



Department of Process Engineering

Ref :...../U.M/F.S.T/2024

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم هندسة الطرائق

رقم:..... / ج. م. ك. ع. ت. / 2024

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des procédés

Option : Génie chimique

THÈME

Préparation et caractérisation d'un charbon actif à base d'un déchet
végétal : Application à l'adsorption, étude cinétique et
thermodynamique

Présenté par

- 1- SELLA Zineb
- 2- HAMADI Chemss

Soutenu le 30 /06 / 2024 devant le jury composé de :

Présidente :	N. MAHREZ	MCA	Université de Mostaganem
Examinatrice :	N. DOUARA	MCA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	M. BENZEKRI BENALLOU	MCA	Université de Mostaganem
Co-Encadreur	K. KHALILI	Doctorante	Université de Mostaganem

Remercîment

Tout d'abord, on tient à remercier le bon Dieu Tout-Puissant pour toutes ses bénédictions dont ce travail fait partie. On remercie madame **N. MAHREZ** la présidente de jury pour avoir accepté de présider ce jury.

Nous tenons à remercier madame **N. DOUARA** pour avoir accepté de nous avoir examiné notre travail de fin d'étude.

On tient à exprimer notre profonde gratitude et reconnaissance envers notre encadrant monsieur **M. BENZEKRI BENALLOU** pour sa patience, encouragements et surtout les efforts qu'il a faits pour nous avoir accueillies au sein de laboratoire structure.

On remercie vivement notre Co-encadrante mademoiselle **K. KHALILI** pour l'intérêt qu'elle a porté à notre travail et pour avoir accepté de nous aider.

Nous exprimons notre gratitude à tous les professeurs qui ont contribué et influencé d'une manière ou d'une autre sur la réalisation de ce travail grâce à leur enthousiasme durant notre parcours universitaire.

Un remerciement plus particulier à tous nos enseignants de département de science de la technologie 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.

Dédicace

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* ☼

Zineb et Chemss

Résumé

Ce mémoire se concentre sur la préparation, la caractérisation et l'application du charbon actif, produit à partir de déchets végétaux, pour l'adsorption d'un colorant Rouge Acide 14 (Azorubine).

La première étape de l'étude consiste à fabriquer du charbon actif en utilisant des déchets végétaux comme matière première. Le processus inclut la carbonisation des déchets végétaux suivie d'une activation par un agent basique pour augmenter la surface spécifique et la porosité du charbon obtenu.

La deuxième étape implique la caractérisation des charbons activés obtenus par l'indice d'iode et Bleu méthylène. et dernièrement nous avons étudié l'influence de quelques paramètres sur la capacité d'adsorption à savoir la masse d'adsorbant, la température, le pH du milieu et du colorant avec la modélisation des isothermes et la cinétique d'adsorption.

Mots clés : Adsorption, Charbon actif, Azorubine, Rouge Acide 14.

ملخص

تركز هذه الأطروحة على تحضير وتوصيف وتطبيق الكربون المنشط الناتج من المخلفات النباتية لامتصاص صبغة الأحمر الحمضي 14 (الأزوروبين).

تتكون المرحلة الأولى من الدراسة من تصنيع الكربون المنشط باستخدام المخلفات النباتية كمواد خام. تتضمن العملية تفحيم النفايات النباتية يليها التنشيط بعامل أساسي لزيادة المساحة السطحية المحددة ومسامية الكربون الناتج.

تتضمن الخطوة الثانية توصيف الكربون المنشط الذي تم الحصول عليه بواسطة مؤشر اليود والميثيلين الأزرق ومؤخراً قمنا بدراسة تأثير بعض العوامل على قدرة الامتزاز وهي كتلة المادة المازة ودرجة الحرارة ودرجة الحموضة للوسط والصبغة. مع نمذجة متساوي الحرارة وحركية الامتزاز.

الكلمات المفتاحية: الامتزاز، الكربون المنشط، الأزوروبين، حمض أحمر 14.

Abstract

This dissertation focuses on the preparation, characterization and application of activated carbon, produced from plant waste, for the adsorption of a acid Red 14 dye (Azorubin).

The first stage of the study consists of manufacturing activated carbon using plant waste as raw material. The process includes the carbonization of plant waste followed by activation with a basic agent to increase the specific surface area and porosity of the carbon obtained.

The second step involves the characterization of the activated carbons obtained by the iodine index and Methylene Blue. and recently we studied the influence of some parameters on the adsorption capacity, namely the mass of adsorbent, the temperature, the pH of the medium and the dye with modeling of isotherms and adsorption kinetics.

Key words: Adsorption, Activated carbon, Azorubin, Acid Red 14.

Sommaire

Introduction générale	1
I.1.1 Introduction.....	2
I.1.2 Définition	2
I.1.3 Les types d'adsorption	2
I.1.4 Les facteurs influençant des paramètres d'adsorption	3
I.1.5 Le mécanisme d'adsorption	3
I.2.1 Généralité.....	4
I.2.2 Généralité sur les colorants.....	4
I.3.1 Généralité sur le charbon actif.....	5
I.3.2 Définition du charbon actif.....	5
I.3.4 Origine des charbons actifs.....	6
I.3.5 Structure poreuse du charbon actif	6
II.1 Préparation de l'adsorbant	7
II.2 Caractérisation de l'adsorbant.....	8
II.2.1 Indice d'iode.....	8
II.2.2 Bleu méthylène.....	9
II.2.3 Détermination de la courbe d'étalonnage.....	10
II.3 Choix de molécule étudiée.....	12
II.3.1 Le colorant Rouge Acide 14 (Azorubine).....	12
II.4 Méthode de dosage Rouge Acide 14 (Azorubine).....	12
II.4.1 Dosage par spectrophotométrie	12
II.5 Application à l'adsorption de Rouge Acide 14 (Azorubine)	13
II.5.1 Détermination de la courbe d'étalonnage de Rouge Acide 14 (Azorubine)	13
II.6 Détermination du temps d'équilibre	15
II.7 L'effet de la dose de l'adsorbant sur l'adsorption.....	15
II.8 L'effet de pH sur l'adsorption de Rouge Acide 14 (Azorubine)	16

II.9 Isotherme d'adsorption de Rouge Acide 14 (Azorubine)	17
II.9.1 Les modèles d'isothermes d'adsorption	18
II.10 Thermodynamique d'adsorption de Rouge Acide 14	20
II.10.1 Paramètres thermodynamiques d'adsorption de Rouge Acide 14.....	21
II.11 Cinétique d'adsorption de Rouge Acide 14 (Azorubine).....	22
II.11.1 Modèle cinétique pseudo-premier ordre	23
II.11.2 Modèle cinétique pseudo-deuxième ordre	23
II.11.3 Modèle cinétique diffusion intra-particulaire.....	24
Conclusion générale	26
Références	27

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma de l'adsorption physique.....	3
Figure I.2 : Les colorants alimentaires et industriels.....	4
Figure I.3 : La structure de charbon actif.....	5
Figure II.1 Préparation du charbon actif poudre.....	7
Figure II.2 Les étapes de détermination l'indice d'iode.....	9
Figure II.3 Courbe d'étalonnage du bleu de méthylène.....	11
Figure II.4 Les valeurs de l'indice de BM et l'indice d'iode.....	11
Figure II.5 Structure chimique d'Azorubine.....	12
Figure II.6 Principe d'absorption de la lumière monochromatique par un corps absorbant....	13
Figure II.7 La courbe d'étalonnage de Rouge Acide 14	14
Figure II.8 Taux d'élimination de Rouge Acide 14 en fonction du temps.....	15
Figure II.9 Taux d'élimination en fonction de la dose.....	16
Figure II.10 Taux d'élimination en fonction de pH.....	17
Figure II.11 L'isotherme d'adsorption de Rouge Acide 14 $q_e=f(C_e)$	18
Figure II.12 L'isotherme d'adsorption de Rouge Acide 14 pour le modèle de Langmuir.....	19
Figure II.13 L'isotherme d'adsorption de Rouge Acide 14 pour le modèle de Freundlich.....	19
Figure II.14 L'isotherme d'adsorption de Rouge Acide 14 pour le modèle de Tamkin.....	20
Figure II.15 Taux d'élimination de Rouge Acide 14 à différentes températures.....	21
Figure II.16 Évolution de $\ln(K_d)$ en fonction de $1/T$ pour l'adsorption de Rouge Acide 14 par l'adsorbant.....	22
Figure II.17 Cinétique d'adsorption de Rouge Acide 14 de pseudo 1 ^{ier} ordre.....	23
Figure II.18 Cinétiques d'adsorption de Rouge Acide 14 de pseudo 2 ^{ème} ordre.....	24
Figure II.19 Cinétique d'adsorption de Rouge Acide 14 de diffusion intra-particulaire.....	25

Liste des tableaux

Tableau I.1 Tailles des pores et surface spécifique des charbons actifs.....	6
Tableau II.1 Élaboration de la courbe d'étalonnage pour la Rouge Acide 14.....	14
Tableau II.2 Résultats obtenue d'isotherme d'adsorption de Rouge Acide 14 pour les trois modèles	20
Tableau II.3 Paramètres thermodynamiques d'adsorption de Rouge Acide 14.....	22
Tableau II.4 Résultats obtenue de la cinétique d'adsorption de Rouge Acide 14 de pseudo 1 ^{er} ordre et 2 ^{ème} ordre.....	24
Tableau II.5 Résultats obtenue de la cinétique d'adsorption de Rouge Acide 14 de diffusion intra-particulaire.....	25

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].

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 [2].

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 [3].

Une prise de conscience c'est généralisé chez les scientifiques qui cherchent des procédés de dépollution pour l'élimination des polluants organiques fréquemment retrouvé à concentration significative dans les milieux aquatiques [4].

La dépollution d'eaux usées peut être réalisée par différents procédés comme traitement physique, traitement chimique, traitement biologique, membranes, adsorption.

L'adsorption reste parmi les techniques les plus utilisés et facile. 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 [5].

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail dont l'objectif est d'étudier les capacités d'adsorption d'un charbon actif préparé au laboratoire, notre travail de fin d'étude est divisé en trois parties

- La première partie consiste à la préparation d'un charbon actif à partir d'un déchet végétal.
- La deuxième partie caractérisation du charbon actif préparé.
- La troisième partie application à l'adsorption.

I.1.1 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 [8].

I.1.2 Définition

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 traicteur 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 [9].

I.1.3 Les types d'adsorption

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

I.1.3.1 Adsorption Physique

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 [10].

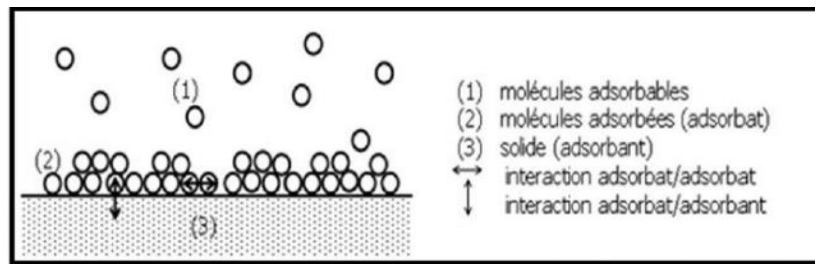


Figure I.1 Schéma de l'adsorption physique

I.1.3.2 Adsorption Chimique

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 [11].

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 [12].

I.1.4 Les facteurs influençant des paramètres d'adsorption

L'adsorption dépend de nombreux facteurs dont les principaux sont :

- Les caractéristiques de l'adsorbant : polarité, volume poreux, surface spécifique et fonctions superficielles.
- Les caractéristiques de l'adsorbat : polarité, solubilité et poids moléculaire, Les paramètres physico-chimiques du milieu la température et pH.

I.1.5 Le mécanisme d'adsorption

Le mécanisme d'adsorption au cours de l'adsorption d'une espèce sur un solide, le transfert de masse des molécules se fait de la phase fluide vers l'adsorbant. Ce processus s'opère au sein d'un grain d'adsorbant en trois étapes :

- ✓ Diffusion externe : Elle correspond au transfert du soluté (molécules de la Phase liquide) du sein de la solution à la surface externe des particules ;
- ✓ Diffusion interne : Les particules de fluide pénètrent à l'intérieur des pores. Elle dépend du gradient de concentration de la solution ;
- ✓ Diffusion de surface : Elle correspond à la fixation des molécules sur la surface des pores [13].

I.2.1 Généralité

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 [14].

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 [15].

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 [16].

I.2.2 Généralité sur les colorants

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 [17, 18].

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, 20]. Dans notre étude, nous avons choisi un colorant (Azorubine) comme modèle représentatif des polluants organiques.



Figure I.2 Les colorants alimentaires et industrielles

I.3.1 Généralité sur le charbon actif

Le charbon, classiquement utilisé comme combustible, est dernièrement utilisé pour son haut contenu en carbone et ses propriétés spécifiques notamment dans la fabrication des électrodes, des fibres de carbone, des catalyseurs et comme matière première pour l'élaboration des adsorbants sous la forme de charbon actif. Brièvement un charbon actif est un matériel solide résistant à la haute température avec une capacité d'adsorption qui est définie par le volume poreux et les groupes fonctionnels, principalement oxygénés, qui se trouvent à la surface.

Les applications principales du charbon actif sont entre autres la purification, décoloration, désodorisation et en général la désintoxication des eaux potables ainsi que la purification de l'air et des produits chimiques alimentaires [21].

I.3.2 Définition du charbon actif

Les charbons actifs sont de loin les adsorbants les plus fabriqués et utilisés industriellement. Ils peuvent être obtenus à partir d'un grand nombre de matériaux carbonés (bois, charbon, noix de coco, résidus pétroliers, margine, etc.), par des processus de carbonisation suivis des processus d'activation dûment contrôlés.

Les charbons actifs sont composés de microcristallines élémentaires de graphite qui sont assemblées avec une orientation aléatoire. Ils sont fréquemment utilisés pour la récupération des vapeurs de solvants et d'hydrocarbures, la décoloration, la purification d'eau, l'élimination d'odeur [22].



Figure I.3 La structure de charbon actif

I.3.4 Origine des charbons actifs

Les matériaux d'origines carbonées sont valorisés pour la préparation des charbons actifs avec des propriétés finales remarquables, telles que la surface spécifique, la distribution des pores et la capacité d'adsorption. Les matériaux couramment utilisés incluent les composés lignocellulosiques et carbonés [23].

Les matériaux lignocellulosiques, tels que le bois, les coques de noix (comme celles de coco et d'amandes), et les résidus agricoles (comme la paille de riz et les coques de café), sont abondants et faciles à traiter, produisant des charbons avec une bonne porosité et des propriétés variables [24].

Les matériaux carbonés, comme le charbon minéral et la tourbe, sont également utilisés. Le charbon minéral, avec sa haute teneur en carbone, produit un charbon actif à bonne capacité d'adsorption, idéal pour le traitement de l'eau et la purification des gaz industriels [25].

I.3.5 Structure poreuse du charbon actif

Les pores sont classés en trois types de porosité selon leur diamètre, et selon la définition de l'IUPAC [26], la porosité est classée de la manière suivante :

Tableau I.1 Tailles des pores et surface spécifique des charbons actifs.

	Micropores	Mésopores	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

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 mésopores [27].

II.1 Préparation de l'adsorbant

Pour ce projet, nous avons décidé de mettre en valeur un déchet végétal. La préparation de ce matériau, reçu de manière partielle :

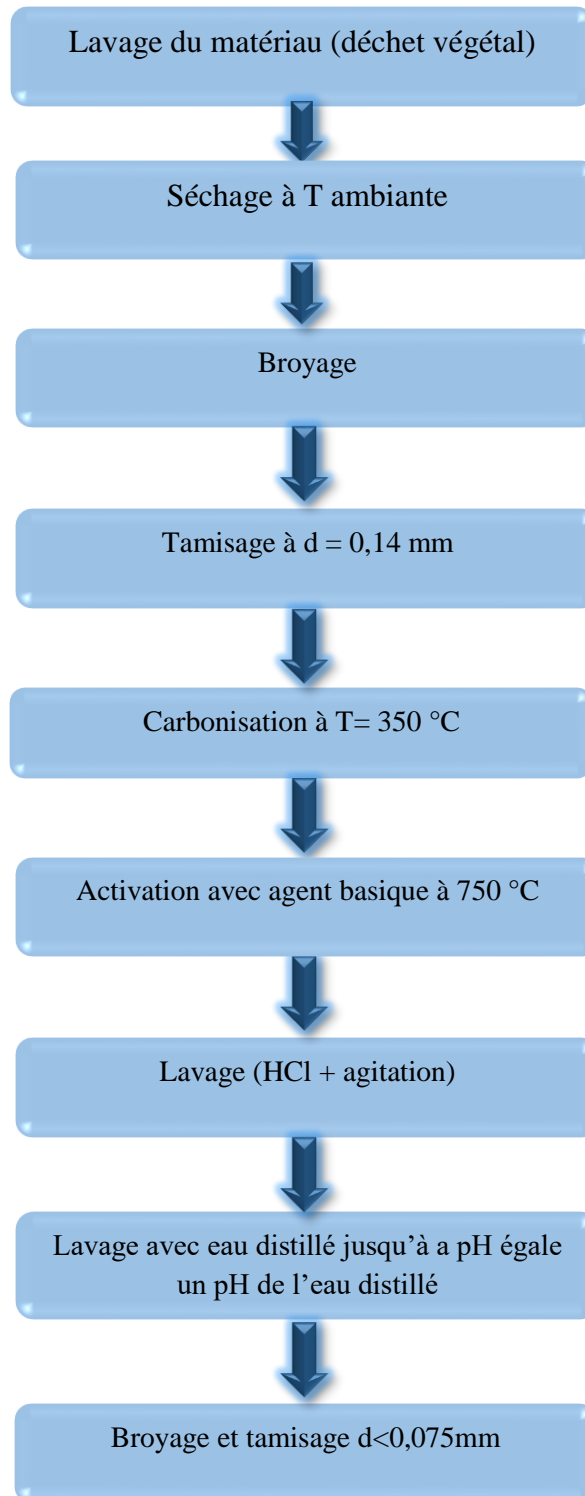


Figure II.1 Préparation du charbon actif poudre

II.2 Caractérisation de l'adsorbant

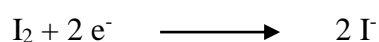
II.2.1 Indice d'iode

II.2.1.1 Définition

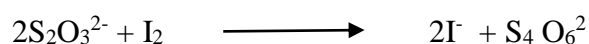
L'indice d'iode fournit une indication sur la microporosité du l'adsorbant. C'est le nombre de milligrammes d'iode adsorbé par gramme d'adsorbant à une concentration résiduelle de 0,02 N [28].

II.2.1.2 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 :



II.2.1.3 Préparation des solutions

Pour préparer une solution d'iode de concentration 0,1 N, commencez par peser 19,10 g d'iodure de potassium cristallisé. Dissolvez-le dans une petite quantité d'eau. Ensuite, pesez 12,69 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 (1 L). 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 24,82 g de ce sel dans une fiole jaugée de 1 litre. 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.

II.2.1.4 Protocole de l'indice d'iode

Pour déterminer l'indice d'iode de chaque charbon actif 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.

On pèse 0,2 g d'adsorbant préparé qui a été séché auparavant à 150 °C dans l'étuve pendant 3h heures, on le transpose dans un flacon, ajouter 10 mL de HCl et remue doucement jusqu'à ce que l'échantillon soit complètement mouillé, on porte à ébullition pendant 30 secondes, laisse refroidir à température ambiante, transpose 100 mL de la solution d'iode dans le flacon, le bouche immédiatement et agite rigoureusement pendant 30 secondes, on filtre, ensuite on écarte les 20 à 30 mL du filtrat et récupérer le reste dans un bécher. On pipete 50 cm³ du filtrat dans un erlenmeyer propre de 250 mL, titre goutte à goutte avec Na₂S₂O₃ jusqu'à ce que la solution devienne transparente on note le Volume V.

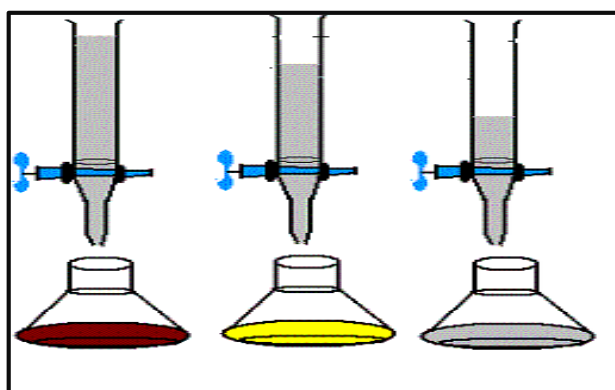


Figure II.2 Les étapes de détermination l'indice d'iode

Calcule l'indice d'iode comme suit :

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

m : La masse de charbon actif (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 Bleu méthylène

II.2.2.1 Définition

L'indice de bleu de méthylène est une méthode couramment utilisée pour évaluer la capacité d'adsorption et la surface spécifique des charbons actifs. Cette méthode repose sur l'adsorption de la molécule de bleu de méthylène (un colorant cationique) à la surface du charbon actif [29].

II.2.2.2 Détermination de l'indice Bleu Méthylène

L'indice de Bleu de Méthylène a été déterminé suivant la norme Chemviron Carbon company méthode TM-11[30] dans laquelle on détermine l'adsorption du filtrat contenant la concentration résiduelle du Bleu de Méthylène après un contact avec le charbon actif de 30 minutes.

II.2.2.3 Protocole de l'indice Bleu méthylène

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

- 1- Une solution d'acide acétique (0,25 %).
- 2- Une solution d'acide acétique (50 %).
- 3- Une solution de BM de concentration (1200 mg /L).
- 4- Pipeter des concentrations différentes de solution de BM (120 mg/L), les mettre dans des fioles 100 ml et diluer avec acide acétique (0,25 %) jusqu'à trait de jauge (1 L).

Mode opératoire

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 :

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

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'adsorbat (L).

II.2.3 Détermination de la courbe d'étalonnage

Pour effectuer un dosage par méthode physique, on utilise une courbe de référence appelée courbe d'étalonnage. Pour tracer cette courbe, on effectue une série de mesures d'une grandeur physique spécifique sur des solutions de concentrations connues. Cela permet de représenter l'évolution de cette grandeur en fonction de la concentration [31].

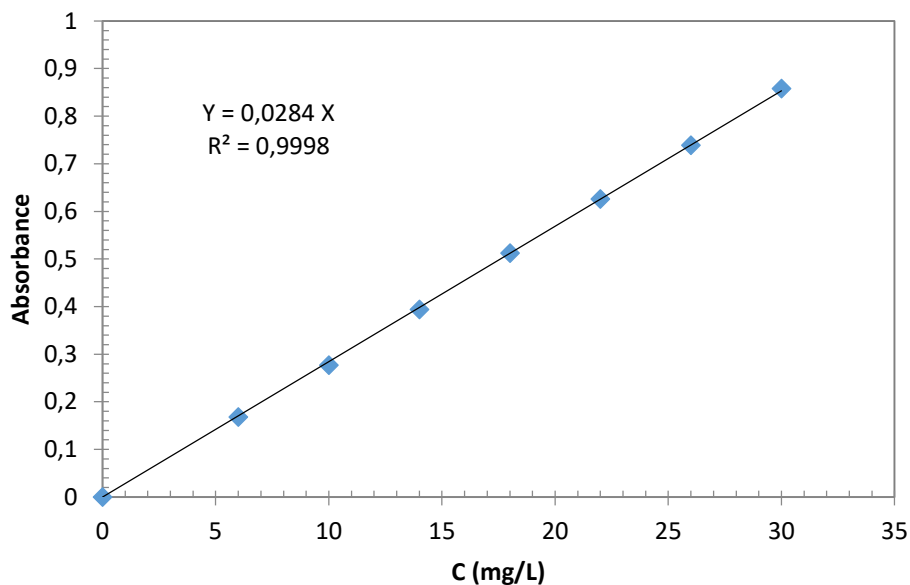


Figure II.3 Courbe d'étalonnage du Bleu de Méthylène

L'équation de la droite donnant l'absorbance en fonction de la concentration du bleu de méthylène est $[Abs = 0,0284 \times C]$ avec un coefficient de régression $R^2 = 0,9998$. Ce qui peut être considéré comme un bon ajustement linéaire. Cette équation est utilisée pour calculer la concentration résiduelle inconnue.

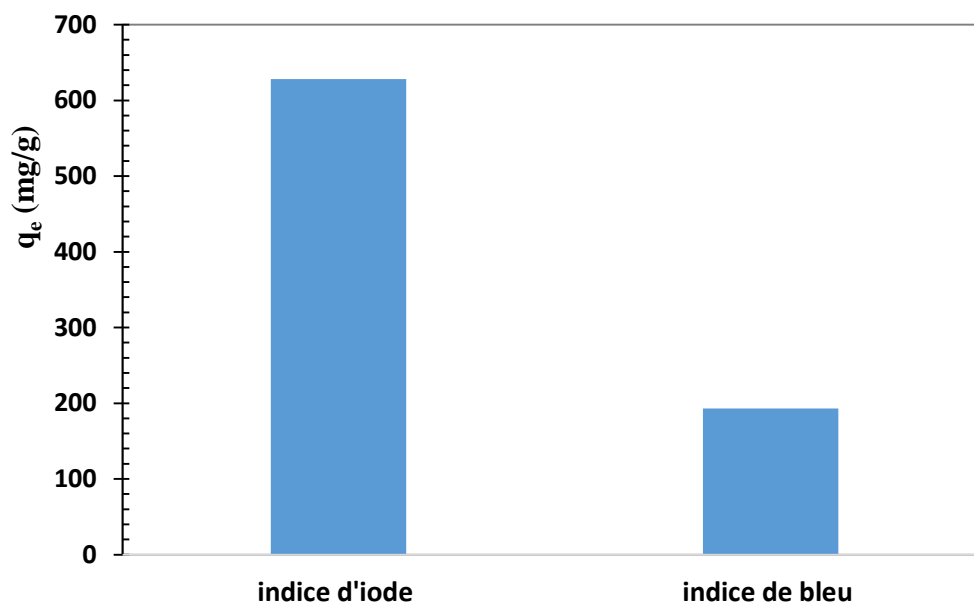


Figure II.4 les valeurs de l'indice de BM et l'indice d'iode

Selon l'histogramme, on observe que le charbon préparé possède une surface microporeuse assez importante, avec un indice d'iode de 628,30 mg/g, et une mésoporosité moyennement faible, et un indice de Bleu de Méthylène de 193 mg/g.

II.3 Choix de molécule étudiée

II.3.1 Le colorant Rouge Acide 14 (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 [32].

II.3.1.1 Caractéristique physique et chimique

- **Formule chimique** : $C_{20}H_{12}N_2Na_2O_7S_2$.
- **Masse molaire** : 502,44 g/mol.
- **Aspect** : poudre rouge, soluble dans l'eau.
- **La longueur d'onde** : $\lambda = 515$ nm.

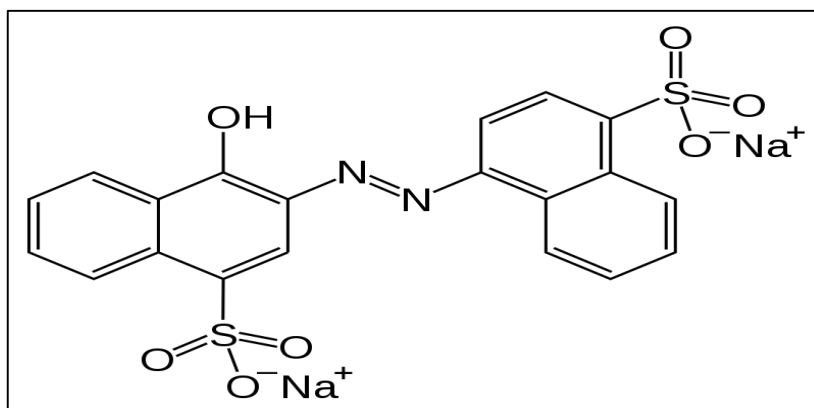


Figure I.5 Structure chimique d'Azorubine

II.4 Méthode de dosage Rouge Acide 14 (Azorubine)

II.4.1 Dosage par spectrophotométrie

L'analyse spectrophotométrique repose sur l'étude de la variation de l'absorption de la lumière par un milieu en fonction de la concentration d'un constituant. Cette méthode utilise une lumière sensible monochromatique et est particulièrement intéressante car elle permet de travailler avec de faibles quantités de substance sans détruire l'échantillon. Elle s'applique à un très grand nombre de dosages [33].

II.4.1.1 Loi d'absorption

Les lois générales d'absorption s'appliquent aux spectres d'absorption dans les domaines de l'ultraviolet et du visible.

II.4.1.2 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.

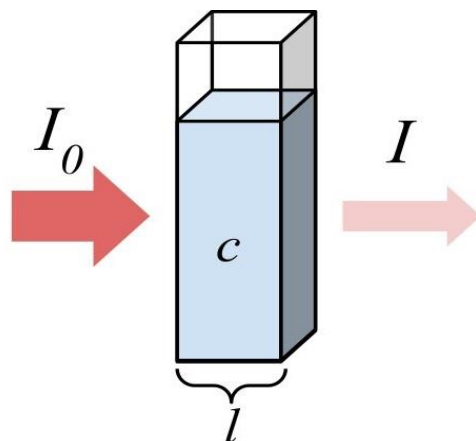


Figure II.6 Principe d'absorption de la lumière monochromatique par un corps absorbant

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

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

Avec :

T : facteur de transmission ou transmittance.

A : absorbance ou densité optique.

C : concentration massique du composé dosé.

I, I_0 : intensité du faisceau émergent et incident.

ε : coefficient spécifique d'absorbance.

ℓ : épaisseur de la cuve.

II.5 Application à l'adsorption de Rouge Acide 14 (Azorubine)

II.5.1 Détermination de la courbe d'étalonnage de Rouge Acide 14 (Azorubine)

II.5.1.1 Préparation de la solution mère (SM)

Une solution mère a été préparé en pesant 1g de Rouge Acide 14 (Azorubine), qu'on a dissout dans une fiole de 1000 mL, et on a complète avec de l'eau distillée, la concentration correspondante est de 1000 mg/L.

II.5.1.2 Préparation de la solution fille (SF)

À partir de la solution mère (SM), des étalons avec des concentrations comprises entre 2 et 16 mg/L ont été préparés.

II.5.1.3 Etablissement de la courbe d'étalonnage

Chaque étalon a été analysé dans le domaine du UV par spectrophotométrie à la longueur d'onde de 515 nm, qui a été déterminée par balayage.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le Tableau II.1 et représentés graphiquement sur la Figure II.7.

Tableau II.1 Élaboration de la courbe d'étalonnage pour la Rouge Acide 14

C (mg/L)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
ABS	0	0,073	0,147	0,223	0,298	0,376	0,446	0,534	0,622

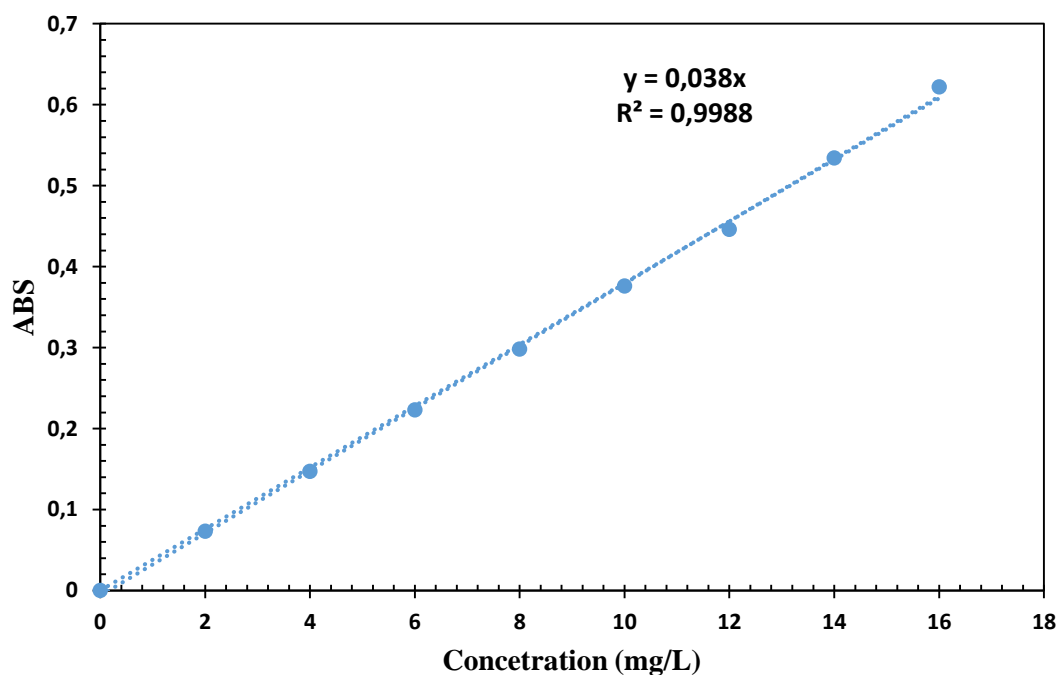


Figure II.7 La courbe d'étalonnage de Rouge Acide 14

On observe que la courbe obtenue est une droite, avec un coefficient de corrélation de 0,9988, indiquant un bon ajustement linéaire. L'équation de cette droite, qui relie l'absorbance à la concentration de Rouge Acide 14 est : $[A = 0,038 \times C]$. Cette équation permet de déterminer la concentration d'une solution inconnue de Rouge Acide 14 (Azorubine).

II.6 Détermination du temps d'équilibre

Pour étudier le temps de contact nécessaire pour atteindre l'équilibre d'adsorption de Rouge Acide 14 (Azorubine), nous avons préparé deux solutions avec des concentrations de 150 mg/L et 100 mg/L, et suivi la procédure suivante :

Dans une série de béchers, on a introduit successivement 0,1 g du charbon et 25 mL de la solution Rouge Acide 14 (Azorubine) de la concentration préparée.

Le mélange est agité pendant des durées de 5 ;15 ;30 ; 60 ; 90 et120 minutes, puis centrifuger et analyser par spectrophotométrie.

Les résultats obtenus sont représentés graphiquement sur la Figure II.8.

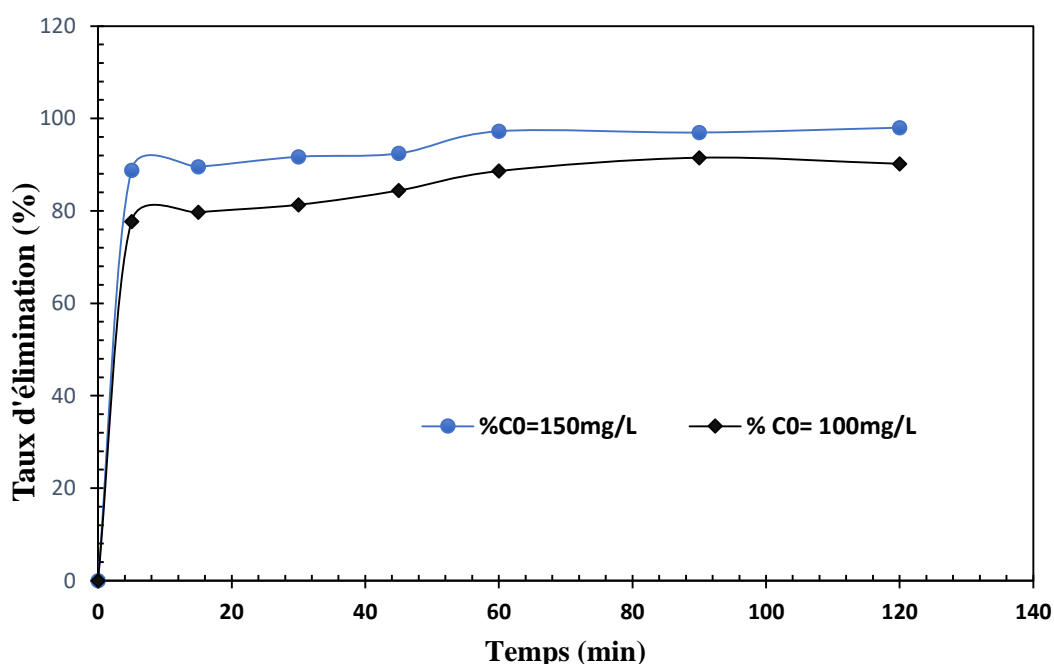


Figure II.8 Taux d'élimination de Rouge Acide 14 en fonction du temps

On remarque une augmentation du taux d'élimination de Rouge Acide 14 (Azorubine) par notre charbon actif 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. Cependant, les expériences d'adsorption seront menées avec un temps de contact d'une heure, considéré comme suffisant pour ce système.

II.7 L'effet de la dose de l'adsorbant sur l'adsorption

On introduit dans une série de béchers contenant successivement des masses de 0,05 ; 0,1 ; 0,15 ; 0,2 et 0,25 gramme de notre adsorbant, 25 ml de la solution de Rouge Acide 14 (Azorubine) d'une concentration 100 mg/L. Le mélange est agité pendant une heure, puis centrifugé et analysé.

Les résultats de ces mesures sont représentés graphiquement sur la Figure II.9.

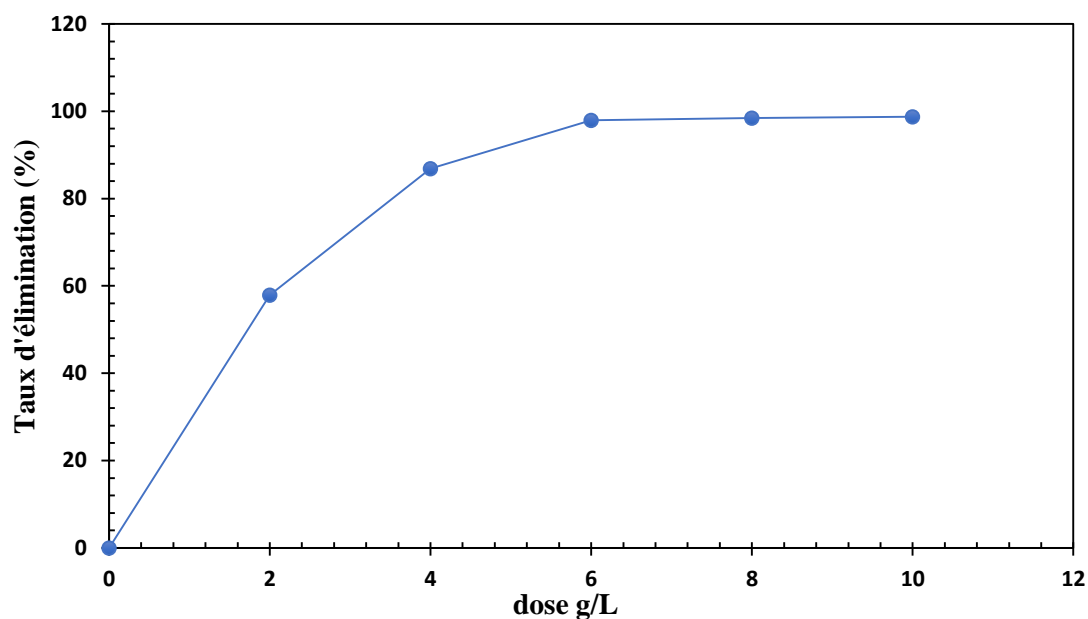


Figure II.9 Taux d'élimination de Rouge Acide 14 en fonction de la dose d'adsorbant

La Figure II.9 indique qu'une augmentation de la quantité du Rouge Acide 14 (Azorubine) adsorbée à l'équilibre en fonction du taux d'élimination de l'adsorbant, avec une adsorption maximale atteinte à une dose d'adsorbant de 6 g/L. Par conséquent, nous utiliserons cette dose optimale pour toutes les expériences d'adsorption.

II.8 L'effet de pH sur l'adsorption de Rouge Acide 14 (Azorubine)

Le pH, ou potentiel hydrogène, est une mesure permettant de déterminer si une solution est acide ou base. Il influence l'adsorption en raison de la nature de l'adsorbant, dont les sites comportent des groupements fonctionnels organiques.

Dans une série de béchers, nous avons successivement introduit 25 mL de la solution Rouge Acide 14 (Azorubine) à une concentration de 100 mg/L, à laquelle nous avons ajouté 0,15 g de charbon. Ensuite, nous avons ajusté le pH à différentes valeurs.

Le mélange est agité magnétiquement pendant une heure, puis la suspension est séparée par centrifugation. La concentration résiduelle en amoxicilline est ensuite déterminée par spectrophotométrie à une longueur d'onde de 515 nm.

Les résultats obtenus sont représentés graphiquement sur la Figure II.10.

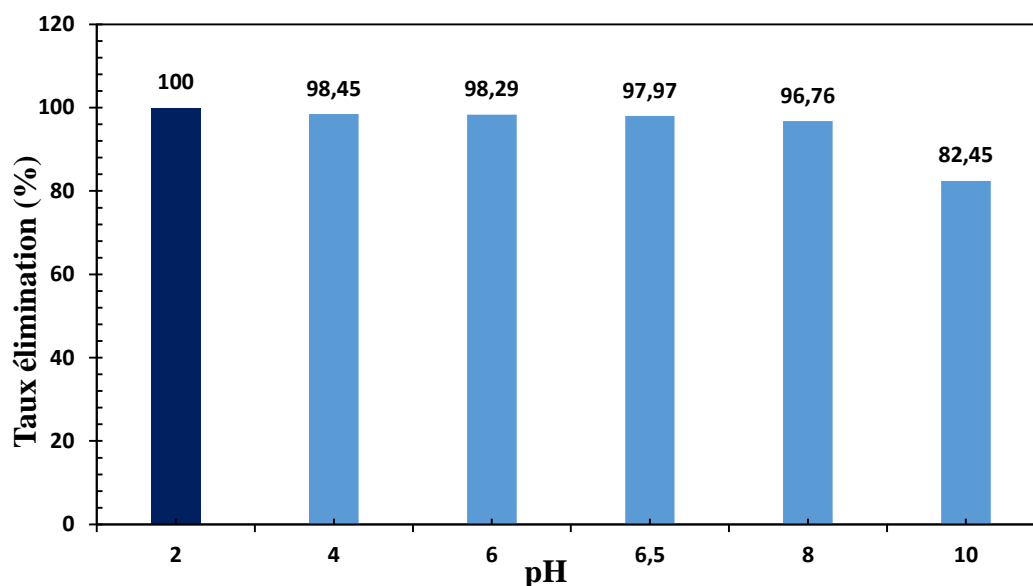


Figure II.10 Taux d'élimination de Rouge Acide 14 en fonction de Ph

D'après la figure II.10, nous constatons que la capacité d'adsorption de l'amoxicilline est la plus élevée pour une solution à un pH=2. C'est à ce pH que l'isotherme d'adsorption sera établie.

II.9 Isotherme d'adsorption de Rouge Acide 14 (Azorubine)

L'isotherme d'adsorption représente la relation à l'équilibre entre la quantité de substance adsorbée par un adsorbant et la concentration résiduelle de cette substance dans la phase fluide (liquide ou gazeuse). Elle est cruciale pour caractériser les propriétés d'adsorption d'un matériau et optimiser les procédés d'adsorption.

Dans une série de béchers contenant 25 mL de solution à pH=2 avec une concentration qui varient entre 100 mg/L à 500 mg/L et 0,15 g de charbon, l'ensemble est agité pendant un temps de 1h, puis centrifuger et analyser.

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

$$\text{suivante : } q_e = \frac{C_0 - C_e}{1000 \times m} \times V$$

C_0 : Concentration initial de l'adsorbat (mg/L).

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

m : Masse d'adsorbant (g).

V : Volume d'adsorbat (mL).

1000 : Coefficient de conversion.

Les valeurs de cette étude sont représentées graphiquement sur la Figures II.11.

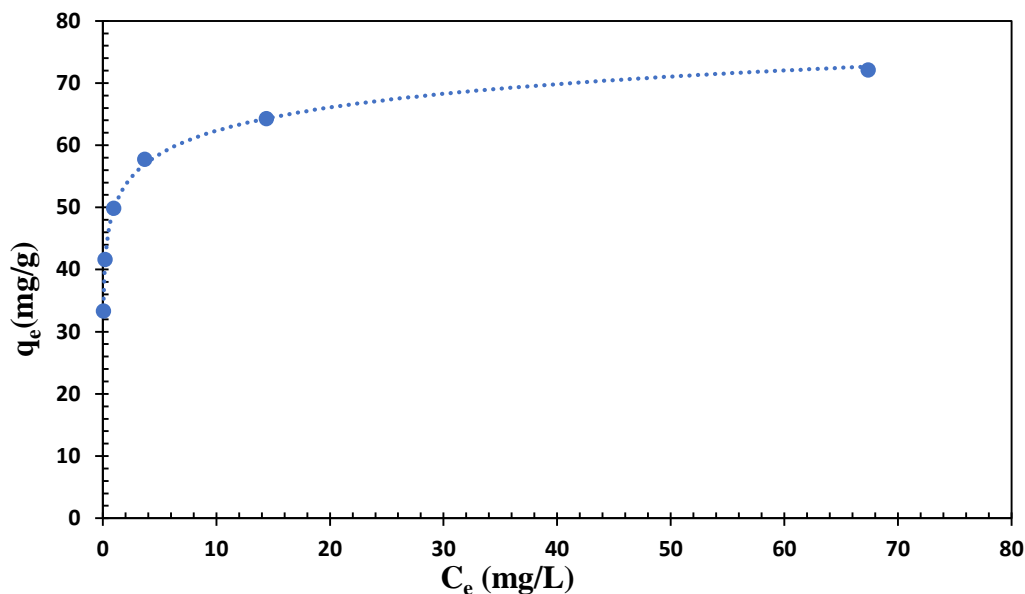


Figure II.11 L'isotherme d'adsorption de Rouge Acide 14 $q_e=f(C_e)$

D'après la Figure II.11, on remarque que la capacité d'adsorption de l'azorubine par l'adsorbant augmente de manière significative avec l'augmentation de la concentration initiale. L'isotherme obtenue montre un plateau correspond à la formation d'une monocouche d'azorubine sur la surface de l'adsorbant, ce qui indique la saturation des sites de la surface de l'adsorbant. Cela signifie que les molécules d'Azorubine se sont fixées de manière homogène sur les sites d'adsorption disponibles, formant une couche uniforme. Cette observation confirme que l'adsorption a atteint sa capacité maximale, et que tous les sites disponibles pour l'adsorption sont occupés. L'allure de l'isotherme suit le type L suivant la norme de Giles.

II.9.1 Les modèles d'isothermes d'adsorption

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

II.9.1.1 Modèle Langmuir

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

L'équation de Langmuir :
$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_{max}} + \frac{1}{q_{max} \times K_L}$$

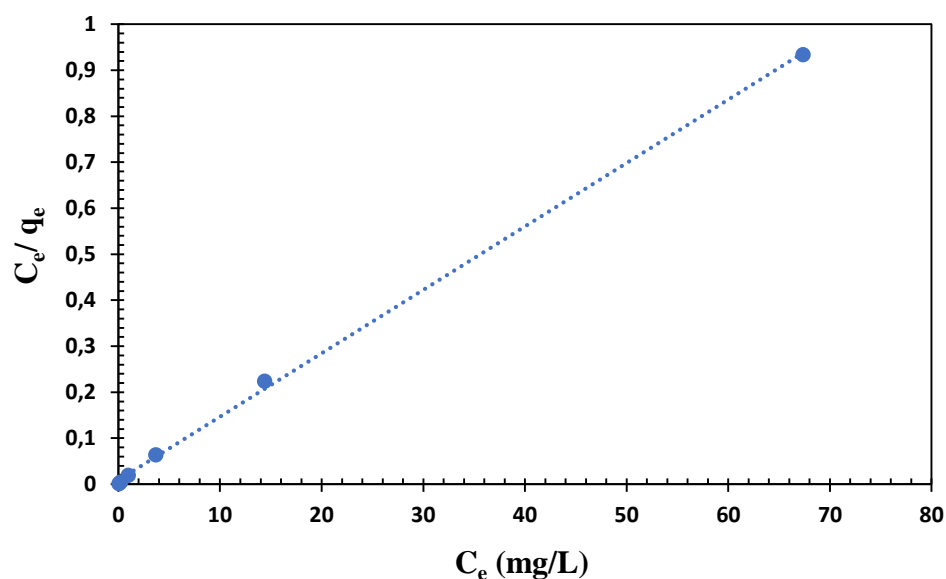


Figure II.12 L'isotherme d'adsorption de Rouge Acide 14 pour le modèle de Langmuir

II.9.1.2 Modèle Freundlich

Modèle empirique qui s'applique à une adsorption sur des surfaces hétérogènes et ne suppose pas de saturation. L'équation de Freundlich : $\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F$

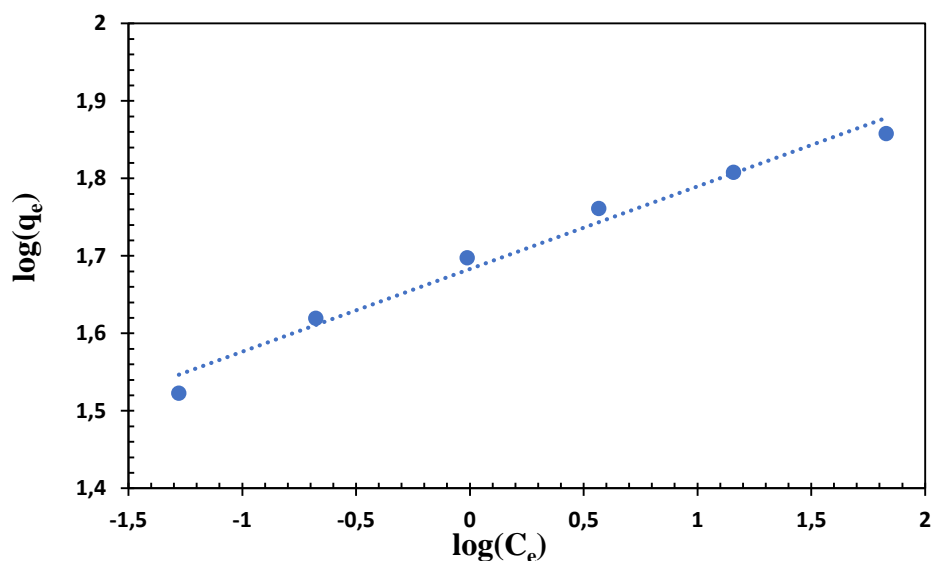


Figure II.13 L'isotherme d'adsorption de Rouge Acide 14 pour le modèle de Freundlich

II.9.1.3 Modèle Temkin

Prend en compte les interactions entre les molécules adsorbées et une distribution uniforme des énergies de liaison. L'équation de Temkin : $q_e = B_T \log C_e + B_T \log K_T$

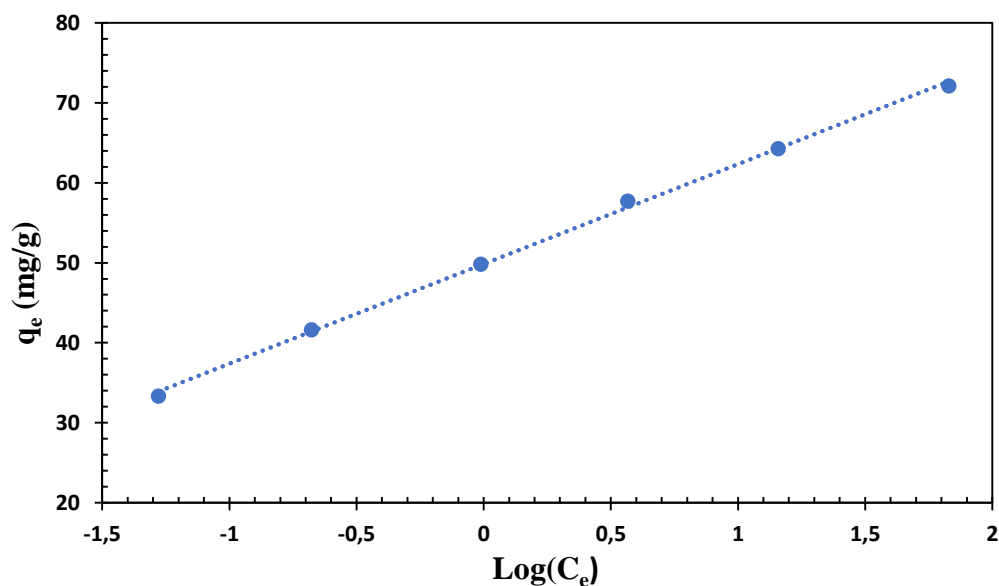


Figure II.14 L'isotherme d'adsorption de Rouge Acide 14 pour le modèle de Temkin

Tableau II.2 Résultats obtenue d'isotherme d'adsorption de Rouge Acide 14 pour les trois modèles

Modèle de Langmuir		
q _{max} (mg/g)	K _L (L/mg)	R ²
72,46	1,568	0,9994
Modèle de Freundlich		
n	K _F (L/mg)	R ²
9,380	48,194	0,9791
Modèle de Temkin		
B _T (J/mol)	K _T (L/mg)	R ²
12,473	9924,6	0,9987

Au vu des droites obtenues dans les (figures II.12 ; II.13 et II.14) de leurs facteurs de corrélation R² qui sont respectivement 0,9994 ; 0,9791 et 0,9987, on peut déduire que le modèle le plus adéquat est celui de Langmuir.

II.10 Thermodynamique d'adsorption de Rouge Acide 14

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 [58]. 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 [34].

Des flacons contenant 25 mL de solution de Rouge Acide 14 (Azorubine) à une concentration de 500 mg/L sont ajustés à un pH=2, puis 0,15 g de charbon y sont ajoutés. Ces flacons sont ensuite placés successivement à des températures de 25 °C, 30 °C, 35 °C et 40°C dans un bain-marie équipé d'un thermostat pour contrôler la température. Le mélange est agité pendant une heure, puis centrifugé et analysé par spectrophotométrie.

II.10.1 Paramètres thermodynamiques d'adsorption de Rouge Acide 14

Les résultats de ces mesures sont présentés dans la Figure II.15.

La relation thermodynamique de Gibbs-Helmholtz : $\Delta G^\circ = -R \times T \times \ln(K_d) \dots\dots (1)$

La relation obtenue par intégration de Van't Hoff : $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T \times \Delta S^\circ \dots\dots (2)$

D'après les équations (1) et (2) on a : $R \times T \times \ln(K_d) = -\Delta H^\circ + T \times \Delta S^\circ$

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

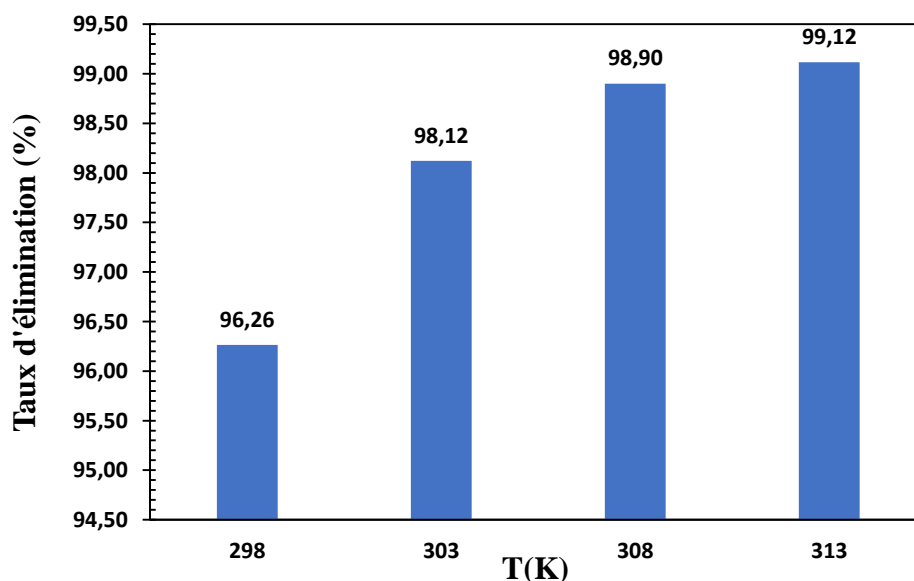


Figure II.15 Taux d'élimination de Rouge Acide 14 à différentes températures

Ce graphique montre que le taux d'élimination (%) de l'Azorubine augmente avec la température croissante. Cette observation indique que le processus d'adsorption de l'Azorubine sur l'adsorbant est de nature endothermique, c'est-à-dire qu'il absorbe de la chaleur.

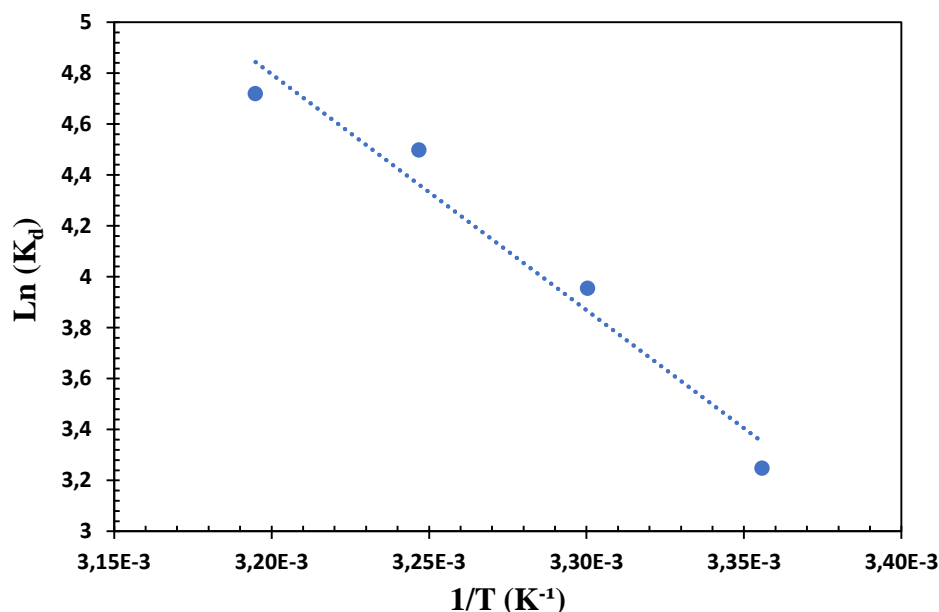


Figure II.16 Évolution de $\text{Ln}(K_d)$ en fonction de $1/T$ pour l'adsorption de Rouge Acide 14 par l'adsorbant

Tableau II.3 Paramètres thermodynamiques d'adsorption de Rouge Acide 14

ΔG° (kJ/mol)				ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (J/mol.K)
298 K	303 K	308 K	313 K		
-8,05	-9,96	-11,52	-12,28	77,082	0,2865

Les résultats des paramètres thermodynamiques obtenus sont regroupés dans le Tableau II.3. D'après ces résultats, on observe que l'énergie libre ($\Delta G^\circ < 0$) dans tous les cas. Ceci indique que l'adsorption du Rouge Acide 14 sur le charbon actif est spontanée. L'enthalpie ($\Delta H^\circ > 0$), ce qui implique que le processus de l'adsorption est endothermique ainsi qu'une température plus élevée facilite l'adsorption, ($\Delta S^\circ > 0$) est positive, cela veut dire que les molécules du Rouge Acide 14 restent moins ordonnées sur l'interface solide/ liquide à la cour de processus d'adsorption.

II.11 Cinétique d'adsorption de Rouge Acide 14 (Azorubine)

Plusieurs modèles cinétiques ont été utilisés pour interpréter les données expérimentales, fournissant des informations essentielles pour l'utilisation de ces charbons actifs dans le domaine de l'adsorption [35]. Nous avons adopté trois modèles cinétiques (pseudo-premier ordre, pseudo-second ordre, et diffusion intra-particulaire), en prenant des temps de contact inférieurs au temps d'équilibre, avec les doses et le pH optimaux déterminés auparavant.

Dans une série des béchers nous avons introduit 25 mL de solutions à concentration 100 mg/L, ajusté au pH=2 et nous avons ajouté 0,15 g d'adsorbant, l'ensemble est agité à des temps de 5 ; 15 ; 30 ; 45 et 60 minutes puis centrifuger et analyser par spectrophotométrie.

Les résultats de ces mesures sont représentés sur les Figures II.17 ; II.18 et II.19 et mentionnés dans les Tableaux II.4 et II.5.

II.11.1 Modèle cinétique pseudo-premier ordre

C'est le plus ancien des modèles cinétiques, il a été proposé par Lagergren en 1898. Le modèle cinétique du pseudo premier ordre peut être exprimé par l'équation suivante :

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

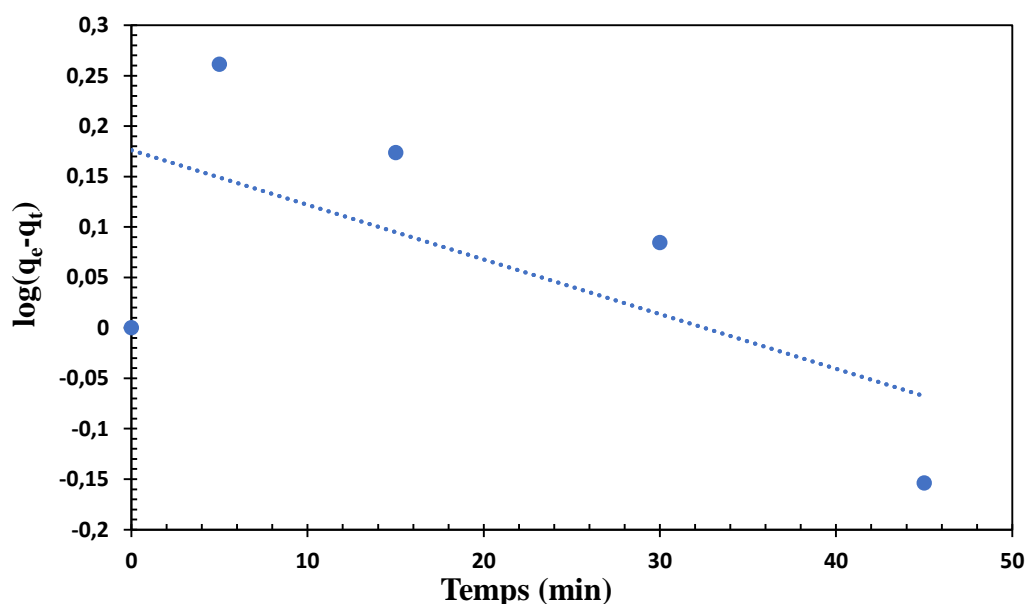


Figure II.17 Cinétique d'adsorption de Rouge Acide 14 de pseudo 1^{er} ordre

II.11.2 Modèle cinétique pseudo-deuxième ordre

Ce modèle peut être exprimé par l'équation de la forme suivante : $\frac{t}{q_t} = \frac{1}{q_e} t + \frac{1}{k_2 \times q_e^2}$

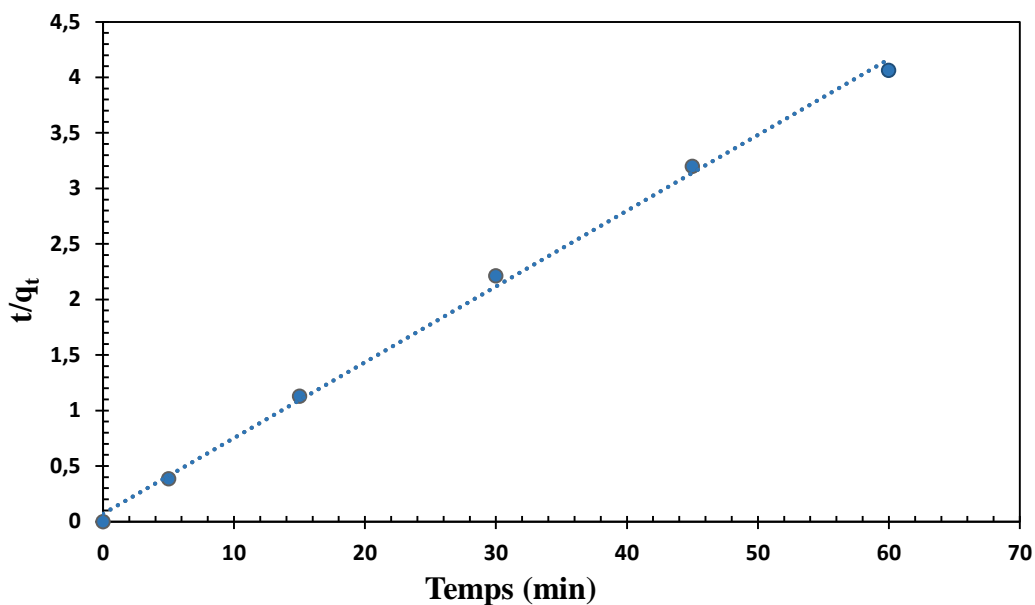


Figure II.18 Cinétique d'adsorption de Rouge Acide 14 de pseudo 2^{ème} ordre

Tableau II.4 Résultats obtenue de la cinétique d'adsorption de Rouge Acide 14 de pseudo 1^{er} ordre et 2^{ème} ordre

Modèle cinétique de pseudo 1 ^{er} ordre			
q _e (exp) (mg/g)	q _e (cal) (mg/g)	k ₁ (min ⁻¹)	R ²
14,77	1,4997	0,0054	0,3923
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
14,77	14,66	0,0672	0,9977

II.11.3 Modèle cinétique diffusion intra-particulaire

Le modèle de diffusion intra-particulaire ou le modèle de Weber et Morris suppose que le processus de diffusion est la seule étape limitative qui contrôle l'adsorption. Ce modèle peut être exprimé par la relation suivante : $q_t = k_{int} \times t^{0,5} + C$

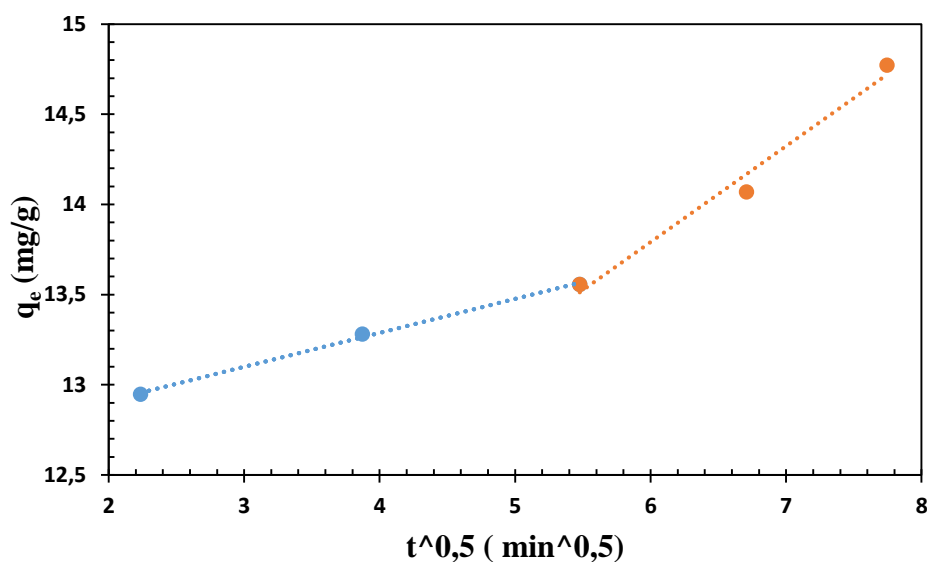


Figure II.19 Cinétique d'adsorption de Rouge Acide 14 de diffusion intra-particulaire

Tableau II.5 Résultats obtenue de la cinétique d'adsorption de Rouge Acide 14 de diffusion intra-particulaire

	Étape 1 DIP	Étape 2 DIP
k_{int} (mg. g ⁻¹ .min ^{-0,5})	0,1881	0,5319
C (mg/g)	12,53	10,60
R ²	0,9977	0,9809

D'après les résultats obtenus et présentés sur les (Figures II.17; II.18 et II.19), on remarque que l'application du modèle de pseudo premier ordre pour l'adsorption de Rouge Acide 14 (Azorubine) donne un coefficient de détermination (R^2) bas. Par contre le coefficient de détermination (R^2) 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 0,9977.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre étude a été réalisée en trois étapes, le premier est la fabrication du charbon actif à partir d'un déchet végétal, la seconde étape est la caractérisation des charbons activés obtenus et la dernière étape application sur l'adsorption.

L'objectif de notre travail est l'élimination d'un polluant organique par l'adsorption sur un charbon actif obtenu et d'étudier l'impact des différents paramètres tels que le temps de contact, le pH de la solution et du colorant et la température avec la modélisation des isothermes et la cinétique d'adsorption.

Les résultats sont :

- ✓ Le temps de contact nécessaire pour atteindre le rendement d'adsorption maximal est de 60 minutes.
- ✓ 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 de l'Azorubine sur un adsorbant à l'aide de plusieurs modèles d'adsorption. Parmi ceux-ci, le modèle de Langmuir a été choisi pour sa capacité à bien décrire l'isotherme d'adsorption observée. Ce modèle a permis de caractériser précisément la formation d'une monocouche d'Azorubine sur la surface de l'adsorbant.
- Les résultats de l'étude thermodynamique ont montré que l'adsorption du Rouge Acide 14 sur le charbon actif est un processus spontané et endothermique.
- La cinétique d'adsorption du Rouge Acide 14 sur le charbon actif suit le modèle pseudo- deuxième ordre R^2 est proche de 1 (0,9977).
- La diffusion intra-particulaire, est une étape contrôle le mécanisme d'adsorption mais elle n'est pas considérée comme une étape limitative.

Notre contribution ouvre de nouvelles perspectives pour la valorisation du charbon actif préparé à partir de des déchets végétaux. Son utilisation dans le processus d'adsorption permet de purifier les eaux usées, réduisant ainsi la pollution et traitant les déchets industriels

Références

- [1] J. F. Pankow, Aquatic Chemistry Concepts, Lewis Publishers, Chelsea, Michigan (1991).
- [2] R. Papin, Technique de l'Ingénieur, « L'adsorption J2730, J2731 » (2005).
- [3] Emillan Kcoller, Aide-mémoire de Génie chimique, 4^e édition, Dunod, (2001).
- [4] F.L. Slejko, Adsorption Technology, Marcel Dekker, New York (1985).
- [5] 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.
- [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] 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).
- [9] N. Ghalmi et A. Sifer, Essais d'adsorption du phénol et du cuivre sur charbon actif valorisé à base de grignon d'olives, Mémoire d'Ingéniorat, Université de Boumerdès, (2006).
- [10] N. Gherbi, Etude expérimentale et identification du processus de rétention des cations métalliques par des matériaux naturels', Thèse de doctorat, Université de Constantine (2008).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] N. Yahiaoui, Etude de l'adsorption des composés phénoliques des marges d'olive sur carbonate de calcium, hydroxyapatite et charbon actif, Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, (2012).
- [14] Collectif, Dictionnaire de l'environnement (3^e édition), Afnor, (2001).
- [15] L. Med Lamin ; C. Smail ; L. Smail ; Dépollution par charbon actif d'une eau contaminée par bleu de méthylène. Mémoire de Master. Université Hamma Lakhdar - El oued, (2017).
- [16] E. Guechi, Enlèvement de colorants à partir de solutions aqueuses par des matériaux sorbants non conventionnels et à faible coût, Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba-Algérie, (2013).

Références

- [17] F. Benamraoui, Elimination des colorants cationiques par des charbons actifs synthétisés à partir des résidus de l'agriculture, Mémoire de magister en génie des procédés, option génie chimique, université de SETIF, (2014).
- [18] P. Arnauld, Cours De Chimie Organique, 15^{ème} édition, Dunod éditeur, (1990).
- [19] N. Bouanimba, Modélisation et optimisation de la cinétique de dégradation photo catalytique de polluants organiques en solution, Mémoire de magister, Université Mentouri Constantine Algérie, (2009).
- [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] M. Allali. Hassani, O. Dusart, M. Mazet, Elimination des micropolluants par adsorption sur charbon actif dans l'eau : cas d'un tension actif non inionique, influence de co-adsorbant, Wat. Res, 24(6),699-708, (1990).
- [22] J.M. Coulson, J.F. Richardson, Chemical Engineering, vol 3 2nd Edition, Butterworth Heinemann (1979).
- [23] J.M. Haguenoer, D.Furon, Toxicologie et hygiène industrielles, Tome X, Paris, (1983).
- [24] Carmen Manole Crenga. Procédé AD-OX d'élimination de polluants organiques non biodégradables (par adsorption puis oxydation catalytique). Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 2007.
- [25] GOUMIDI, F et HADRI, Z « pyrolyse d'une plante saharienne pour l'adsorption de corps organiques et métaux lourds », université de Mostaganem 2000-2001.
- [26] J. Blanco Castro, P. R. Bonelli, E. G. Cerella, and A.I. Cukierman, Phosphoric Acid Activation of Agricultural Residues and Bagasse from Sugar Cane: Influence of the Experimental Conditions on Adsorption Characteristics of Activated Carbons, Industrial and Engineering Chemistry Research, 39(11), 4166-4172, (2000).
- [27] S. Budavari, Merck index. White house Station, NJ: Merck. (1996).
- [28] 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).
- [29] M. Goyal, S. Singh, and R.C. Bansal, Equilibrium and Dynamic Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solutions by Surface Modified Activated Carbons, Carbon Sci. 5(4), 170-179 (2004).
- [30] B. Bestani, N. Benderdouche, B. Benstaali, M. Belhakem, Methylene blue and iodine adsorption onto an activated desert plant, Bioresour. Technol. 99, 8441-8444 (2008).
- [31] F.S. Baker, C.E. Miller, A.J. Repik, and E.D. Tolles, Activated Carbon, Kirk (1992).

Références

[32] E.H. Cho, and C.H. Pitt, The adsorption of Gold and Silver Cyanide from Solution by Activated Charcoal, Gold, Silver, Uranium, and Coal Geology, Mining, Extraction and the Environment, The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc., New York, NY., 114-133 (1983).

[33] R.D. Ashford, Ashford's Dictionary of Industrial chemicals. London. Wavelength (1994).

[34] K.G. Bhattacharyya and A. Sharma, Kinetics and thermodynamics of methylene blue on Nee (*Azadirachta indica*) leaf powder, *J Dyes and pigments*, 65, 51-59 (2005).

[35] J.S. Mattson, and H.B. Mark, Jr. Activated Carbon. New York: Dekker, (1971).