

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

N° d'ordre : M2...../GP/2025

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Des Procédés

Spécialité : Génie Des Procédés Des Matériaux

Thème

**Etude de l'élimination de la Rhodamine B par le procédé
d'adsorption sur un adsorbant d'origine végétale**

Présenté par

- 1- HACHELAF Yasmine
- 2- FOURLOUL Atika

Soutenu le 03 /06 / 2025 devant le jury composé de :

Président :	Mr.TERMOUL Mourad	MCA	Université de Mostaganem
Examinatrice :	Mme. DOUARA Nadia	MCA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	Mme. ATTOUTI Salima	MCA	Université de Mostaganem
Co-Encadrant	Mr. YASLAM SALAH Gamal	Doctorant	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2024/2025

Remercîments

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Un merci tout particulier à notre encadrante de mémoire, Dr ATTOUTI Salima, pour son accompagnement précieux, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de ce travail. Ses orientations nous ont permis de mener à bien cette recherche.

Nous remercions chaleureusement les membres de jury Dr TERMOUL Mourad d'avoir accepté de présider ce jury de soutenance. Je tiens à remercier Dr DOUARA Nadia d'avoir acceptée d'évaluer ce travail et aussi pour leurs remarques constructives et leur soutien durant ce parcours académique.

Nos remerciements vont également à tous les doctorants de laboratoire de recherche, ALLAL Mohamed ; KHALILI Khadidja ; et AMIAR Soumia Abir, qui ont accepté de partager leurs connaissances et leurs données, enrichissant ainsi notre réflexion.

Un remerciement plus particulier à tous nos enseignants de département de génie des procédés de l'Université Abd El Hamid Ibn Badis.

Enfin, grands Merci à nos familles respectives et nos amis qui nous ont aidés. Nous profitons de l'occasion pour remercier tous ceux qu'ont collaborés de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Dédicaces

- Nous tenons à exprimer notre gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire. Vos conseils, votre soutien et votre confiance ont été notre plus grande force.

Nous dédions ce modeste travail, comme preuve de respect, de gratitude, et de reconnaissance à :

Nos chers parents : Qui n'ont jamais cessé de nous encourager et nous conseiller, Ils nous ont beaucoup aidé tout en long de notre chemin, grâce à leur amour, leur compréhension, leurs sacrifices, leur tendresse, leurs prières et leur patience et leur soutien moral et matériel.

Nos chers frères et sœurs : Pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral, pour leur indulgence en notre faveur qu'ils touchent ici l'affection la plus intime qu'on ressent à leur égard.

Nos amis et collègues : Pour leur compagnie et bons moments passés ensemble. Et tous ceux qui nous sont chers... Merci d'être toujours là pour nous.

Que Dieu vous garde

Atika & Yasmine

Résumé

Ce mémoire porte sur la préparation, la caractérisation et l'application de feuilles d'artichaut, issues de déchets végétaux, comme adsorbant pour l'adsorption du colorant Rhodamine B.

La première étape de l'étude a consisté à préparer une poudre d'artichaut homogène sur le plan granulométrique. La caractérisation du matériau préparé, essentielle pour évaluer sa morphologie et sa porosité, a été réalisée à l'aide de deux indices : l'indice d'Iode et l'indice de Bleu de Méthylène, dont les valeurs obtenues sont respectivement de 104 mg/g et 171.12 mg/g. Le point de charge zéro (pHpzc) a également été déterminé, révélant une valeur de 6,2 ce qui permet de mieux comprendre le mécanisme d'adsorption.

La deuxième partie du travail s'est intéressée à l'étude de l'influence de plusieurs paramètres opératoires sur la capacité d'adsorption de la Rhodamine B, notamment le temps de contact, la dose d'adsorbant et le pH de la solution. Les résultats ont montré que les conditions optimales d'adsorption sont : un temps de contact de 1 heures, une dose de 12 mg/L, et un pH de 2, aboutissant à une capacité maximale d'adsorption de 13,64 mg/g selon le modèle de Langmuir.

L'étude cinétique a indiqué que le processus suit une cinétique de pseudo-deuxième ordre. Par ailleurs, l'étude thermodynamique a révélé que le processus d'adsorption est spontané et endothermique.

Mots clés : Adsorption, feuilles d'artichauts, Rhodamine B.

Abstract

This thesis deals with the preparation, characterization and application of artichoke leaves, derived from plant waste, as an adsorbent for Rhodamine B dye adsorption.

The first stage of the study involved preparing a granulometrically homogeneous artichoke powder. Characterization of the prepared material, essential for assessing its morphology and porosity, was carried out using two indices: the Iodine Index and the Methylene Blue Index, with values of 104 mg/g and 171.12 mg/g respectively. The zero charge point (pHpzc) was also determined, revealing a value of 6.2, which provides a better understanding of the adsorption mechanism.

The second part of the work focused on the influence of several operating parameters on the adsorption capacity of Rhodamine B, notably contact time, adsorbent dose and solution pH. The results showed that the optimum conditions for adsorption are: a contact time of 1 hour, a

dose of 12 mg/L, and a pH of 2, resulting in a maximum adsorption capacity of 13.64 mg/g according to the Langmuir model.

The kinetic study indicated that the process follows pseudo-second-order kinetics. The thermodynamic study revealed that the adsorption process is spontaneous and exothermic.

Key words: Adsorption, artichoke leaves, Rhodamine B.

ملخص

تتناول هذه الأطروحة تحضير وتوصيف وتطبيق أوراق الخرشوف، المشتقة من النفايات النباتية، كمادة ماصة لامتنزاز صبغة الرودامين ب.

تضمنت المرحلة الأولى من الدراسة تحضير مسحوق خرشوف متجانس حبيبي متجانس. تم إجراء توصيف للمادة المحضرة، وهو أمر ضروري لتقييم مورفولوجيتها ومساميتها، باستخدام مؤشرين: مؤشر اليود ومؤشر الميثيلين الأزرق، بقيم 104 ملغم/غم و171.12 ملغم/غم على التوالي. كما تم تحديد نقطة الشحنة الصفرية، والتي كشفت عن قيمة 6.2، مما يوفر فهمًا أفضل لآلية الامتنزاز.

، ولا سيما وقت التلامس B نظر الجزء الثاني من العمل في تأثير العديد من معاملات التشغيل على قدرة امتنزاز الرودامين وجرعة المادة الماصة ودرجة حموضة المحلول. أظهرت النتائج أن ظروف الامتنزاز المثلى هي: زمن تلامس قدره ساعة واحدة، وجرعة قدرها 12 مجم/لتر، ودرجة حموضة 2، مما أدى إلى قدرة امتنزاز قصوى تبلغ 13.64 مجم/جم وفقًا لنموذج لانجموير.

أشارت الدراسة الحركية إلى أن العملية تتبع حركية الترتيب الثاني الزائف. كشفت الدراسة الديناميكية الحرارية أن عملية الامتنزاز تلقائية وطاردة للحرارة.

الكلمات المفتاحية: الامتنزاز، أوراق الخرشوف، الرودامين ب

Liste des figures

Figure I 1. Mécanisme d'adsorption.....	3
Figure I 2. Colorants synthétiques.....	12
Figure II. 1 L'artichaut.....	15
Figure II. 2 Protocole de titrage de l'indice d'Iode	17
Figure II. 3 Structure chimique de Bleu De Méthylène.....	18
Figure II. 4. Structure chimique du Rhodamine B.....	20
Figure III 1 L'indice d'Iode et l'indice de Bleu de Méthylène.....	26
Figure III 2. Courbe du pH _{pzc}	26
Figure III 3. Courbe d'étalonnage du Rhodamine B	27
Figure III 4 . Représentation graphique de l'effet de temps sur l'adsorption.....	28
Figure III 5. Représentation graphique de l'effet de dose sur l'adsorption.....	29
Figure III 6. Représentation graphique de l'effet de pH sur l'adsorption.....	30
Figure III 7. Isotherme d'adsorption	31
Figure III 8 Modèle de Langmuir.....	32
Figure III 9. Modèle de Freundlich.....	32
Figure III 10. Modèle de Temkin.....	33
Figure III 11. Représentation graphique des résultats de la thermodynamique d'adsorption..	34
Figure III 12. Courbes des résultats de la thermodynamique d'adsorption.....	35
Figure III 13 .Modèle cinétique pseudo-premier ordre.....	36
Figure III 14. Modèle cinétique pseudo-deuxième ordre.....	37

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : La porosité des adsorbants.....	8
Tableau I.2 : Les différentes classes des colorants.....	12
Tableau II. 1 : Fiche technique du Rhodamine B.....	20
Tableau III 1: Résultats de l'élaboration de la courbe d'étalonnage.....	27
Tableau III 2: Résultats de l'effet de temps sur l'adsorption	28
Tableau III 3: Résultats de l'effet de dose sur l'adsorption.....	29
Tableau III 4: Résultats de l'effet de pH sur l'adsorption.....	30
Tableau III 5 Paramètres des modèles d'isothermes	33
Tableau III 6 : Résultats de la thermodynamique d'adsorption.....	34
Tableau III 7 : Résultats de la cinétique d'adsorption.....	36
Tableau III 8: Paramètres de la cinétique d'adsorption.....	37

Liste des abréviations

UMAB	Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem
FST	Faculté des Sciences et de la Technologie
RhB	Rhodamine B
pH	Potentiel hydrogène
BET	Brunauer-Emmett-Teller
IBM	Indice de bleu de méthylène
pH _{pcz}	pH au point de charge nulle
K _L	Constante de Langmuir
K _F	Constante de Freundlich
K _T	Constante de Temkin
C _{eq}	Concentration à l'équilibre
q _{max}	Quantité adsorbée maximale
q _e	Quantité adsorbée à l'équilibre
k ₁	constante de vitesse du premier ordre (min ⁻¹ ou h ⁻¹).
R	La constante des gaz (8,314 J mol ⁻¹ . K ⁻¹).

Sommaire

REMERCIEMENTS.....	I
RESUME.....	II
ملخص.....	III
LISTE DES FIGURES.....	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	V
LISTE DES ABREVIATIONS.....	VI
INTRODUCTION GENERALE.....	1
I.1 Les types d'adsorption.....	3
I.1.1 Adsorption physique (Physisorption).....	4
I.1.2 Adsorption chimique (Chimisorption).....	4
I.2 Les facteurs influençant sur les paramètres d'adsorption.....	4
I.2.1. La surface spécifique.....	4
I.2.2. Le pH.....	4
I.2.3. La température.....	4
I.2.4. La concentration.....	4
I.2.5. La nature de l'adsorbant et de l'adsorbant.....	5
I.2 GENERALITE SUR LES ADSORBANTS.....	6
I.2 Les types d'adsorbants.....	6
I.2.1 Adsorbants d'origine végétale.....	6
I.2.2 Adsorbants d'origine animale.....	6
I.2.3 Adsorbants d'origine microbienne.....	6
I.3 CARACTERISATION DES ADSORBANTS.....	6
I.3.1 L'indice de Bleu de Méthylène (IBM).....	7
I.3.2 Indice d'iode.....	7
I.3.3 Le pH _{pzc}	7
I.4 STRUCTURE POREUSE DES ADSORBANTS.....	7

I.5 LA MODELISATION DU PROCESSUS D'ADSORPTION	8
I.5.1 Isotherme de Langmuir	8
I.5.2 Isotherme de Freundlich.....	9
I.5.3 Isotherme de Temkin.....	9
I.6 LA THERMODYNAMIQUE D'ADSORPTION	10
I.7 LA CINETIQUE D'ADSORPTION.....	10
I.7.1 Modèle cinétique pseudo-premier ordre	10
I.7.2 Modèle cinétique pseudo-deuxième ordre	11
I.8 GENERALITE SUR LES COLORANTS	11
I.8.1 Définition des colorants	11
I.8.2 Classification chimique des colorants	12
I.8.3 L'impact des colorants sur la nature	12
II. GENERALITE SUR L'ARTICHAUT	15
II.2 CARACTERISATION DE L'ADSORBANT	16
II.2.1 Indice d'iode.....	16
II.2.1.1 Protocole de préparation d'une solution d'iode 0,1 N	16
II.2.1.2 Protocole de l'indice d'iode.....	17
II.2.2 L'indice de Bleu de Méthylène	18
II.2.2.1 Définition du bleu de méthylène.....	18
II.2.2.2 Détermination de l'indice Bleu Méthylène.....	18
II.3 Généralité sur le Colorant Rhodamine B	20
II.4 Etablissement de la courbe d'étalonnage	22
Pour prépn obtenue est ainsi de 500 mg/L	22
II.5 Paramètres influençant l'adsorption.....	22
II.5.1.Effet du temps.....	22
II.5.2 Effet de dose.....	22
II.5.3 Effet du pH.....	22
II.5.4 Isothermes d'adsorption	23
II.5.5 Thermodynamique d'adsorption	23

II.5.6 Cinétique d'adsorption du Rhodamine B	23
III.1 RESULTATS DE LA CARACTERISATION	25
III.1.1 Détermination de l'indice de Bleu de Méthylène	25
III.1.2 Détermination de l'indice d'iode	25
III.1.3 Détermination du pH _{pzz}	26
III.2 RESULTATS DE L'APPLICATION.....	27
III.2.1 Etablissement de la courbe d'étalonnage	27
III.2.2 Détermination du temps d'équilibre.....	28
III.2.3 Détermination de la dose optimale.....	29
III.2.4 Détermination du pH optimale.....	30
III.2.5 Détermination des isothermes d'adsorption du Rhodamine B.....	31
III.2.6 Etude thermodynamique de l'adsorption	34
III.2.7 Cinétique d'adsorption du Rhodamine B.....	35
CONCLUSION GENERALE	39
REFERENCES.....	40



Introduction Générale

Introduction générale

Face à l'urgence environnementale et à la raréfaction des ressources, la valorisation des déchets végétaux s'impose comme une solution durable pour réduire la pollution et promouvoir l'économie circulaire. Les résidus agricoles et agroalimentaires, souvent considérés comme sans valeur, recèlent un potentiel insoupçonné dans divers domaines, notamment le traitement des eaux polluées par adsorption [1].

L'adsorption, processus naturel où des molécules se fixent à la surface d'un matériau (l'adsorbant), est une méthode efficace et peu coûteuse pour éliminer les contaminants (métaux lourds, colorants, pesticides...), les adsorbants d'origine végétale offrent une alternative écologique, renouvelable et biodégradable [2].

Parmi les déchets végétaux sous-exploités, les résidus d'artichaut (feuilles, tiges, bractées) présentent des propriétés intéressantes pour l'adsorption. Riches en fibres et en groupes fonctionnels (hydroxyle, carboxyle), ces biomatériaux peuvent piéger efficacement les polluants par des interactions physico-chimiques [3].

L'utilisation de l'artichaut comme adsorbant illustre parfaitement le concept de valorisation de la terre à la dépollution. Cependant, des défis persistent comme l'optimisation des procédés de prétraitement et de modification chimique, et aussi l'étude économique pour une industrialisation viable, sans oublier l'Intégration dans des systèmes de filtration durables [4].

Les feuilles d'artichauts déchets agricoles abondants, se révèlent être des adsorbants naturels prometteurs grâce à leur composition riche en cellulose et groupes fonctionnels. Leur structure poreuse naturelle permet d'adsorber efficacement divers polluants comme les métaux lourds et colorants. Cette valorisation des déchets végétaux combine des avantages économiques et écologiques, Bien que nécessitant parfois des traitements d'optimisation, ces biomatériaux représentent une solution innovante pour le traitement des eaux polluées [5].



Chapitre I

Introduction

L'adsorption est un phénomène naturel aussi discret que fondamental, où des atomes, ions ou molécules se fixent à la surface d'un matériau. Contrairement à l'absorption (où une substance est engloutie en profondeur), l'adsorption joue en surface, créant des liaisons éphémères ou durables selon les partenaires en présence. Ce mécanisme est partout : dans nos filtres à eau, les masques à gaz et aussi dans la catalyse industrielle [6].

I. Définition de l'adsorption

L'adsorption est un phénomène physico-chimique se traduisant en particulier par une modification de concentration à l'interface de deux phases non miscibles, on appelle une adsorption lorsque les molécules d'un fluide (gaz ou liquide) viennent se fixer sur la surface d'un solide. La phase constituée de molécules adsorbées est appelée « soluté » ou « adsorbat » et le solide est nommé « adsorbant » [7].

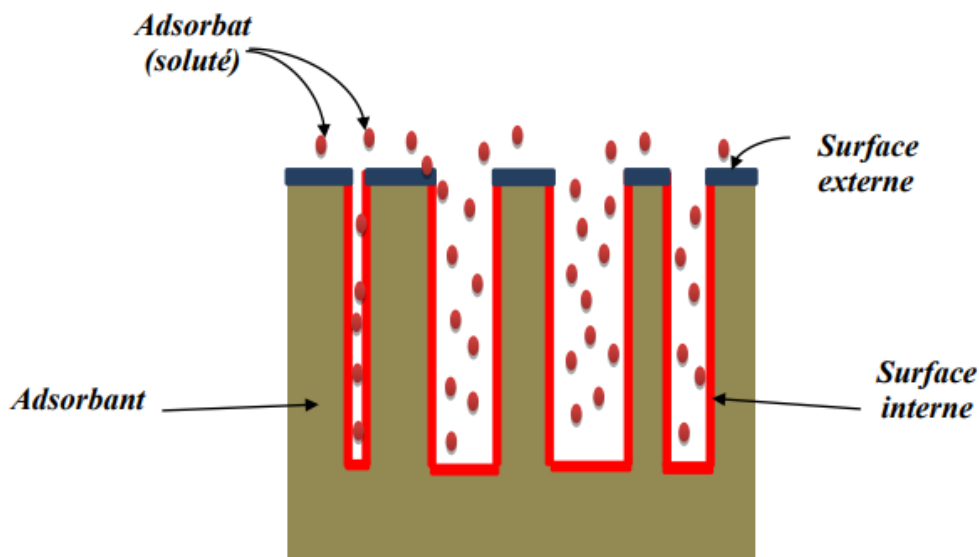


Figure I 1. Mécanisme d'adsorption

I.1 Les types d'adsorption

Selon l'intensité des interactions entre l'adsorbant et l'adsorbat, les forces responsables de l'adsorption peuvent être de nature physique ou chimique. On distingue ainsi deux types d'adsorption : l'adsorption physique (physisorption) et l'adsorption chimique (chimisorption) [8].

I.1.1 Adsorption physique (Physisorption)

La physisorption repose sur de faibles interactions intermoléculaires, telles que les forces de Van der Waals ou les interactions électrostatiques de polarisation. Ce processus est réversible, peu spécifique, et se produit rapidement. Sa cinétique est généralement limitée par les phénomènes de diffusion [9].

I.1.2 Adsorption chimique (Chimisorption)

Appelée chimisorption, ce mécanisme implique une liaison chimique forte (de type covalente) entre les atomes de surface du solide et les molécules adsorbées. Contrairement à la physisorption, elle est irréversible et libère des énergies importantes, se traduisant par des chaleurs d'adsorption élevées [10].

I.2 Les facteurs influençant sur les paramètres d'adsorption

L'efficacité d'un système d'adsorption dépend de plusieurs paramètres intrinsèques et extrinsèques, liés à la fois aux propriétés de l'adsorbant, aux caractéristiques de l'adsorbat et aux conditions opératoires. Une compréhension approfondie de ces facteurs est essentielle pour optimiser les performances des matériaux adsorbants et concevoir des procédés plus efficaces. Parmi ces facteurs, on peut citer [11] :

I.2.1. La surface spécifique

La surface spécifique également désignée par le terme d'aire massique est un paramètre clé influençant l'efficacité des matériaux adsorbants, Elle détermine la quantité de sites disponibles pour la fixation des molécules et varie considérablement selon le type de matériau [12].

I.2.2. Le pH

Le pH ou potentiel hydrogène, il représente la mesure de l'acidité ou de l'alcalinité en chimie d'une solution ou d'un milieu représente un paramètre opératoire critique dans les processus d'adsorption en raison de son influence déterminante sur les propriétés électrochimiques des interfaces, Cette section analyse son impact à travers une approche fondamentale-appliquée, Le pH influence significativement l'adsorption.

$$\text{pH} = -\log [H^+] \quad [13] \quad \dots\dots\dots (1)$$

I.2.3. La température

L'adsorption est majoritairement exothermique (favorisée à basse température), bien que certains cas endothermiques rares existent, l'analyse thermodynamique de l'adsorption permet d'optimiser les procédés industriels en ajustant la température selon le système adsorbant-adsorbat considéré [14].

I.2.4. La concentration

L'adsorption dépend fortement de la concentration en adsorbat. Aux faibles concentrations, elle suit généralement une loi de Freundlich, traduisant une adsorption progressive sur des

sites hétérogènes. À plus fortes concentrations, on observe une saturation des sites actifs décrite par le modèle de Langmuir [15].

I.2.5. La nature de l'adsorbant et de l'adsorbant

L'efficacité du processus d'adsorption repose sur une adéquation optimale entre les caractéristiques de l'adsorbant et celles de l'adsorbant. Trois facteurs principaux gouvernent cette interaction : la compatibilité dimensionnelle (la taille des pores de l'adsorbant doit correspondre à celle des molécules à capter), les affinités chimiques (polarités complémentaires et interactions électrostatiques), et les conditions du milieu (pH, nature du solvant).

En comprenant ces facteurs clés, il sera possible de proposer des solutions optimisées pour des applications ciblées, contribuant ainsi aux avancées dans les domaines du traitement des polluants et de l'ingénierie des matériaux [14].

I.2 Généralité sur les adsorbants

Les adsorbants sont des solides microporeux présentant des surfaces par unité de masse importantes (de 100 m²/g et jusqu'à plus de 2000 m²/g) afin de maximiser la capacité d'adsorption. Il existe de nombreuses variétés d'adsorbants. Le choix se fera en fonction de l'adsorbat et/ou du type d'opération désirée. Généralement, tous les matériaux sont des adsorbants mais seuls ceux possédant d'importantes capacités d'adsorption sont intéressants pour des applications industrielles. Cette capacité d'adsorption est en partie liée à la structure interne du matériau et les adsorbants intéressants possèdent un réseau poreux très développé et une grande surface spécifique. Dans l'industrie, les adsorbants les plus utilisés sont les charbons actifs, les zéolithes, les gels de silice et les alumines activées [16].

I.2 Les types d'adsorbants

Les adsorbants sont des matériaux naturels, d'origine végétale, animale ou microbienne, capables de capturer et éliminer des polluants comme les colorants, les métaux lourds, etc... Par adsorption ou absorption [17].

I.2.1 Adsorbants d'origine végétale

Obtenir par des déchets végétaux souvent considérés comme des résidus sans valeur comme les coques de noix de coco, la bagasse de canne à sucre, le vétiver, la pulpe de betterave, les fibres de jute, le coton, Noyaux d'olives, les balles de riz, les feuilles d'artichauts [18].

I.2.2 Adsorbants d'origine animale

Dérivés de produits animaux ou de déchets de l'industrie agroalimentaire comme Laine de Mouton, Os Animaux Calcinés, Plumes de Volaille, carapaces de Crustacés (Chitine/Chitosane), Coquilles d'Œufs [19].

I.2.3 Adsorbants d'origine microbienne

Les adsorbants microbiens (ou microbiennes) sont des microorganismes (bactéries, champignons, algues, levures) ou leurs dérivés (parois cellulaires, bio polymères extracellulaires) utilisés pour adsorber des polluants (métaux lourds, colorants, hydrocarbures, etc.). Ils constituent une alternative écologique et économique aux méthodes classiques de dépollution [20].

I.3 Caractérisation des adsorbants

La caractérisation des adsorbants est une étape essentielle dans l'étude des procédés d'adsorption, que ce soit pour des applications environnementales catalytiques ou industrielles. Elle permet de déterminer les propriétés physico-chimiques des matériaux adsorbants, qui influencent directement leur capacité et leur efficacité à fixer des molécules cibles (métaux lourds, polluants organiques, gaz, etc.), il existe plusieurs méthodes courantes

pour la caractérisation comme l'indice de bleu de méthylène, l'indice d'iode, BET, et plusieurs autres méthodes [21].

I.3.1 L'indice de Bleu de Méthylène (IBM)

L'indice de bleu de méthylène correspond à la quantité maximale de bleu de méthylène adsorbée par une masse donnée de matériau solide (souvent exprimée en mg de bleu de méthylène par gramme de matériau sec), C'est une mesure indirecte de la surface active ou de la capacité d'adsorption d'un adsorbant pour des molécules organiques polaires, Plus l'indice est élevé, plus l'adsorbant a de sites actifs disponibles, Il reflète notamment la présence de micropores et la surface spécifique accessible aux grosses molécules, Le bleu de méthylène a une taille moléculaire d'environ 1,5 nm, donc l'IBM ne donne pas d'information sur les micropores < 1 nm, mais plutôt sur les méso pores et macro pores utiles pour adsorber des grosses molécules [22].

I.3.2 Indice d'iode

L'indice d'iode est un paramètre classique utilisé pour évaluer la capacité d'adsorption d'un adsorbant (comme le charbon actif, les zéolithes, ou d'autres matériaux poreux), en particulier pour les petites molécules organiques, Il donne une mesure de la surface interne accessible dans les micropores (typiquement < 2 nm), car l'iode est une petite molécule (~0,5 nm).

L'indice d'iode permet de Caractériser la surface spécifique microporeuse d'un matériau adsorbant et de Comparer l'efficacité des adsorbants pour l'adsorption de petites molécules organique [23].

I.3.3 Le pH_{pzc}

Le pH_{pzc} (pH au point de charge nulle) est une propriété physico-chimique importante dans la caractérisation des adsorbants (matériaux biologiques utilisés pour adsorber des polluants, comme les métaux lourds, les colorants, etc.). Le pH_{pzc} est le pH auquel la surface de l'adsorbant n'a aucune charge nette.

- $\text{pH} < \text{pH}_{\text{pzc}}$: la surface est chargée positivement
- $\text{pH} > \text{pH}_{\text{pzc}}$: la surface est chargée négativement

Le pH_{pzc} est un paramètre clé pour comprendre comment un adsorbant interagit avec les polluants en solution. Il permet d'optimiser les conditions de traitement et de mieux interpréter les mécanismes d'adsorption [24].

I.4 Structure poreuse des adsorbants

La structure poreuse des adsorbants naturels est un facteur clé déterminant leur efficacité pour capturer les polluants (métaux lourds, colorants, etc.). Cette porosité, résultant de leur origine biologique et des traitements appliqués, influence directement leur surface spécifique, leur capacité d'adsorption et leur cinétique de fixation [25].

La surface spécifique est directement dépendante de la porosité : plus la microporosité est importante, plus la surface spécifique est importante. L'adsorption sur les surfaces macroporeuses est généralement négligeable par rapport à l'adsorption dans les micropores et les méso pores [26].

Tableau I. 1 : La porosité des adsorbants

	Micropores	Méso pores	Macropores
Diamètre (Å)	Inférieur à 20	20-500	Supérieur à 500
Volume poreux (m³/g)	0,15-0,5	0,02-0,1	0,2-0,5
Surface spécifique (m²/g)	100-1000	10-100	0,5-2

Chaque type de pores joue un rôle particulier dans le phénomène d'adsorption. Les micropores déterminent pratiquement à eux seuls la capacité d'adsorption d'un charbon actif: ils représentent presque la totalité de la surface et du volume offert à l'adsorption), Les macropores et les mésopores constituent les voies de passage vers les micropores [26].

I.5 La modélisation du processus d'adsorption

Les isothermes d'adsorption jouent un rôle important dans la détermination des capacités maximales d'adsorption. Il existe de nombreux modèles théoriques pour décrire les isothermes d'adsorption. Les plus courants sont les modèles de Langmuir, Freundlich et Temkin car ils sont les plus simples et plus répandus [27].

La quantité q_e (masse adsorbée par gramme d'adsorbant) est déterminée par l'équation suivante :

$$q_e = \frac{C_0 - C_e}{1000 \times m} \times V \dots (2)$$

I.5.1 Isotherme de Langmuir

Le modèle de Langmuir est l'un des modèles théoriques les plus utilisés pour décrire l'adsorption d'une couche mono moléculaire (monocouche) à la surface d'un adsorbant. Développé par Irving Langmuir en 1918, il repose sur des hypothèses simplificatrices et permet de déterminer la capacité maximale d'adsorption et l'affinité entre l'adsorbant et l'adsorbant [28].

L'isotherme de Langmuir peut être exprimée selon l'équation suivante :

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_{max}} + \frac{1}{q_{max} \times K_L} \dots (3)$$

- C_{eq} : Concentration à l'équilibre en mg/l ;
- q_e : Quantité de substance adsorbée par une unité de masse d'adsorbant en mg/g ;
- K_L : Constante ;

Le tracé de C_{eq}/q_e en fonction de C_{eq} donne une droite d'ordonnée à l'origine $1/(K_L * q_{max})$ et de pente $1/(K_L * q_{max})$.

- Pente = $1/q_{max}$
- Ordonnée à l'origine = $1/(K_L * q_{max})$
 - $RL > 1$: Adsorption défavorable.
 - $RL = 1$: Linéaire.
 - $0 < RL < 10 < RL < 1$: Favorable.
 - $RL = 0$: Irréversible.

I.5.2 Isotherme de Freundlich

Le modèle de Freundlich est une approche empirique largement utilisée pour décrire l'adsorption sur des surfaces hétérogènes, contrairement au modèle de Langmuir qui suppose une surface homogène. Développé par Herbert Freundlich en 1906, ce modèle s'applique particulièrement aux systèmes où l'adsorption se produit en multicouche ou lorsque les sites d'adsorption ont des énergies différentes [29].

L'isotherme de Freundlich est exprimée par l'équation :

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \dots (4)$$

- C_{eq} : Concentration à l'équilibre en mg/l ;
- q_e : Quantité de substance adsorbée par une unité de masse d'adsorbant en mg/g ;
- K_F : Constante qui est un indicateur de la capacité d'adsorption ;
- $1/n$: l'intensité de l'adsorption.

Le tracé de $(\log q_e)$ en fonction de $(\log C_{eq})$ donne une droite d'ordonnée à l'origine,

- Pente = $1/n$
- Ordonnée à l'origine = $\log K_F$

Plus K_F est élevé, plus la capacité d'adsorption est grande.

- Si $n > 1$ → Adsorption favorable (plus forte aux faibles concentrations).
- Si $n = 1$ → Adsorption linéaire (partition simple).
- Si $n < 1$ → Adsorption défavorable (hétérogénéité marquée).

I.5.3 Isotherme de Temkin

L'isotherme de Temkin suppose que la décroissance de la chaleur de l'adsorption avec le taux de recouvrement est linéaire plutôt que logarithmique (comme l'isotherme de Freundlich), Ce modèle considère une non uniformité de surface et une occupation préférentielle des sites les plus adsorbants [30].

Le modèle d'isotherme de Temkin est exprimé par l'équation :

$$q_e = B_T \ln C_e + B_T \ln K_T \dots (5)$$

- Pente = B
- Ordonnée à l'origine = BlnAT.
- q_e (mg.g⁻¹) et C_e (mg.L⁻¹) sont respectivement la quantité adsorbée à l'équilibre et la concentration d'équilibre.
- T : est la température (K),
- R : est la constante des gaz (8,314 J mol⁻¹. K⁻¹).
- K_T : La constante est liée à la chaleur d'adsorption.

I.6 La thermodynamique d'adsorption

L'adsorption s'accompagne toujours d'un échange thermique, qu'il soit exothermique ou endothermique. La mesure de la chaleur d'adsorption constitue le critère principal pour distinguer la chimisorption de la physisorption. Les paramètres thermodynamiques, qui dépendent fortement de la température, représentent également des indicateurs précieux pour prédire le comportement d'adsorption [31].

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.

La relation thermodynamique de Gibbs-Helmholtz [32] :

$$\Delta G^\circ = -R \times T \times \ln(K_d) \dots (6)$$

La relation obtenue par intégration de Van't Hoff [33] :

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T \times \Delta S^\circ \dots (7)$$

D'après les équations (1) et (2) on a :

$$R \times T \times \ln(K_d) = -\Delta H^\circ + T \times \Delta S^\circ$$

$$\ln K_d = -\left(\frac{\Delta H^\circ}{R \times T}\right) + \left(\frac{1}{R}\right) \Delta S^\circ \dots (8)$$

I.7 La cinétique d'adsorption

Plusieurs modèles cinétiques ont été employés pour analyser les données expérimentales, offrant des informations clés pour l'application de l'adsorbant en adsorption, nous avons appliqué deux modèles (pseudo-premier ordre, pseudo-second ordre) en utilisant des différents temps de contact, avec les doses optimales et le pH préalablement déterminés [34].

I.7.1 Modèle cinétique pseudo-premier ordre

C'est le plus ancien des modèles cinétiques, il a été proposé par Lagergren en 1898. Le modèle du premier ordre est utile pour une analyse simplifiée, mais doit être complété par d'autres modèles (second ordre, Elovich) pour une description complète. Son application

nécessite une validation expérimentale rigoureuse, Il suppose que la vitesse d'adsorption est proportionnelle à la concentration résiduelle du polluant en solution. [35]

Le modèle cinétique du pseudo premier ordre peut être exprimé par l'équation suivante :

$$\log(q_e - q_t) = -k_1 \times t + \log q_e \dots \dots (9)$$

- q_t = quantité adsorbée à l'instant t (mg/g),
- q_e = capacité d'adsorption à l'équilibre (mg/g),
- k_1 = constante de vitesse du premier ordre (min^{-1} ou h^{-1}).

I.7.2 Modèle cinétique pseudo-deuxième ordre

Le modèle de pseudo-second ordre est largement utilisé pour décrire la cinétique d'adsorption des polluants (métaux lourds, colorants, etc.) sur des adsorbants. Contrairement au modèle du premier ordre, il suppose que la vitesse d'adsorption dépend des sites actifs disponibles à la surface du matériau, et non seulement de la concentration en solution. Ce modèle peut être exprimé par l'équation de la forme suivante : [35]

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{q_e} t + \frac{1}{k_2 \times q_e^2} \dots \dots (10)$$

- q_t = quantité adsorbée au temps t (mg/g),
- q_e = capacité d'adsorption à l'équilibre (mg/g),
- k_2 = constante de vitesse de pseudo-second ordre ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$).
- Pente = $1/q_e$
- Ordonnée à l'origine = $1/(k_2 \cdot q_e)$.

I.8 Généralité sur les colorants

Les colorants sont des substances chimiques utilisées pour apporter de la couleur à divers matériaux (textiles, plastiques, aliments, cosmétiques, etc.). Ils jouent un rôle essentiel dans l'industrie, mais certains sont toxiques et polluants, nécessitant des méthodes de traitement des eaux usées comme l'adsorption sur adsorbants [36].

I.8.1 Définition des colorants

Un colorant est une substance chimique naturelle ou synthétique, qui est capable d'absorber et de réémettre certaines longueurs d'onde de la lumière visible, lui conférant une couleur spécifique. Il se fixe de manière permanente ou temporaire sur un substrat (tissu, papier, plastique, etc.) par des liaisons chimiques ou physiques [37].

Généralement, la molécule colorante est le chromogène c'est un assemblage de groupes chromophores, auxochromes et de structures aromatiques conjuguées (cycles benzéniques, anthracène, perylène, etc.). Les chromophores sont les groupements qui lui confèrent la couleur et les groupements auxochromes permettent sa fixation à la substance à colorer, et aussi permettent d'enrichir ou d'appauvrir le chromophore en électrons, de ce fait, il peut

modifier la longueur d'onde (donc la couleur) de la radiation absorbée par le chromophore et/ou modifier l'intensité de l'absorption [38].

I.8.2 Classification chimique des colorants

Les colorants peuvent être classés en fonction de leur structure chimique qui détermine leurs propriétés (couleur, stabilité, solubilité, etc.) [39].

Tableau I.2 : Les différentes classes des colorants

Classe	Structure	Couleur	Exemple
Colorants azoïques	Liaisons azo (-N=N-)	jaune, orange, rouge, bleu	Rouge Allura AC, Orange G
Colorants anthraquinoniques	3 cycles aromatiques avec 2 groupes C=O	Rouge, Bleu	Alizarine, Indanthrène Blue
Triarylméthanés	Atome de carbone central lié à 3 groupes aromatiques.	Bleu, Vert	Bleu de méthylène, Vert malachite
Xanthènes	Noyau xanthène (oxygène central)	Rose, Rouge	Rhodamine B (RHB)
Nitro/Nitroso	Groupes -NO ₂ ou -NO.	Jaune, Brun	Jaune naphthol S
Polymères	Longues chaînes insolubles dans l'eau.	Toutes	Disperse Red 60

I.8.3 L'impact des colorants sur la nature

Les polluants organiques sont des substances chimiques qui peuvent avoir des impacts significatifs sur l'environnement et la santé humaine. Ils sont caractérisés par leur légèreté, leur persistance dans l'environnement, leur capacité à s'accumuler dans les tissus vivants et leur propension à se déplacer sur de longues distances [40].

Les polluants organiques peuvent provenir de sources industrielles, agricoles, domestiques ou naturelles. Ils peuvent être issus de la combustion de biomasse, de l'incinération des déchets, de l'utilisation de pesticides ou de produits chimiques dans l'industrie, l'agriculture et les ménages.

Les colorants sont considérés comme des polluants organiques et sont largement utilisés dans les industries textiles, alimentaires, cosmétiques et cliniques, donc ils sont une source de pollution une fois évacués dans l'environnement [41].

Les colorants, en particulier les colorants synthétiques, présentent une toxicité multifactorielle pour les écosystèmes et la santé humaine. Leur dangerosité provient principalement de leur structure chimique complexe (composés azoïques, aromatiques ou métallifères) qui, une fois

rejetés dans l'environnement, se dégradent en sous-produits souvent plus toxiques que la molécule mère. Ces substances persistent dans les milieux aquatiques où elles bloquent la photosynthèse et provoquent une hypoxie mortelle pour la biodiversité. Leur toxicité directe sur les organismes vivants s'exprime par des mécanismes génotoxiques, cancérogènes (via la formation d'amines aromatiques) et des perturbations endocriniennes [42].



Chapitre 2

II. Généralité sur l'artichaut

L'artichaut (*Cynara scolymus*) est une plante méditerranéenne largement utilisée en médecine traditionnelle pour ses propriétés biologiques attribuées essentiellement aux polyphénols. Avec une production annuelle de 57000 tonnes. Les sous-produits de l'artichaut (feuilles, bractées externes et tiges) représentent une énorme quantité de déchets, la possibilité de les récupérer est une alternative intéressante du point de vue économique et environnemental. Le but de la thématique proposée est la valorisation des sous-produits de l'artichaut par extraction de ses substances bioactives essentiellement les polyphénols, en Algérie, les superficies de plantation d'artichaut sont concentrées dans la wilaya de Relizane qui représente 75% de la superficie totale [43].



Figure II. 1 L'artichaut

Les résidus d'artichaut, grâce à leur composition riche en fibres et composés actifs, sont des candidats prometteurs pour l'adsorption des polluants émergents. Leur valorisation s'inscrit dans une logique d'économie circulaire, réduisant à la fois les déchets agricoles et la pollution de l'eau [44].

II.1 Préparation de l'adsorbant**II.1.1 Collecte et utilisation**

Les feuilles d'artichaut brutes utilisées dans ce travail ont été récupérées auprès des vendeurs de légumes frais au marché central situé dans la ville de Mostaganem, en Algérie, l'artichaut récupéré a été utilisé comme les autres légumes sans utiliser les feuilles.

II.1.2 Séchage et broyage de l'adsorbant

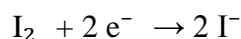
Les feuilles d'artichaut ont été triées et séchées à l'air libre en ombre pendant quelques jours, l'étape de séchage a pour but d'abaisser la teneur en eau des feuilles d'artichaut, l'adsorbant a été filtré avec un papier filtre, et rincer avec l'eau de robinet bouillante, pendant 4 à 5 jours jusqu'à la clarté et la pureté totale de l'eau, avant d'utiliser l'eau distillée bouillante pour un rinçage finale pendant 24 heure. Après le rinçage en laisse l'adsorbant dans l'étuve jusqu'à séchage complet pendant 2 à 3 jours, à 65°C, après on fait un tamisage avec un tamis de 0,14mm pour obtenir une poudre d'adsorbant de même granulométrie.

II.2 Caractérisation de l'adsorbant**II.2.1 Indice d'iode**

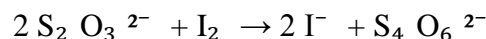
L'indice d'iode quantifie la capacité d'un matériau à adsorber l'iode (en mg par gramme), révélant ainsi sa microporosité. La mesure est standardisée à une concentration résiduelle de 0,02 N, L'iodométrie est une méthode analytique basée sur l'utilisation d'une solution titrée d'iode pour doser des espèces chimiques. Son principe repose sur les réactions d'oxydoréduction impliquant l'iode (I_2) [45].

Le processus implique deux étapes claires :

- Libération d'iode : Par réaction chimique, l'iode est libéré sous sa forme moléculaire (I_2), Exemple de demi-équation :



- Titration iodométrique : L'iode libéré est dosé par une solution de thiosulfate de sodium ($Na_2 S_2 O_3$), un réducteur efficace. La réaction s'écrit :



Cette méthode est largement utilisée pour déterminer la concentration en oxydants ou en composés capables de libérer de l'iode en solution.

II.2.1.1 Protocole de préparation d'une solution d'iode 0,1 N

- Peser précisément 12,69 g d'iode sublimé (I_2) et 19,10 g d'iodure de potassium (KI).
- Dans une fiole jaugée de 1 L, dissoudre d'abord le KI dans 50-100 mL d'eau distillée.
- Ajouter progressivement l'iode solide et agiter jusqu'à dissolution complète (la solution prendra une couleur brun foncé).

- Ensuite, peser précisément 24,82 g de thiosulfate de sodium penta hydraté ($\text{Na}_2 \text{S}_2 \text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2 \text{O}$) à l'aide d'une balance analytique.
- Introduire le sel dans une fiole jaugée propre de 1 litre.
- Agiter doucement jusqu'à dissolution complète des cristaux.

II.2.1.2 Protocole de l'indice d'iode

Pour déterminer l'indice d'iode il faut :

- Une solution d'acide chlorhydrique de concentration 5 %.
- Une solution d'iode 0,1N.
- Une solution de thiosulfate de sodium de concentration 0,1 N.

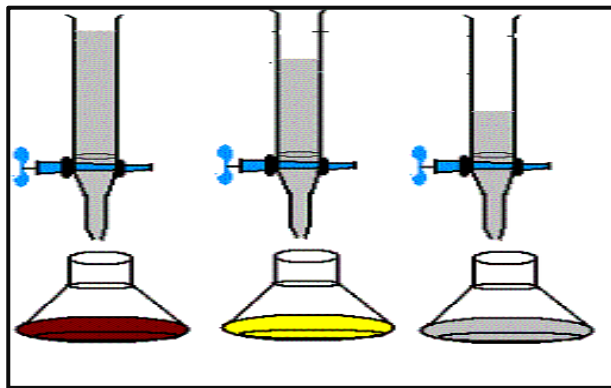


Figure II. 2 Protocole de titrage de l'indice d'Iode

II.1.4 Préparation de l'échantillon

On pèse une masse de 0,2 g d'adsorbant préparé qui a été séché à 150 °C dans l'étuve pendant 3 heures, on le transpose dans un flacon, ajouter 10 mL de HCl (5%) et remue doucement jusqu'à ce que l'échantillon soit complètement mouillé, on porte à ébullition pendant 30 secondes, ensuite laisse refroidir à température ambiante, verser 100 mL de la solution d'iode dans le flacon, le bouche immédiatement et agite pendant 30 secondes, on filtre un mélange pour éliminer les particules solides et obtenir un filtrat (liquide clair), On écarte (jette) les 20–30 mL initiaux du filtrat, probablement pour éviter des impuretés ou des résidus de filtration, le reste du filtrat est récupéré dans un bécher. On ajoute goutte à goutte une solution de thiosulfate de sodium ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) dans l'erlenmeyer, La solution change de couleur (par exemple, du jaune/brun à incolore si on dose de l'iode I_2), On note le volume V de thiosulfate versé pour atteindre la décoloration (point équivalent).

Calcule l'indice d'iode comme suit :

$$\text{Indice d'iode}(\text{mg/g}) = \frac{((v' - v) \times N \times 126,93)}{m} \dots\dots(11)$$

m : La masse de l'adsorbant (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.

II.2.2 L'indice de Bleu de Méthylène

II.2.2.1 Définition du bleu de méthylène

Le Bleu de Méthylène (ou chlorure de méthylthioninium, *Méthylène Blue* en anglais) est un colorant cationique bleu appartenant à la famille des thiazines.

Le bleu de méthylène est un composé hétérocyclique avec :

- Un noyau central phénothiazine (fusion d'un cycle benzénique et d'un thiazine).
- Deux groupes diméthylamino ($N(CH_3)_2$) en positions 3 et 7.
- Une charge positive sur l'atome d'azote du cycle, compensée par un ion chlorure (Cl^-).

Le nom IUPAC du bleu de méthylène est : Chlorure de 3,7-bis (diméthylamino) phénothiazin-5-ium, avec une formule brute de $C_{16}H_{18}CN_3S$, et une masse molaire de 319,85 g/mol. [46]

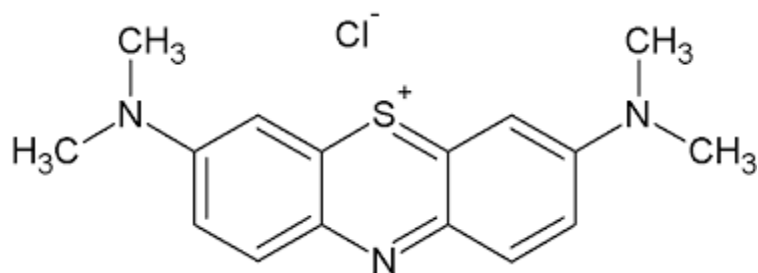


Figure II. 3 Structure chimique de Bleu de Méthylène

II.2.2.2 Détermination de l'indice Bleu Méthylène

La détermination de l'indice de Bleu de Méthylène a été réalisée selon la méthode TM-11 de Chemviron Carbon. Cette méthode consiste à :

Pour déterminer l'indice de BM il faut :

1- Une solution d'acide acétique (0,25 %), on prend 2.5mL d'acide acétique fumant dans une fiole de 1L puis en rempli avec l'eau distillée jusqu'à trait de jauge.

2- Une solution d'acide acétique (50 %), ou on verse un volume de $V=253.11\text{ml}$ d'acide acétique fumant dans une fiole de 500ml.

3- Une solution de BM de concentration (1200 mg /L), on pèse une masse de $m=1.2\text{g}$ de BM et on dissoudre dans 100ml d'acide acétique (50%) et diluer avec l'acide acétique (0.25%) jusqu'à trait de jauge dans une fiole de 1l.

$$\text{Indice du Bleu Méthylène (mg/g)} = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \dots\dots (12)$$

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

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

m : masse d'adsorbant (g).

V : volume d'adsorbant (L).

II.2.3 Détermination du pH_{pzc}

Un volume de 50 mL d'une solution de NaCl (0.01M) est placé dans des flacons à bouchons, le pH est ajusté de 2 à 12 en ajoutant l'hydroxyde de sodium ou l'acide chlorhydrique concentré, une masse de 0.15 g d'adsorbant est ensuite ajouté aux solutions de NaCl de différents pH. Après 48 heures d'agitation le pH_{final} est mesuré. La différence entre le $\text{pH}_{\text{initial}}$ et le pH_{final} sera tracé en fonction du $\text{pH}_{\text{initial}}$ et le point qui a été pris comme pH_{pzc} est ou $\text{pH}_{\text{final}} - \text{pH}_{\text{initial}} = 0$

II.3 Généralité sur le Colorant Rhodamine B

Rhodamine B, « RhB » le composé modèle de cette étude, est un colorant de la classe des xanthènes, elle se présente sous forme de cristaux d'un vert sombre. Elle est largement utilisée comme colorant dans l'industrie textile et alimentaire, et comme traceur fluorescent dans l'eau sa formule chimique est $C_{28}H_{31}N_2O_3$ [47].

Tableau II. 1 : Fiche technique du Rhodamine B

Nom UICPA	Chlorure de [9-(2-carboxyphényl)-6-diéthylamino-3-xanthénylidène]-diéthylammonium
Masse molaire	479,01 ± 0,028 g/mol
Masse volumique	0,79 g·cm ⁻³
Solubilité	50 g·L ⁻¹
Longueur d'onde	552,5 nm
Température de fusion	210-211 °C
Formule brute	$C_{28}H_{31}N_2O_3$

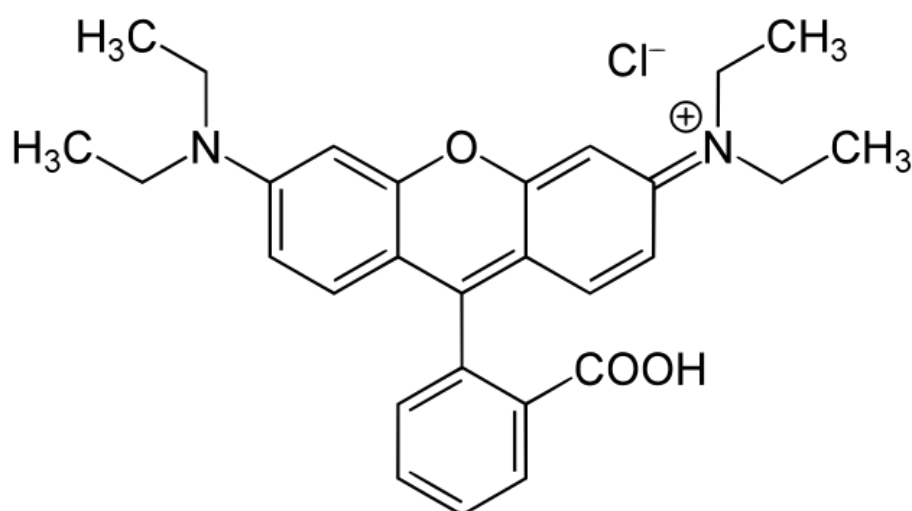


Figure II. 4. Structure chimique du Rhodamine B

II.3.1 Propriétés de la Rhodamine B

La Rhodamine B s'impose comme le colorant traceur de référence en hydrologie grâce à des propriétés uniques qui répondent parfaitement aux exigences des études hydrologiques, elle Permet des mesures précises même à haute dilution, elle a une stabilité Remarquable et elle a aussi une grande résistance à la dégradation photochimique, elle est connue par sa toxicité modérée, La Rhodamine B est préférée aux autres colorants pour 3 raisons clés :

a) Fluorescence intense et stable

Elle est 10 fois plus lumineuse que la fluorescéine, même à très faible concentration (0,1 ppb), et elle résiste à la lumière et aux variations de pH.

b) Détection facile en milieu complexe

Ces émissions dans l'orange-rouge est entre 565nm et 580nm, avec une plage où l'eau et les matières organiques interfèrent peu.

c) Coût imbattable

Elle est bien moins chère que les alternatives hautes performances [48].

La Rhodamine B est choisie pour les tests d'adsorption car elle combine une mesurabilité facile, représentativité industrielle et interactions variées avec les adsorbants. C'est un colorant idéal pour optimiser les procédés de dépollution de sources naturelle

II.4 Etablissement de la courbe d'étalonnage

Pour préparer la solution mère n°1, une masse de 0,250 g de Rhodamine B a été dissoute dans une fiole jaugée de 500 mL, puis complétée avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. La concentration obtenue est ainsi de 500 mg/L

Une dilution a ensuite été effectuée à partir de la solution mère n°1 : un volume approprié a été prélevé et introduit dans une fiole jaugée de 200 mL pour obtenir une solution mère n°2 à une concentration de 50 mg/L.

À partir de cette solution mère n°2, une série de 7 solutions étalons a été préparée par dilution dans des fioles jaugées de 25 mL, afin d'obtenir des concentrations comprises entre 1 mg/L et 4 mg/L. Ces solutions ont été utilisées pour tracer la courbe d'étalonnage.

II.5 .Paramètres influençant l'adsorption**II.5.1.Effet du temps**

L'adsorption de la Rhodamine B par notre matériau (adsorbant) en fonction du temps permet de déterminer le temps de contact adsorbant-adsorbat nécessaire pour établir un équilibre d'adsorption, dans le but de déterminer le temps d'équilibre d'adsorption, des volumes de 25 mL prélevés de la solution concernée de concentration connue (10mg/L) et (5mg/L) à une température ambiante constante (20°C) ont été préparés, avec 5 échantillons de chaque concentrations, on à ajouter dans chaque solution une masse d'adsorbant de $m=0.1g$. L'ensemble est agité avec des agitateurs magnétiques à des temps d'agitation allant de 30 à 120 min, la séparation a été effectuée par centrifugation à l'aide d'une centrifugeuse pendant 15 min, l'absorbance finale a été déterminée à l'aide d'un spectrophotomètre Zuzi 4255/50.

II.5.2 Effet de dose

Nous avons appliqué la procédure suivante : un volume de 25ml de solution de colorant Rhodamine B avec des concentrations connues (10 mg/L) et (8mg/L) ont été mélangé et agité respectivement avec 0,05; 0,1; 0,2; 0,3 ; 0,4 g de masse d'adsorbant, avec 5 échantillons de chaque concentrations, pendant un temps (le temps d'équilibre adsorbat-adsorbant déterminer auparavant). Après centrifugation, les résultats sont analysés et calculés pour déterminer la dose nécessaire pour l'adsorption.

II.5.3 Effet du pH

On a appliqué le protocole suivant dans une série de 5 flacons qui contient $V= 25$ mL de solution de colorant de concentration (10mg/L) et (15mg/L), et contient une masse de $m=0.3g$ (déterminer auparavant) ont été introduites afin de leurs imposer des pH [2 ;4 ;6 ;8 ;10] appropriés pour des milieux acide ou basique, et on a utilisé des solutions de NaOH de 1N et

0.1N pour augmenter la valeur du pH , et aussi des solutions de HCl de 1N et 0.1N pour diminuer la valeur de pH, après centrifugation, les résultats obtenues sont analysés et calculés pour déterminer le pH nécessaire pour l'adsorption. L'isotherme d'adsorption sera établie avec une solution de pH=2.

II.5.4 Isothermes d'adsorption

Dans une série de béchers contenant 25 mL de solution à pH =2 avec une concentration qui varient entre 5 mg/L à 100 mg/L et une masse de $m= 0.3g$, l'ensemble est agité pendant un temps de 1h, puis centrifuger et analyser pour faire la modélisation du processus d'adsorption

II.5.5 Thermodynamique d'adsorption

Dans des flacons contenant 25 mL de solution de Rhodamine B à une concentration de 10 mg/L et 15mg/L sont ajustés à un pH=2, puis des masses de $m=0,3$ g de l'adsorbant sont ajoutés dans chaque échantillon, ces flacons sont ensuite placés successivement à des températures de 25 °C, 30 °C, 35 °C et 40°C dans un bain-thermostatique équipé d'un thermostat pour contrôler la température. Le mélange est agité pendant une heure, puis centrifugé et analysé par spectrophotométrie, pour déterminer les paramètres thermodynamiques nécessaire.

II.5.6 Cinétique d'adsorption du Rhodamine B

Dans une série des béchers nous avons introduit 25 ml de solutions à concentration 10 mg/L et 15 mg/L, ensuite on a ajusté au pH=2 et nous avons ajouté 0,3 g d'adsorbant, l'ensemble est agité à des temps de 5 à 100 minutes puis centrifuger et analyser par spectrophotométrie.



Chapitre 3

III1 Résultats de la caractérisation**III1.1 Détermination de l'indice de Bleu de Méthylène**

Une masse de 0,1g de charbon actif est introduite dans un bécher, mélangée à 25 mL de solution de BM à 1200 mg/L est agitée pendant 30 min. Après filtration le filtrat est analysé par spectrophotométrie à 620 nm. La quantité de BM adsorbée est calculée à partir de l'équation suivante :

$$\text{Indice du Bleu Méthylène (mg/g)} = \frac{(C_0 - C_e)V}{m}$$

L'équation de la droite donnant l'absorbance en fonction de la concentration du bleu de méthylène est [Abs= 0.1098×C]. Cette équation est utilisée pour calculer la concentration résiduelle inconnue, on a obtenu une absorbance égale à 0.283.

$$\text{IBM (mg/g)} = \frac{(1200 - 515.48) * 0.025}{0.1}$$

$$\text{IBM} = 171,129326 \text{ mg/g}$$

III1.2 Détermination de l'indice d'iode

Calcule l'indice d'iode comme suit :

$$\text{indice d'iode (mg/g)} = \frac{((v' - v) \times N \times 126,93)}{m}$$

$$\text{indice d'iode (mg/g)} = \frac{((50 - 48.36) \times 0.1 \times 126,93)}{0.2}$$

$$\text{indice d'iode} = 104.02 \text{ mg/g}$$

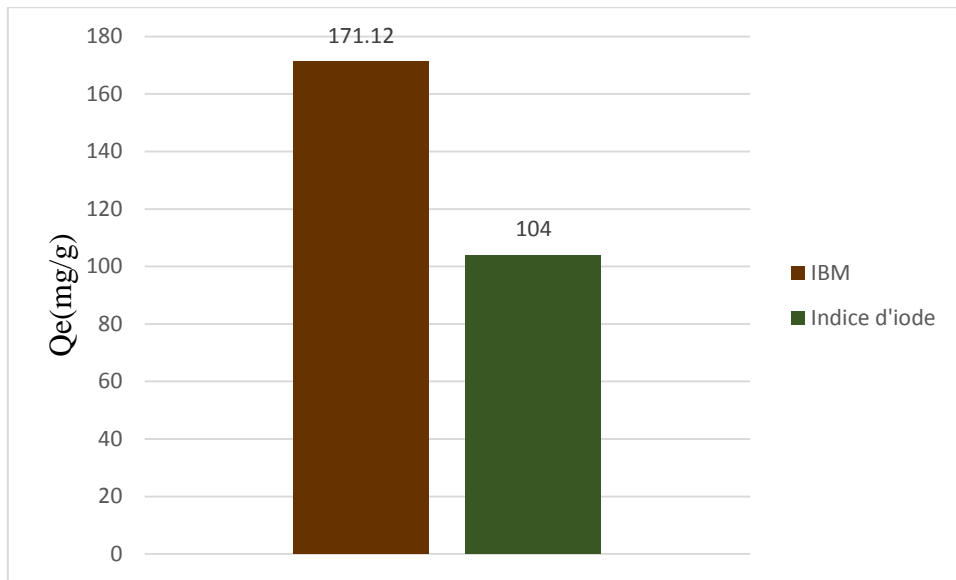


Figure III 1 L'indice d'Iode et l'indice de Bleu de Méthylène

Selon l'histogramme, on observe que l'adsorbant préparé possède une surface microporeuse très importante, avec un indice d'iode de 104 mg/g, et un indice de Bleu de Méthylène de 171,12 mg/g.

III.1.3 Détermination du pH_{pzc}

Les résultats de pH_{pzc} sont représentés graphiquement dans la figure III.2

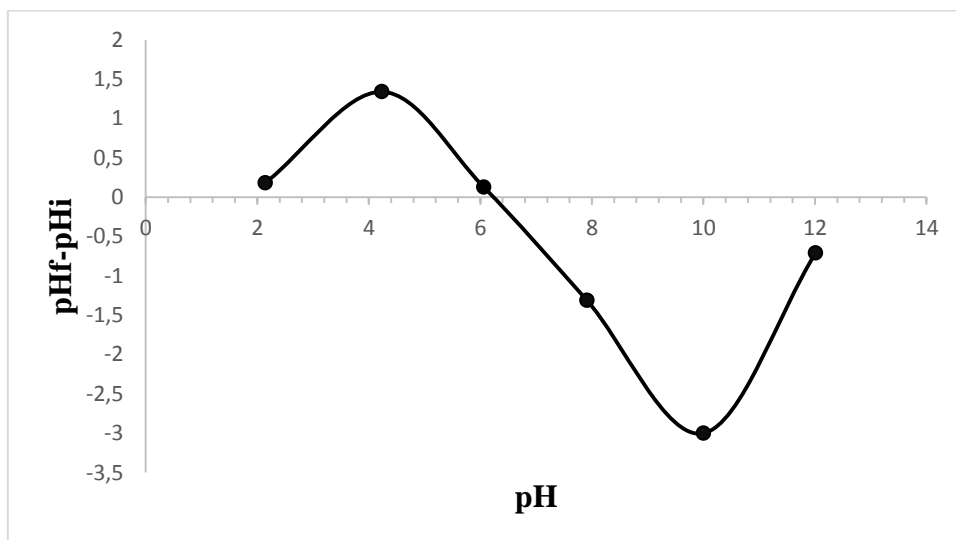


Figure III 2. Courbe du pH_{pzc}

Le pH_{pzc} est déterminé est égal à 6,2 Lorsque le pH de la solution est supérieur au pH_{pzc} (6,2), la surface de l'adsorbant, en perdant des protons s'est chargée plus négativement et a favorisé donc l'adsorption du Rhodamine B chargé positivement à cause de l'augmentation de la force électrostatique d'attraction. Pour des pH < pH_{pzc} (6,2), il y a diminution de la

Capacité d'adsorption en raison de la répulsion entre la surface de l'adsorbant et le Rhodamine B chargés tous les deux positivement.

III.2 Résultats de l'application

III.2.1 Etablissement de la courbe d'étalonnage

Chaque étalon a été analysé dans le domaine de l'UV par le spectrophotomètre à la longueur d'onde de 552,5 nm, qui a été déterminée par balayage.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le Tableau et représentés graphiquement sur la Figure. III.3 et dans le tableau III.1.

Tableau III. 1: Résultats de l'élaboration de la courbe d'étalonnage

Abs	0	0,16	0,216	0,281	0,376	0,476	0,557	0,630
C (mg/L)	0	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4

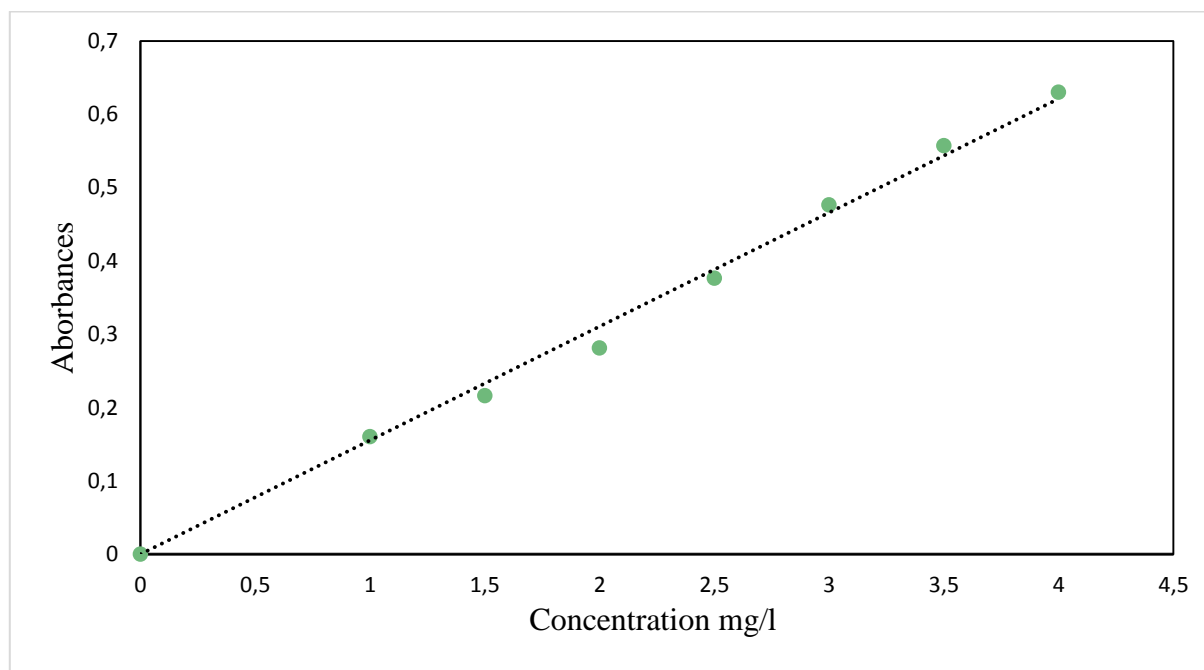


Figure III. 3. Courbe d'étalonnage du Rhodamine B

On observe que la courbe obtenue est une droite, avec un coefficient de corrélation de 0,9947, donc on a un bon ajustement linéaire. L'équation de cette droite, qui relie l'absorbance à la concentration du Rhodamine B est : $[A = 0,1553 \times C]$. Cette équation permet de déterminer la concentration d'une solution inconnue Rhodamine B.

III.2.2 Détermination du temps d'équilibre

- On a étudié le temps de contact nécessaire pour atteindre l'équilibre d'adsorption du Rhodamine- B, Les résultats obtenus sont représentés graphiquement sur la Figure III.4 et dans le tableau III.2.

Tableau III. 2: Résultats de l'effet de temps sur l'adsorption

Temps (Min)	Taux (%)	C _{eq} (mg/L)	Quantité (mg/g)	C ₀ (mg/L)
30	52,02	4,79	1,30	10
60	56,6	4,33	1,41	
90	58,33	4,16	1,45	
120	61,94	3,80	1,54	
30	36,76	3,16	0,45	5
60	64,19	1,79	0,80	
90	67,54	1,62	0,84	
120	68,06	1,59	0,85	

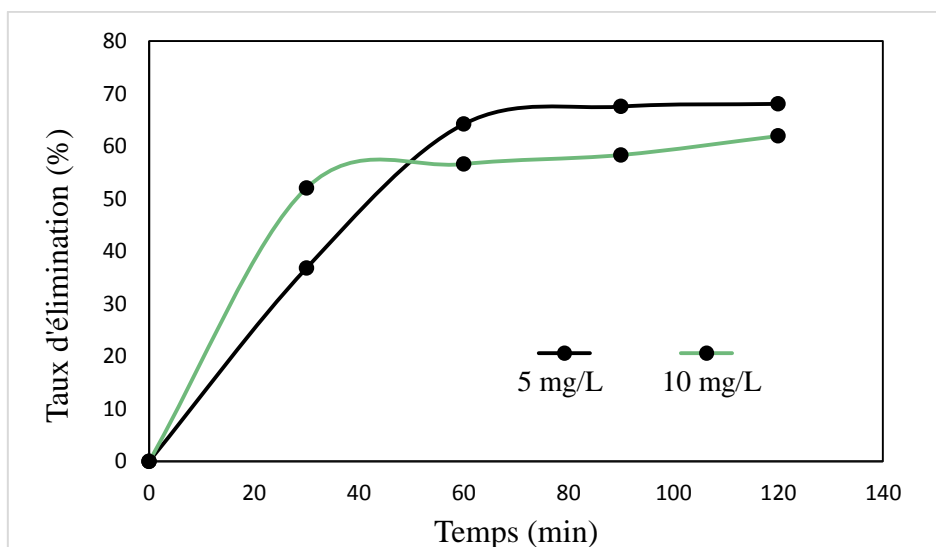


Figure III. 4 . Représentation graphique de l'effet de temps sur l'adsorption

On observe une augmentation du taux d'élimination de Rhodamine B par notre adsorbant avec le temps, jusqu'à atteindre un plateau de saturation où ce rapport ne change plus, indiquant que l'équilibre de l'interaction adsorbant-adsorbat est atteint, et donc on a choisi un temps d'équilibre d'une heure (60min).

III.2.3 Détermination de la dose optimale

Les résultats de mesure de la dose sont représentés graphiquement sur la Figure III.5 et dans le tableau. III.3.

Tableau III. 3: Résultats de l'effet de dose sur l'adsorption

Dose (g/L)	Masse (mg)	Taux (%)	C _{eq} (mg/L)	Quantité (mg/g)	C ₀ (mg/L)
2	0,05	35,80	6,41	1,79	10
4	0,1	60,91	3,90	1,52	
6	0,2	78,87	2,11	0,98	
8	0,3	84,28	1,57	0,70	
10	0,4	84,54	1,54	0,52	
2	0,05	41,32	4,69	1,65	8
4	0,1	54,68	3,62	1,09	
6	0,2	77,38	1,80	0,77	
8	0,3	83,74	1,30	0,55	
10	0,4	83,90	1,28	0,41	

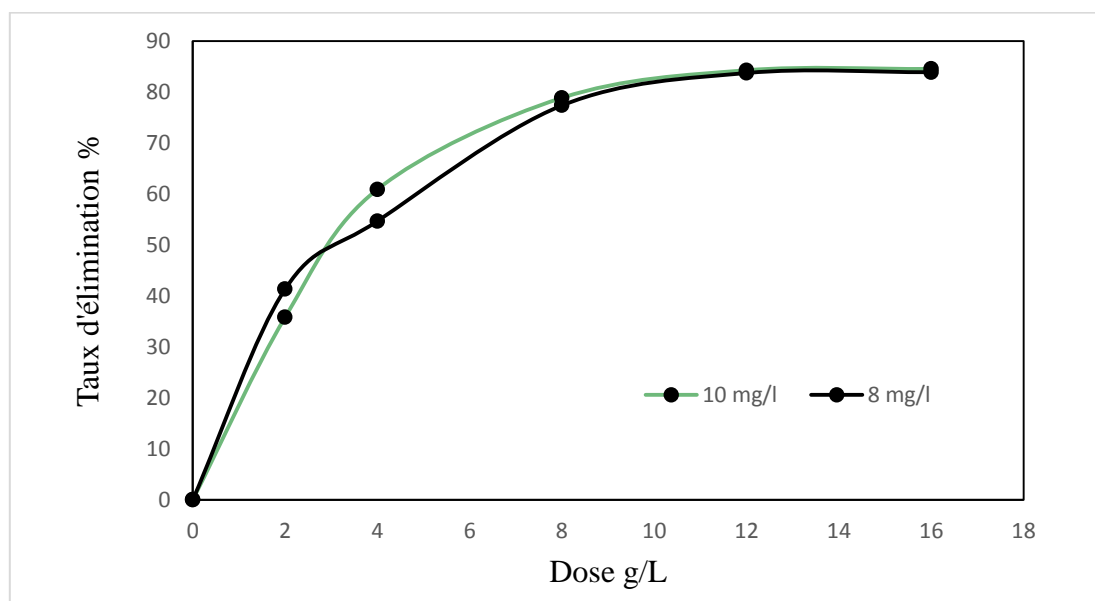


Figure III. 5. Représentation graphique de l'effet de dose sur l'adsorption

La Figure III.5 montre une augmentation de la quantité du Rhodamine B adsorbée à l'équilibre en fonction du taux d'élimination de l'adsorbat, avec une adsorption maximale atteinte à une dose d'adsorbant de 12 g/L (0.3g). Par conséquent, nous utiliserons cette dose optimale pour toutes les expériences de l'adsorption.

III.2.4 Détermination du pH optimale

Les résultats d'effet de pH sur l'adsorption sont représentés graphiquement sur la Figure III.6 et dans le tableau III.4.

Tableau III. 4: Résultats de l'effet de pH sur l'adsorption

pH	Taux (%)	C _{eq} (mg/L)	Quantité (mg/g)	C ₀ (mg/L)
2	79,00	2,09	1,07	10
4	73,85	2,61	1,03	
6	69,67	3,03	0,99	
8	63,49	3,65	0,94	
10	56,02	4,39	0,88	
2	99,67	0,032	0,83	15
4	98,06	0,19	0,81	
6	95,42	0,45	0,79	
8	95,75	0,42	0,79	
10	94,26	0,57	0,78	

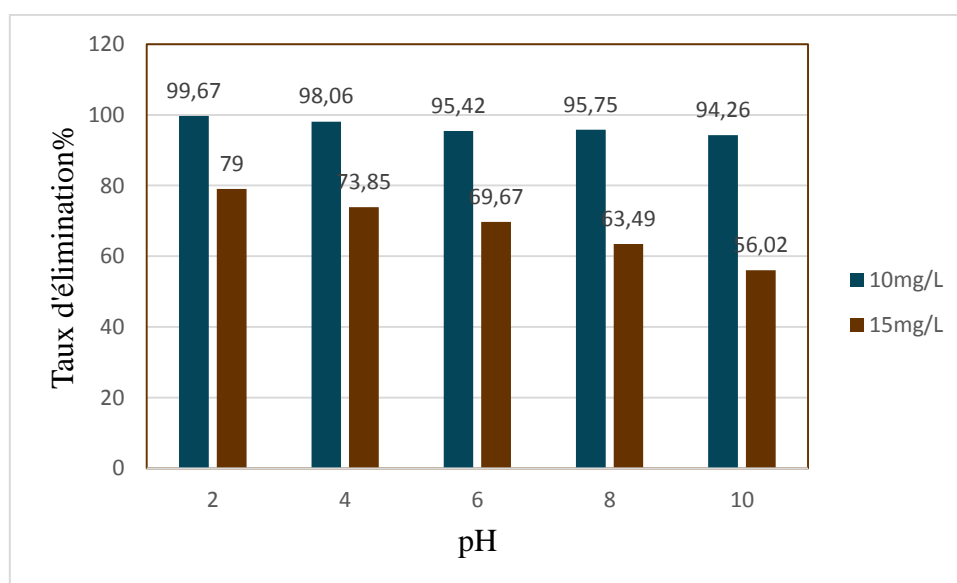


Figure III. 6. Représentation graphique de l'effet de pH sur l'adsorption

D'après la figure III.6, nous constatons que la capacité d'adsorption du Rhodamine B est la plus élevée pour une solution à un pH=2. La surface de la plupart des adsorbants (chitosan, biochars) est chargée positivement (H^+ dominant), La RhB^+ est répulsée, mais certains mécanismes non électrostatiques (liaisons H, interactions π - π) dominent. C'est à ce pH que l'isotherme d'adsorption sera établie.

III.2.5 Détermination des isothermes d'adsorption du Rhodamine B

Les valeurs de cette étude sont représentées graphiquement sur les figures. III.7 ; III.8 ; III.9 ; III.10 et dans le tableau III.5.

Tableau III.5: Résultats de l'isotherme d'adsorption

C₀ (mg/L)	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
C_{eq} (mg/L)	0,57	1,13	2,4	3,39	5,05	8,37	9,27	12,36	13,52	15,13	18,73
q_e (mg/g)	0,36	0,73	1,46	2,21	2,91	3,46	4,22	4,8	5,53	6,23	6,77
c_{eq}/q_e	1,55	1,54	1,63	1,53	1,73	2,41	2,19	2,57	2,44	2,42	2,76
log c_{eq}	-0,24	0,056	0,38	0,53	0,7	0,92	0,96	1,092	1,13	1,18	1,27
log q_e	-0,43	-0,13	0,16	0,34	0,46	0,54	0,62	0,68	0,74	0,79	0,83

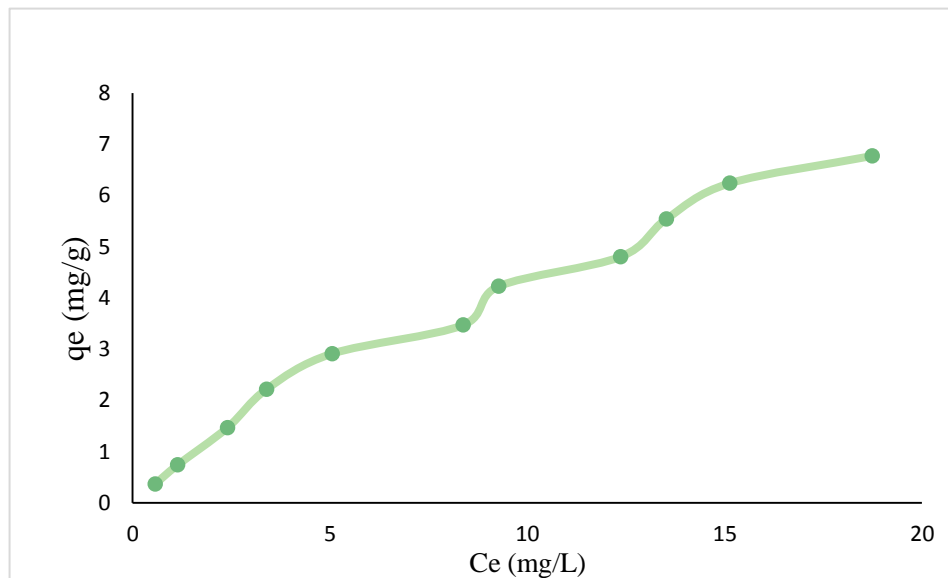


Figure III. 7. Isotherme d'adsorption

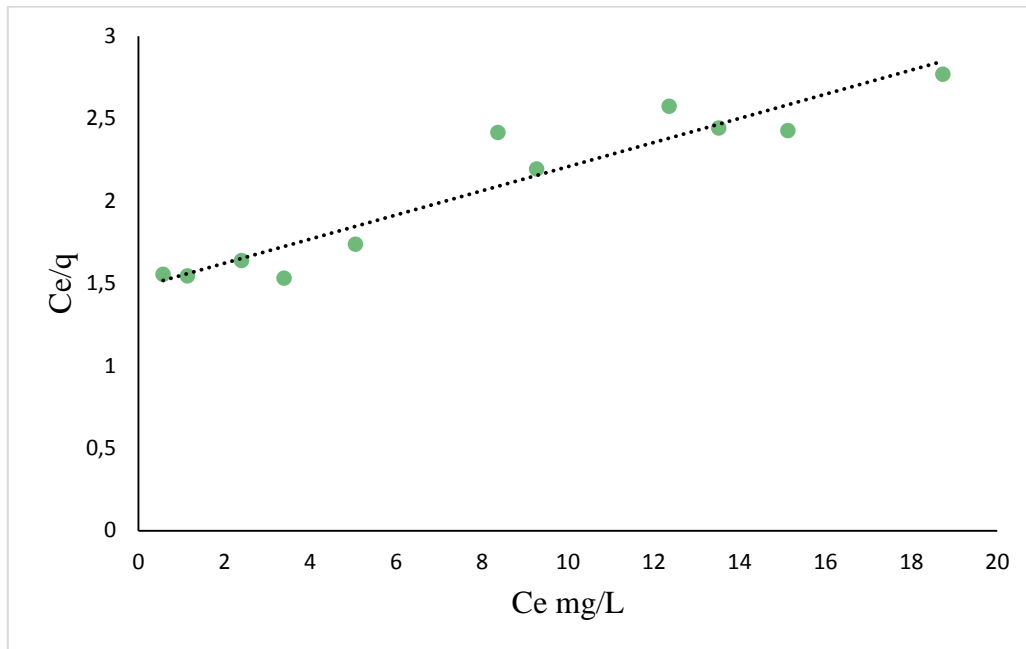


Figure III. 8 Modèle de Langmuir

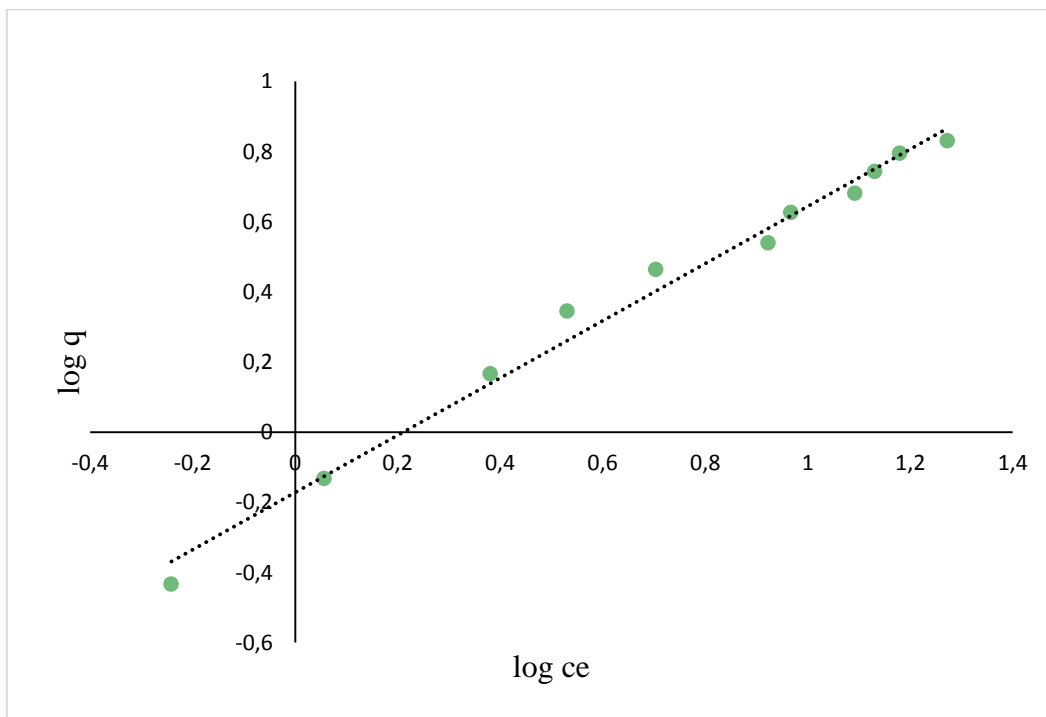


Figure III 9. Modèle de Freundlich

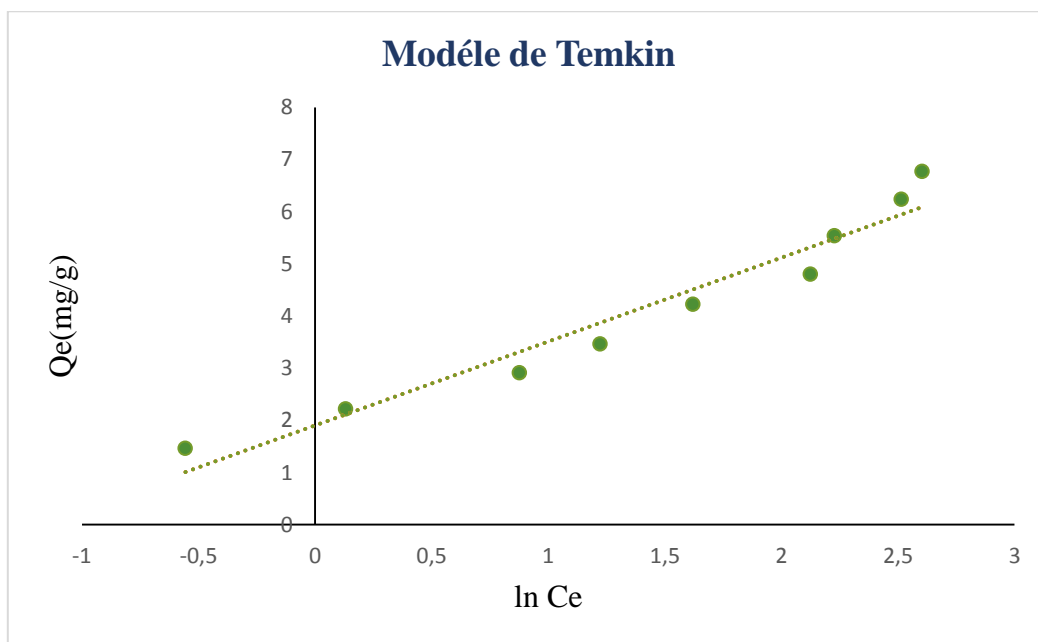


Figure III. 10. Modèle de Temkin

Tableau III. 5 Paramètres des modèles d'isothermes

Modèle de Langmuir		
q_{max} (mg/g)	K_L (L/mg)	R²
13,64	0,050	0,899
Modèle de Freundlich		
n	K_F (L/mg)	R²
1,407	0,853	0,981
Modèle de Temkin		
B_T (J/mol)	K_T (L/mg)	R²
1,61	3,26	0,954

Au vu des droites obtenues dans les (figures III8 ; III9 et III10) de leurs facteurs de corrélation R² qui sont respectivement 0,8998 ; 0,981 et 0,9538, on peut déduire que le modèle le plus adéquat est celui de Freundlich donc l'adsorption est hétérogène et non limitée à une monocouche, 1/n = 1.407 > 1 donc l'adsorption est favorable (plus forte aux faibles concentrations).

III.2.6 Etude thermodynamique de l'adsorption

Les résultats de ces mesures sont présentés dans les Figures III.17 ; III.18 et dans le tableau III.12.

Tableau III. 6 : Résultats de la thermodynamique d'adsorption

T (k°)	C _{eq} (mg/L)	Taux (%)	1/t	K _d	Ln (K _d)	C ₀ (mg/L)
298	0,86	91,30	0,0034	0,875	-0,133	10
303	1,34	86,54	0,0033	0,535	-0,623	
308	1,40	85,96	0,0032	0,510	-0,672	
313	1,89	81	0,0032	0,355	-1,034	
298	1,28	91,45	1,14	0,0034	0,892	15
303	1,44	90,34	1,13	0,0033	0,779	
308	1,59	89,35	1,12	0,0032	0,699	
313	1,69	88,66	1,11	0,0032	0,651	

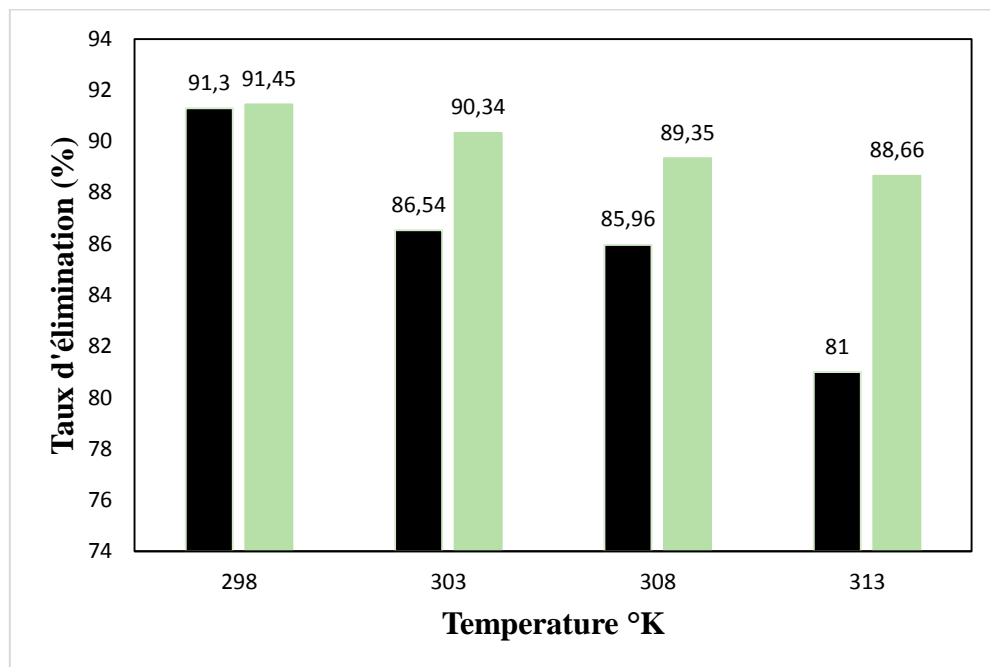


Figure III. 11. Représentation graphique des résultats de la thermodynamique d'adsorption

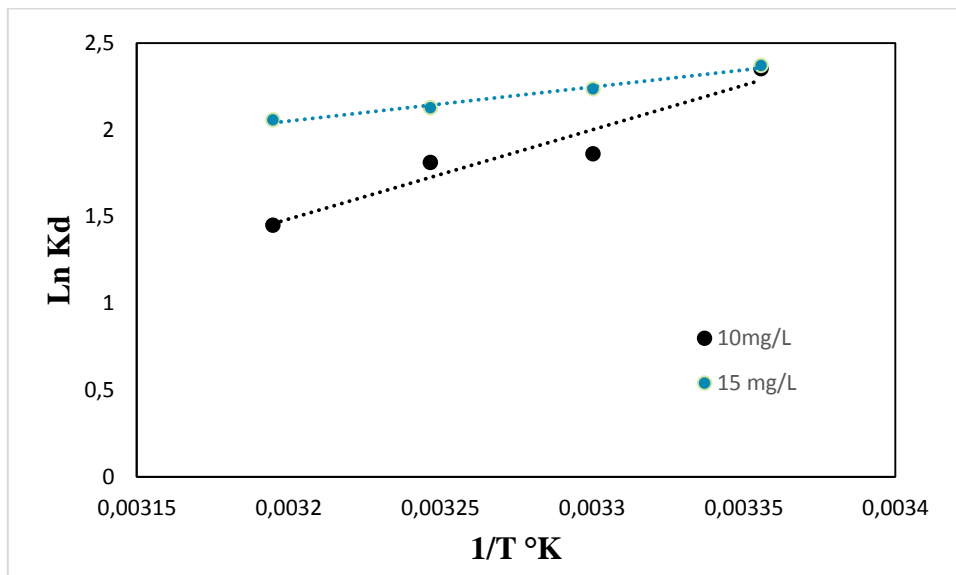


Figure III. 12. Courbes des résultats de la thermodynamique d'adsorption

Tableau III.3: Paramètres thermodynamiques

ΔG° (kJ/mol)				ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (J/mol.K)	C0 (mg/L)
298 K	303 K	308 K	313 K			
-5,826	-4,610	-4,489	-3,59	-42,76	-124,47	10
-5,8738	-5,632	-5,447	-5,353	-16,30	-35,11	15

D'après les résultats des paramètres thermodynamiques obtenus dans le tableau III.5, on n'observe que l'énergie libre ($\Delta G^\circ < 0$) dans tous les cas. Ceci indique que l'adsorption du Rhodamine B sur l'adsorbant est spontanée. L'enthalpie ($\Delta H^\circ < 0$), ce qui implique que le processus de l'adsorption est exothermique ainsi qu'une température plus élevée facilite l'adsorption, ($\Delta S^\circ < 0$) est négative cela veut dire que les molécules du Rhodamine B restent plus ordonnées sur l'interface solide/ liquide à la cour de processus d'adsorption.

III.2.7 Cinétique d'adsorption du Rhodamine B

Les résultats des mesures de la cinétique d'adsorption sont représentés sur les Figures III.13 et III.14 ; et mentionnés dans les Tableaux III.7.

Tableau III. 7 : Résultats de la cinétique d'adsorption

Temps (min)	Taux (%)	C _{eq} (mg/L)	Q (mg/g)	t/q _e	q _e -q _t	Log (q _e -q _t)	t [^] (1/2)	C0 (mg/L)
5	89,18	1,081	0,74	6,72	0,012	-1,890	2,236	10
10	90,53	0,946	0,75	13,25	0,0016	-2,793	3,16	
15	90,47	0,952	0,75	19,89	0,0021	-2,668	3,87	
30	90,59	0,940	0,75	39,73	0,0010	-2,96	5,47	
45	90,40	0,959	0,75	59,73	0,0005	-3,27	6,708	
60	90,59	0,940	0,75	79,47	0	0	7,746	
5	89,39	1,59	0,70	7,13	0,13	-0,87	2,236	15
10	90,42	1,43	0,71	14,01	0,01	-1,77	3,16	
15	90,29	1,45	0,71	21,06	0,01	-1,73	3,87	
30	94,29	0,85	0,76	39,37	-0,04	0	5,47	
45	92,48	1,12	0,73	60,85	-0,009	0	6,708	
60	91,75	1,23	0,73	82,15	0	0	7,746	

III.2.7.1 Modèle cinétique pseudo-premier ordre

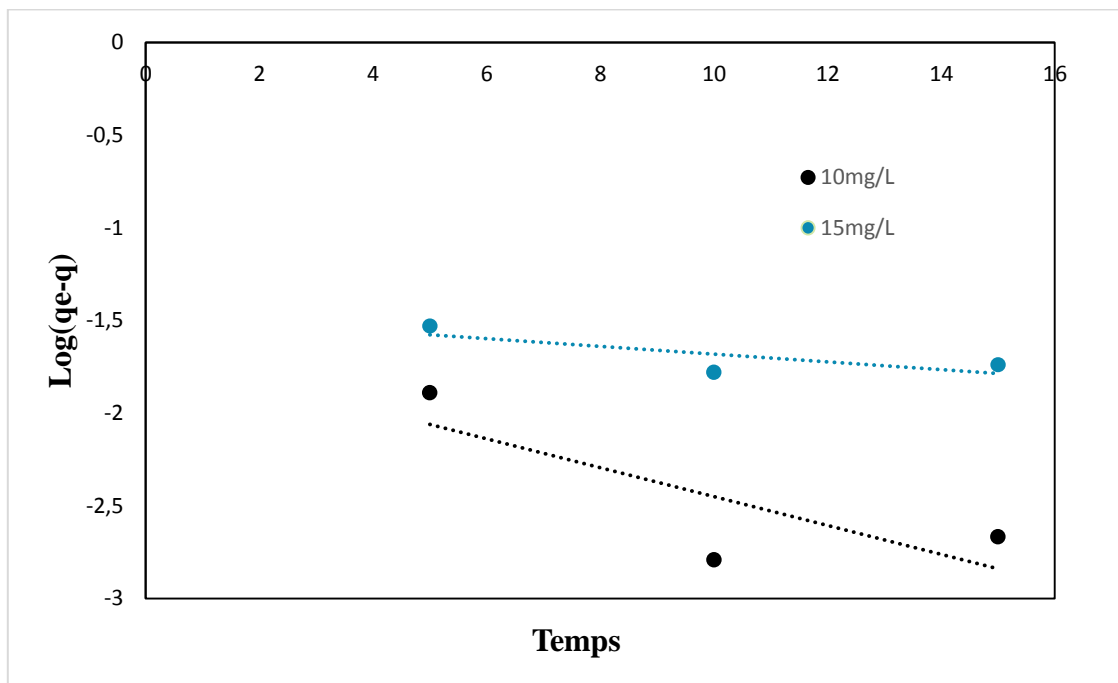


Figure III. 13 .Modèle cinétique pseudo-premier ordre

III.2.7.2 Modèle cinétique pseudo-deuxième ordre

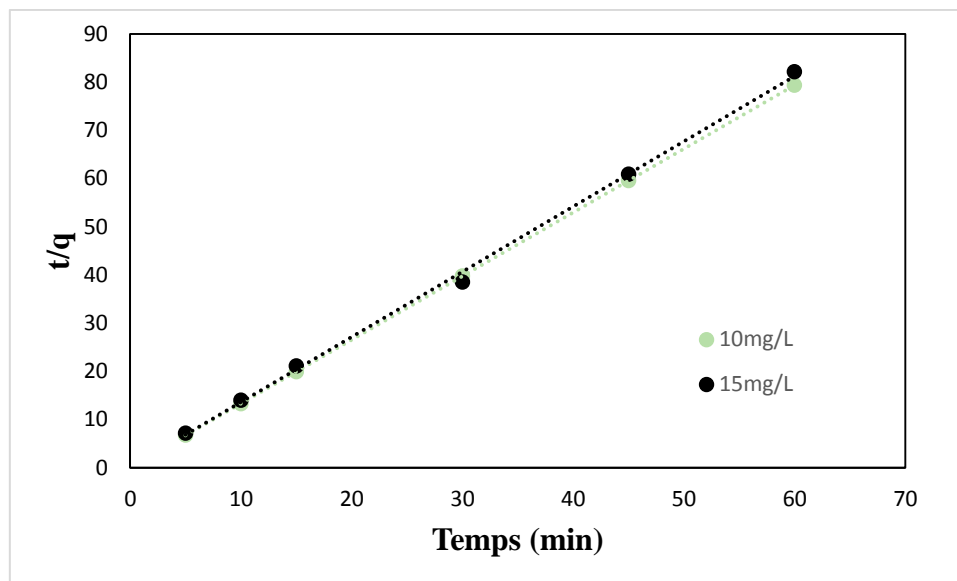


Figure III. 14. Modèle cinétique pseudo-deuxième ordre

Tableau III. 8: Paramètres de la cinétique d'adsorption

Modèle cinétique de pseudo 1 ^{er} ordre				
q _e (exp) (mg/g)	q _e (cal) (mg/g)	k ₁ (min ⁻¹)	R ²	Concentration (mg/L)
0,756	0,021	0,0209	0,5464	10
0,730	0,033	0,0778	0,6103	15
Modèle cinétique de pseudo 2 ^{ème} ordre				
q _e (exp) (mg/g)	q _e (cal) (mg/g)	k ₂ (g.mg ⁻¹ . min ⁻¹)	R ²	Concentration (mg/L)
0,756	0,75	20,87	1	10
0,730	0,74	21,5	1	15

D'après les résultats obtenus présentés sur les (Figures III.13 III.14), et dans le tableau III.8, on remarque que l'application du modèle de pseudo premier ordre pour l'adsorption du Rhodamine B donne un coefficient de détermination (R²) bas. Par contre le coefficient de détermination (R²) du pseudo second ordre est élevé.

On peut conclure que le modèle de pseudo second ordre est le plus fiable pour déterminer l'ordre de cinétique d'adsorption du colorant et qui représente un bon coefficient de corrélation R^2 qui est de l'ordre de 1.

Conclusion générale

Notre étude a été réalisée en trois étapes, la première étape est la préparation des feuilles d'artichauts à partir d'un déchet végétal, la seconde étape est la caractérisation de l'adsorbant avec l'indice de Bleu de Méthylène, l'indice d'Iode et le pH_{pzc}, et la dernière étape est l'application.

L'objectif de cette étude est d'évaluer la capacité d'adsorption d'un colorant organique par des feuilles d'artichaut, en examinant l'influence du temps, du pH, de la concentration et de la température. Les données expérimentales seront interprétées via des modèles d'isothermes et une analyse cinétique.

Les résultats sont :

- L'indice de Bleu de Méthylène est 171.12 mg/g
- L'indice d'iode est 104.08 mg/g
Donc la surface de l'adsorbant est hétérogène.
- La valeur du pH_{pzc} est 6.2
- Le temps de contact nécessaire pour atteindre le rendement d'adsorption maximal est de 60 minutes.
- La dose optimale pour atteindre une adsorption maximale d'adsorbant est de 12 g/L (0.3g).
- Le pH optimal pour obtenir le meilleur rendement est à pH= 2.

En ce qui concerne les résultats des études cinétiques, la modélisation d'isotherme et la modélisation de la thermodynamique on peut conclure que :

- Dans notre étude, nous avons analysé l'adsorption du Rhodamine B sur un adsorbant à l'aide de plusieurs modèles d'adsorption. Parmi ceux-ci, le modèle de Freundlich a été choisi pour sa capacité à bien décrire l'isotherme d'adsorption observée. Ce modèle a permis de caractériser précisément la formation des multicouches de Rhodamine B sur la surface de l'adsorbant.
- Les résultats de l'étude thermodynamique ont montré que l'adsorption du Rhodamine B sur l'adsorbant est un processus spontané et exothermique.
- La cinétique d'adsorption du Rhodamine B sur l'adsorbant suit le modèle pseudo-deuxième ordre R² est de 0.9977

Cette étude contribue à la valorisation des déchets végétaux en démontrant l'efficacité des feuilles d'artichaut comme adsorbant bio source. Les résultats obtenus offrent des pistes pour une gestion durable des eaux polluées et aussi pour la réduction des déchets agricoles par leur transformation en un matériau utile.

Références

- [1] Thue, Patrícia S., Lima, Elvio C., Sieliechi, Joseph M., dos Reis Borges, Talita A., Machado, Fabricio M., Puchana-Rosero, María J., & Tran, Hai N. (2018). Adsorption des contaminants émergents par des biochars dérivés de déchets agricoles
- [2] Benally, C., Oumam, M., Mustapha Bensaida, M., & El Alem, N. et al. (2021). Adsorption des métaux lourds par des biomodifiés à base de résidus agricoles : Performances et mécanismes. *Revue des Sciences de l'Eau*, 34(3), 215-230.
- [3] El Achaby, Abdellah El Kharraz, M., El Achaby, M., Qaiss, A., & Vaudreuil, S. (2018). "Artichoke (*Cynara cardunculus* L.) Waste as a natural filler for polymer composites: Preparation and characterization". *Waste and Biomass Valorization*, 9(11), 2069-2079.
- [4] Galanakis, C.M Boukoussa, B., Hammoudi, M., & El Alem, N. (2023). "Sustainable Applications for the Valorization of *Cynara Cardunculus* L. By-Products". *Circular Economy and Sustainability*, 3(1), 421-443.
- [5] Amalric, J., et al. (2023). "Valorisation des déchets foliaires d'artichaut (*Cynara scolymus* L.) Comme bioadsorbant pour l'élimination des métaux lourds et colorants azoïques". *Déchets Sciences & Techniques*, 89, 45-58.
- [6] Rouquerol, François, Rouquerol, J., & Sing, K. (1999). *Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications*. Academic Press.
- [7] Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC), « Compendium of Chemical Terminology (Gold Book): Adsorption
- [8] Rouquerol, François, Rouquerol, J., & Sing, K. (1999). *Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications*. Academic Press.
- [9] Rouquerol, F., Rouquerol, J., & Sing, K. (2013).
- [10] Joly, J.-P. (2005). *Adsorption et chimisorption sur les surfaces solides*. Techniques de l'Ingénieur, réf. IN85.
- [11] Le Cloirec, P. (2012). *Les composés organiques volatils dans l'environnement*. Presses des Mines, Chapitre 4.
- [12] Villiéras, F., et al. (2002). "Les phénomènes d'adsorption aux interfaces solides-liquides". *Techniques de l'Ingénieur*, J2 150.
- [13] Millero, F.J. (2001). "The pH of estuarine waters". *Limnology and Oceanography*, 46(2), 229-240.

Références

- [14] Le Cloirec, P. (2012). Les composés organiques volatils dans l'environnement. Presses des Mines, Section 4.3.
- [15] Villiéras, Frédéric. et al. (2002). "Les phénomènes d'adsorption aux interfaces solides-liquides". Techniques de l'Ingénieur, J2 150, §4.3.
- [16] Rouquerol, Francois., & Sing, Kenneth. (2013). L'adsorption – Des gaz et des liquides par les solides poreux.
- [17] Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). *Adsorption des colorants sur des matériaux naturels: Une revue*. Environmental Chemistry Letters, 17(1), 145-155.
- [18] Bhatnagar (2015), "*Agricultural waste peels as versatile biomass for water purification: A review.*» Chemical Engineering Journal, 270, 244-271.
- [19] El Hajam (2018), "*Valorisation des co-produits animaux (plumes, laine, os) dans le traitement des eaux.*", Thèse, Université de Lorraine.
- [20] Vijayaraghavan, & Yun, Y.-S. (2008), "*Bacterial biosorbents and biosorption.*", Biotechnology Advances, 26(3), 266-291.
- [21] Rouquerol, F., et al. (2012), "*Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications*" (2nd ed.).Academic Press.
- [22] Norme AFNOR NF T 90-037 (1986), "*Détermination de l'indice de bleu de méthylène des argiles et matériaux similaires.*", Association Française de Normalisation (AFNOR).
- [23] Guo (2022), "*Relationship between iodine number and BET surface area for nanoporous materials*", Microporous and Mesoporous Materials 333:111704
- [24] Kosmulski, (2009), "*pH-dependent surface charging and points of zero charge. IV. Update and new approach*", Journal of Colloid and Interface Science 337(2):439-448
- [25] Gupta, V.K. et al. (2013), "*A critical review on recent developments in the low-cost adsorption of dyes from wastewater*", Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 43(10), 1071-1123.
- [26] Rouquerol, François, Rouquerol, J., & Sing, K. (1999). Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications. Academic Press.
- [27] Bansal, R. C. & Goyal, M. (2005). Activated Carbon Adsorption. Taylor & Francis. Foo, K. Y. & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modelling of adsorption isotherm systems. Chemical Engineering Journal, 156(1), 2–10.

Références

- [28] Langmuir, I. (1918). "The Adsorption of Gases on Plane Surfaces of Glass, Mica and Platinum". *Journal of the American Chemical Society*, 40(9), 1361-1403.
- [29] Freundlich, H. (1906), "*Über die Adsorption in Lösungen.*", *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 57, 385-470.
- [30] Dada, A.O. et al. (2012), "*Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin-Radushkevich isotherms studies of equilibrium sorption of Zn²⁺ onto phosphoric acid modified rice husk.*"
- [31] Brunauer, S., Emmett, P.H. & Teller, E. (1938), "Adsorption of Gases in Multimolecular Layers", *Journal of the American Chemical Society* 60(2):309-319
- [32] Gibbs, J.W. (1876). "On the Equilibrium of Heterogeneous Substances"
- [33] van't Hoff, J. H. (1884). *Études de dynamique chimique*. (trans. from Dutch: "Études de dynamique chimique", Frederik Müller & Co, Amsterdam).
- [34] Somorjai, G. A., & Li, Y. (2010), *introduction to Surface Chemistry and Catalysis* (2nd ed.). Wiley.
- [35] Ho, Y. S. & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes.
- [36] Zollinger, H. (2003)
- [37] Burkinshaw, S.M. (2016), "*Physico-chemical Aspects of Textile Coloration*"
- [38] Zollinger, H. (2003), "*Color Chemistry: Syntheses, Properties, and Applications of Organic Dyes and Pigments*", Wiley-VCH, 3rd edition
- [39] Hunger, K. (2003), "*Industrial Dyes: Chemistry, Properties, Applications*", Wiley-VCH
- [40] Jones, K.C. & de Voogt, P. (1999), "Persistent organic pollutants (POPs): state of the science", *Environmental Pollution* 100(1-3):209-221
- [41] Chung, K.T. (2016), "Azo dyes and human health: A review", *Journal of Environmental Science and Health, Part C* 34(4):233-261
- [42] Puvaneswari et al. (2006), "Toxicity assessment and microbial degradation of azo dyes", *Indian Journal of Experimental Biology* 44:618-626
- [43] Lombardo, S., & Pandino, G. (2014). Artichoke [*Cynara cardunculus* L. subsp. *scolymus* (L.) Hegi]: Botany, horticulture, and breeding. In: Janick, J. (Ed.), *Horticultural Reviews*, 42, 139–181.
- [44] Thue, (2018). Adsorption des contaminants émergents par des biochars dérivés de déchets agricoles : Une revue. *Revue des Sciences de l'Eau*, 31(2), 105-126.

Références

[45] ASTM D4607-94(2021), "Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon", ASTM International

[46] AFNOR NF P94-068 (1998) – Sol – Reconnaissance et essais – Détermination de la capacité d'échange cationique et de la surface spécifique par adsorption du bleu de méthylène

[47] Huang et al. (2021), "Rhodamine B: A review of its detection, toxicity, and degradation", Environmental Research, 200, 111366

[48] Zollinger (2003) : "Color Chemistry" (Wiley)