



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des procédés

Option: Génie chimique

THÈME

Élaboration d'un charbon d'os et évaluation de son pouvoir adsorbant pour l'Azorubine

Présenté par

- 1- AMMOURI Abdel krim
- 2- BEY Younes

Soutenu le 23./06/ 2026 devant le jury composé de :

Présidente :	MEKIBES Zohra	MCB	Université de Mostaganem
Examinatrice :	DOUARA Nadia	MCA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	ZERHOUNI Anissa	MCB	Université de Mostaganem
Co-rapporteur :	YASLAM Saleh	Doctorant	Université de Mostaganem

Remerciements

Nous remercions, en premier lieu le bon Dieu tout puissant de nous avoir illuminé le chemin, et de nous avoir accordé la puissance, la volonté et la patience pour achever ce modeste travail.

Le présent travail a été effectué au Laboratoire de Structure, Application et Elaboration des Matériaux Moléculaires (SEA2M) de la faculté des Sciences et de la Technologie -Université de Mostaganem- sous la direction de Mme ZERHOUNI Anissa, maître de conférences à faculté de Médecine, à qui nous tenons à exprimer notre profonde gratitude pour son investissement tout au long de de notre projet de fin d'étude, son dévouement et ses encouragements perpétuels. Nous avons largement profité de sa rigueur scientifique ; nous tenons encore à la remercier pour son inépuisable patience, ses judicieux conseils et surtout pour la bonne humeur qu'elle communique avec le monde.

Nous sommes aussi très reconnaissants à notre Co-encadrant, Monsieur Saleh YASLAM, doctorant au laboratoire SEA2M, pour son encadrement remarquable, sa disponibilité, ses encouragements, ses précieux conseils, son aide dans nos moments de doute et la confiance qu'il ous a accordé qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous sommes enchantés d'apprendre que, Docteur Zohra MEKIBES et Docteur Nadia DOUARA, maîtres de conférences à la faculté des Sciences et de la Technologie- Université de Mostaganem- font partie de ce jury afin d'examiner et évaluer ce travail. Qu'elles trouvent ici l'expression de notre profond respect.

Il nous est particulièrement agréable de remercier la doctorante Khadidja, du laboratoire (SEA2M) ainsi que tous nos amis, pour leurs aides et leurs encouragements ; qu'ils soient assurés de notre sincère reconnaissance pour tout ce qu'ils ont fait pour nous.

Toute notre reconnaissance s'adresse à nos familles, spécialement nos parents, en espérant pouvoir un jour vous rendre un peu de tout ce que vous nous avez apporté. Merci de nous avoir soutenu jusqu'au bout, c'est en grande partie grâce à vous que nous sommes arrivés là.

Enfin, nos vifs remerciements à l'ensemble des personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

AMMOURI Abdelkrim

BEY Younes

Dédicaces

Je dédie ce travail de fin d'études :

- ❖ À mes très chers parents, pour leur amour inconditionnel, leur confiance aveugle et les sacrifices consentis pour notre éducation. Ce diplôme est le fruit de votre soutien quotidien et le témoignage de nos profondes reconnaissances. Que Dieu les protège et les récompense pour tout ce qu'ils ont fait pour moi.
- ❖ À mes frères et sœur, pour leur présence rassurante, leurs encouragements et leur complicité de chaque instant.
- ❖ Aux membres de nos familles, proches et grands-parents, dont la bienveillance nous a toujours portés vers l'avant.
- ❖ À mes collègues de travail, qui m'ont apporté leur soutien, leurs encouragements et leur aide précieuse tout au long de la réalisation de ce mémoire. Leur compréhension, leur disponibilité et leurs conseils ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère reconnaissance et de ma profonde gratitude.
- ❖ A mes formidables amis et collègues de promotion, avec qui on a partagé les doutes, les réussites et les moments inoubliables de cette vie estudiantine.
- ❖ À tous mes enseignants, qui ont contribué à ma formation et à l'acquisition de mes connaissances.

A toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont cru en nous et ont contribué à nos réussites

Je leur exprime ma profonde gratitude et mon immense reconnaissance.

Younes

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail : À ma très chère mère, pour son amour inconditionnel, ses sacrifices, son soutien constant et ses précieuses prières qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours. À ma chère grand-mère, pour son affection, sa tendresse et ses encouragements qui ont toujours été une source de motivation. À mon frère, pour son soutien, sa présence et sa confiance en moi. À toute ma famille, qui m'a entouré d'amour, de conseils et d'encouragements durant toutes ces années. À mes amis, pour les moments partagés, leur aide, leur compréhension et leur soutien moral. À tous mes enseignants et professeurs, qui m'ont transmis leur savoir, guidé mes pas et contribué à ma formation académique et personnelle.

Abdel Krim

Résumé

Les polluants, qu'ils soient organiques ou inorganiques, ont toujours posé des problèmes de santé et d'environnement.

Le premier objectif de cette étude est la valorisation d'un déchet animal en l'occurrence les os du poulet pour la préparation d'un charbon d'os. Parmi deux colorants testés au préalable, l'Azorubine a été choisi car il possède une affinité élevée pour le matériau préparé, contrairement à la Rhodamine B. le second objectif est donc l'application de ce matériau comme adsorbant pour l'élimination de l'Azorubine utilisés comme polluants organiques en milieu aqueux.

La caractérisation de ce charbon d'os a consisté à déterminer son point de charge nulle (pH_{zpc}). L'évaluation des indices d'iode et de bleu de méthylène montre que ce matériau possède une structure poreuse intéressante pour l'application envisagée.

L'effet de plusieurs paramètres d'adsorption tel que le temps de contact, le pH de la solution, la dose d'adsorbant et la température a été étudié en système batch.

L'adsorption de l'Azorubine sur le charbon d'os présente un profil d'isotherme de type L. l'application des modèles de Langmuir, de Freundlich et de Temkin a permis de décrire le comportement d'équilibre d'adsorption. Le modèle de Langmuir offre le meilleur ajustement, avec une capacité maximale d'adsorption (q_{max}) de 50 mg/g.

Les interactions de surface sont thermodynamiquement spontanées avec une affinité avérée entre l'adsorbant et l'adsorbat.

Mots clés : Adsorption, Biocharbon, os de poulet, Azorubine, Isothermes, pollution.

ملخص

قد شكّلت الأصباغ، سواء كانت عضوية أو غير عضوية، دائمًا مشكلات صحية وبيئية.

يتمثل الهدف الأول من هذه الدراسة في تثمين نفاية حيوانية، والمتمثلة في عظام الدجاج، من أجل تحضير فحم عظمي. ومن بين صبغتين تم اختبارهما مسبقًا، تم اختيار الأزوروبين (Azorubine) لأنه يمتلك ألفة مرتفعة تجاه المادة المحضرة، على عكس الرودامين ب (Rhodamine B) ويتمثل الهدف الثاني إذن في تطبيق هذه المادة كمتنر لإزالة الأزوروبين المستخدم كملوّث عضوي في الوسط المائي.

تمثلت عملية توصيف هذا الفحم العظمي في تحديد نقطة الشحنة الصفرية الخاصة به (pH_{pzc}) كما أظهر تقييم مؤشري البيود والأزرق الميثيليني أن هذه المادة تمتلك بنيةً مساميةً واعدة للتطبيق المستهدف.

تمت دراسة تأثير عدة عوامل للامتزاز، مثل زمن التماس، والرقم الهيدروجيني للمحلول (pH)، وجرعة المتنر، ودرجة الحرارة، وذلك في نظام الدفعات (Batch).

يُظهر امتزاز الأزوروبين على الفحم العظمي منحنى إيزوثرم من النوع L. وقد أتاح تطبيق نماذج لانغموير (Langmuir) وفريندليش (Freundlich) وتمكين (Temkin) وصف سلوك توازن الامتزاز. وقد قدّم نموذج لانغموير أفضل توافق، بسعة امتزاز قصوى ($q_{\max}$) بلغت 50 ملغ/غ.

إن التفاعلات السطحية تتميز بأنها تلقائية من الناحية الديناميكية الحرارية، مع وجود ألفة مؤكدة بين المادة الممتزة (المأز) والمادة الممتزة عليها (الممتز).

الكلمات المفتاحية: الامتزاز، الكربون الحيوي، عظام الدجاج، الأزوروبين، متساويات الحرارة (الإيزوثرمات)،

Abstract

Dyes, whether organic or inorganic, have always posed health and environmental problems.

The first objective of this study is the valorization of animal waste, specifically chicken bones, for the preparation of bone char. Among two dyes pre-tested, Azorubine was selected because it exhibits a high affinity for the prepared material, unlike Rhodamine B. The second objective is therefore the application of this material as an adsorbent for the removal of Azorubine, used as a model organic pollutant in an aqueous medium.

The characterization of the bone char consisted of determining its point of zero charge (pHpzc). The evaluation of the iodine and methylene blue indices shows that this material possesses an interesting porous structure for the intended application.

The effect of several adsorption parameters, such as contact time, solution pH, adsorbent dose, and temperature, was studied in a batch system.

The adsorption of Azorubine onto bone char exhibits a type L isotherm profile. The application of Langmuir, Freundlich, and Temkin models allowed for the description of the adsorption equilibrium behavior. The Langmuir model offered the best fit, with a maximum adsorption capacity ($q_{\max}$) of 50.50 mg/g.

The surface interactions are thermodynamically spontaneous, with proven affinity between the adsorbent and the adsorbate.

Key words: Adsorption, bone char, chicken bones, Azorubine, Isotherms, pollution

Sommaire

Liste des figures	
Liste des Tableaux	
Abréviations	
Introduction générale	2
Partie I : Synthèse Bibliographique.....	4
I. Pollution De L'eau	5
I.1. Introduction.....	5
I.2. Pollution de l'environnement.....	5
I.3. Pollution par les colorants.....	5
I.4. Toxicité des polluants	6
I.5. Traitement des polluants par adsorption	6
II. Adsorption	6
II.1. Introduction.....	6
II.2. Définition de l'adsorption.....	7
II.3. Les types d'adsorption.....	7
II.3.1 Physisorption	7
II.3.2 Chimisorption	8
II.4. Facteurs influençant l'adsorption.....	9
II.4.1. Structure de l'adsorbant	9
II.4.2. Nature de l'adsorbat.....	9
II.4.3. Le pH de solution	9
II.4.4. Influence de la température	9
II.5. Classification d'isothermes d'adsorption (Giles et al.).....	9
II.5.1. L'isotherme de type (S).....	10
II.5.2. L'isotherme de type (L).....	10
II.5.3. L'isotherme de type (H)	10
II.5.4. L'isotherme de type (C)	10
II.6. Modèles d'isothermes d'adsorption	11
II.6.1. Isotherme de Langmuir.....	11
II.6.2. Isotherme de Freundlich.....	11
II.6.3. Isotherme de Temkin.....	12
II.7. Thermodynamique d'adsorption	12
II.7.1. Paramètres thermodynamiques.....	13
III. Biocharbon	13

III.1. Introduction	13
III.2. Définition du charbon actif.....	14
III.3. Biomasse	15
III.4. Définition du déchet.....	15
III.5. Valorisation du déchet étudié (os de poulet).....	15
III.5.1. Os de poulet.....	16
III.6. Définition du Biocharbon.....	16
III.7. Methodes de caractérisation	17
III.7.1. Indice d'iode.....	17
□ Définition	17
□ Méthode iodométrique.....	17
III.7.2. Indice du Bleu de Méthylène.....	17
□ Définition	17
III.8. Utilisation du biocharbon	18
IV. Généralité sur les colorants	18
IV.1. Définition.....	18
IV.3. Classification des colorants	19
IV.4. Classification Chimique	20
IV.5. Classification tinctoriale	21
IV.5.1. Colorants acides ou anioniques.....	21
IV.5.2. Colorants basiques ou cationiques	21
IV.6. Colorants choisis pour l'étude	22
IV.6.1. Azorubine.....	22
IV.6.2. Colorant Rhodamine B	23
Partie II : Etude Expérimentale.....	27
Introduction	28
I. Matériels et methodes experimentales.....	28
I.1. Préparation de la matière brute	28
I.2. Le Spectrophotomètre.....	29
I.2.1. Loi de BEER LAMBERT	30
I.3. Colorants étudiés	31
I.3.1. Préparation de solutions.....	31
I.3.2. Établissement des courbes d'étalonnage des deux colorants.....	32
I.3.3. Comparaison des résultats expérimentaux.....	32
I.4. Caractérisation de l'adsorbant.....	34
I.4.1. Détermination de l'indice d'iode.....	34
I.4.2. Détermination de l'indice Bleu Méthylène.....	35

□	<i>Evaluation des Indices d'iode et de bleu méthylène</i>	<i>37</i>
	<i>I.4.3. pH de point de charge zéro (pH_{zpc})</i>	<i>38</i>
□	<i>Evaluation de pH de point de charge zéro (pH_{zpc})</i>	<i>38</i>
I.5.	Etude paramétrique.....	39
	<i>I.5.1. Effet du temps de contact</i>	<i>39</i>
	<i>I.5.2. Effet de dose d'adsorbant</i>	<i>41</i>
	<i>I.5.3. L'effet de pH de solution.....</i>	<i>42</i>
	<i>I.5.4. Isotherme d'adsorption d'Azorubine</i>	<i>43</i>
	<i>I.5.5. Les modèles d'isothermes d'adsorption.....</i>	<i>45</i>
	I.5.5.1. Modèle Langmuir.....	45
	I.5.5.2. Modèle Freundlich	46
	I.5.5.3. Modèle Temkin	47
	I.5.5.4. Résultats d'isotherme obtenue pour les trois modèles.....	48
	<i>I.5.6. Thermodynamique d'adsorption d'Azorubine.....</i>	<i>49</i>
I.6.	Comparaison entre notre biocharbon et ceux de la littérature	51
	Conclusion générale	52
	Références bibliographiques	55

Liste des figures

Partie I : Synthèse Bibliographique

Figure II.1 Schéma de l'adsorption physique.	7
Figure II.2 Classification des isothermes d'après Gilles et al.	10
Figure III.1 : Structure chimique et poreuse du charbon actif.	14
Figure III.2 Présentation du biocharbon.	17
Figure IV.1 Les colorants alimentaires et industrielles.	19
Figure IV.2 Structure chimique d'Azorubine.	22
Figure IV.3 Structure chimique de Rhodamine B.	24

Partie II : Synthèse Expérimentale

Figure I.1 Protocole de préparation du biocharbon à partir des os de poulet.	29
Figure I.2 Spectrophotomètre UV Visible.	30
Figure I.3 Principe d'absorption de la lumière monochromatique par un corps absorbant ..	30
Figure I.4 Courbe d'étalonnage d'azorubine.	32
Figure I.5 Courbe d'étalonnage de Rhodamine B.	33
Figure I.6 Courbe d'étalonnage de bleu méthylène avec l'acide acétique.	37
Figure I.7 les valeurs de l'indice de BM et l'indice d'iode.	38
Figure I.8 Point de charge nulle pour le biocharbon.	39
Figure I.9 Taux d'élimination d'azorubine en fonction du temps.	40
Figure I.10 Taux d'élimination de Azorubine en fonction de la masse.	41
Figure I.11 Taux d'élimination en fonction de pH pour l'adsorption d'azorubine.	43
Figure I.12 Courbe isotherme pour l'azorubine.	44
Figure I.13 Isotherme d'adsorption d'Azorubine pour le modèle de Langmuir.	46
Figure I.14 Isotherme d'adsorption d'Azorubine pour le modèle de Freundlich.	47
Figure I.15 Isotherme d'adsorption d'Azorubine pour le modèle de Temkin.	48
Figure I.16 Représentation graphique de l'équation de van 't Hoff.	49

Liste des tableaux

Partie I : Synthèse Bibliographique

Tableau II.1 Comparaisons entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique	8
Tableau IV.1 Principaux groupements chromophores et auxochromes.	19
Tableau IV. 2 Les Colorants distinctifs utilisés dans les opérations de coloration du textile.	20
Tableau IV.3 Famille des colorants.....	20
Tableau IV.4 Les avantages et les inconvénients d'Azorubine.....	22

Partie II : Synthèse Expérimentale

Tableau I.1 Élaboration de la courbe d'étalonnage pour Azorubine.	32
Tableau I.2 Élaboration de la courbe d'étalonnage pour Rhodamine B.....	33
Tableau I.3 Résultats obtenus du taux d'élimination des deux colorants.	33
Tableau I.4 Élaboration de la courbe d'étalonnage pour le Bleu Méthylène.	36
Tableau I.5 pH initial et final de la solution de NaCl.	38
Tableau I.6 Taux d'élimination du Azorubine en fonction du temps.	40
Tableau I.7 Paramètre de l'effet de masse.	41
Tableau I.8 Effet du pH sur l'adsorption du Azorubine.....	42
Tableau I.9 Résultats pour l'isotherme d'adsorption d'Azorubine.	43
Tableau I.10 Résultats pour le modèle Langmuir.	45
Tableau I.11 Résultats pour le modèle Freundlich.	47
Tableau I.12 Résultats pour le modèle Temkin.	48
Tableau I.13 Résultats des trois modèles d'isotherme pour l'azorubine.	48
Tableau I.14 Paramètre thermodynamique.	49
Tableau I.15 Paramètres thermodynamiques d'adsorption de Azorubine.	50
Tableau I.16 Comparaison entre différents adsorbants étudiés pour l'adsorption de l'azorubine	51

Abréviations

Symbol	Signification	Unité
Ce	Concentration à l'équilibre	mg/L
C ₀	Concentration initiale	mg/L
ΔG°	Variation de l'énergie libre de Gibbs	kJ/mol
ΔH°	Variation de l'enthalpie	kJ/mol
HCl	Acide chlorhydrique	mol/L
K _d	Coefficient de distribution	L/g
K _f	Constante de Freundlich	(mg/g)(L/mg) ^{1/n}
K _L	Constante de Langmuir	L/mg
K _T	Constante de Temkin	L/mg
Ln	Logarithme népérien	
M	Masse de l'adsorbant	G
NaCl	Chlorure de sodium	mol/L
NaOH	Hydroxyde de sodium	mol/L
pH _{zpc}	pH au point de charge zero	
q _e	Quantité adsorbée à l'équilibre	mg/g
R ²	Coefficient de détermination	
T	Température absolue	K
UV-Visible	Ultraviolet-Visible	
V, V'	Volume de solution	mL ou L
λ	Longueur d'onde	Nm
Abs	Absorbance	
A	Absorbance optique	
BM	Bleu de Méthylène	mg/g
X	Quantité de soluté adsorbée à l'équilibre	Mg
Q _m	Quantité maximale de soluté adsorbée par gramme d'adsorbant nécessaire pour couvrir la surface d'une couche monomoléculaire	mg/g
1/n	Paramètre relié à l'intensité d'adsorption	
pH _i	pH initial	
pH _f	pH final	

Introduction

Générale

Introduction générale

L'eau est un élément vital dont l'importance au niveau planétaire est sans cesse rappelée. Sa pollution par les activités industrielles et agricoles constitue un sujet de préoccupation majeur de nos sociétés développées [1].

L'industrie des colorants entraîne une pollution très grave pour les citoyens et l'environnement car ils sont des produits chimiques nocifs pour la santé, tels que certains colorants azoïques cancérogènes, qui provoquent une pollution de l'eau ce qui nécessite des techniques pour les dégrader [2].

L'origine des eaux résiduaires colorées est pratiquement industrielle, principalement celle du textile, du cuir [3], des entreprises cosmétiques, pharmaceutiques [4] et agroalimentaire [5]. Les colorants sont principalement des composés aromatiques et hétérocycliques, leur structure complexe et stable comprend des chromophores et des groupements fonctionnels polaires qui sont difficilement dégradables.

Les rejets industriels représentent une menace de plus en plus inquiétante vis-à-vis de l'homme et des écosystèmes. Les effluents industriels et les polluants résultants de l'utilisation intensive des produits organiques tels que les colorants constituent les causes majeures de pollution de l'environnement [6].

Cette pollution entraîne une perturbation de l'écosystème dont les conséquences peuvent aller jusqu'à la migration ou l'extinction de certaines espèces incapables de s'adapter au changement de l'environnement. Le phénomène de pollution est provoqué par nombreuse activités humaines, industriels et quelques phénomènes naturels, les colorants font depuis tout récrément l'objet d'une préoccupation environnementale croissante [7].

Une prise de conscience s'est généralisé chez les scientifiques qui cherchent des procédés de dépollution pour l'élimination des polluants organiques fréquemment retrouvés à concentration significative dans les milieux aquatiques [6].

L'adsorption reste parmi les techniques les plus utilisées et les plus faciles. De nombreuses recherches ont étudié l'élimination des colorants dans les solutions aqueuses en utilisant divers matériaux solides, notamment le charbon actif. L'adsorption de molécules organiques,

comme les colorants, sur le charbon actif a démontré une grande efficacité en tant que méthode de traitement [9].

Les eaux usées colorées sont habituellement traitées par des procédés physiques ou chimiques. Ceux-ci comprennent la floculation, la flottation [10], l'électrocoagulation seule ou combinée à la flottation [11], la précipitation, les techniques d'oxydation telle que l'oxydation photo-catalytique [12] et l'ozonation, la filtration membranaire [13], les échanges d'ions et l'adsorption. La technique de l'adsorption est la méthode la plus favorable pour l'élimination des colorants et est devenue une méthode analytique de choix, très efficace et simple dans son utilisation [14].

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail, dont l'objectif est d'étudier les capacités d'adsorption d'un biocharbon préparé au laboratoire à partir d'un déchet animal abondant et peu valorisé, à savoir les os de poulet. Le choix de ce précurseur s'inscrit dans une démarche de valorisation des déchets organiques et de développement de matériaux adsorbants à faible coût destinés au traitement des eaux polluées.

Notre travail de fin d'étude est divisé en deux parties.

La première est une synthèse bibliographique soulignant les notions fondamentales sur la contamination du milieu hydrique par des polluants, avec des rappels sur les colorants, leur classification, leur utilisation, leur toxicité, leur impact environnemental ainsi que les méthodes de traitement des eaux polluées.

La seconde partie est consacrée à l'étude expérimentale. Elle porte sur la préparation et la caractérisation d'un biocharbon issu d'os de poulet, ainsi que sur l'évaluation de ses performances d'adsorption. L'influence de différents paramètres opératoires tels que le pH, la température, la dose d'adsorbant et le temps de contact a été étudiée. Une application a ensuite été réalisée pour l'élimination de deux colorants organiques, l'Azorubine et la Rhodamine B, à partir de solutions aqueuses.

Et enfin une conclusion générale de l'étude qui relate l'essentiel des résultats obtenus. Et, bien sûr, des suggestions et des recommandations pour une éventuelle amélioration et continuation du travail.

Partie I : Synthèse

Bibliographique

I. Pollution De L'eau

I.1. Introduction

La pollution des eaux est un enjeu environnemental majeur qui affecte la santé des écosystèmes aquatiques, la qualité de l'eau potable et la santé humaine. Les sources de pollution des eaux peuvent être multiples, telles que les rejets industriels, les eaux usées, les pesticides, les déchets plastiques, et les hydrocarbures. Les conséquences de la pollution des eaux peuvent être graves, allant de la mort de poissons et d'autres espèces animales à la propagation de maladies chez les humains qui consomment de l'eau contaminée.

La pollution de l'eau peut causer des perturbations écologiques importantes. Selon une étude publiée dans la revue *Environmental Pollution* en 2019, la pollution de l'eau peut réduire la biodiversité des écosystèmes aquatiques et nuire à la survie des espèces animales [15].

Les pesticides sont une source majeure de pollution des eaux et ont des impacts négatifs sur la faune et la flore aquatiques, ainsi que sur la santé humaine. Selon une étude menée en 2019 par l'Agence française pour la biodiversité, plus de la moitié des cours d'eau en France sont contaminés par des pesticides [16].

I.2. Pollution de l'environnement

La pollution de l'environnement constitue l'un des problèmes majeurs affectant les écosystèmes naturels et la santé humaine. Elle résulte principalement des activités industrielles, agricoles et domestiques qui rejettent dans l'environnement diverses substances toxiques telles que les métaux lourds, les pesticides, les hydrocarbures et les colorants organiques. Ces polluants contaminent les eaux, les sols et l'air, provoquant une dégradation progressive de la qualité environnementale et un déséquilibre des systèmes biologiques [17].

I.3. Pollution par les colorants

Les effluents industriels contenant des colorants synthétiques représentent une source importante de pollution des milieux aquatiques. En raison de leur structure moléculaire complexe et de leur stabilité chimique élevée, ces composés sont difficilement biodégradables et persistent longtemps dans l'environnement. Leur présence dans l'eau

limite la pénétration de la lumière, perturbe la photosynthèse des organismes aquatiques et réduit la concentration en oxygène dissous [18].

I.4. Toxicité des polluants

La toxicité des polluants dépend de leur nature chimique, de leur concentration ainsi que de la durée d'exposition. Certains composés organiques et colorants synthétiques peuvent présenter des effets toxiques, mutagènes ou cancérogènes sur les êtres vivants. Chez l'homme, une exposition prolongée à ces substances peut entraîner des irritations cutanées, des troubles respiratoires, des atteintes hépatiques et des perturbations du système nerveux [19].

I.5. Traitement des polluants par adsorption

Afin de réduire les impacts environnementaux liés aux polluants organiques, plusieurs techniques de traitement des eaux usées ont été développées. Parmi celles-ci, l'adsorption sur charbon actif et biocharbon est largement utilisée grâce à son efficacité, son faible coût et sa simplicité de mise en œuvre. Cette technique permet l'élimination de nombreux contaminants organiques présents dans les effluents industriels [7].

II. Adsorption

II.1. Introduction

L'adsorption est un phénomène physico-chimique se traduisant en particulier par une modification de concentration à l'interface de deux phases non miscibles. L'adsorption est un phénomène de surface, est donc à distinguer de l'absorption, phénomène de profondeur [6].

Au cours de ce processus les molécules d'un fluide (gaz ou liquide), appelé adsorbat, viennent se fixer sur la surface d'un solide, appelé adsorbant donc tout atome ou molécule qui s'approche d'une surface subit une attraction qui peut conduire à la formation d'une liaison entre la particule et la surface [7].

Il existe cinq types d'interfaces selon la nature des deux phases : gaz / liquide, gaz/solide, liquide/liquide, liquide/solide, solide/solide, et pour chacun de ces types d'interfaces, on peut distinguer le cas où ces phases sont pures de celui où elles constituent des mélanges [6].

II.2. Définition de l'adsorption

L'adsorption est un processus qui permet de fixer des molécules d'un fluide sur la surface d'un solide, augmentant ainsi la concentration de ces molécules sur la surface sans modifier le volume du milieu poreux.

L'adsorption est l'un des moyens mis à la disposition du traiteur d'eau pour éliminer les matières organiques non dégradables dissoutes, extraites de la phase liquide ou gazeuse dans laquelle ils sont immergés ainsi que l'élimination des métaux lourds qui peuvent être dissouts dans l'eau [10].

II.3. Les types d'adsorption

On distingue deux types d'adsorption : physique (physisorption) et chimique (chimisorption).

II.3.1 Physisorption

L'adsorption physique ou physisorption est un phénomène physique met en jeu de faibles interactions entre entités moléculaires comme les forces d'attraction de van der Waals et des forces dues aux interactions électrostatiques de polarisation. L'adsorption physique est un phénomène réversible, peu spécifique, rapide et généralement limitée par les phénomènes de diffusion.

La force des interactions mises en jeu peut être estimée par l'énergie d'adsorption physique qui est comprise entre 5 et 40 kJ. Mol et considérée comme faible. L'adsorption physique est donc favorisée par une baisse de la température et peut se faire en monocouche ou multicouches [11].

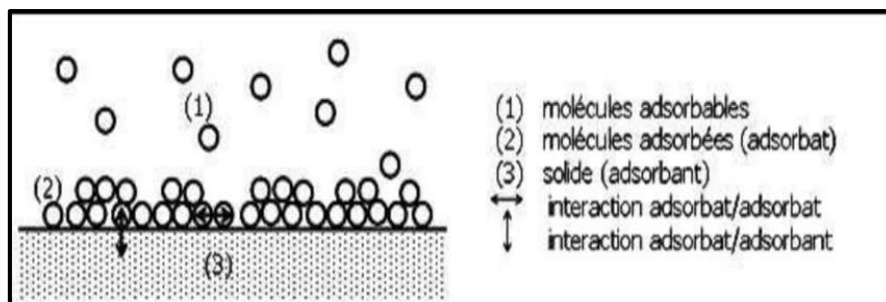


Figure II.1 Schéma de l'adsorption physique.

II.3.2 Chimisorption

L'adsorption chimique ou chimisorption est une adsorption qui met en jeu des énergies de liaison importantes. Elle résulte d'une interaction chimique entre les molécules d'adsorbant composant la surface du solide et les molécules de soluté. Les molécules adsorbées subissent, généralement des changements dans leurs structures chimiques [12].

L'adsorption chimique résulte d'une interaction chimique qui se traduit par un transfert d'électrons entre le solide et l'adsorbat. Il y a alors formation d'un composé chimique à la surface de l'adsorbant. Ce type d'adsorption se développe à haute température et met en jeu une enthalpie de transformation élevée [13].

Tableau II.1 Comparaisons entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique [21]

Paramètre	Adsorption physique	Adsorption chimique
Utilisation en traitement des eaux	Couramment utilisée	Rarement utilisée
Nature de liaisons	Non spécifique. Liaisons physiques de faible énergie (liaisons intermoléculaires de Van der Waals) dues aux forces d'attraction selon la différence d'électronégativité (affinité chimique) entre l'adsorbat et l'adsorbant	Spécifique. Liaisons chimiques de forte énergie (formation de liaisons covalentes ou ioniques due au transfert d'électron entre l'adsorbat et l'adsorbant à cause de leur affinité chimique importante).
Vitesse d'adsorption	Rapide mais limitée par le transfert de masse	Variable
Type de réaction	Réversible, exothermique	Irréversible. Exothermique
Chaleur d'adsorption	4-40 kJ/mole	> 200 kJ/mole
Quantité adsorbée	Plusieurs couches de substances adsorbées	Monocouche
Caractère de la surface	Plus ou moins homogène	Hétérogène

II.4. Facteurs influençant l'adsorption

II.4.1. Structure de l'adsorbant

La structure et la nature des adsorbants jouent un rôle déterminant dans la fixation des différents composés organique et inorganique. La taille des particules, la surface spécifique et la porosité sont les principales propriétés qui affectent l'affinité d'un adsorbant vis-à-vis du soluté [22].

II.4.2. Nature de l'adsorbat

Les propriétés physico-chimiques de l'adsorbat sont déterminantes et jouent un rôle primordial lors de son adsorption sur une surface solide de l'adsorbant. La structure moléculaire est l'un des principaux paramètres qui influence la rétention des adsorbats. Plus la structure moléculaire est volumineuse plus sa rétention par certaines phases solides est difficile. Par ailleurs, l'adsorption des solutés est conditionnée par la composition de la solution puisqu'en présence simultanée de plusieurs espèces génère une concurrence vis-à-vis des sites d'adsorption surtout pour celles qui possèdent une structure similaire [23].

II.4.3. Le pH de solution

Le pH est un paramètre prédominant qui a un effet non négligeable sur les caractéristiques de l'adsorption. Il affecte directement l'état de charge de l'adsorbant et de l'adsorbat. Son effet sur la rétention des contaminants est souvent étudié. Dans la plupart des cas, les meilleurs résultats sont acquis aux pH les plus faibles. Cette propriété s'applique particulièrement à l'adsorption de substances acides ou moléculaires [24].

II.4.4. Influence de la température

L'adsorption est un processus global résultant de plusieurs processus à l'interface solide liquide. Elle peut être exothermique, endothermique ou athermique. Elle est donc conditionnée par la température. Ainsi, l'augmentation de la température favorise les processus de chimisorption alors que son abaissement favorise l'adsorption physique [25].

II.5. Classification d'isothermes d'adsorption (Giles et al.)

Toutes les isothermes sont divisées, par Giles et al. (1960), en 4 classes principales (S, L, H et C) selon la pente initiale, et 5 sous-groupes pour chaque classe

II.5.1. L'isotherme de type (S)

C'est une isotherme de forme concave, elle est observée lorsque les interactions adsorbat-adsorbant et adsorbat-adsorbat (l'adsorbat est adsorbé sur les molécules déjà adsorbées sur l'adsorbant) interviennent d'une manière successive formant une adsorption coopérative de molécules.

II.5.2. L'isotherme de type (L)

C'est une isotherme de forme convexe, elle correspond à l'isotherme de Langmuir

II.5.3. L'isotherme de type (H)

Elle est observée, même à faible concentrations de l'adsorbat, lorsqu'il y a une affinité importante entre l'adsorbat et l'adsorbant

II.5.4. L'isotherme de type (C)

Elle correspond à une partition constante du soluté dans l'interface solution-adsorbant. Elle est linéaire à cause de la création de nouveaux sites, qui restent libres, au cours de l'adsorption. [21].

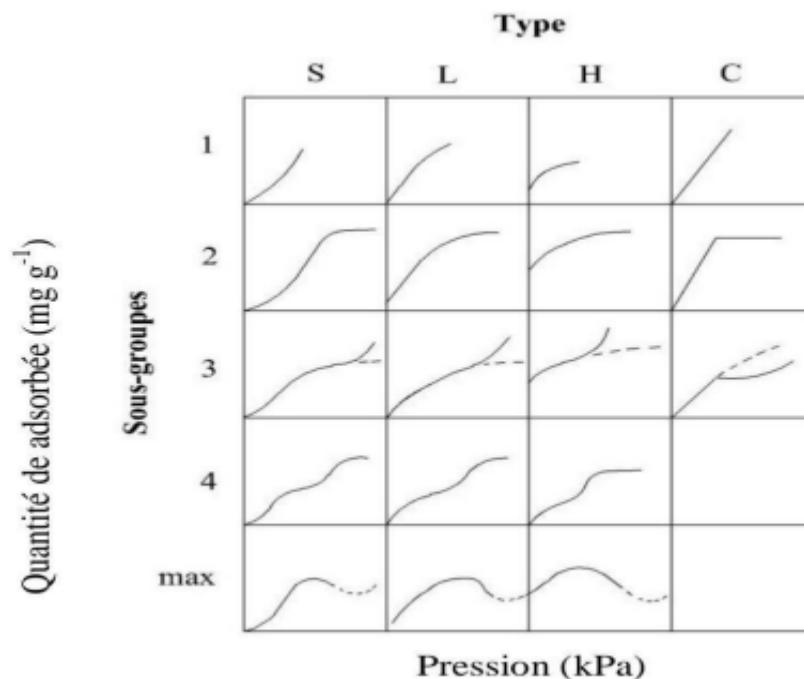


Figure II.2 Classification des isothermes d'après Gilles et al.

II.6. Modèles d'isothermes d'adsorption

II.6.1. Isotherme de Langmuir

A une température donnée (constante). L'adsorption en régime statique (échelle laboratoire ou échelle discontinue) est décrite par l'équation de Langmuir, qui prend en compte un équilibre entre la surface du matériau adsorbant et un polluant dans la phase gazeuse. Ce modèle suppose une surface uniforme et une adsorption monocouche et ne prend pas en compte les interactions entre les molécules adsorbées [21].

$$q_e = \frac{Q_{max} \times K_L \times C_e}{1 + K_L \times C_e} \quad \dots(1)$$

Avec :

C_0 : concentration adsorbée à l'équilibre (mg/g)

C_{final} : concentration du soluté à l'équilibre (mg/L)

Q_{max} : Capacité maximale d'adsorption pour former une monocouche (mg/g)

K_L : Constante d'affinité ou de Langmuir liée à l'énergie de liaison (L/mg)

II.6.2. Isotherme de Freundlich

A une température donnée. L'adsorption en régime statique (échelle laboratoire ou échelle discontinue) est décrite par l'équation de Freundlich pour les liquides, où un équilibre s'effectue entre les molécules d'adsorbat fixée par l'adsorbant et celles restées libres dans la phase liquide. L'isotherme décrit la relation existant à l'équilibre entre la concentration de l'adsorbat dans la phase liquide (C_e) et celle adsorbée à la surface de l'adsorbant (q_e) [21].

Pour obtenir une forme linéaire de l'équation de Freundlich, des logarithmes décimaux doivent être utilisés :

$$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad \dots(2)$$

Avec :

q_e : quantité de soluté adsorbé par unité de masse d'adsorbant (mg/g)

K_f : Constante de Freundlich liée à la capacité d'adsorption.

C_e : concentration d'adsorbat dans la phase liquide à l'équilibre (mg/L)

$1/n$: Constante empirique liée à l'intensité ou à l'hétérogénéité de l'adsorption. Elle est généralement comprise entre 0 et 1.

II.6.3. Isotherme de Temkin

Temkin et Pyzhew (1940) ont proposé un modèle qui tient compte de l'effet indirect des interactions adsorbant/adsorbat dans l'isotherme d'adsorption. En effet à cause de ces interactions, la chaleur d'adsorption de toutes les molécules diminue linéairement avec la couche recouverte [26].

L'isotherme de Temkin est donnée par l'équation suivante :

$$q_e = \frac{RT}{b} \ln(K_T C_e) \quad \dots(3)$$

Avec :

q_e : Quantité adsorbée à l'équilibre par unité de poids de l'adsorbant (mg/g).

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

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

T : température absolue (K).

b : variation de l'énergie d'adsorption (J. mol/g.mg).

K_T : constante de liaison à l'équilibre de Temkin (L/mg).

II.7. Thermodynamique d'adsorption

Le phénomène d'adsorption est toujours accompagné par un échange thermique, soit exothermique ou endothermique. La mesure de la chaleur d'adsorption est le principal critère qui permet de différencier entre la chimisorption et la physisorption. Les paramètres

thermodynamiques, peuvent aussi être considérés comme des indicateurs précieux en prévoyant le comportement d'adsorption et dépendent fortement de la température [20].

Ces paramètres qui sont la chaleur d'adsorption, l'énergie d'activation, la variation de l'énergie libre Gibbs (ΔG), l'enthalpie (ΔH) et L'entropie (ΔS). Leur calcul est indispensable pour la détermination de la nature du processus de rétention [20].

Des flacons contenant chacun 25 mL d'une solution d'Azorubine, à une concentration initiale de 150 mg/L, ont été ajustés à un pH de 2. Une masse de 0,25 g de biocharbon a ensuite été introduite dans chaque flacon. Les échantillons ont été placés dans un bain-marie thermostatique, successivement réglé à 25 °C, 35 °C et 40 °C. Le système a été soumis à une agitation continue pendant 90 minutes, après quoi les suspensions ont été centrifugées. Les solutions obtenues ont finalement été analysées par spectrophotométrie.

II.7.1. Paramètres thermodynamiques

La relation thermodynamique de Gibbs-Helmholtz : $\Delta G^\circ = -R \times T \times \ln(K_d)$... (4)

La relation obtenue par intégration de Van't Hoff : $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T \times \Delta S^\circ$... (5)

D'après les équations (4) et (5) on a : $R \times T \times \ln(K_d) = -\Delta H^\circ + T \times \Delta S^\circ$... (6)

$$\ln(K_d) = -\left(\frac{\Delta H^\circ}{R \times T}\right) + \left(\frac{1}{R}\right) \Delta S^\circ \quad \dots(7)$$

III. Biocharbon

III.1. Introduction

Le biocharbon a été utilisé par les humains pendant des siècles comme amendement du sol, ce matériau a été reconnu ces dernières années en raison de ses propriétés d'adsorption, qui sont prétendument comparables au charbon actif. Des études suggèrent que le biocharbon est efficace pour éliminer les métaux lourds et autres contaminants des eaux usées municipales ainsi que des eaux usées industrielles [27,28,29]. Par conséquent, la production et la distribution commerciale de biocharbon continuent de croître à l'échelle internationale, et ses applications se diversifient et augmentent par rapport à ses premières utilisations comme amendement du sol. Le charbon actif partage certains éléments communs avec le biocharbon, il est principalement utilisé pour l'adsorption, ce qui le rend parfait pour filtrer les composés

organiques nocifs à la fois du gaz et de l'eau [30]. Les différences entre le charbon actif et le biocharbon sont faibles, mais elles peuvent jouer un rôle énorme dans la fonction du produit final. Les différences sont toutes dues à des processus légèrement différents au cours de la production, ce qui permet d'optimiser l'utilisation finale des produits à base de carbone. À cette fin, il est important d'étudier les impacts environnementaux du biocharbon par rapport à d'autres matériaux comme le charbon actif.

III.2. Définition du charbon actif

Le charbon actif est un matériau efficace pour éliminer les polluants organiques et inorganiques de l'eau potable. Selon une étude publiée dans la revue *Environmental Science & Technology* en 2015, le charbon actif est capable d'éliminer les contaminants émergents tels que les produits pharmaceutiques et les produits chimiques perfluorés, qui sont souvent présents dans l'eau potable [31].

L'utilisation de charbon actif peut réduire la quantité de produits chimiques nécessaires pour traiter l'eau potable, réduisant ainsi les coûts et les impacts environnementaux de ces produits chimiques. Selon une étude publiée dans la revue *Water Research* en 2016, l'utilisation de charbon actif pour traiter l'eau potable peut réduire la quantité de chlore nécessaire pour désinfecter l'eau, réduisant ainsi la production de sous-produits de désinfection potentiellement dangereux pour la santé humaine [32].

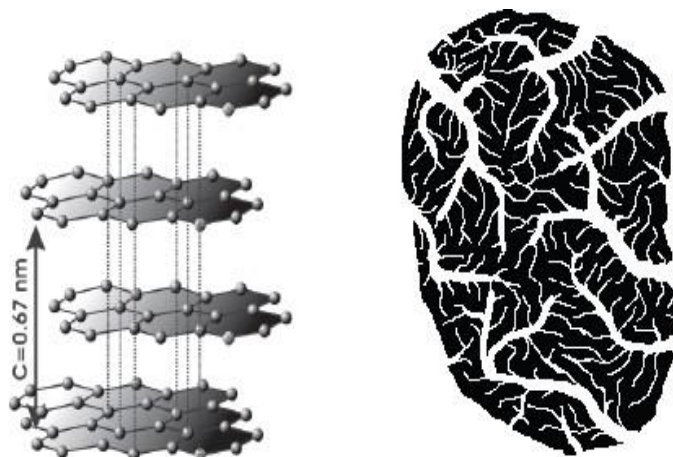


Figure III.1 : Structure chimique et poreuse du charbon actif.

III.3. Biomasse

Le biocharbon étant un produit issu de la biomasse, la biomasse désigne l'ensemble des matières organiques pouvant se transformer en énergie. On entend par matière organique aussi bien les matières d'origine végétale (résidus alimentaires, bois, feuilles...) que celles d'origine animale (cadavres d'animaux, être vivant du sol).

III.4. Définition du déchet

Les déchets sont de la matière abandonnée, considérée comme inutilisable et sans valeur, voire à valeur négative, par une société, dans un contexte donné et à une période bien déterminée de sa marche évolutive. Or, la matière étant elle-même source de matière, celle constitutive des déchets, composée de molécules complexes et organisées, représente-t-elle a priori une ressource potentiellement valorisable.

Les déchets résultant de la transformation des matières premières ont en général peu ou pas de valeur marchande. Ainsi, l'utilisation de ces sous-produits en tant que matériau vise à les valoriser et à prévenir d'éventuelles conséquences dommageables pour l'environnement et la santé. En ce qui a trait à l'adsorption de polluants, les matériaux les plus recherchés sont ceux ayant une teneur élevée en carbone. Les récentes décennies ont en effet vu la publication de nombreux travaux relatifs à l'utilisation des déchets d'animaux comme supports d'adsorption (forme naturelle / charbon actif). Ces déchets sont disponibles en grandes quantités dans le monde, en conséquence des quantités énormes de ces produits sont rejetées.

III.5. Valorisation du déchet étudié (os de poulet)

Le biocharbon, en particulier celui issu de la biomasse résiduelle, suscite un intérêt considérable en raison de sa grande surface spécifique, de sa structure poreuse, de ses avantages économiques et environnementaux, ainsi que de la disponibilité de ses groupes fonctionnels de surface [33].

Les biocharbons issus de déchets animaux sont particulièrement attractifs en raison de leur abondance, de leur teneur intrinsèque en minéraux et de leur faible coût, des caractéristiques susceptibles d'améliorer leurs performances d'adsorption. Des recherches récentes ont exploré divers déchets animaux et agricoles, tels que les coquilles d'œufs [34], les arêtes de poisson [35] et les os de bovins [36], comme précurseurs pour la préparation de biochar. Ces

matériaux possèdent des structures poreuses et sont riches en phosphate de calcium, ce qui les rend favorables aux processus d'adsorption. Les études fondamentales sur l'adsorption soulignent que la porosité, la chimie de surface et les mécanismes d'interaction jouent un rôle crucial dans l'efficacité de l'adsorption [37]. Dans ce mémoire on a choisie l'os de poulet

III.5.1. Os de poulet

Les déchets d'os de poulet constituent un sous-produit majeur de l'industrie avicole et sont générés en très grandes quantités à travers le monde, ce qui engendre d'importants défis environnementaux et de gestion des déchets [38]. Les méthodes d'élimination inappropriées, telles que la mise en décharge et le dépôt à ciel ouvert, entraînent souvent des émissions d'odeurs, une contamination microbienne et une dégradation de l'environnement [39].

Les déchets d'os de poulet sont principalement composés d'hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) incorporée dans une matrice carbonée, ce qui leur confère des avantages particuliers pour le développement de matériaux adsorbants [40]. La pyrolyse améliore la porosité, la surface spécifique et la stabilité des déchets d'os de poulet, tandis que la composante hydroxyapatite favorise les mécanismes d'échange ionique et les interactions électrostatiques. La phase carbonée apporte des groupes fonctionnels oxygénés, tels que les groupes hydroxyle, carboxyle et phosphate, permettant de fortes interactions avec les molécules de colorants par liaisons hydrogène, attraction électrostatique et interactions π - π [39,41].

III.6. Définition du Biocharbon

Le biocharbon (appelé aussi biochar) est le sous-produit de la pyrolyse, une décomposition thermochimique de la matière organique qui se réalise quand de la biomasse est exposée à des températures supérieures à 350 °C en l'absence ou très peu d'oxygène [42].

Cependant, il se distingue du charbon de bois et des matières analogues du fait que celui-ci est produit dans le but d'être appliqué dans le sol comme moyen d'améliorer la fertilité du sol, d'augmenter le stockage de carbone, ou même de favoriser la filtration de l'eau de percolation du sol [42].



Figure III.2 Présentation du biocharbon.

III.7. Methodes de caractérisation

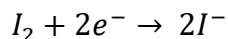
III.7.1. Indice d'iode

- **Définition**

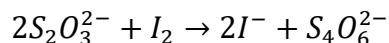
L'indice d'iode fournit une indication sur la microporosité du l'adsorbant. C'est le nombre de milligrammes d'iode adsorbé par gramme d'adsorbat à une concentration résiduelle de 0,02 N [43].

- **Méthode iodométrique**

L'iodométrie implique l'utilisation d'une solution titrée d'iode pour les réactions. Cette méthode est liée au titrage de l'iode qui est libéré lors de diverses réactions chimiques.



L'analyse iodométrique repose sur des réactions d'oxydoréduction. Lorsqu'on ajoute de l'iode libre à une solution de thiosulfate de sodium, qui agit comme un réducteur, la réaction suivante se produit :



III.7.2. Indice du Bleu de Méthylène

- **Définition**

L'indice du bleu de méthylène est le nombre de milligrammes du bleu de méthylène adsorbé par un gramme de biocharbon. Il est déterminé suivant la norme

ChemvironCarboncompanymethod TM-11 [5]. Il donne une idée sur la surface disponible pour les adsorbants micro et mésoporeux. La surface occupée par une molécule du bleu de méthylène est prise égale à $119 \text{ \AA}^2$ [6].

III.8. Utilisation du biocharbon

Le biocharbon est peu coûteux et peut être facilement préparé à partir de diverses ressources en utilisant des procédés thermochimiques avec des applications étendues d'une manière rentable par rapport aux matériaux de pétrochimie ou d'autres procédés chimiques. Combinant ses propriétés uniques, telles qu'une surface relativement grande, un volume poreux élevé, une stabilité à long terme et des groupes fonctionnels de surface enrichis, le biocharbon peut être utilisé à de nombreuses fins, telles que le traitement des eaux usées, précurseur de catalyseurs, amendement des sols, additif pour la digestion anaérobie et le compostage et le stockage d'énergie [44].

IV. Généralité sur les colorants

IV.1. Définition

Les colorants sont des substances colorées, naturelles ou synthétiques, qui ont la capacité de teindre les fibres végétales et animales de façon durable. Lorsqu'un colorant est mis en contact avec un support dans des conditions appropriées, il se fixe sur ce dernier en lui communiquant une certaine couleur [16, 17].

Les colorants se caractérisent par leur capacité à absorber les rayonnements lumineux dans le spectre visible (de 400 à 700 nm). Ils se différencient par leur structure chimique, organique ou inorganique [19, 45]. Dans notre étude. Dans notre étude, nous avons choisi deux colorants (Azorubine, Rhodamine B) comme modèle représentatif des polluants organiques.

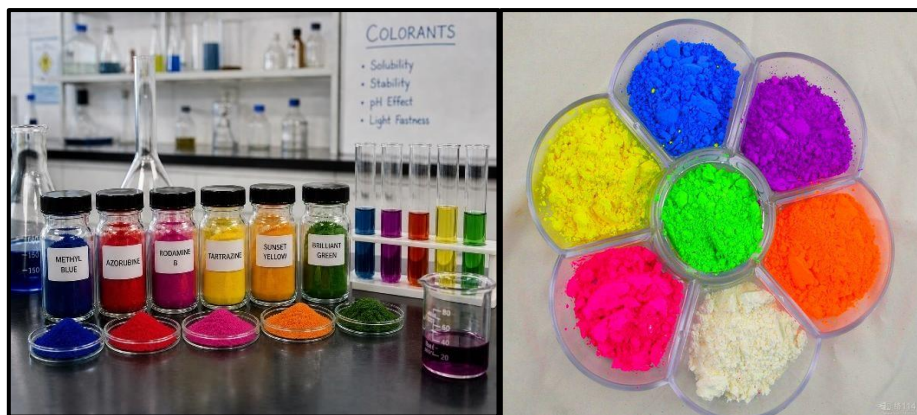


Figure IV.1 Les colorants alimentaires et industrielles.

IV.2. Les constituants d'un colorant

Les colorants organiques sont composés de deux parties :

- **Groupes chromophores** : des groupes insaturés responsables de leurs colorations et de leur faculté d'absorption dans l'UV/visible. Exemple : $C=C$, $N=N$, $C=O$ et $N=O$
- **Groupes auxochromes** : Il s'agit des groupes acides ($COOH$, $SO_3H...$) ou basiques (OH , $-NH_2$, $-NHR$, $-NR_2$) qui font que les colorants s'attachent aux substrats, c'est-à-dire qu'ils forment les liaisons avec des substrats. Ils ont aussi un pouvoir de modifier les propriétés d'un colorant (la longueur d'onde donc la couleur) [18].

Tableau IV.1 Principaux groupements chromophores et auxochromes [19].

Groupements chromophores	Groupements auxochromes
Azo ($-N=N-$)	Amino ($-NH_2$)
Nitroso ($-NO$ ou $-N-OH$)	Méthylamino ($-NHCH_3$)
Carbonyl ($=C=O$)	Diméthylamino ($-N(CH_3)_2$)
Vinyl ($-C=C-$)	Hydroxyl ($-HO$)
Nitro ($-NO_2$ ou $=NO-OH$)	Alkoxy ($-OR$)
Sulphure ($>C=S$)	Groupements donneurs d'électrons

IV.3. Classification des colorants

Les colorants présentent une diverse structure considérable et ils sont classifiés de plusieurs manières, par leur structure chimique et par leur application au type de fibre. Les colorants peuvent être également classifiés suivant leur solubilité [45].

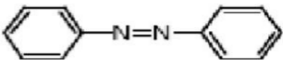
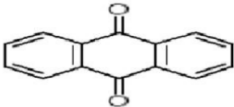
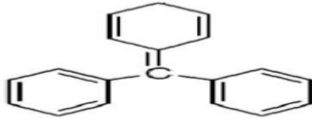
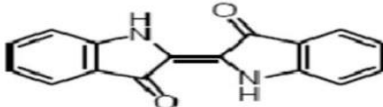
Tableau IV. 2 Les Colorants distinctifs utilisés dans les opérations de coloration du textile [8].

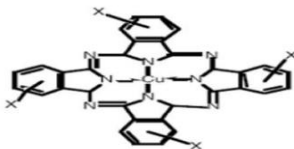
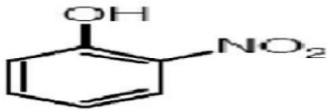
classe de colorant	description
acides	Composés anioniques, hydrosolubles
Basiques	Hydrosolubles, appliqués dans les bains de teinture faiblement acides ; colorants très lumineux
Directs	Composés hydrosolubles et anioniques ; peut être appliqué directement à cellulosique sans mordant (ou métaux comme le chrome et le cuivre)
Dispersé	non hydrosoluble
réactifs	Composés hydrosolubles et anioniques ; la classe la plus grande de colorant
Soufrés	Composés organiques contenant du soufre
De Cuve	Insoluble dans l'eau ; les colorants les plus anciens ; plus complexe chimiquement.

IV.4. Classification Chimique

Le classement des colorants selon leur structure chimique repose sur la nature du groupe chromophore.

Tableau IV.3 Famille des colorants.

Colorants	Structure	réf
Les colorants azoïques		[46]
Les colorants anthraquinoniques		[46]
Les colorants triphénylméthanes		[47]
Les colorants indigoïdes		[46]

Les colorants xanthènes		[46]
Les phthalocyanines		[47]
Les colorants nitrés et nitrosés		[47]

IV.5. Classification tinctoriale

On distingue différentes catégories tinctoriales définies cette fois par les auxochromes. Les plus importants sont :

IV.5.1. Colorants acides ou anioniques

Ces colorants sont utilisés pour teindre les fibres animales (laine et soie) et quelques fibres acryliques modifiés (nylon) en milieu légèrement acide. Ils présentent des groupements sulfonates ou carboxylates ce qui les rend solubles dans l'eau. Ces groupements forment des liaisons ioniques avec des groupements amines des substrats [48]. Le colorant le plus importants de cette classe est l'Azorubine qui fera objet de notre étude.

IV.5.2. Colorants basiques ou cationiques

Les colorants basiques présentent des groupes basiques tels que les amines et les ions hydroxyles. Ce qui fait qu'ils soient bien solubles dans l'eau. Ces colorants permettent des nuances très vives et résistantes sur les fibres acryliques grâce aux liaisons entre les sites cationiques des colorants et les sites anioniques des fibres [49]. Le colorant le plus importants de cette classe est le Rhodamine B qui fera objet de notre étude.

IV.6. Colorants choisis pour l'étude

IV.6.1. Azorubine

Le colorant alimentaire Rouge Acide 14, également connu sous les noms de Carmoisine, Azorubine ou E122, est un colorant rouge synthétique de la famille des colorants azoïques utilisé dans divers produits alimentaires, cosmétiques et médicaux pour sa capacité à colorer en rouge, mais sa consommation est controversée en raison de ses effets nocifs sur la santé, notamment son association avec des réactions allergiques et des risques cancérigènes [22].

- **Caractéristique physique et chimique**

Formule chimique : $C_{20}H_{12}N_2Na_2O_7S_2$.

Masse molaire : 502,44 g/mol.

Famille : Colorants azoïques

Aspect : Poudre rouge, soluble dans l'eau, inodore.

La longueur d'onde : $\lambda = 515$ nm.

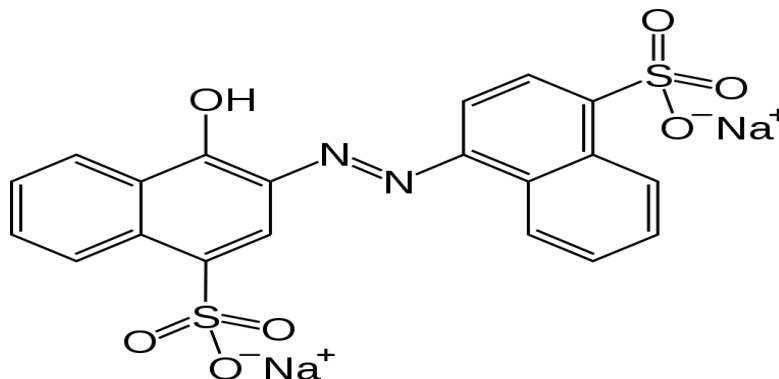


Figure IV.2 Structure chimique d'Azorubine.

- **Les avantages et les inconvénients**

Tableau IV.4 Les avantages et les inconvénients d'Azorubine [50,51,52].

Avantages	Inconvénient
• Très soluble dans l'eau : facilite la préparation des solutions et des essais expérimentaux.	• Structure azoïque stable : peut être difficile à éliminer complètement dans certains procédés.

-
- **Couleur intense** : permet une mesure simple par spectrophotométrie UV-Visible avec une bonne précision.
 - **Stabilité chimique relativement élevée** : utile pour étudier les performances des adsorbants sur plusieurs conditions expérimentales.
 - **Colorant anionique** : intéressant pour étudier les interactions électrostatiques avec différents adsorbants.
 - **Large utilisation industrielle** : les résultats obtenus peuvent être appliqués au traitement des eaux usées des industries alimentaires et textiles.
 - **Compétition avec d'autres ions** : dans les eaux réelles, ce qui peut diminuer l'efficacité d'adsorption.
 - **Sensibilité au pH** : la capacité d'adsorption varie fortement selon le pH du milieu.
 - **Toxique** : Peut former des sous-produits toxiques après dégradation partielle.
 - **Molécule relativement volumineuse** : diffusion plus lente dans certains adsorbants microporeux.
-

- **Utilisations**

L'Azorubine est largement utilisée en :

- **Industrie alimentaire** : boissons, confiseries, desserts, sirops, produits laitiers. Elle est connue sous le code alimentaire E122.
- **Industrie pharmaceutique** : les comprimés, les gélules, les sirops médicamenteux,
- **Industrie textile** : L'Azorubine est employée pour la coloration de certaines fibres textiles grâce à sa bonne stabilité chimique et sa forte intensité colorante.
- **Études d'adsorption et traitement des eaux** : l'adsorption, les biocharbons, les charbons actifs, le traitement des eaux usées.

IV.6.2. Colorant Rhodamine B

Le Rhodamine B est un colorant fluorométrique utilisé dans la recherche scientifique, le traçage hydrologique, l'imagerie en biologique et la teinture industrielle en raison de ses propriétés photo-physiques exceptionnelles et de sa forte solubilité.

- **Caractéristique physique et chimique**

Formule chimique : $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$

Masse molaire : 479,02 g/mol

Famille : Colorants xanthènes

Aspect : Poudre cristalline vert foncé à rouge violacé, très soluble dans l'eau, inodore.

La longueur d'onde : $\lambda = 552$ nm.

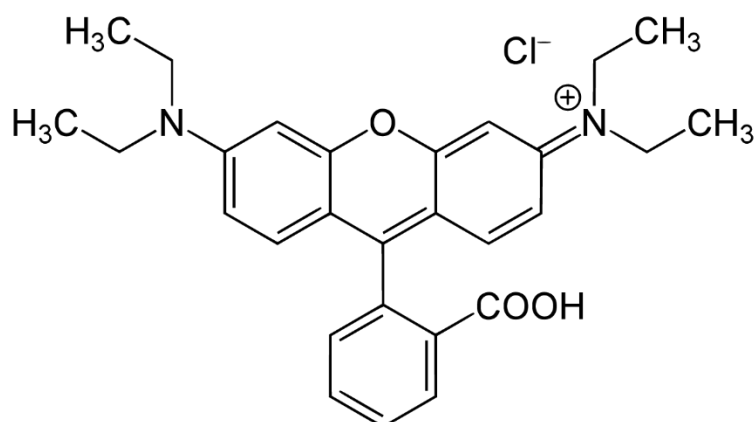


Figure IV.3 Structure chimique de Rhodamine B.

- **Les avantages et les inconvénients**

Tableau IV.5 Les avantages et les inconvénients de Rhodamine B [50,51,52].

Avantages	Inconvénient
• Très forte fluorescence : facilite la détection à très faible concentration. • Couleur intense : permet une mesure simple par spectrophotométrie UV-Visible avec une bonne précision. • Stabilité chimique relativement élevée : utile pour étudier les performances des adsorbants sur plusieurs conditions expérimentales. • Colorant cationique : utile pour l'étude des interactions avec les surfaces négatives.	• Structure xanthénique stable : ce qui cause une Faible biodégradabilité • Potentiel cancérigène et mutagène : lors d'expositions prolongées. • Sensibilité au pH : influençant fortement l'adsorption. • Toxique : Toxicité élevée pour les organismes aquatiques et humains.

-
- **Large utilisation industrielle :**
Utilisé comme traceur fluorescent en laboratoire et hydrologie.
 - **Molécule relativement volumineuse :** diffusion plus lente dans certains adsorbants microporeux.
-

- **Utilisations**

- **Traceur fluorescent :** l'hydrologie, les écoulements d'eau, les études environnementales.
- **Applications biomédicales et microscopie :** microscopie fluorescente, marquage biologique, analyses cellulaires.
- **Industrie textile :** La Rhodamine B sert à colorer certaines fibres textiles et matériaux synthétiques.
- **Études adsorption et dépollution :** l'adsorption, la photocatalyse, les matériaux adsorbants, le traitement des eaux usées.

Partie II : Etude Expérimentale

Introduction

Dans cette partie, nous présentons les caractéristiques physico-chimiques des colorants étudiés, à savoir l'azorubine et la rhodamine B, ainsi que les différentes méthodes de caractérisation appliquées au biocharbon préparé.

L'étude de l'adsorption des deux colorants a été réalisée en tenant compte du choix approprié du colorant et en suivant l'évolution de l'équilibre d'adsorption sous l'influence de plusieurs paramètres expérimentaux, notamment la quantité de biocharbon utilisée, le temps de contact, la température, le pH de la solution ainsi que le pH au point de charge nulle (pH_{zpc}).

I. Matériels et méthodes expérimentales

I.1. Préparation de la matière brute

Dans le contexte de ce projet, nous avons élaboré un biocharbon à partir d'un déchet animal, spécifiquement les os de poulet. La préparation de ce matériau a été effectuée à travers plusieurs phases consécutives, qui sont détaillées ci-dessous :

Un échantillon de déchets de poulet a été récupéré auprès d'un boucher. Les déchets ont d'abord été soigneusement lavés à l'eau afin d'éliminer les impuretés et d'obtenir des os de poulet propres. Les os ont ensuite été séchés, puis découpés en petits morceaux avant d'être broyés jusqu'à l'obtention d'une poudre fine.

La poudre obtenue a été soumise à une opération de tamisage afin de sélectionner une granulométrie inférieure ou égale à 0,14 mm. Par la suite, le matériau a été carbonisé dans un four à une température de 500 °C.

Après l'étape de carbonisation, le produit obtenu a été traité par lavage avec une solution d'Acide chlorhydrique sous agitation. Enfin, le matériau a été rincé plusieurs fois à l'eau distillée jusqu'à l'obtention d'un pH final proche de celui de l'eau distillée, afin d'éliminer toute trace résiduelle d'acide.

Le rendement de production du biocharbon obtenu après la phase de préparation a été estimé à 60 %

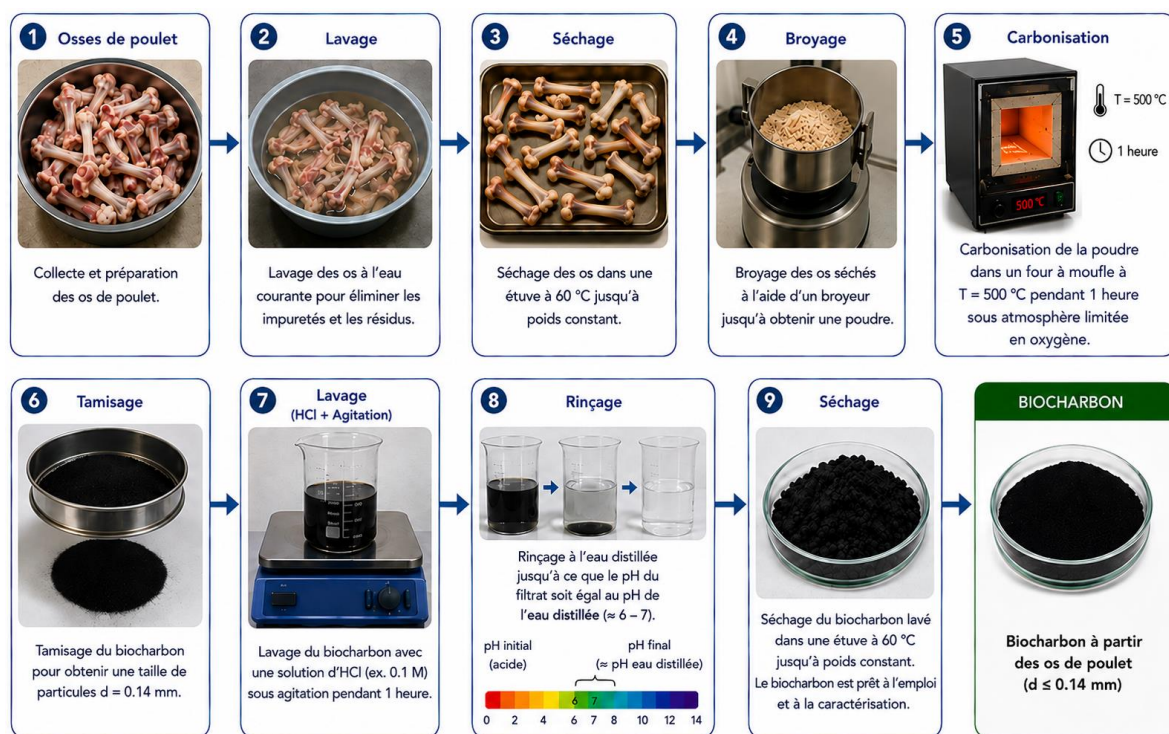


Figure I.1 Protocole de préparation du biocharbon à partir des os de poulet.

I.2. Le Spectrophotomètre

Le Spectrophotomètre est un appareil utilisé pour mesurer l'absorbance ou la transmittance d'une solution à une longueur d'onde donnée. Il permet principalement de déterminer la concentration d'une substance dissoute, notamment les colorants, en analysant l'interaction entre la lumière et la matière.

Le fonctionnement du spectrophotomètre repose sur le passage d'un faisceau lumineux monochromatique à travers une solution contenue dans une cuve. Une partie de la lumière est absorbée par les molécules de la solution, tandis que l'autre partie est transmise. L'appareil mesure alors l'intensité lumineuse avant et après la traversée de l'échantillon afin de calculer l'absorbance.

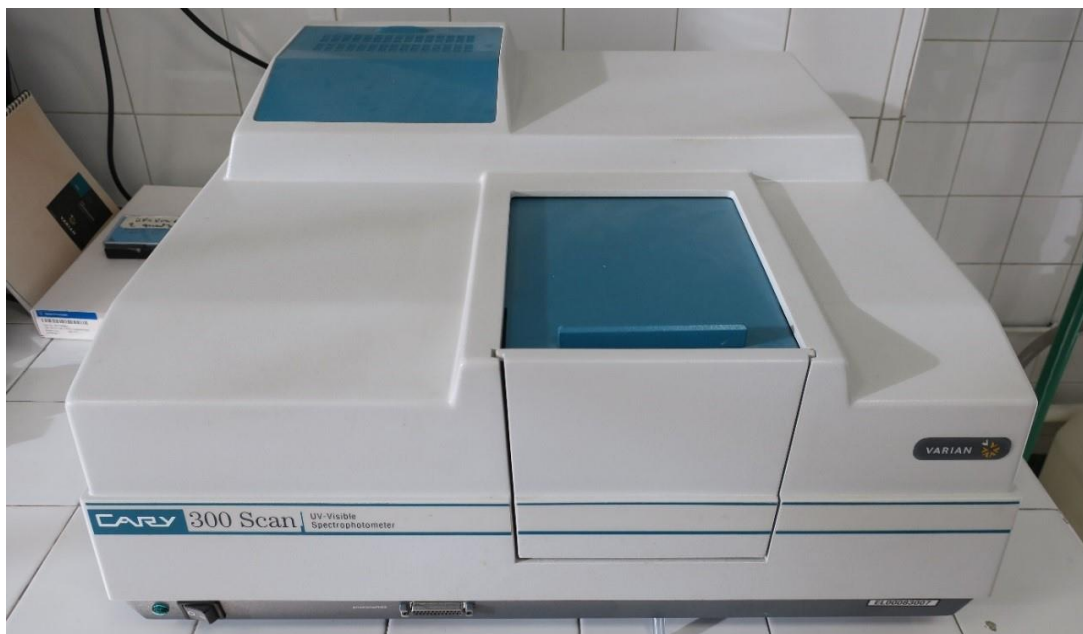


Figure I.2 Spectrophotomètre UV Visible.

Le principe de mesure est basé sur la loi de Beer–Lambert, qui établit une relation proportionnelle entre l'absorbance et la concentration de la solution :

I.2.1. Loi de BEER LAMBERT

Considérons un faisceau de lumière monochromatique traversant une solution d'un corps absorbant sur une épaisseur (ℓ). Soit (I_0) la puissance de rayonnement à l'entrée de la solution, (I) la puissance de rayonnement à la sortie, (C) la concentration du corps absorbant, et (ℓ) l'épaisseur de la cuve.

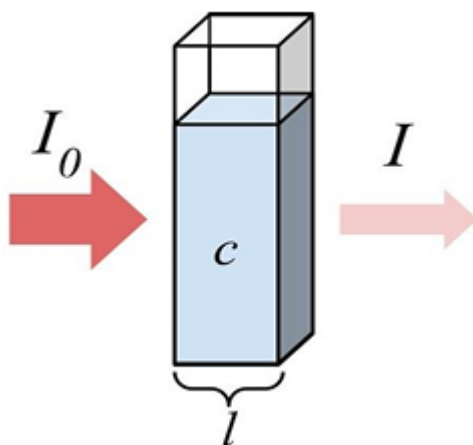


Figure I.3 Principe d'absorption de la lumière monochromatique par un corps absorbant

La loi de BEER LAMBERT s'exprime sous la forme suivante :

$$Abs = \varepsilon \times l \times C \quad \dots(8)$$

Avec :

T : facteur de transmission ou transmittance.

Abs : absorbance ou densité optique.

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

I, I₀ : intensité du faisceau émergent et incident.

ε : coefficient spécifique d'absorbance.

l : longueur de la cuve en cm

I.3. Colorants étudiés

I.3.1. Préparation de solutions

- **Préparation de solution mère**

En utilisant une balance analytique et une spatule, nous avons pesé dans une fiole jaugée de 500 mL, 0,5 g de colorant (chaque colorant dans une fiole séparé) et compléter avec l'eau distillé jusqu'au trait de jauge et on l'agite pendant 24h. La concentration correspondante est de 1000 mg/L. À partir de la solution mère, nous avons réalisé l'ensemble des protocoles expérimentaux de cette étude

- **Préparation de solution fille**

À partir de la solution mère (C = 1000 mg/L), on prélève 10 mL que l'on introduit dans une fiole jaugée de 200 mL, puis on complète avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Cette opération permet de préparer deux solutions filles des deux colorants, chacune à une concentration de 50 mg/L.

I.3.2. Établissement des courbes d'étalonnage des deux colorants

Une comparaison de l'absorbance des deux colorants, la rhodamine B et l'azorubine, sera réalisée dans les mêmes conditions expérimentales.

Mode opératoire :

Une masse de 0,1 g de biocharbon a été pesée puis mise en contact avec 25 mL de la solution fille. Le mélange a été agité pendant 2 heures à l'aide d'un agitateur. Après agitation, l'échantillon a été transféré dans un tube et soumis à une centrifugation. Enfin, l'absorbance du surnageant a été mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre.

I.3.3. Comparaison des résultats expérimentaux

Étant donné que l'absorbance mesurée était élevée, la solution de rhodamine B a été diluée dix fois afin de la ramener dans le domaine de linéarité de mesure.

Tableau I.1 Élaboration de la courbe d'étalonnage pour Azorubine.

C(mg/L)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
Abs	0	0,07	0,14	0,25	0,29	0,39	0,44	0,55	0,55

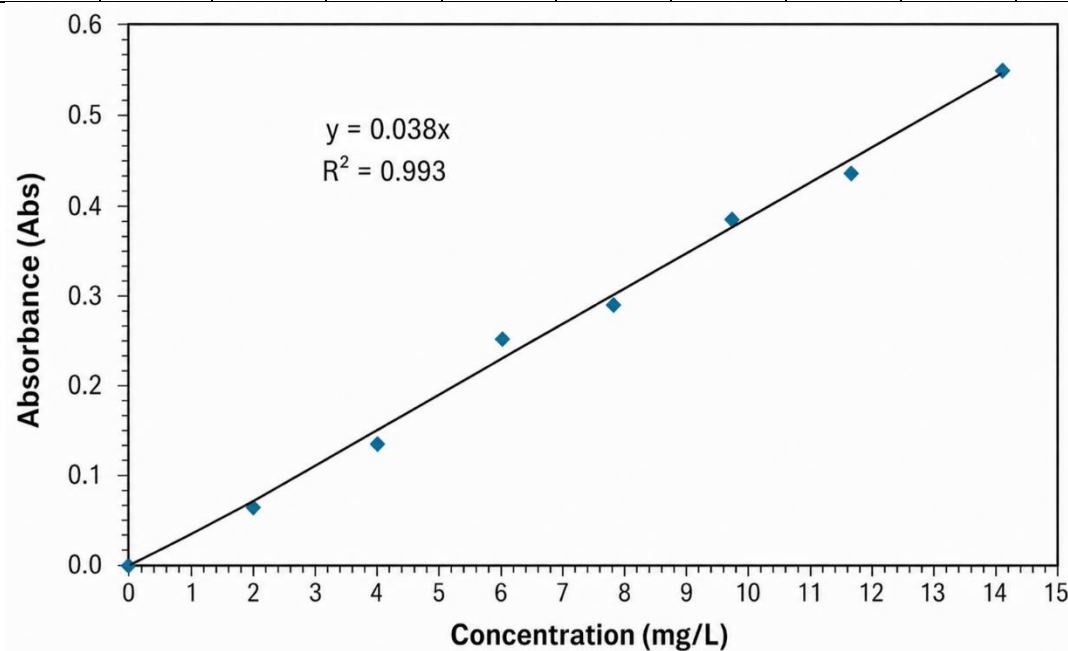
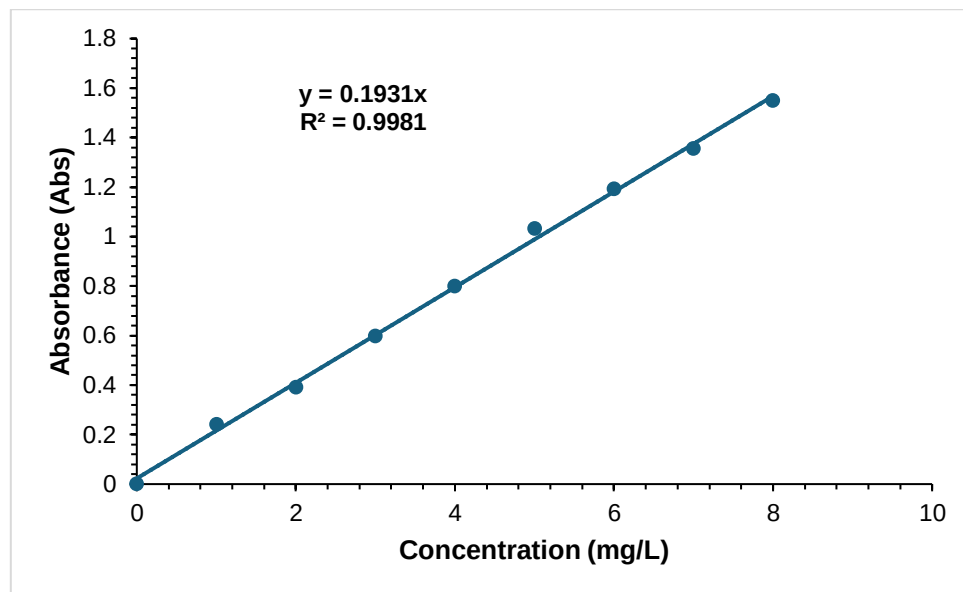


Figure I.4 Courbe d'étalonnage d'azorubine.

Tableau I.2 Élaboration de la courbe d'étalonnage pour Rhodamine B.

C(mg/L)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
abs	0	0,240	0,391	0,597	0,799	1,033	1,192	1,356	1,550

**Figure I.5** Courbe d'étalonnage de Rhodamine B.**Tableau I.3** Résultats obtenus du taux d'élimination des deux colorants.

Coefficient	Azorubine	Rhodamine B
Facteur de dilution	1	10
Abs	0,313	0,313
Ce (mg/L)	8,236	16,209
Qe (mg/g)	10,44	8,44
Taux d'élimination (%)	83,52	67,58

D'après les résultats du tableau I.3, on conclue que, La capacité d'adsorption à l'équilibre (q_e) est plus élevée pour la l'azorubine (10,44 mg/g) que pour le rhodamine B (8,44 mg/g), indiquant une meilleure rétention du premier colorant par le biocharbon. Cette observation est confirmée par le taux d'élimination, également supérieur pour la rhodamine B (83,52 % contre 67,58 %), traduisant une affinité plus importante de ce colorant pour la surface adsorbante. Globalement, le biocharbon présente donc une efficacité d'adsorption plus élevée vis-à-vis de la rhodamine B.

Sur la base de ces résultats, l'**azorubine** a été sélectionnée comme colorant modèle pour la poursuite de l'étude.

I.4. Caractérisation de l'adsorbant

I.4.1. Détermination de l'indice d'iode

Pour déterminer l'indice d'iode de chaque biocharbon il faut :

- 1) Une solution d'acide chlorhydrique de concentration 5 %.
- 2) Une solution d'iode 0,1N.
- 3) Une solution de thiosulfate de sodium de concentration 0,1 N.
- 4) Solution d'iodure de potassium (0,1 N)

- **Préparation des solutions**

Pour préparer une solution d'iode de concentration 0,1 N, commencez par peser 3,82 g d'iodure de potassium cristallisé. Dissolvez-le dans une petite quantité d'eau. Ensuite, pesez 2,538 g d'iode sublimé et ajoutez-le à la solution d'iodure de potassium dans une fiole jaugée. Agitez la fiole, fermée, jusqu'à ce que l'iode soit complètement dissous. Complétez ensuite avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge (200 mL). Enfin, conservez la solution à l'abri de la lumière.

Pour préparer une solution de thiosulfate de sodium ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) de concentration 0,1 N, introduisez 4,964 g de ce sel dans une fiole jaugée de 200 mL. Ajoutez un peu d'eau distillée et agitez jusqu'à dissolution complète du thiosulfate, puis complétez avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.

Mode opératoire

Peser 1g de l'échantillon qui a été séché auparavant à 150°C dans l'étuve pendant 3 heures, le transposer dans un flacon, ajouter 10 cm³ de HCl et remuer doucement jusqu'à ce que l'échantillon soit complètement mouillé, porter à ébullition pendant 30 secondes, laisser refroidir à température ambiante, transposer 100 cm³ de la solution d'iode dans le flacon, le boucher immédiatement et agiter pendant 30 secondes rigoureusement, filtrer, ensuite écarter les 20 à 30 cm³ du filtrat et récupérer le reste dans un bécher. Pipeter 50 cm³ du filtrat dans un erlenmeyer propre de 250 cm³, titrer avec $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ jusqu'à ce que la solution devienne jaune pâle, titrer goutte à goutte jusqu'à ce que la solution devienne transparente, noter le volume V' et finalement calculer la molarité du filtrat R à partir de l'équation suivante :

$$R = (0,001 \cdot V')/2 \quad \dots(9)$$

Calculer le facteur de correction (D) qui est donné par la relation suivante :

$$D = \left(\frac{0,01}{R} \right)^{0,165} \quad \dots(10)$$

Calculer l'indice d'iode par la relation suivante :

$$\text{indice d'iode (mg / g)} = \frac{[1269,1 - (V' \times 27,92)] \times D}{m} \quad \dots(11)$$

m : La masse de biocharbon (g).

V' : Volume de thiosulfate pour le titrage à blanc.

V : Volume de thiosulfate pour le titrage après adsorption.

N : La normalité de la solution de thiosulfate utilisée.

I.4.2. Détermination de l'indice Bleu Méthylène

Pour déterminer l'indice de BM de chaque biocharbon, il faut :

- 1- Une solution d'acide acétique (0,25%).
- 2- Une solution d'acide acétique (50%).
- 3- Une solution de BM de concentration (1200mg /L)
- 4- Pipeter des concentrations différentes de solution de BM (1200mg/L), les mettre dans des fioles 100 mL et diluer avec acide acétique (0,25%) jusqu'à trait de jauge (1L).

- **Préparation des solutions**

Pour préparer une solution d'acide acétique (0,25%). On prend 2,5mL d'acide acétique fumant dans 900ml d'eau distillée dans une fiole de 1L et diluer jusqu'à trait de jauge. Pour préparer une solution d'acide acétique (50%). On prend 253,11ml d'acide acétique fumant dans une fiole et diluer jusqu'à trait de jauge.

Pour préparer une solution de BM de concentration (1200mg). On pèse 1,2g de BM et dissoudre dans 100mL d'acide acétique (50%) et diluer jusqu'à trait de jauge (1L). D'après cette solution du BM on prépare une solution intermédiaire de 120mg /L (100mL), on diluer avec la solution d'acide acétique de (0,25%).

- **Mode opératoire**

Pour déterminer l'indice de BM on pèse 0,1g de biocharbon et introduire 25 ml de solution de BM de la concentration 1200 mg /L, puis on fait l'agitation pendant 30 min pour chaque charbon.

Calculer l'indice de BM par la relation suivante :

$$\text{Indices BM (mg/g)} = \frac{(1200 - C_{eq}) * V}{m * 1000} \quad \dots(12)$$

m : la masse du biocharbon (0,1g).

V : le volume de solution (25mL).

- **Détermination de la courbe d'étalonnage du BM**

Chaque étalon a été analysé dans le domaine du UV par spectrophotométrie à la longueur d'onde de 620 nm, qui a été déterminée par balayage. Les résultats obtenus sont regroupés dans le Tableau II.1 et représentés graphiquement sur la Figure II.1.

• **Tableau I.4** Élaboration de la courbe d'étalonnage pour le Bleu Méthylène.

C0	0	2	4	6	8	10
Abs	0	0,23	0,45	0,65	0,81	1,03

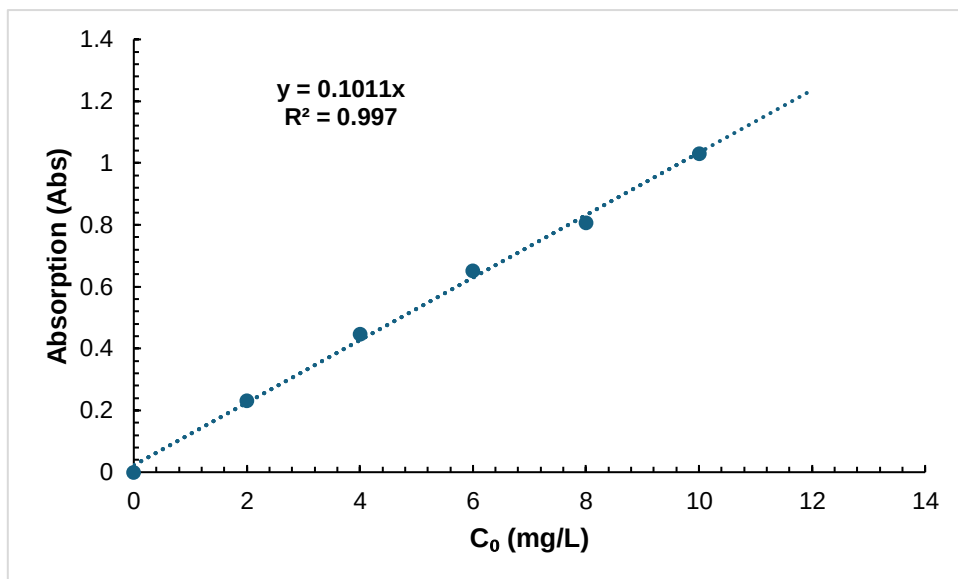


Figure I.6 Courbe d'étalonnage de bleu méthylène avec l'acide acétique.

La figure indique que l'équation décrivant l'absorbance en relation avec la concentration du l'acide acétique est $[Abs = 0,1011 \times C]$, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,997$. Ce qui peut être perçu comme une bonne adéquation linéaire. On se sert de cette équation afin de déterminer la concentration résiduelle qui est inconnue

- **Evaluation des Indices d'iode et de bleu méthylène**

L'indice d'iode et l'indice de bleu de méthylène sont deux indicateurs cruciaux dans la caractérisation du biocharbon, comme le montrent les résultats obtenus :

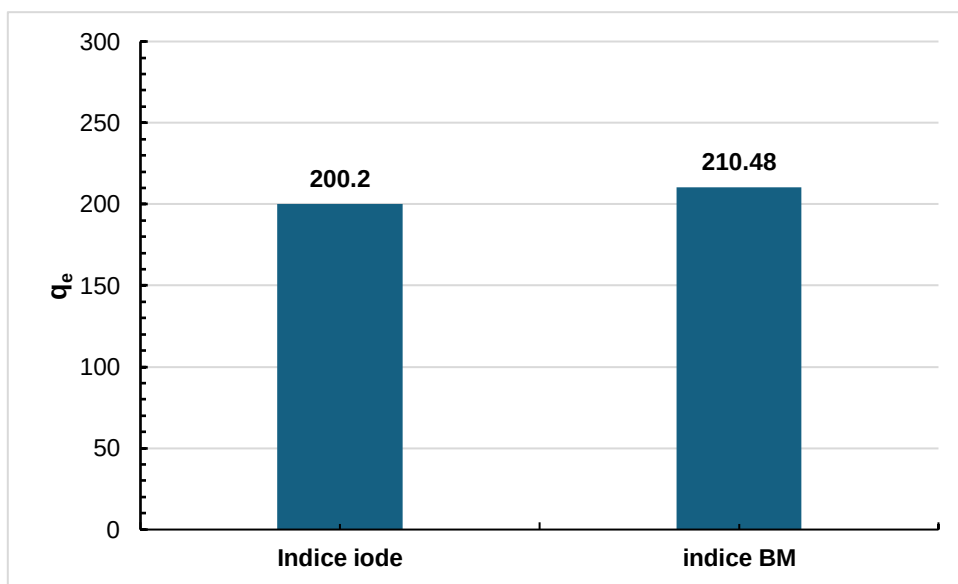


Figure I.7 les valeurs de l'indice de BM et l'indice d'iode.

D'après l'histogramme, on note que le biocharbon préparé a une surface microporeuse moyenne avec un indice d'iode de 200,2 mg/g. Il présente également une mésoporosité moyenne et un indice de Bleu de Méthylène de 210,48 mg/g.

I.4.3. pH de point de charge zéro (pH_{zpc})

Le pH_{zpc} est défini comme étant le quel il y a absence de charge positive ou négative à la surface du l'adsorbant

50 mL d'une solution NaCl (0,01 M) sont placés dans de flacons à bouchons, le pH est ajusté de 2 à 12 en ajoutant l'hydroxyde de sodium ou l'acide chlorhydrique concentré ; 0,15 g de biocharbon est ensuite ajouté aux solutions de NaCl. Après 48 heures d'agitation le pH_{final} est mesuré. On trace le pH_{final} en fonction du pH_{initial}.

Le pH qui correspond au point d'intersection avec la ligne pH_{final}=pH_{initial} est le pH_{zpc}

- **Evaluation de pH de point de charge zéro (pH_{zpc})**

Le pH_{zpc} désigne la valeur de pH à laquelle la charge nette présente sur la surface du biocharbon est nulle. Les résultats sont présentés comme suit :

Tableau I.5 pH initial et final de la solution de NaCl.

pHi	2,08	4,09	6,03	8,03	9,94	11,34
pHf	5,61	8,25	8,7	8,77	8,89	11,8
DpH	3,53	4,16	2,67	0,68	-1,09	-0,14

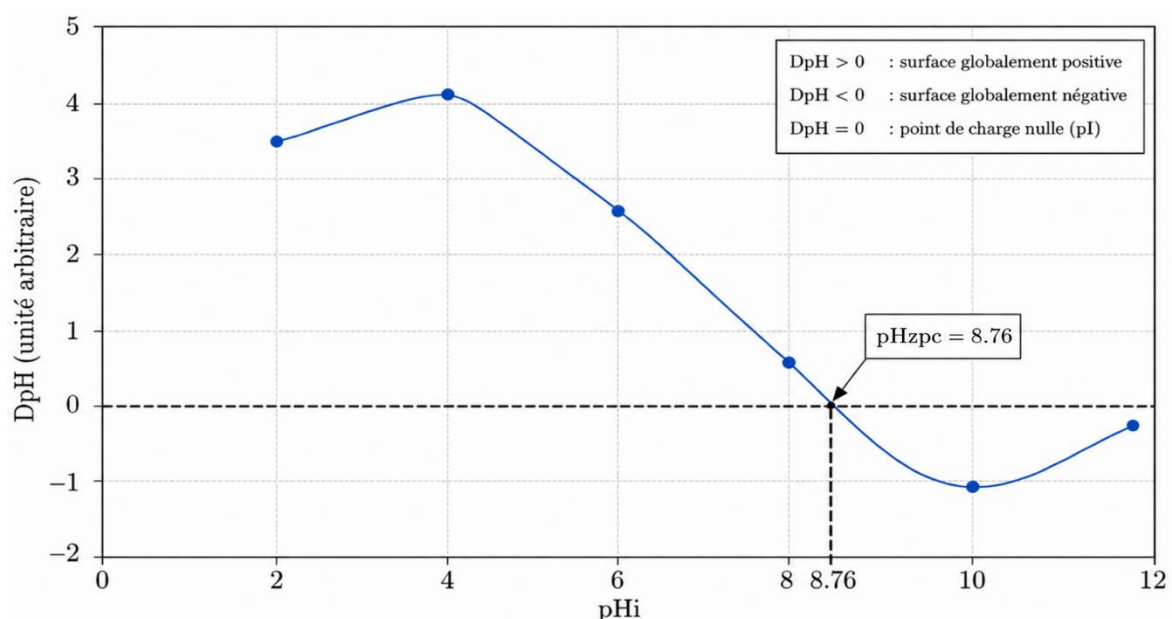


Figure I.8 Point de charge nulle pour le biocharbon.

La surface du biocharbon peut acquérir une charge positive ou négative selon le pH du milieu. Lorsque le pH de la solution est inférieur au pH_{zpc} du biocharbon ($pH < pH_{zpc}$), celui-ci a un comportement basique qui favorise l'adsorption des espèces anioniques. Par contre, si le pH du milieu est supérieur au pH_{zpc} du biocharbon ($pH > pH_{zpc}$), la surface de biocharbon présente une charge négative, qui favorise l'adsorption des espèces cationiques. La valeur de pH_{zpc} est de 8.76 (expliquer l'intersection du graph) et le $pH_{solution} NaCl = 6.36$.

Dans notre cas, le pH au point de charge nulle (pH_{zpc}) est supérieur au pH de la solution, ce qui indique que le biocharbon présente un comportement de surface à caractère basique dans les conditions étudiées. Le choix s'est donc porté sur un colorant anionique pour la réalisation de cette étude.

I.5. Etude paramétrique

I.5.1. Effet du temps de contact

Afin d'étudier le temps de contact nécessaire pour atteindre l'équilibre d'adsorption d'Azorubine, une solution de concentration initiale 50 mg/L a été préparée.

Dans une série de flacons, 0,05 g de biocharbon ont été introduits avec 25 mL de cette solution. Les mélanges ont ensuite été soumis à agitation pendant différentes durées (30, 60, 90, 120, 150 et 180 minutes).

Après chaque temps de contact, les échantillons ont été centrifugés, puis l'absorbance du surnageant a été déterminée par spectrophotométrie afin de suivre l'évolution de l'adsorption.

Les résultats sont :

Tableau I.6 Taux d'élimination du Azorubine en fonction du temps.

t (min)	0	30	60	90	120	150	180
ABS	0	1,025	1,015	0,930	0,966	0,925	0,946
Taux d'élimination (%)	0	46,05	46,57	51,05	49,15	51,31	50,21

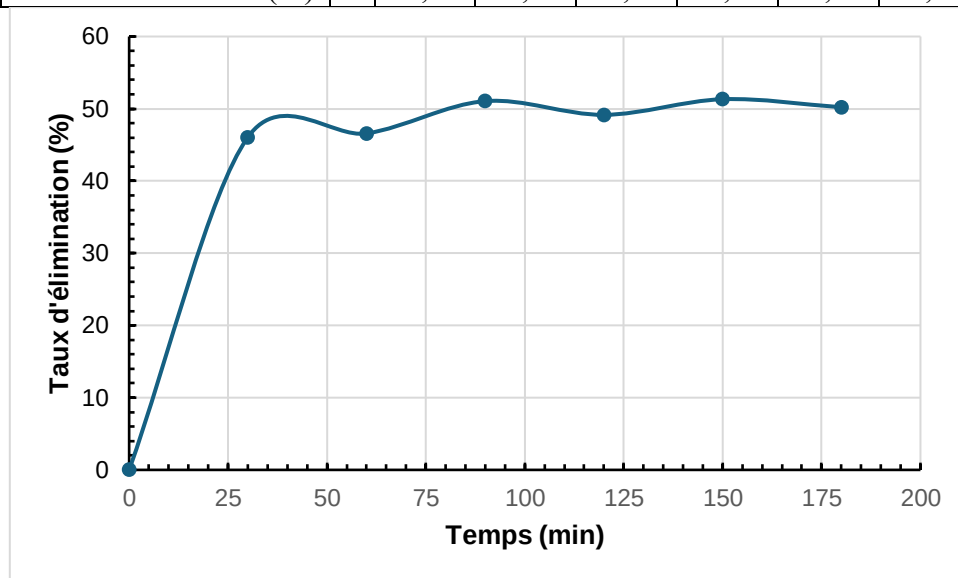


Figure I.9 Taux d'élimination d'azorubine en fonction du temps.

Les résultats indiquent que le temps de contact exerce une influence notable sur l'adsorption du colorant Azorubine. Une adsorption rapide est observée au cours des 40 premières minutes, suivie d'une augmentation plus progressive avec l'augmentation du temps de contact.

Au-delà de 90 minutes, aucune variation significative de la quantité adsorbée n'est constatée, ce qui traduit l'atteinte de l'équilibre d'adsorption. En conséquence, un temps de contact de 90 minutes a été retenu comme temps d'équilibre, comme le montre la courbe présentée dans la figure correspondante.

I.5.2. Effet de dose d'adsorbant

Une série de béchers a été préparée en y introduisant respectivement des masses de 0,05 ; 0,10 ; 0,20 ; 0,25 ; 0,30 ; 0,35 et 0,40 g d'adsorbant. À chacun d'eux, 25 mL d'une solution d'Azorubine de concentration 50 mg/L ont été ajoutés. Les mélanges ont été agités pendant 90 minutes, puis centrifugés. Les concentrations résiduelles ont ensuite été déterminées par spectrophotométrie.

L'effet de la dose sur l'élimination du colorant par le biocharbon est illustré dans le tableau II.4 et la figure II.5.

Tableau I.7 Paramètre de l'effet de dose.

m (g)	0,05	0,1	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
Abs	0,95	0,67	0,45	0,39	0,36	0,36	0,39
C_e (mg/L)	25,08	17,66	11,84	10,34	9,50	9,37	10,32
Taux d'élimination (%)	49,84	64,68	76,32	79,32	81	81,26	79,37

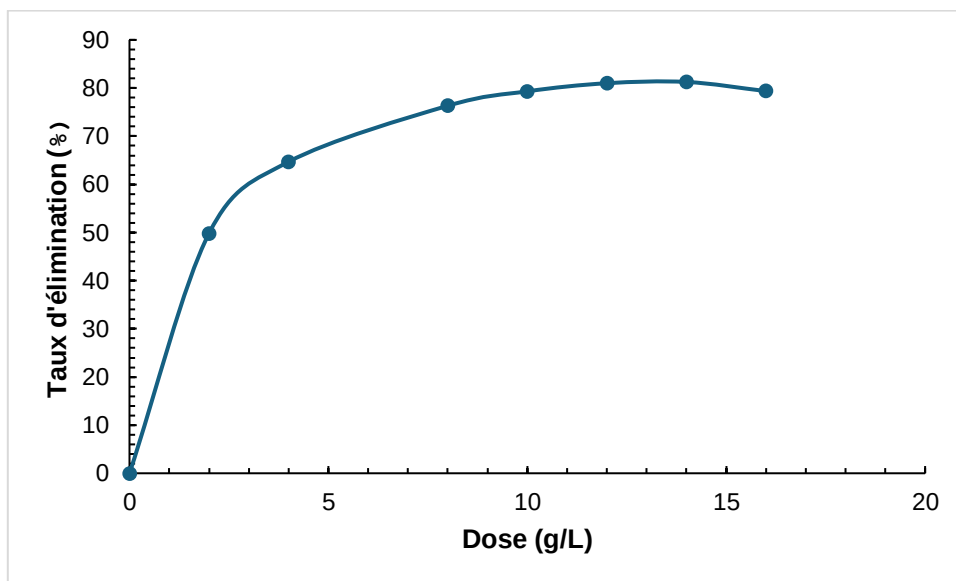


Figure I.10 Taux d'élimination de Azorubine en fonction de la dose.

La figure met en évidence une augmentation de la quantité d'Azorubine adsorbée à l'équilibre en fonction du taux d'élimination, jusqu'à atteindre un maximum pour une dose

d'adsorbant de **10 g/L**. En conséquence, cette dose optimale a été retenue pour l'ensemble des expériences d'adsorption.

I.5.3. L'effet de pH de solution

Le pH (potentiel hydrogène) est un indicateur de l'acidité ou de l'alcalinité d'une solution aqueuse. Il varie sur une échelle logarithmique de 0 à 14 :

- Une solution est acide si $\text{pH} < 7$
- Neutre si $\text{pH} = 7$
- Basique si $\text{pH} > 7$.

Dans cette étude, l'effet du pH sur la capacité d'adsorption de l'Azorubine par le biocharbon a été investigué. Des solutions de 25 mL d'Azorubine (50 mg/L) ont été préparées dans une série d'erlenmeyers, avec des pH ajustés à (2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 et $9 \pm 0,1$) à l'aide de solutions de HCl et de NaOH (0,1 N). Chaque solution a ensuite été mise en contact avec 0,25 g de biocharbon.

Les mélanges ont été agités pendant 90 minutes, puis filtrés. Les concentrations à l'équilibre ont été déterminées par spectrophotométrie. Les données obtenues ont permis d'établir la variation du taux d'adsorption en fonction du pH.

Les données obtenues ont permis d'établir la variation du taux d'adsorption en fonction du pH.

Tableau I.8 Effet du pH sur l'adsorption du Azorubine.

pH	2,09	3,08	4,05	5,05	6,05	6,99	8,02	9,01
Taux d'élimination (%)	97,26	95,42	85,42	84,21	81,94	83,42	78,47	82,42

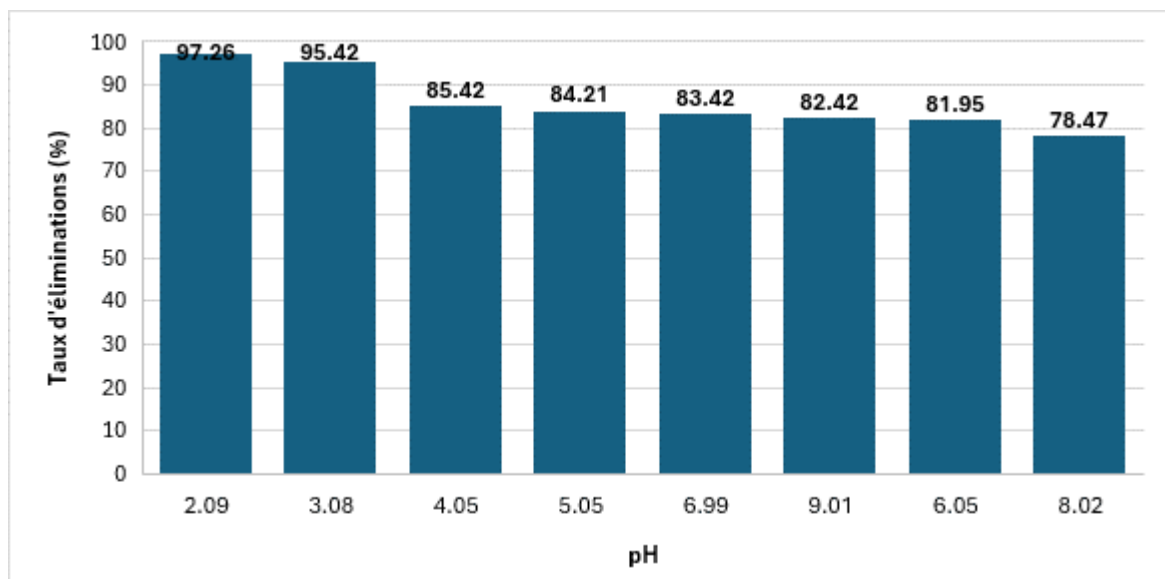


Figure I.11 Taux d'élimination en fonction de pH pour l'adsorption d'azorubine.

D'après les résultats illustrés, le taux d'élimination maximal de l'Azorubine est atteint à pH 2. De manière générale, l'adsorption de ce colorant est favorisée en milieu acide. Par conséquent, ce pH optimal sera retenu pour l'établissement des isothermes d'adsorption.

I.5.4. Isotherme d'adsorption d'Azorubine

Le modèle d'isotherme de Langmuir est l'isotherme d'adsorption le plus connu de tous les isothermes l'adsorption décrivant et la capacité d'adsorption maximale peut être facilement calculée. Le modèle isotherme de Freundlich est également utilisé pour l'étude de l'hétérogénéité des surfaces des adsorbants.

Une série de béchers a été préparée, chacun contenant 25 mL de solution ajustée à pH = 2, avec des concentrations initiales comprises entre 25 et 800 mg/L, en présence de 0,25 g de biocharbon. Les mélanges ont été soumis à agitation pendant 90 minutes, puis centrifugés avant analyse. Les résultats sont :

Tableau I.9 Résultats pour l'isotherme d'adsorption d'Azorubine.

C	F	Abs	C _e	q _e
25	1	0,04	1,05	2,39
50	1	0,06	1,82	4,82
75	1	0,04	1,24	7,38

100	1	0,04	1,24	9,88
150	1	0,16	4,24	14,58
180	1	0,28	7,5	17,25
200	1	0,27	7,13	19,29
250	1	0,6	15,76	23,42
300	1	1,11	29,29	27,07
350	10	0,16	41,58	30,84
400	10	0,20	53,42	34,66
450	10	0,30	77,89	37,21
500	10	0,39	102,37	39,76
600	10	0,56	146,58	45,34
700	10	0,82	216,05	48,39
800	25	0,48	315,79	48,42

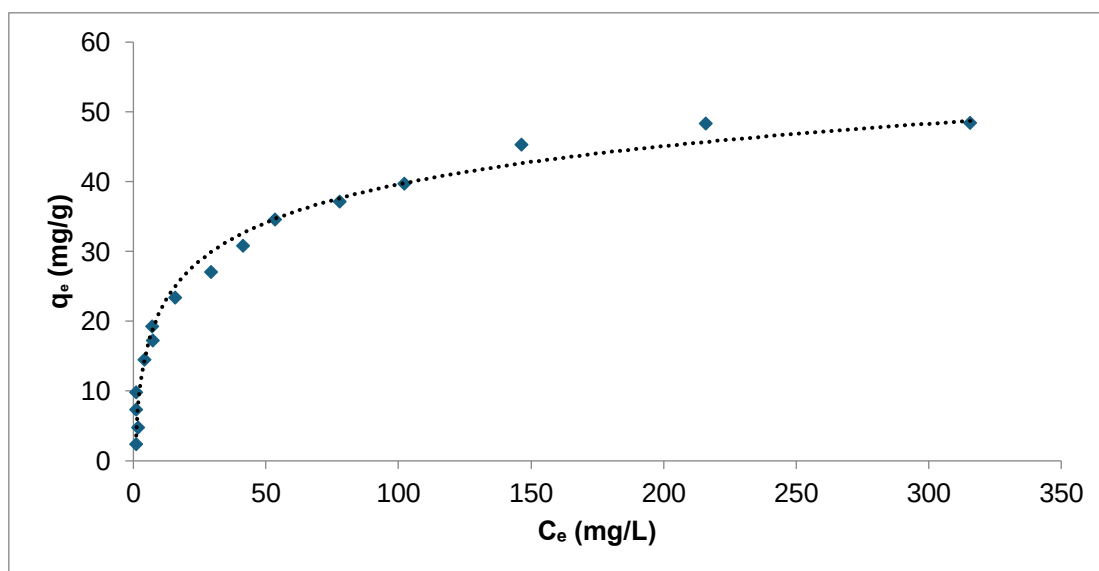


Figure I.12 Courbe isotherme pour l'azorubine.

D'après la figure, la capacité d'adsorption de l'azorubine par l'adsorbant augmente nettement avec l'élévation de la concentration initiale. L'isotherme obtenue présente un plateau, caractéristique de la formation d'une monocouche d'azorubine à la surface de l'adsorbant, traduisant ainsi la saturation des sites actifs.

Ce comportement indique une fixation homogène des molécules d'azorubine sur les sites d'adsorption disponibles, conduisant à la formation d'une couche uniforme. Par conséquent, l'adsorption atteint sa capacité maximale lorsque l'ensemble des sites est occupé. L'allure de l'isotherme correspond au type L selon la classification de Giles.

I.5.5. Les modèles d'isothermes d'adsorption

Il existe plusieurs modèles d'isothermes d'adsorption, les plus couramment utilisés étant : Langmuir, Freundlich et Temkin

I.5.5.1. Modèle Langmuir

Modèle basé sur l'adsorption sur une surface homogène avec une capacité d'adsorption finie.

L'équation de Langmuir :

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_{\max}} + \frac{1}{q_{\max} \times K_L} \quad \dots(13)$$

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

q_e : quantité adsorbée à l'équilibre (mg/g)

$q_{\max}$: capacité maximale d'adsorption correspondant à la monocouche (mg/g)

K_L : constante de Langmuir liée à l'affinité adsorbant–adsorbat (L/mg)

Tableau I.10 Résultats pour le modèle Langmuir.

C_e	1,05	1,82	1,24	1,24	1,24	7,5	7,13	15,76
C_e/q_e	0,44	0,38	0,17	0,13	0,29	0,43	0,47	0,67
C_e	29,29	41,58	53,42	77,89	102,37	146,58	216,05	315,79
C_e/q_e	1,08	1,35	1,54	2,09	2,57	3,23	4,46	6,52

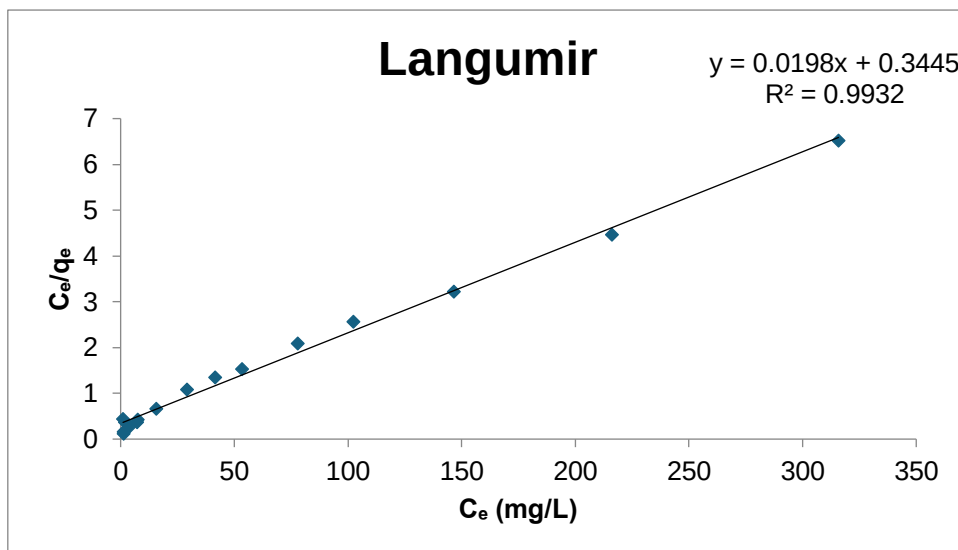


Figure I.13 Isotherme d'adsorption d'Azorubine pour le modèle de Langmuir.

I.5.5.2. Modèle Freundlich

Modèle empirique qui s'applique à une adsorption sur des surfaces hétérogènes et ne suppose pas de saturation.

L'équation de Freundlich :

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad \dots(14)$$

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

q_e : quantité adsorbée à l'équilibre (mg/g)

K_F : constante de Freundlich représentant la capacité d'adsorption (mg/g) (L/mg)^{1/n}

n : facteur d'intensité ou d'hétérogénéité de l'adsorption

$1/n$: indice de l'hétérogénéité de la surface.

Le trace de la courbe $\log Q_e = f(\log C_e)$ donne une droite d'ordonnée à l'origine égale $\log K$ et de pente égale $1/n$.

Tableau I.11 Résultats pour le modèle Freundlich.

Log(C_e)	0,02	0,26	0,09	0,09	0,63	0,88	0,85	1,20
Log(q_e)	0,38	0,68	0,87	0,99	1,16	1,24	1,29	1,37
Log(C_e)	1,47	1,62	1,73	1,89	2,01	2,17	2,33	2,50
Log(q_e)	1,43	1,49	1,54	1,57	1,6	1,66	1,68	1,69

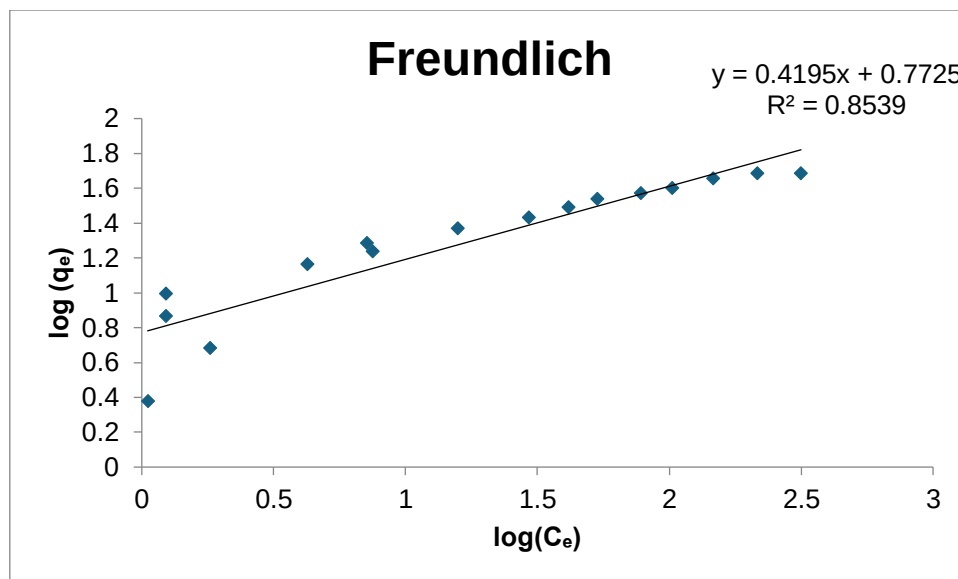


Figure I.14 Isotherme d'adsorption d'Azorubine pour le modèle de Freundlich.

I.5.5.3. Modèle Temkin

Prend en compte les interactions entre les molécules adsorbées et une distribution uniforme des énergies de liaison.

L'équation de Temkin :

$$q_e = B_T \log C_e + B_T \log K_T \quad \dots(15)$$

q_e : quantité adsorbée à l'équilibre (mg/g)

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

B_T : constante de Temkin (mg/g)

K_T : Constante d'équilibre de Temkin (L/g)

Tableau I.12 Résultats pour le modèle Temkin.

Log(Ce)	0,02	0,26	0,09	0,09	0,63	0,88	0,85	1,20
qe	2,39	4,82	7,38	9,88	14,58	17,25	19,29	23,42
Log(Ce)	1,47	1,62	1,73	1,89	2,01	2,17	2,33	2,50
qe	27,07	30,84	34,66	37,21	39,76	45,34	48,39	48,42

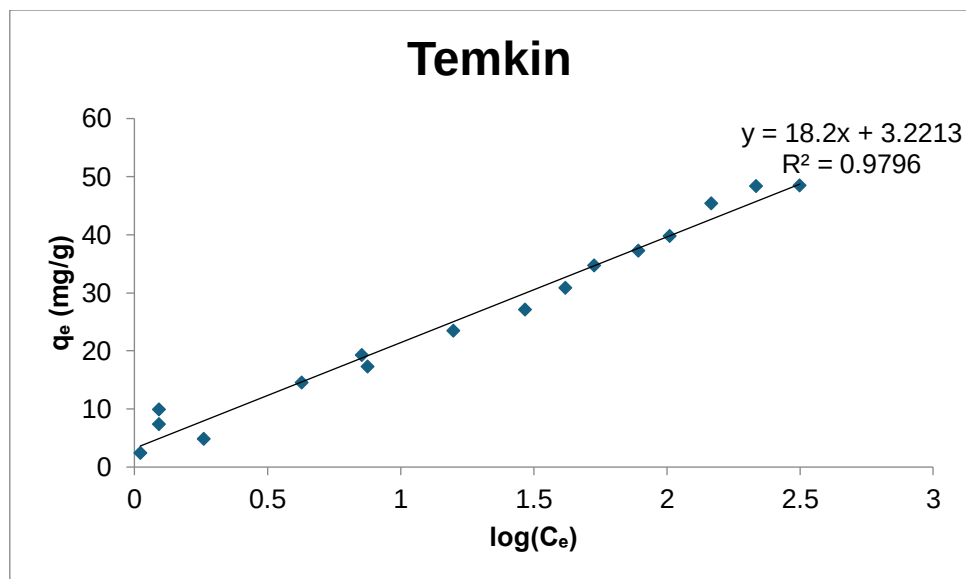


Figure I.15 Isotherme d'adsorption d'Azorubine pour le modèle de Temkin.

I.5.5.4. Résultats d'isotherme obtenue pour les trois modèles

Tableau I.13 Résultats des trois modèles d'isotherme pour l'azorubine.

Modèle de Langmuir		
$q_{max} (mg/g)$	$K_L (L/mg)$	R^2
50,50	0,057	0,99
Modèle de Freundlich		
n	$K_F (L/mg)$	R^2
2,38	5,92	0,85
Modèle de Temkin		
$B_T (J/mol)$	$K_T (L/mg)$	R^2
18,2	1,50	0,97

Au regard des droites obtenues dans les figures 1, 2 et 3, ainsi que des coefficients de détermination (R^2) correspondants respectivement (0,9932 ; 0,8539 et 0,979), il apparaît que le modèle de Langmuir présente le meilleur ajustement aux données expérimentales.

I.5.6. Thermodynamique d'adsorption d'Azorubine

Des flacons contenant chacun 25 mL d'une solution d'Azorubine, à une concentration initiale de 150 mg/L, ont été ajustés à un pH de 2. Une masse de 0,25 g de biocharbon a ensuite été introduite dans chaque flacon. Les échantillons ont été placés dans un bain-marie thermostatique, successivement réglé à 25 °C, 35 °C et 40 °C. Le système a été soumis à une agitation continue pendant 90 minutes, après quoi les suspensions ont été centrifugées. Les solutions obtenues ont finalement été analysées par spectrophotométrie.

Tableau I.14 Paramètre thermodynamique.

C_0 (mg/L)	T (K)	Abs	C_e (mg/L)	q_e (mg/g)	k_d	$\ln(k_d)$	$1/T$ (10^{-3} K^{-1})
150	298,15	0,137	3,61	14,64	4,06	1,40	3,35
150	308,15	0,115	3,03	14,70	4,86	1,58	3,25
150	313,15	0,097	2,55	14,74	5,78	1,75	3,19

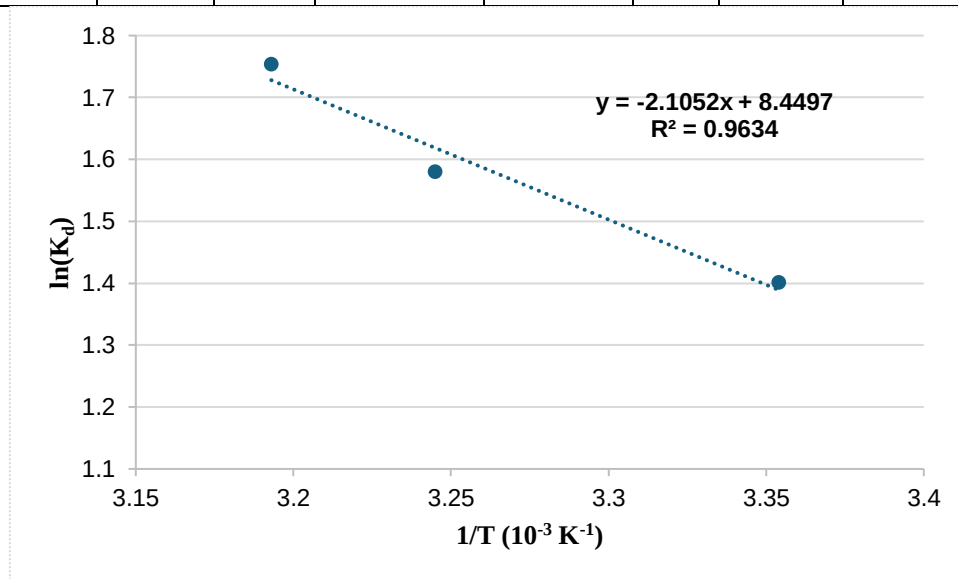


Figure I.16 Représentation graphique de l'équation de van 't Hoff.

Tableau I.15 Paramètres thermodynamiques d'adsorption de Azorubine.

ΔG° (kJ/mol)			ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (J/mol.K)
298 K	308 K	313 K		
-3,474	-4,046	-4,559	17,536	70,35

Les paramètres thermodynamiques déterminés sont présentés dans le Tableau. Les valeurs négatives de l'énergie libre standard ($\Delta G^\circ < 0$) obtenues pour l'ensemble des températures étudiées indiquent que le processus d'adsorption d'Azorubine sur le biocharbon est spontané. De plus, on observe que lorsque la température augmente, les valeurs de ΔG° deviennent de plus en plus négatives, ce qui traduit une augmentation de la spontanéité du processus et confirme que l'élévation de la température favorise l'adsorption.

Par ailleurs, la valeur positive de l'enthalpie standard ($\Delta H^\circ > 0$) révèle le caractère endothermique de l'adsorption. La faible valeur de ΔH° suggère également que le mécanisme mis en jeu correspond principalement à une adsorption physique (physisorption), gouvernée par des interactions faibles de type forces de Van der Waals et interactions électrostatiques. Ainsi, l'augmentation de la température améliore la mobilité des molécules du colorant et facilite leur fixation sur les sites actifs du biocharbon.

En outre, l'entropie standard ($\Delta S^\circ > 0$) présente une valeur positive, ce qui traduit une augmentation du désordre à l'interface solide/liquide au cours du processus d'adsorption. Cela peut être attribué à une réorganisation des molécules du colorant ainsi qu'à des phénomènes de désolvation lors de leur fixation sur la surface du biocharbon. Cette augmentation du désordre favorise également la spontanéité de l'adsorption avec l'élévation de la température.

I.6. Comparaison entre notre biocharbon et ceux de la littérature

Tableau I.16 Comparaison entre différent adsorbant étudiée pour l'adsorption du azorubine

Type Adsorbant	Capacité maximale d'adsorption (mg/g)	Réf
Notre biocharbon	48,42	
Chitosane fonctionnalisé au CTAB (Biopolymère modifié)	492,6	[53]
Déchets d'os d'autruche (Biosorbant brut)	86,67	[54]
Noyaux de dattes modifiés (Diazonium - DS-SD)	16,25	[55]
Déchet naturel (Non modifié - ND)	13,0 à 16,0	[56]
Charbon actif de biomasse (Spécifique azorubine)	5,53	[57]

Conclusion générale

L'objectif principal de cette étude était la valorisation d'un biocharbon à partir de résidus animaux (les os de poulet) et l'appréciation de son efficacité dans l'élimination d'un colorant organique, l'Azorubine, via le processus d'adsorption en solution aqueuse. Cette recherche s'inscrit dans une perspective d'optimisation des déchets organiques et de création de matériaux adsorbants performants, abordables et écologiques pour le traitement des eaux résiduaires industrielles.

Notre travail a été divisé en deux grandes parties : une partie théorique (bibliographique) et une partie expérimentale.

La première partie a été consacrée à une étude bibliographique portant sur la pollution des eaux par les colorants organiques, leurs impacts sur l'environnement et la santé humaine, ainsi que les différentes méthodes de traitement des effluents industriels. Une attention particulière a été accordée au phénomène d'adsorption, considéré comme l'une des techniques les plus efficaces et les plus simples pour l'élimination des polluants organiques. Cette partie a également permis de présenter les principales caractéristiques des adsorbants carbonés, notamment le biocharbon, ainsi que les propriétés physico-chimiques des colorants étudiés, à savoir l'Azorubine et la Rhodamine B.

La deuxième partie a été consacrée à l'étude expérimentale. Dans un premier temps, un biocharbon a été préparé à partir d'os de poulet selon plusieurs étapes comprenant le lavage, le séchage, le broyage, le tamisage, la carbonisation et le traitement chimique à l'acide chlorhydrique. Le matériau obtenu a ensuite été caractérisé à l'aide de l'indice d'iode, de l'indice du bleu de méthylène et de la détermination du pH au point de charge zéro (pH_{ZPC}). Les résultats obtenus ont montré que le biocharbon possède une structure poreuse favorable au phénomène d'adsorption, avec une microporosité et une mésoporosité moyennes. Par ailleurs, la valeur du pH_{ZPC} déterminée expérimentalement (8,76) indique que la surface du biocharbon est chargée positivement à des pH inférieurs à cette valeur, ce qui favorise l'attraction électrostatique des espèces anioniques. Ce résultat a ainsi orienté le choix de l'azorubine comme colorant anionique modèle pour les essais d'adsorption.

Par la suite, une comparaison entre les deux colorants étudiés a été réalisée. Les résultats expérimentaux ont montré que l'Azorubine présente une meilleure affinité vis-à-vis du biocharbon préparé. Pour cette raison, ce colorant a été retenu pour la suite de l'étude d'adsorption.

L'influence de plusieurs paramètres opératoires sur l'adsorption d'Azorubine a ensuite été étudiée, notamment le temps de contact, la dose d'adsorbant, le pH du milieu et la température. Les résultats obtenus ont montré que l'équilibre d'adsorption est atteint après 90 minutes de contact. De plus, l'augmentation de la masse du biocharbon favorise le taux d'élimination jusqu'à une dose optimale de 10 g/L. L'étude de l'effet du pH a révélé que l'adsorption est fortement favorisée en milieu acide, avec un rendement maximal obtenu à $\text{pH} = 2$.

L'étude des isothermes d'adsorption a montré que le modèle de Langmuir représente le meilleur ajustement des données expérimentales avec un coefficient de corrélation élevé, ce qui indique une adsorption en monocouche sur une surface relativement homogène du biocharbon.

L'étude thermodynamique a permis de mettre en évidence le caractère spontané et endothermique du processus d'adsorption. Les valeurs négatives de l'énergie libre de Gibbs ($\Delta G^\circ < 0$) indiquent que l'adsorption d'Azorubine sur le biocharbon se réalise spontanément. Par ailleurs, la valeur positive de l'enthalpie ($\Delta H^\circ > 0$) montre que l'augmentation de la température favorise le phénomène d'adsorption. La valeur positive de l'entropie ($\Delta S^\circ > 0$) traduit une augmentation du désordre à l'interface solide/liquide au cours du processus.

Au terme de cette étude, il peut être conclu que le biocharbon préparé à partir d'os de poulet constitue un adsorbant efficace et prometteur pour l'élimination des colorants organiques présents dans les eaux usées. En plus de son efficacité, ce matériau présente un intérêt environnemental et économique important grâce à la valorisation des déchets animaux.

Enfin, cette étude ouvre plusieurs perspectives de recherche. Dans de futurs travaux, une activation du biocharbon préparé pourra être envisagée afin d'améliorer ses propriétés texturales et ses capacités adsorbantes. Cette étape permettra probablement d'augmenter la surface spécifique et la porosité du matériau, conduisant ainsi à de meilleures performances

Conclusion générale

d'adsorption. La poursuite des recherches pourra également porter sur l'élimination d'autres polluants organiques ou métalliques ainsi que sur l'utilisation de méthodes de caractérisation plus avancées pour une meilleure compréhension des mécanismes d'adsorption.

Références bibliographiques

- [1] J. F. Pankow, Aquatic Chemistry Concepts, Lewis Publishers, Chelsea, Michigan (1991).
- [2] Zhang, X.; Wang, T.; Xu, Z.; Zhang, L.; Dai, Y.; Tang, X.; Tao, R.; Li, R.; Yang, Y.; Tai, Y. Effect of heavy metals in mixed domestic-industrial wastewater on performance of recirculating standing hybrid constructed wetlands (RSHCWs) and their removal. Chemical Engineering Journal 379 (2020) 122363.
- [3] Dutta, M.; Bhattacharjee, S.; De, S. Separation of reactive dyes from textile effluent by hydrolyzed polyacrylonitrile hollow fiber ultrafiltration quantifying the transport of multicomponent species through charged membrane pores. Separation and Purification Technology 234 (2020) 116063.
- [4] Sharma, M.; Halder, A.; Vaish, R. Effect of Ce on piezo/photo catalytic effects of Ba_{0.9}Ca_{0.1}Ce_xTi_{1-x}O₃ ceramics for dye/pharmaceutical waste water treatment. Materials Research Bulletin 122 (2020) 110647.
- [5] Do Nascimento Júnior, W. J.; Aquino, R. V. S.; Barbosa, A. A.; Rocha, O. R. Development of a new PET flow reactor applied to food dyes removal with advanced oxidative processes. Journal of Water Process Engineering 31 (2019) 100823.
- [6] S. Bouacherine, Eliminations des polluants spécifiques par adsorption sur charbon actif et argile traitée et non traitée, Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaadia - Souk-Ahras-Algérie, (2013).
- [7] F. Rouquerol, J. Rouquerol, K. S. W. Sing et coll, "Adsorption by powders and porous solids : principes, methodology and applications", Academic Press 2nd edition, (2014).
- [8] SLASLI M A. Modélisation de l'adsorption par les charbons microporeux : Approches théorique et expérimentale, Thèse de doctorant, Université de Neuchâtel, 3/12/2002.
- [9] D.C. Dobbins, J. Thornton-Manning, D.D. Jones & T.W. Federle, Mineralization potential for phenol in subsurface soils, Journal of Environmental Quality, 16 (1987) 54–58.
- [10] N. Ghalimi et A. Sifer, Essais d'adsorption du phénol et du cuivre sur charbon actif valorisé à base de grignon d'olives, Mémoire d'Ingénieur, Université de Boumerdès, (2006).
- [11] N. Gherbi, Etude expérimentale et identification du processus de rétention des cations métalliques par des matériaux naturels', Thèse de doctorat, Université de

Références bibliographiques

Constantine (2008).

[12] A. Mekarzia, Utilisation du charbon actif préparé à partir du marc de café dans le traitement et l'épuration des eaux, Mémoire de Magister. Ecole Nationale Polytechnique (2000).

[13] M. H. Rachidi, K. Bahja, A. Zrineh, M. Hamad, S. Zaydoun et M. Ferhat, Etude de l'adsorption de l'Octaéthylporphyrine de Nickel sur les apatites phosphocalciques, J. Chim. Phys., 96(4) 706 - 724 (1999).

[14] J.M. Haguenoer, D.Furon, Toxicologie et hygiène industrielles, Tome X, Paris, (1983).

[15] [Source : J. Salles et al. (2019). Pollution des eaux superficielles : état des lieux et enjeux environnementaux.]

[16] (source: https://www.afbiodiversite.fr/sites/default/files/202102/rapport_indicateurs_qualite_eaux_2019.pdf).

[17] Baird C., Cann M., *Environmental Chemistry*, 5^e édition, W.H. Freeman and Company, 2012.

[18] Robinson T., McMullan G., Marchant R., Nigam P., "Remediation of dyes in textile effluent: a critical review", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 77, 2001, pp. 247–255.

[19] Davis M. L., *Introduction to Environmental Engineering*, McGraw-Hill, 2010.

[20] D. Chebli, Traitement des eaux usées industrielles : dégradation des colorants azoïques par un procédé intégré couplant un procédé d'oxydation avancée et un traitement biologique, Thèse de doctorat, Université Farhat Abbas-Sétif-Algérie, (2012).

[21] Habib BOUZID, Les procédés d'adsorption et séparation membranaire, Editions des Itinéraires Scientifiques (ITSC), 2024.

[22] Hawleys condensed chemical dictionary 11th édition

[23] Y. Bentahar, Caractérisation physico-chimique des argiles marocaines : application à l'adsorption, argiles et de colorant cationique, thèse de doctorat,

2011.

[24] F.Bouchemal, S. Achour. Essais d'adsorption de la Tyrosine sur charbon actif en poudree et en grain. Laboratoire de recherche en hydraulique souterraine et de surface. Laryss Journal, (2007).

[25] C.H. Giles, D.Smith, J.Colloid Interf.Sci.47(1974)755-765.

[26] C.E. Chitour, « Chimie physique des phénomènes de surface », OPUAlger(1979).

[27] Han, Y., Boateng, A.A., Qi, P.X., Lima, I.M., Chang, J. Heavy metal and phenol adsorptive properties of biochars from pyrolyzed switchgrass and woody biomass in correlation with surface properties. J. Environ. Manag, 2013, 118, 196-204.

[28] Jiang, T.Y., Jiang, J., Xu, R.K., Li, Z. Adsorption of Pb(II) on variable charge soils amended with rice-straw derived biochar. Chemosphere, 2012, 89, 249-256.

[29] Karim, A.A., Kumar, M., Mohapatra, S., Panda, C.R., Singh, A. Banana peduncle biochar: characteristics and adsorption of hexavalent chromium from aqueous solution, 2015, 7, 1-10.

[30] Hashim A, Alhashimi., Can B Aktas. Life cycle environmental and economic performance of biochar compared with activated carbon: A meta analysis. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 118, 13-26.

[31] Hassler, J. W. Purification with activated carbon: Industrial, commercial, environmental. New York: Chemical Publishing (1974).

[32] (source : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135416305062>).

[33] Adeniyi, A. G., Iwuzor, K. O., Emenike, E. C. et al. Thermochemical co-conversion of biomass-plastic waste to biochar: a review. Green Chemical Engineering, 5(1), 31–49. <https://doi.org/10.1016/j.gce.2023.03.002> (2024).

[34] Ofudje, E. A., Sodiya, E. F., Akinwunmi, F. et al. Eggshell derived calcium oxide nanoparticles for Toluidine blue removal. Desalination and Water Treatment, 247, 294-308 <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28079> (2022).

- [35] Al-Kazragi, M. A.U.R., and Al-Heetimi, D. T. Pretreated fishbone as low cost-adsorbent for cationic dye adsorption from aqueous solutions: equilibrium, optimization, kinetic and thermodynamic study. In *Journal of Physics: Conference Series* 1879(2): 022067). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1879/2/022073> (2021).
- [36] Chaghtmi, R., Trabelsi, A. B. H., Haddad, K. et al. Biochar derived from animal bone waste as an alternative bioadsorbent for an industrial tannery dye removal. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(21), 27461-27475
- [37] Khatri, M., Al-juboori, R., Mehdi, M., et al.. Adsorption Techniques for Dye Removal/Recovery from Industrial Wastewater. In book: *Water Treatment*. <https://doi.org/10.1201/9781003471998-6>
- [38] Muteeb, G., Ansari, K., Eyvaz, M. et al. Removal of methylene blue (MB) dye from water and wastewater using acid-activated chicken bone in a batch adsorption process. *Scientific Reports*, 15(1), 23098. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08341-3> (2025).
- [39] Li, Y., Wang, M., Liu, J. et al. Adsorption/desorption behavior of ionic dyes on sintered bone char. *Materials Chemistry and Physics*, 297, 127405. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127405> (2023).
- [40] Ouzani, A., Zouambia, Y., Maachou, H. et al. Sustainable removal of basic fuchsine and methylene blue dyes using chicken bone biomass: thermodynamics, kinetics, and insights from experimental studies and decision tree with least squares boosting predictive modeling. *Water*, 17(7), 1053. <https://doi.org/10.3390/w17071053> (2025).
- [41] Fawzy, M. E., Ahmed, H. M., and Nassar, H. F. Chicken bone ash as a cost-effective and efficient adsorbent for phenol removal from aqueous solution. *Desalination and Water Treatment*, 281, 255-264. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29141> (2023).
- [42] Chan, K. Y., Xu. Z. Biochar: Nutrient properties and their enhancement. In *Biochar for Environmental Management*, ed, Lehmann, J., and Joseph, S., London: Earthscan publications Ltd, 2009, 67-84.

- [43] N. DOUARA, Etude de la fixation de colorants par un déchet solide modifié chimiquement en mode batch. Mémoire de magister, Université de Mostaganem (2007-2008).
- [44] Zhang, Z., Zhu, Z., Chen, B., Liu, L. Insights into biochar and hydrochar production and applications: A review. *Energy*, 2019, 171, 581-598.
- [45] S. Rangabhashiyam, N. Anu, N. Selvaraj. Sequestration of dye from textile industry wastewater using agricultural waste products as adsorbents. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1 (2013) 629–641.
- [46] Ayalri, *Journal of Hazardous Materials*, Chen, (1996) .(Etude de la réactivité de surface d'argiles naturelles étude de l'adsorption de colorants anioniques. (2011). Thèse Université de Strasbourg, France, p75-86.
- [47] JR W J., WEBER B. VANVLIET, Fundamental concepts for applications of Activated Carbon Adsorption of Organics from the Aqueous Phase. Ann Arbor Science, Michigan, U.S.A. .(1980).
- [48] S. Shore .Colorant and auxiliaries, organic chemistry and application properties. Volume 1-colorants. BTTG-Shirley, Society of dyers and colourists, Manchester, Angleterre. (1990).
- [49] O., Dussart Marmier and B Seraud. ,*la tribune de l'eau.*, (1991). 44, 554, 15-22
- [50] G. Crini, "Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review", *Bioresource Technology*, 97 (9), 1061–1085, 2006.
- [51] G. Crini and E. Lichtfouse, *Adsorption Processes for Water Treatment and Purification*, Springer, Cham, 2018.
- [52] M. Inyang, E. Dickenson, "The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: A review", *Chemosphere*, 134, 232–240, 2015.
- [53] <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov>
- [54] <https://journals.ekb.eg>
- [55] <https://www.sciencedirect.com>

Références bibliographiques

[56] <https://journals.sagepub.com>

[57] <https://e-biblio.univ-mosta.dz>