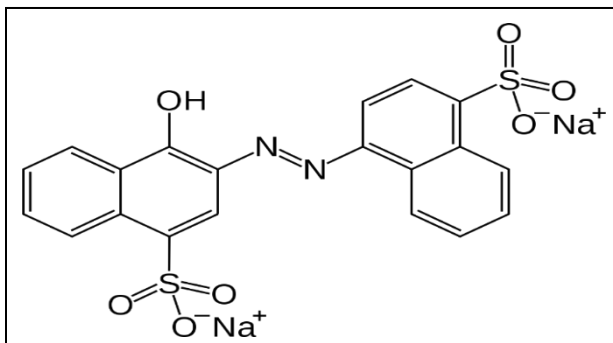


Figure II.1: Structure chimique d'Azorubine (Acide rouge 14).

Tableau II.1 : Les propriétés physico-chimiques d'Azorubine

<i>Propriétés chimique</i>	<i>Propriétés physique</i>
Formule chimique: $C_{20}H_{12}N_2Na_2O_7S_2$	Masse molaire: 502,428 g/mol
Stabilité et solubilité : très hydrosoluble et Stable à la chaleur et à la lumière	Longueur d'onde d'absorption λ : 515 nm
Structure : colorant azoïque anionique	Aspect : poudre rouge foncé

II.3. Méthode de dosage acide rouge 14

II.3.1. Dosage par spectrophotométrie

Le dosage spectrophotométrique repose sur la mesure de l'absorbance en fonction de la concentration. La spectrophotométrie UV-Visible permet de déterminer les concentrations résiduelles du colorant à sa longueur d'onde d'absorption maximale, selon la loi de Beer-Lambert. Cette méthode est rapide, sensible et non destructive.

$$A = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) = \log\left(\frac{1}{T}\right) = \varepsilon \times l \times C \dots \dots \dots \text{(eq. 15)}$$

Avec :

T : facteur de transmission ou transmittance.

A : absorbance ou densité optique.

C : concentration massique du composé dosé (mg/L).

I_0 et I : intensité du faisceau émergent et incident.

ε : coefficient spécifique d'absorbance (L/mg cm).

l : épaisseur de la cuve (1 cm).

En utilisant l'équation de régression linéaire obtenue à partir d'une courbe d'étalonnage établie sur une série de concentrations.

La quantité adsorbée par gramme d'adsorbant à un temps donné $t(q_t)$ ainsi que le taux d'élimination (R) du colorant étudié sont déterminés à l'aide des équations suivantes :

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)}{m} \times V \dots \dots \dots \text{(eq. 16)}$$

Et :

$$R(\%) = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \dots \dots \dots \text{(eq. 17)}$$

Avec :

q_t : Quantité de colorant adsorbé par gramme d'adsorbant à l'instant t (mg/g).

C_0 : Concentration initiale du colorant (mg/L).

C_t : Concentration du colorant dans la solution à l'instant t (mg/L).

V: le volume de la solution traitée (L)

m : masse de l'adsorbant (g).

II.3.2. Détermination de la courbe d'étalonnage

- **Préparation des solutions mère :** Une solution mère a été préparée en dissolvant 1 g d'Azorubine (Rouge Acide 14) dans une fiole jaugée de 1000 mL. Le volume a ensuite été complété avec de l'eau distillée, ce qui permet d'obtenir une solution de concentration égale à 1000 mg/L.
- **Préparation de la solution fille :** Des solutions filles de 2 à 16 mg/L ont été préparées par dilution de la solution mère (1000 mg/L). Des volumes appropriés ont été prélevés puis complétés à l'eau distillée dans des fioles jaugées afin d'obtenir les concentrations souhaitées.
- **Établissement de la courbe d'étalonnage :** Chaque solution étalon a été analysée par spectrophotométrie UV-Visible à la longueur d'onde de 515 nm, déterminée préalablement par balayage spectral. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau II.2 et représentés sous forme graphique dans la Figure II.1.

Tableau II.2 : Élaboration de la courbe d'étalonnage pour l'Azorubine.

C (mg/L)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
ABS	0	0,073	0.139	0.252	0.290	0.385	0.443	0.555	0.553

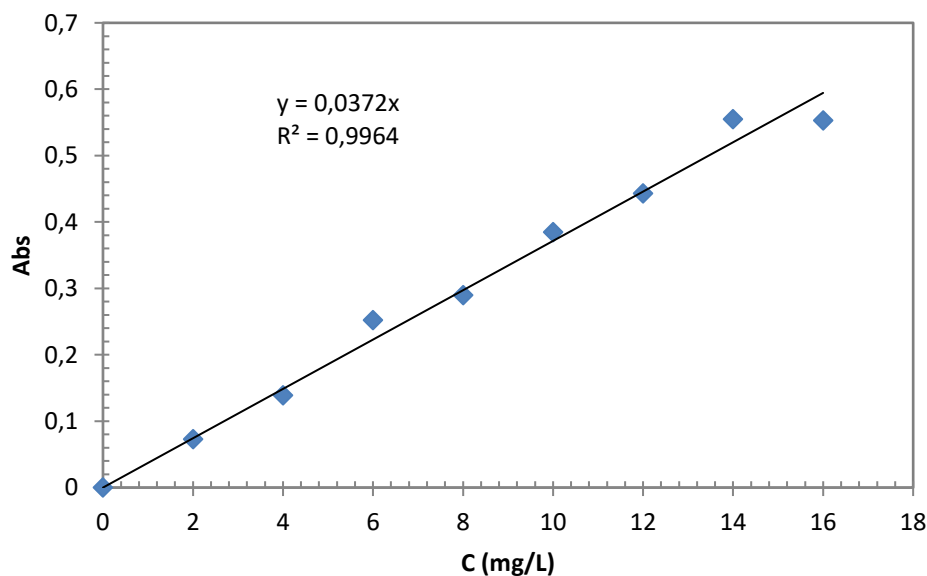


Figure II.2: La courbe d'étalonnage de l'Azorubine.

On observe que la courbe d'étalonnage présente une relation linéaire, avec un coefficient de corrélation $R^2=0,9874$, traduisant un bon ajustement au modèle linéaire.

L'équation de la droite d'étalonnage, reliant l'absorbance à la concentration du Rouge Acide 14, est donnée par : $[A = 0,0372 \times C]$. Cette relation permet de déterminer la concentration de solutions inconnues de Rouge Acide 14 (Azorubine).

II.4. Application à l'adsorption du Rouge Acide 14

II.4.1. L'effet de la dose de l'adsorbant sur l'adsorption

Une série de flacons a été préparée en introduisant des masses croissantes d'adsorbant, comprises entre 0,005 et 0,03 g. À chaque flacon, 25 mL d'une solution de Rouge Acide 14 (Azorubine) de concentration 150 mg/L ont été ajoutés. Les suspensions ont ensuite été agitées pendant deux heures, puis centrifugées avant analyse.

Les résultats obtenus sont présentés sous forme graphique dans la Figure II.3.

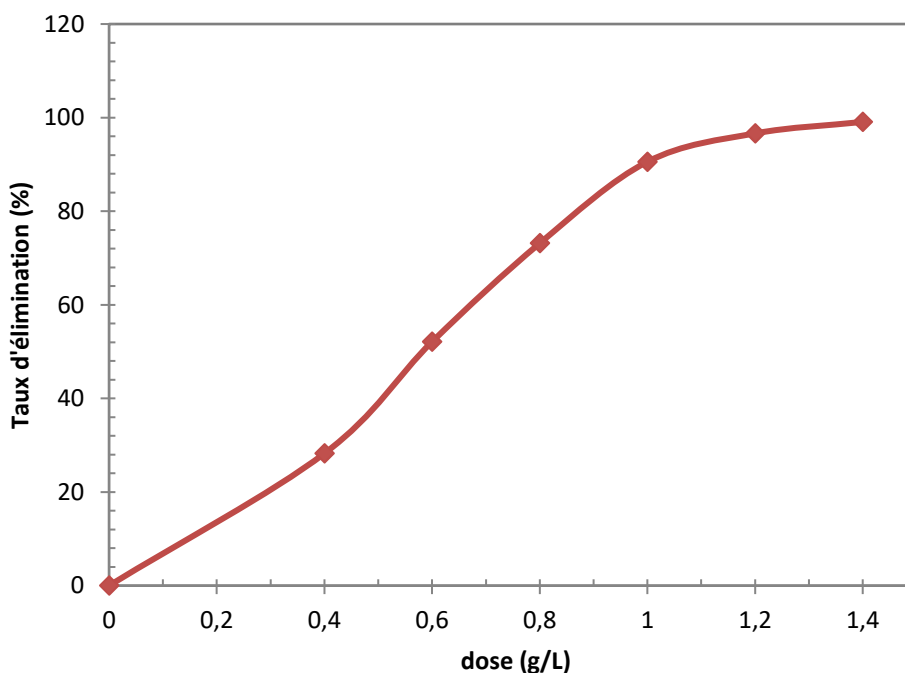


Figure II.3: Taux d'élimination de l'Azorubine en fonction de la dose d'adsorbant.

Le taux d'élimination du Rouge Acide 14 augmente avec l'augmentation de la dose d'adsorbant. Cette augmentation est rapide au début, en raison de la disponibilité élevée des sites actifs. Ensuite, la courbe tend progressivement vers un palier jusqu'à atteindre un maximum, traduisant la saturation des sites d'adsorption. Ainsi, la dose optimale retenue pour la suite de l'étude est fixée à 1 g/L. Par conséquent, cette valeur sera utilisée comme dose optimale dans l'ensemble des expériences d'adsorption.

II.4.2. L'effet du pH sur l'adsorption du rouge acide 14

Le pH est un paramètre physico-chimique déterminant qui contrôle l'état de protonation des groupes fonctionnels de surface de l'adsorbant, influençant ainsi les interactions électrostatiques et, par conséquent, le processus d'adsorption.

L'influence du pH sur l'adsorption du Rouge Acide 14 a été étudiée dans l'intervalle 2 - 10. Des solutions de 25 mL à 150 mg/L ont été mises en contact avec 0,025 g de charbon actif commercial, puis agitées, centrifugées et analysées par spectrophotométrie UV-Visible. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure II.4.

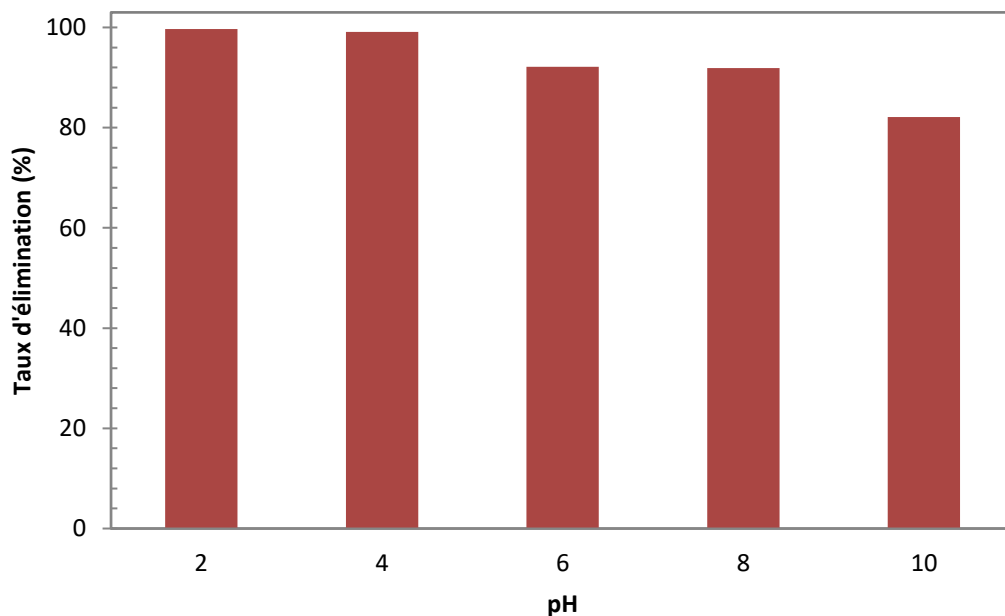


Figure II.4: Taux d'élimination de l'Azorubine en fonction du pH.

La figure II.4 montre que l'efficacité d'adsorption est maximale en milieu fortement acide ($\text{pH} = 2$), ce qui indique des interactions favorables entre l'adsorbant et la molécule adsorbée dans ces conditions.

II.4.3. Détermination du temps d'équilibre

Afin d'étudier le temps de contact nécessaire pour atteindre l'équilibre d'adsorption du Rouge Acide 14 (Azorubine), une solution de concentration initiale de 150 mg/L a été préparée.

Dans une série de flacons, 0,025 g de charbon actif commercial a été introduit, puis 25 mL de la solution d'Azorubine correspondante ont été ajoutés. Les mélanges ont ensuite été agités pendant des durées variables (5, 15, 30, 45, 60, 90 et 120 minutes), puis centrifugés et analysés par spectrophotométrie UV-Visible. Les résultats obtenus sont présentés graphiquement sur la figure II.5.

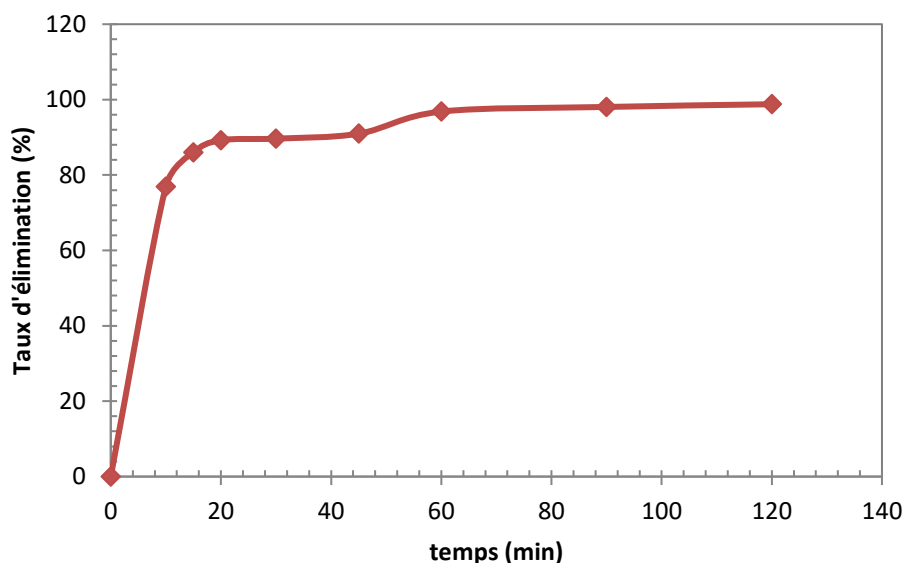


Figure II.5: Taux d'élimination de l'Azorubine en fonction du temps.

On observe une augmentation progressive du pourcentage d'élimination de l'Azorubine par le charbon actif en fonction du temps, jusqu'à atteindre un palier de saturation au-delà duquel le taux reste constant. Ce comportement indique que l'interaction entre l'adsorbant et l'adsorbat a atteint l'équilibre, avec un temps de contact optimal de 60 min.

II.5. Thermodynamique d'adsorption de l'Azorubine

Dans cette étude, des flacons contenant 25 mL de solution d'Azorubine à une concentration de 50 mg/L ont été préparés. Chaque solution a été mise en contact avec une dose optimisée de charbon

actif, à un pH ajusté et pendant un temps de contact déterminé. Les flacons ont ensuite été placés dans un bain-marie thermostaté à différentes températures (298 K, 303 K, 308 K et 313 K). Après agitation, les suspensions ont été centrifugées puis analysées par spectrophotométrie UV-Visible. Les résultats obtenus sont présentés sur les figures II.6 et II.7.

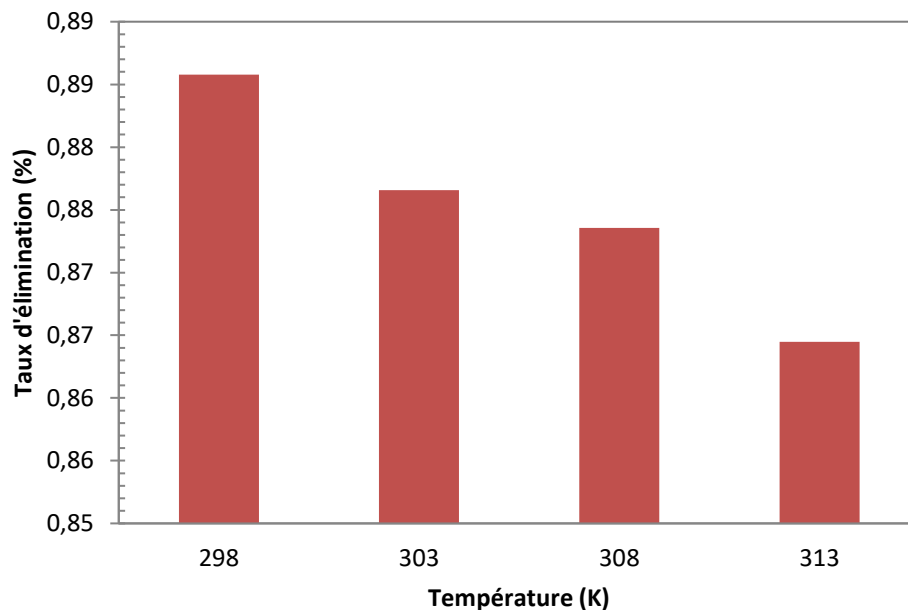


Figure II.6: Taux d'élimination (%) de l'Azorubine à différentes températures.

Le graphe (Figure II.6) montre que l'augmentation de la température entraîne une diminution du taux d'élimination de l'Azorubine par adsorption. En effet, le rendement passe d'environ 88,5 % à 298 K à près de 86,4 % à 313 K. Cette diminution indique que le processus d'adsorption est de nature exothermique.

Cette évolution suggère également que l'adsorption de l'Azorubine est favorisée à basse température, où les interactions adsorbant–adsorbat sont plus stables et plus efficaces. Ainsi, les résultats expérimentaux confirment le caractère exothermique du processus étudié.

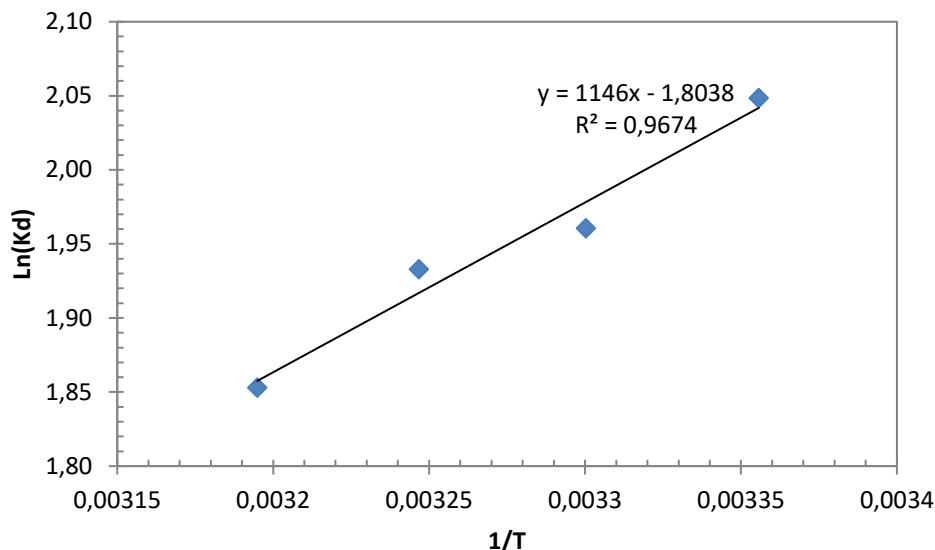


Figure II.7: Évolution de $\ln(K_d)$ en fonction de $(1/T)$ pour l'adsorption de l'Azorubine.

Tableau II.3 : Paramètres thermodynamiques d'adsorption de l'Azorubine.

ΔG° (kJ/mol)				ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (J/mol K)
298 K	303 K	308 K	313 K		
-5,06	-4,99	-4,91	-4,84	-9,53	-14,99

L'analyse du graphe $\ln(K_d)$ en fonction de $(1/T)$ (Figure II.7) montre que les points expérimentaux s'alignent approximativement sur une droite, avec un coefficient de corrélation élevé ($R^2 = 0,9674$). Cette bonne linéarité indique que l'adsorption de l'Azorubine suit le modèle thermodynamique de Van't Hoff, permettant ainsi l'évaluation des paramètres thermodynamiques du système.

La pente de la droite, directement liée à l'enthalpie standard d'adsorption (ΔH°) selon l'équation de Van't Hoff, confirme le caractère exothermique du processus. L'évolution observée suggère que la fixation des molécules d'Azorubine sur l'adsorbant s'accompagne d'un dégagement de chaleur. Par ailleurs, l'augmentation de $(1/T)$ s'accompagne d'une augmentation de $\ln(K_d)$, ce qui confirme la favorabilité du processus à basse température.

Les résultats des paramètres thermodynamiques, regroupés dans le Tableau II.3, montrent que l'énergie libre de Gibbs ($\Delta G^\circ < 0$) est négative dans tous les cas, indiquant que l'adsorption du Rouge Acide 14 sur le charbon actif est spontanée. De plus, l'enthalpie négative ($\Delta H^\circ < 0$) confirme le caractère exothermique du processus, tandis que l'entropie négative ($\Delta S^\circ < 0$) traduit une diminution du désordre à l'interface solide-solution lors de l'adsorption de l'Azorubine.

II.6. Isotherme d'adsorption de l'Azorubine

Une isotherme d'adsorption décrit la relation entre la quantité adsorbée à l'équilibre et la concentration en solution. Elle permet de caractériser le mécanisme et la nature de l'adsorption (mono ou multicouche).

Dans cette étude, des solutions de 100 à 400 mg/L ont été mises en contact avec 0,025 g d'adsorbant à pH = 2 pendant 120 min, puis analysées afin de déterminer la quantité adsorbée à l'équilibre (q_e). Les résultats sont présentés sur la Figure II.8.

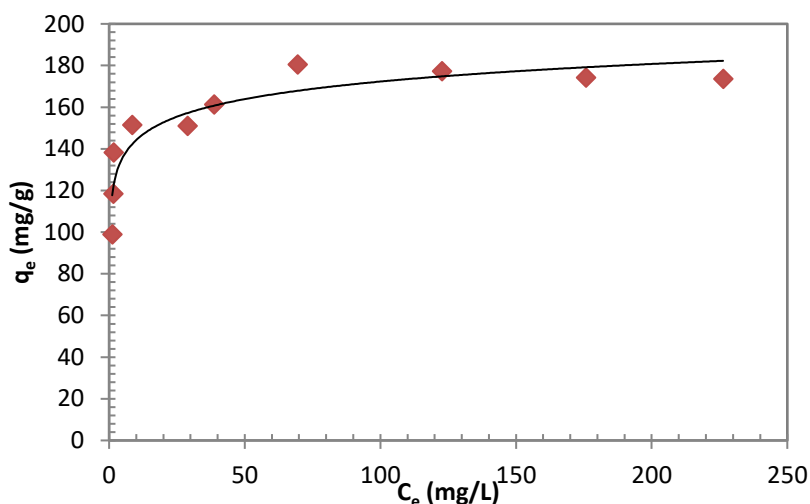


Figure II.8: L'isotherme d'adsorption de l'Azorubine $q_e = f(C_e)$.

La capacité d'adsorption de l'Azorubine par l'adsorbant augmente de manière significative avec l'augmentation de la concentration initiale. L'isotherme obtenue présente un palier, traduisant la saturation progressive des sites actifs de la surface de l'adsorbant. Ce palier correspond à la formation d'une monocouche d'Azorubine sur la surface de l'adsorbant, indiquant que l'ensemble des sites disponibles est occupé et que l'adsorption a atteint sa capacité maximale.

II.7. Modélisation de l'adsorption

La modélisation de l'adsorption consiste à utiliser des modèles mathématiques pour décrire le comportement du processus et interpréter les interactions adsorbant-adsorbat. Elle permet de déterminer les paramètres caractéristiques du système et d'identifier le mécanisme d'adsorption de l'Azorubine sur le charbon actif. Les plus couramment utilisés en adsorption en milieu aqueux sont le modèle de Langmuir et le modèle de Freundlich.

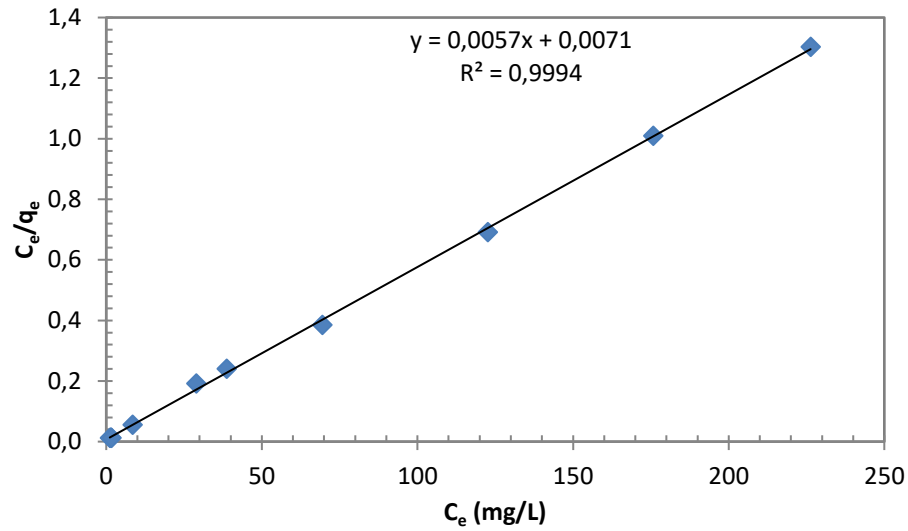


Figure II.9: Application du modèle de Langmuir pour l'adsorption de l'Azorubine.

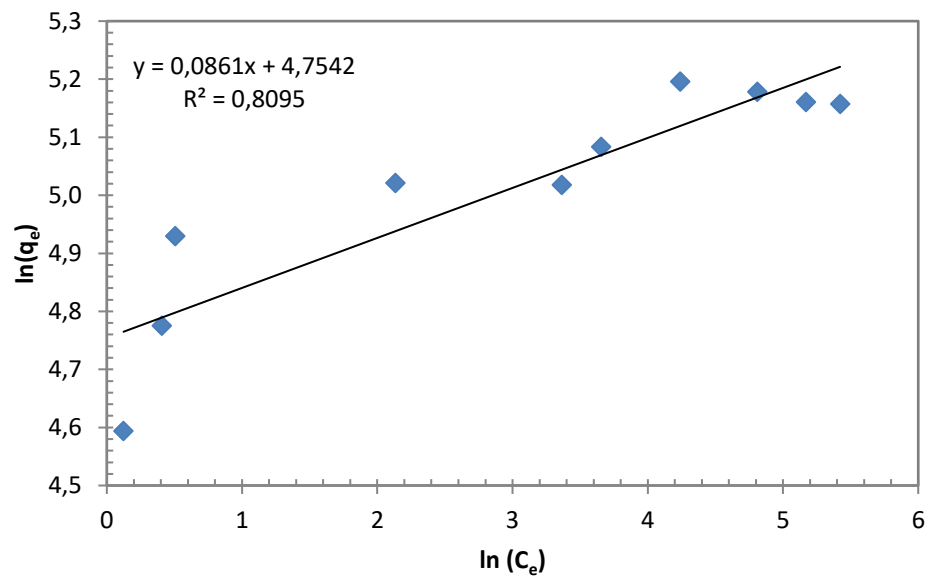


Figure II.10: Application du modèle de Freundlich pour l'adsorption de l'Azorubine.

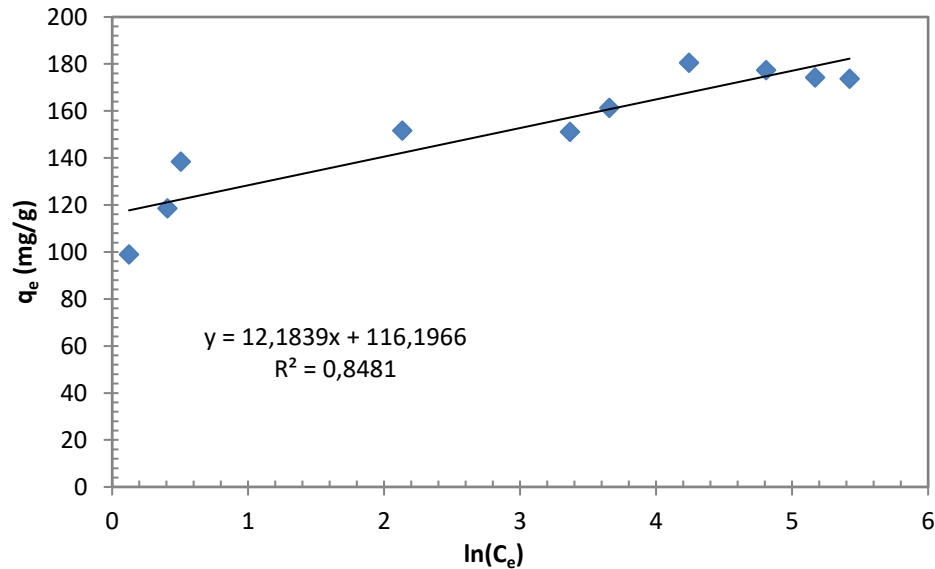


Figure II.11: Application du modèle de Temkin pour l'adsorption de l'Azorubine.

Tableau II.4 : Résultats obtenus pour l'isotherme d'adsorption de l'Azorubine selon le modèle de Langmuir , Freundlich et Temkin

Modèle de Langmuir		
$Q_{\max}$ (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2
175,4	0,8028	0,9994
Modèle de Freundlich		
n	K_F (L/mg)	R^2
11,61	116,1	0,8095
Modèle de Temkin		
B_T (J/mol)	K_T (L/mg)	R^2
12,18	$1,38 \times 10^4$	0,8481

L'analyse des paramètres présentés dans le tableau II.5 montre clairement que le modèle de Langmuir décrit le mieux le comportement d'adsorption de l'Azorubine sur le charbon actif, comparativement aux modèles de Freundlich et de Temkin. En effet, le coefficient de corrélation très élevé ($R^2 = 0,9994$) traduit un excellent ajustement des données expérimentales à ce modèle, confirmant sa pertinence pour décrire le système étudié. La valeur de la capacité maximale d'adsorption ($Q_{\max} = 175,4$ mg/g) met en évidence une forte aptitude du charbon actif à fixer le colorant, tandis que la constante K_L (0,8028 L/mg) reflète une affinité importante entre l'adsorbant et l'adsorbat.

En comparaison, les modèles de Freundlich ($R^2 = 0,8095$) et de Temkin ($R^2 = 0,8481$) présentent des coefficients de corrélation plus faibles, indiquant une moindre adéquation aux résultats expérimentaux. Cela suggère que l'adsorption de l'Azorubine ne suit pas un comportement fortement hétérogène ni une variation linéaire de la chaleur d'adsorption, comme supposé par ces modèles.

Ainsi, l'adsorption de l'Azorubine suit principalement un mécanisme de type Langmuir, correspondant à une adsorption en monocouche sur une surface homogène avec des sites énergétiquement équivalents.

II.8. Cinétique d'adsorption de l'Azorubine

La cinétique d'adsorption de l'Azorubine a été étudiée pour des temps inférieurs au temps d'équilibre en appliquant les modèles du pseudo-premier ordre, du pseudo-deuxième ordre et de diffusion intra-particulaire. Des solutions de 150 mg/L ont été mises en contact avec la dose optimale d'adsorbant et à pH optimal, puis agitées entre 10 et 60 minutes avant analyse par spectrophotométrie UV-Visible. Les résultats sont présentés sur les figures II.12, II.13 et II.14.

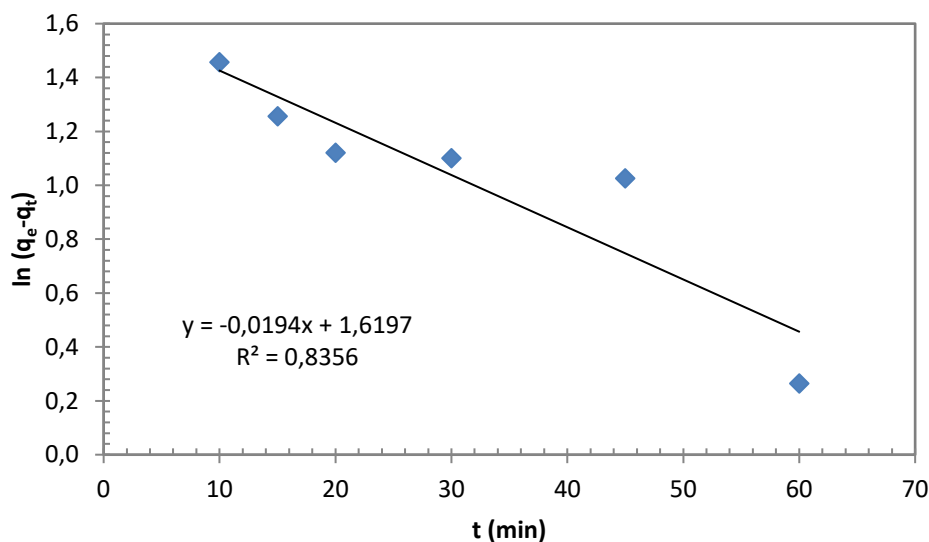


Figure II.12: Représentation graphique de la cinétique d'adsorption de l'Azorubine selon le modèle du pseudo-premier ordre.

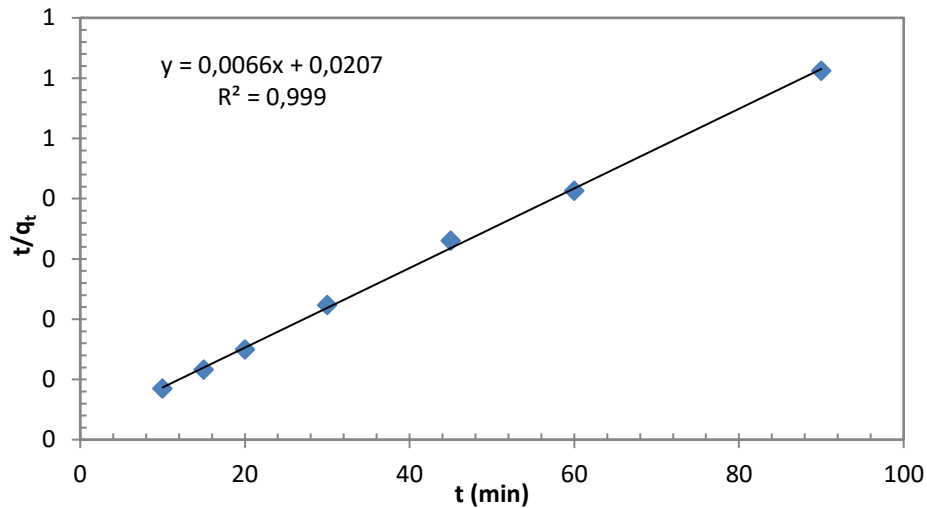


Figure II.13: Représentation graphique de la cinétique d'adsorption de l'Azorubine selon le modèle du pseudo-deuxième ordre.

Tableau II.5 : Paramètres cinétiques de l'adsorption de l'Azorubine selon les modèles du pseudo-premier ordre et du pseudo-deuxième ordre.

Modèle cinétique de pseudo-premier d'ordre			
$q_{e \text{ exp}} \text{ (mg/g)}$	$q_{e \text{ cal}} \text{ (mg/g)}$	$K_1 \text{ (min}^{-1}\text{)}$	R^2
147,08	5,05	0,0194	0,8356
Modèle cinétique de pseudo-deuxième ordre			
$q_{e \text{ exp}} \text{ (mg/g)}$	$q_{e \text{ cal}} \text{ (mg/g)}$	$K_2 \text{ (g/mg min)}$	R^2
147,08	151,52	0,0021	0,9990

L'analyse des résultats du tableau II.6 montre que le modèle cinétique du pseudo-deuxième ordre décrit mieux l'adsorption de l'Azorubine sur le charbon actif que le modèle du pseudo-premier ordre. En effet, le coefficient de corrélation obtenu ($R^2 = 0,9792$) est supérieur à celui du pseudo-premier ordre ($R^2 = 0,8356$), indiquant un meilleur ajustement aux données expérimentales. De plus, la capacité d'adsorption calculée par le modèle du pseudo-deuxième ordre ($q_{e \text{ cal}} = 151,52 \text{ mg/g}$) est très proche de la valeur expérimentale ($q_{e \text{ exp}} = 147,08 \text{ mg/g}$), contrairement au modèle du pseudo-premier ordre ($q_e = 5,05 \text{ mg/g}$). Ces résultats montrent que le processus d'adsorption suit principalement une cinétique de pseudo-deuxième ordre. Cela suggère que les interactions entre l'Azorubine et les sites actifs du charbon actif jouent un rôle déterminant dans le mécanisme d'adsorption.

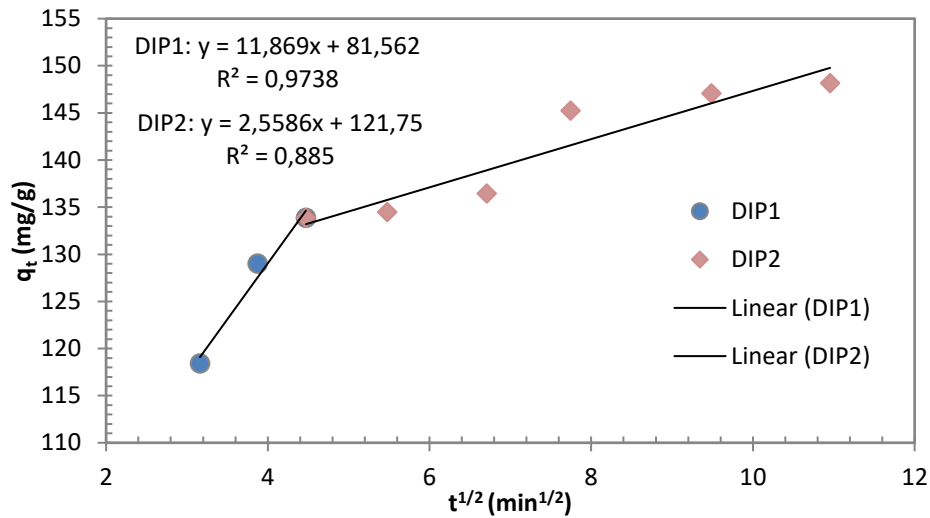


Figure II.14: Représentation graphique du modèle de diffusion intra-particulaire pour l'adsorption de l'Azorubine.

Tableau II.6 : Résultats obtenus pour la cinétique d'adsorption du Rouge Acide 14 selon le modèle de diffusion intra-particulaire.

	Étape 1 DIP	Étape 2 DIP
$K_{id}(\text{mg/g min}^{1/2})$	11,87	2,56
$C_{id}(\text{mg/g})$	81,56	121,75
R^2	0,9738	0,8850

L'analyse des résultats du tableau II.5 montre que l'adsorption de l'Azorubine se déroule en deux étapes de diffusion intra-particulaire. La première étape est rapide, avec une constante de diffusion élevée ($K_{id} = 11,87 \text{ mg/g min}^{1/2}$) et un bon coefficient de corrélation ($R^2 = 0,9738$). La seconde étape est plus lente ($K_{id} = 2,56 \text{ mg/g min}^{1/2}$), traduisant la diffusion du colorant à l'intérieur des pores de l'adsorbant. Les valeurs non nulles de C_{id} indiquent que la diffusion intra-particulaire n'est pas l'unique mécanisme contrôlant l'adsorption. Ainsi, d'autres phénomènes de transfert de masse, notamment la diffusion à travers la couche limite, interviennent également dans le processus d'adsorption.

Conclusion générale

Cette étude vise à évaluer l'efficacité du charbon actif commercial pour l'élimination du colorant organique Rouge Acide 14 (Azorubine) par adsorption en solution aqueuse, ainsi qu'à déterminer les conditions optimales de traitement et à modéliser le comportement d'adsorption.

Les résultats expérimentaux montrent que les performances du procédé dépendent fortement des paramètres opératoires. La dose optimale d'adsorbant est de 1 g/L, tandis que le pH optimal est de 2, conditionnant un rendement d'élimination élevé. Le temps d'équilibre d'adsorption est atteint après 60 minutes, traduisant une cinétique relativement rapide du processus.

L'analyse des données d'équilibre indique que le modèle de Langmuir décrit correctement le comportement d'adsorption, suggérant une adsorption en monocouche sur une surface homogène. Dans ces conditions, la capacité d'adsorption maximale déterminée par le modèle de Langmuir est de 175,4 mg/g, confirmant la bonne affinité entre le colorant et le charbon actif.

En conclusion, le charbon actif commercial présente une efficacité notable pour l'élimination du Rouge Acide 14, ce qui confirme son intérêt pour le traitement des eaux contaminées par les colorants organiques.

- Ce travail contribue à la valorisation du charbon actif dans les procédés de dépollution des eaux et ouvre des perspectives d'optimisation des technologies d'adsorption, ainsi que d'étude des mécanismes de désorption appliqués au traitement des effluents industriels réels.

Référence

- [1] Sadki, H., Ziat, K., & Saidi, M. (2014). *Adsorption d'un colorant cationique d'un milieu aqueux sur une argile locale activée*. Université Abdelmalek Essaâdi, Tanger, Maroc.
- [2] Messaliti, F. (2019). *Étude d'élimination du vert malachite et du rouge Congo par des adsorbants issus des déchets ménagers*. Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis.
- [3] Elkassimi, M., Meziane, D., Abouarnadasse, S., & Azizi, H. (1998). Élimination des colorants de l'industrie textile par le charbon de bois. *Proceedings de la 2e Conférence Maghrébine de Génie des Procédés*.
- [4] Ahmed, M. J., & Dhedan, S. K. (2012). Equilibrium isotherms and kinetic modelling of methylene blue adsorption on agricultural wastes-based activated carbons. *Fluid Phase Equilibria*.
- [5] Shirsath, S. R., Patil, A. P., Patil, J., Naik, J. B., Gogate, P. R., & Sonowane, S. H. (2013). Removal of brilliant green from wastewater using conventional and ultrasonically prepared poly(acrylic acid) hydrogel loaded with kaolin clay: A comparative study. *Ultrasonics Sonochemistry*.
- [6] Benamraoui, F. (2014). *Élimination des colorants cationiques par des charbons actifs synthétisés à partir de résidus agricoles*. Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie.
- [7] Arnauld, P. (1990). *Cours de chimie organique* (15e éd.). Dunod.
- [8] Bouanimba, N. (2009). *Modélisation et optimisation de la cinétique de dégradation photocatalytique de polluants organiques en solution*. Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, Algérie.
- [9] Chebli, D. (2012). *Traitement des eaux usées industrielles : dégradation des colorants azoïques par un procédé d'oxydation avancée couplé à un traitement biologique*. Thèse de Doctorat, Université Farhat Abbas, Sétif, Algérie.
- [10] Hammami, S. (2008). *Étude de dégradation des colorants textiles par procédés d'oxydation avancée*. Thèse de Doctorat, Université Paris-Est & Université Tunis El Manar.
- [11] Chebli, D. (2012). *Traitement des eaux usées industrielles : procédé intégré d'oxydation avancée et traitement biologique des colorants azoïques*. Thèse de Doctorat, Université Farhat Abbas, Sétif, Algérie.
- [12] Benamraoui, F. (2014). *Élimination des colorants cationiques par des charbons actifs issus de résidus agricoles*. Université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie.
- [13] Saidi, F. (2013). *Élimination du bleu de méthylène par procédés d'oxydation avancée*. Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, Algérie.
- [14] Feddal, I. (2016). *Contribution à l'élimination du bleu de méthylène par des matériaux argileux modifiés*. Thèse de Doctorat, Université de Sidi Bel Abbès, Algérie.
- [15] Al-Qodah, Z. (2000). Adsorption of dyes on shale oil ash. *Water Research*, 34(17), 4295–4303.
- [16] Meena, K., Mishra, G. K., Rai, P. K., Rajagopal, C., & Nagar, P. N. (2005). Removal of heavy metal ions from aqueous solutions using carbon aerogel as an adsorbent. *Journal of Hazardous Materials*, 122, 161–170.
- [17] Krazini, I. (2014). *Élimination d'un colorant anionique par adsorption*. Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis.
- [18] Guivarch, E. (2004). *Traitement des polluants organiques par procédé électrochimique d'oxydation avancée (électro-Fenton)*. Thèse de Doctorat, Université de Marne-la-Vallée, France.
- [19] Bakir, H. S. (2014). *Élimination d'un colorant industriel par hydrotalcite*. Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis.

- [20] Karagöz, S., Tay, T., Ucar, S., & Erdem, M. (2008). Activated carbons from waste biomass by sulfuric acid activation and their use on methylene blue adsorption. *Bioresource Technology*, 99, 6214–6222.
- [21] Tertre, E. (2005). *Adsorption de Cs⁺, Ni²⁺ et lanthanides sur kaolinite et smectite jusqu'à 150°C*. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France.
- [22] Zourgui, B. (2022). *Adsorption du bleu de méthylène par argile illite-montmorillonite modifiée*. Thèse de Doctorat.
- [23] Chao, A., Shyu, S., Lin, Y., & Mi, F. (2004). Enzymatic grafting of carboxyl groups onto chitosan for dye adsorption. *Bioresource Technology*, 91, 157–162.
- [24] Ventura-Camargo, B. D. C., & Marin-Morales, M. A. (2013). Azo dyes: Characterization and toxicity – A review. *Textile and Light Industry Science and Technology*.
- [25] Desoille, H., Scherrer, J., & Truhaut, R. (1987). *Précis de médecine du travail* (5e éd.). Masson.
- [26] Norse, T. (1981). The carcinogenicity of chromium. *Environmental Health Perspectives*, 15, 255–270.
- [27] Post, J. L., & Crawford, S. (2007). Varied forms of palygorskite and sepiolite from different geologic systems. *Applied Clay Science*, 232–234.
- [28] Kuans, W., Facey, G. A., Detellier, C., et al. (2003). Nanostructured hybrid materials formed by sequestration of pyridine in sepiolite. *Chemistry of Materials*, 4956–4967.
- [29] Bougdah, N. (2007). *Étude de l'adsorption de micropolluants organiques sur bentonite*. Mémoire de Magister, Université 20 Août 1955, Skikda, Algérie.
- [30] Hillel, M. (2009). *Modélisation des cinétiques d'adsorption sur charbon actif en grain*. Mémoire d'ingénieur d'État, ENSP Alger.
- [31] Aziri, S. (2012). *Étude de l'adsorption du nickel par biosorbants*. Thèse de Magister, Université de Tizi-Ouzou, Algérie.
- [32] Ouslimani, N. (2012). *Adsorption des colorants acides sur montmorillonite*. Thèse de Doctorat, Université de Boumerdès, Algérie.
- [33] Yahiaoui, N. (2012). *Adsorption des composés phénoliques sur carbonate de calcium, hydroxyapatite et charbon actif*. Mémoire de Magister, Université de Tizi-Ouzou, Algérie.
- [34] Nait Merzoug, N. (2014). *Adsorption de polluants organiques sur tiges de dattes*. Mémoire de Magister, Université de Souk Ahras, Algérie.
- [35] Aarfane, A., Salhi, A., El Krati, M., Tahiri, S., & Monkadem, S. (2014). Kinetic and thermodynamic study of dye adsorption on fly ash. *Journal of Materials and Environmental Science*, 5(6), 1927–1939.
- [36] Fayoud, N., Alami Younssi, S., Tahiri, S., & Albizane, A. (2015). Adsorption of methylene blue on wood ash: kinetic and thermodynamic study. *Journal of Materials and Environmental Science*, 6(11), 3295–3306.
- [37] Hadj Salah, N. (2012). *Photocatalytic degradation of organic pollutants using TiO₂*. Thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie.
- [38] Bellir, K. (2002). *Rétention du cuivre par matériaux naturels pour décharges*. Thèse de Magistère, Université de Constantine, Algérie.
- [39] Gherbi, N. (2008). *Rétention des cations métalliques par matériaux naturels*. Thèse de Doctorat.
- [40] Bougdah, N. (2007). *Adsorption de micropolluants organiques sur bentonite*. Université de Skikda, Algérie.
- [41] Gharbi, H. K., & Guentrah, K. (2021). *Isothermes d'adsorption d'un polluant textile*. Mémoire de Master, Université de Mostaganem, Algérie.
- [42] Boussaid, M. (2020). *Adsorption du diclofénac sur divers adsorbants*. Mémoire de Master, Université de Biskra, Algérie.
- [43] Zeldovich, J. (1971). *Chimie physique des phénomènes de surface*. Masson.

- [44] Hammou, D. (2022). *Élimination d'un polluant par charbon actif issu de déchets végétaux*. Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis.
- [45] Robert, L. (2000). Adsorption. *Techniques de l'Ingénieur*, J2730.
- [46] Cassanph, B., Baglin, A., & Frit, D. (1976). Hyperoxalurie studies. *Revue de Médecine*, 17, 803–808.
- [47] Baccar, R., Blanquez, P., Bouzid, J., et al. (2013). Adsorption isotherm and kinetics modeling of dye on activated carbon. *Fuel Processing Technology*.
- [48] Hamouche, A. (2013). *Étude cinétique et thermodynamique de l'adsorption des métaux lourds*. Thèse de Doctorat, Boumerdès, Algérie.
- [49] Baehr, H. D. (1988). *Thermodynamics*. Springer.
- [50] Weber, W. J., & Saint, J. (1963). Kinetics of adsorption on carbon from solutions. *ASCE Journal*.
- [51] Khezzane, A. (2017). *Dépollution par charbon actif du Rouge Congo*. Mémoire de Master, Université d'El Oued, Algérie.
- [52] Zitouni, F., & Benchaa, Z. (2018). *Adsorption des colorants textiles sur charbon actif*. Mémoire de Master, Université de Mostaganem, Algérie.
- [53] Mekibes, Z. (2021). *Fixation de polluants émergents sur supports lignocellulosiques*. Thèse de Doctorat, Université de Mostaganem, Algérie.
- [54] Yahiaoui, N. (2012). *Adsorption des composés phénoliques des margines d'olive*. Mémoire de Magister.