



Department of Process Engineering

قسم هندسة

الطرائق

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

رقم :..... / ج.م.ك.ع.ت//2024

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : **GÉNIE DES PROCÉDÉS**

Option : **GÉNIE CHIMIQUE**

THÈME

**Elimination des colorants basiques en solution aqueuse
Par un support carboné**

Présenté par

1- BENTOUNES Nafissa

2- BENOURLA Hayat

Soutenu le 09 /06 / 2024 devant le jury composé de :

Présidente : MEKIBES Zohra MCB Université de Mostaganem

Examineur : MEDJDOUB Aicha MAB Université de Mostaganem

Rapporteur : DOUARA Nadia MCA Université de Mostaganem

Année Universitaire 2023/2024

Dédicaces

Avant toute chose nous devons remercier ALLAH Tout Puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour accomplir cet humble travail, fruit de mes années de dur labeur.

Nous dédions ce modeste travail aux personnes qui sont les plus chères :

- Nos chers pères, d'avoir toujours cru en moi, encouragé et soutenu.
- Nos chères mères, qui a toujours tous fait afin d'arriver à ce que je suis Aujourd'hui.
- Nos très chers frères et sœurs.
- A toute nos familles nos collègues et nos amis.

Remerciements

Le présent travail a été effectué au Laboratoire de Structure, Elaboration et Application des Matériaux Moléculaires de l'Université de Mostaganem.

Avant tous, nous devons remercier, Dieu le tout puissant qui nous a donné d'envie et la force pour mener à terme ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrante Mme DOUARA Nadia pour ses précieux conseils et son aide durant toute la période de notre stage pratique.

Nous remercions les membres de jury d'avoir accepté d'évaluer le présent travail :

Nous remercions Mme MEKIBES Zohra Maître de conférences à l'Université de Mostaganem d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire ainsi que pour ses enseignements durant notre étude universitaire.

Nous remercions Mme MEDJDOUB Aicha, Maître assistant à l'Université de Mostaganem pour avoir accepté d'évaluer ce travail en tant qu'examinatrice.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenus et encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons également à saluer tous nos collègues rencontrés au cours de ces années passées et qui ont contribué à la bonne ambiance.

Résumé

La technique de l'adsorption est la méthode la plus favorable pour l'élimination des polluants organique et inorganique. Notre travail consiste à étudier l'élimination deux colorants cationiques qui sont le Réactive Noir 5 (RB5) et le Rhodamine B (RhB) sur un charbon actif préparé. Nous insistons sur l'effet des paramètres opératoires sur le processus d'adsorption tels que : le temps de contact, le pH, la masse de l'adsorbant, la température, la cinétique. Les résultats obtenus sont soumis à la modélisation cinétique. Les résultats cinétiques d'adsorption sont mieux décrits par l'expression du modèle de pseudo second ordre. Les données expérimentales ont été illustrées par les modèles de Langmuir, de Freundlich et de Temkin. Les résultats de cette expérience ont montré que le charbon actif préparé a une capacité très élevée d'adsorber les polluants étudiés. Les paramètres thermodynamiques obtenus indiquent que l'adsorption des colorants basiques sur le charbon actif est un processus spontané et endothermique.

Mots clés : adsorption, charbon actif, polluant.

المخلص

تقنية الامتزاز هي الطريقة الأكثر ملائمة لإزالة الملوثات العضوية واللاعضوية. يتكون عملنا في دراسة القضاء على الأصباغ الموجبة على الفحم النشط أعدت في المختبر. نحن نصر على تأثير معلمات التشغيل على عملية الامتزاز مثل: وقت الاتصال ، ودرجة الحموضة ، وكتلة الممتزات ، ودرجة الحرارة ، والحركية. تخضع النتائج التي تم الحصول عليها للنمذجة الحركية تم وصف نتائج حركية الامتزاز على أفضل وجه من خلال التعبير عن نموذج الترتيب الثاني الزائف. تم توضيح البيانات التجريبية من خلال نماذج لانجموير وفروندليتش وتيمكين. أظهرت نتائج هذه التجربة أن الكربون المنشط الذي تم تحضيره يتمتع بقدرة عالية جداً على امتصاص الملوثات المدروس ، تشير عناصر الديناميكية الحرارية التي تم الحصول عليها إلى أن امتزاز الأصباغ الأساسية على الكربون المنشط هو عملية تلقائية وماصة للحرارة.

الكلمات المفتاحية : الامتزاز, الكربون المنشط , الملوث

Abstract

The adsorption technique is the most favorable method for the removal of organic and inorganic pollutant. Our work consists in studying the elimination of two cationic dyes Reactive Black 5 (RB5) and Rhodamine B (RhB) on prepared activated carbon. We insist on the effect of the operating parameters on the adsorption process, such as: the contact time, the pH, the mass of the adsorbent, the temperature, the kinetics. Adsorption kinetics results are best described by expression of the pseudo-second-order model. Experimental data are illustrated by Langmuir, Freundlich and Temkin models. The results of this experiment showed that the activated carbon prepared has a very high adsorption capacity for the pollutants studied. The thermodynamic parameters obtained indicate that adsorption of basic dyes onto activated carbon is a spontaneous, endothermic process.

Key words: adsorption, activated carbon, pollutant .

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Chapitre I l'adsorption	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition de l'adsorption	3
I.3 Types d'adsorption.....	4
I.3.1 Adsorption physique (physisorption)	4
I.3.2 L'adsorption chimique (ou chimisorption).....	4
I.3.3 Différence entre chimisorption et physisorption.....	5
I.4 Facteurs influençant le phénomène d'adsorption	5
I.4.1 Effet de la température	5
I.4.2 Effet de la surface spécifique.....	5
I.4.3 Effet de l'agitation.....	5
I.4.4 L'effet du pH.....	5
I.4.5 La nature de l'adsorbat	6
I.5 Cinétique d'adsorption	6
I.5.1 Modèle pseudo-premier ordre.....	6
I.5.2 Modèle pseudo-second ordre.....	7
I.5.3 Model de diffusion intraparticulaire.....	8
I.6 Isotherme d'adsorption.....	8
I.6.1 Classification des isothermes d'adsorption	9
I.6.2 Modélisation des isothermes d'adsorption	10
I.6.2.1Modèle de Freundlich.....	10
I.6.2.2Modèle de Langmuir	10
I.6.2.3Modèle de Temkin	11
I.7 Grandeurs thermodynamiques	11
Chapitre II charbon actif.....	13
II.1 Introduction.....	14
II.2 Définition.....	14
II.3 Les différentes formes du charbon actif.....	15
II.3.1 Le charbon actif extrudé.....	15
II.3.2 Le charbon actif en poudre	15

SOMMAIRE

II.3.3	Le charbon actif en graine	15
II.4	Propriétés du charbon actif	17
II.4.1	Structure poreuse d'un charbon actif.....	17
II.4.2	La surface spécifique.....	18
II.4.3	La densité.....	18
II.4.4	La teneur en cendres.....	19
II.4.5	Le taux d'humidité	19
II.4.6	Indice d'iode	19
II.5	Utilisations du charbon actif.....	19
II.6	Régénération de charbon actif	20
II.6.1	Régénération à la vapeur	20
II.6.2	Régénération thermique.....	20
II.6.3	Régénération chimique	20
II.6.4	Régénération biologique.....	20
	Partie expérimentale.....	21
III.1	Introduction.....	22
III.2	Caractéristiques des molécules à étudiées	22
III.2.1	Réactif Noir 5 (RB5).....	22
III.2.2	Colorant Rhodamine B.....	23
III.3	La spectrophotométrie UV-Visible.....	24
III.4	Etablissement la courbe détalonnage	25
III.4.1	Préparation de solution mère de RB5 et RhB	25
III.4.2	Préparation des solutions étalons	25
III.5	Effet de temps.....	27
III.6	Effet de dose	28
III.7	Influence du pH.....	29
III.8	Cinétique d'adsorption	29
III.9	Isothermes d'adsorption	35
III.9.1	Modélisation des isothermes d'adsorption	36
III.10	L'effet de la température	40
	Conclusion	43
	Références bibliographique.....	44

La liste des figures

Figure. I. 1	Schéma simplifié représentant le phénomène d'adsorption	3
Figure. I. 2	Schéma de l'adsorption physique	4
Figure. I. 3	Classification des isothermes d'adsorption selon Giles.....	9
Figure. II. 1	L'aspect du Charbon actif extrudé	15
Figure. II. 2	L'aspect du charbon actif en poudre	15
Figure. II. 3	L'aspect du charbon actif en grain	16
Figure. II. 4	Représentation schématique des différents types de pores.....	18
Figure. III. 1	Squelette de Réactif Noir 5 (RB5).....	23
Figure. III. 2	Structure chimique de la molécule du colorant Rhodamine B (RhB).	23
Figure. III. 3	Spectrophotomètre UV visible.	24
Figure. III. 4	Cuve UV.	24
Figure. III. 5	solution mère des deux colorants.	25
Figure. III. 6	Courbe d'étalonnage de Réactif noir 5.	26
Figure. III. 7	Courbe d'étalonnage de Rhodamine B.	26
Figure. III. 8	Taux d'élimination du rectif noir 5 en fonction du temps d'agitation.....	27
Figure. III. 9	Taux d'élimination du rhodamine B en fonction du temps d'agitation.	27
Figure. III. 10	Taux d'élimination du réactif noir 5 en fonction de dose d'agitation.	28
Figure. III. 11	Taux d'élimination du rhodamine B en fonction de dose d'agitation.	28
Figure. III. 12	Taux d'élimination du RB5 en fonction de pH.....	29
Figure. III. 13	Taux d'élimination du RhB en fonction de pH.....	30
Figure. III. 14	Représentation graphique de la cinétique d'adsorption du RB5 (1ier ordre)	31
Figure. III. 15	Représentation graphique de la cinétique d'adsorption du RhB (1ier ordre)	31
Figure. III. 16	Représentation graphique de la cinétique d'adsorption du RB5 (2ième ordre).....	32
Figure. III. 17	Représentation graphique de la cinétique d'adsorption du RhB (2ième ordre)	32
Figure. III. 18	Représentation graphique de la diffusion intra-particulaire pour l'adsorption du RB5.	33
Figure. III. 19	Représentation graphique de la diffusion intra-particulaire pour l'adsorption du RhB.	34
Figure. III. 22	Le modèle de Langmuir linéarisée.	36
Figure. III. 23	Le modèle de Freundlich linéarisée.....	37
Figure. III. 24	Le modèle de tamkin linéarisée.....	37
Figure. III. 25	Le modèle de Langmuir linéarisée.	38
Figure. III. 26	Le modèle de Freundlich linéarisée.....	39
Figure. III. 27	Le modèle de tamkin linéarisée.....	39
Figure. III. 28	Taux d'élimination du RB5 en fonction de température.	40
Figure. III. 29	Taux d'élimination du RhB en fonction de température.	41
Figure. III. 30	Evolution de Ln (Kd) en fonction de (1/T) pour l'adsorption du RB5.....	41

La liste des tableaux

Tableau. I. 1 Comparaison entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique.....	5
Tableau. II. 1 Avantages et inconvénients du charbon actif en poudre.....	16
Tableau.II. 2 avantages et inconvénients du charbon actif en granulés.	17
Tableau. III. 1 Quelques propriétés physico-chimiques du Réactif Noir (RB5).	22
Tableau. III. 2 Propriétés physico-chimique de la Rhodamine B.....	23
Tableau. III. 3 Les paramètres cinétiques d'adsorption du RhB et RB5	33
Tableau. III. 4 Les paramètres cinétiques d'adsorption du RhB et RB5.....	34
Tableau.III. 5 les principaux paramètres de chaque modèle RB5.	38
Tableau.III. 6 les principaux paramètres de chaque modèle RhB.	40
Tableau.III. 7 Paramètres thermodynamiques d'adsorption.....	42

Introduction Générale

Introduction générale

L'eau est un élément indispensable à l'existence. Son rôle est fondamental pour le développement économique de la civilisation humaine vu son utilisation dans de nombreux secteurs notamment l'industrie et l'agriculture. Cette ressource vitale est très connue par sa grande fragilité. D'où la nécessité d'amélioration des moyens efficaces pour sa protection contre la pollution [1].

L'homme cherche toujours à obtenir un environnement propre et non pollué, en évitant autant que possible les matières polluantes. Parmi celles qui sont courantes et très importantes, on cite les colorants pour leurs effets néfastes sur la santé humaine et sur l'environnement.

L'un des importants polluants, ce sont les colorants parmi les polluants organiques qui se manifestent en grande quantité dans les rejets industriels. Une fois qu'ils seront dissous dans l'eau, ils seront parfois difficiles à traiter, car les colorants ont une origine synthétique et une structure moléculaire complexe qui les rend plus stables et difficiles à être biodégradés, donc peuvent constituer des facteurs de risques pour notre santé et de nuisances pour notre environnement. Donc, il est nécessaire de limiter le plus possible ces polluants en mettant en place une moyenne de traitement adaptée comme une unité de décoloration.

La contamination des ressources en eau par des polluants d'origines diverses est un Problème d'actualité, qui se pose avec acuité suite à l'avancement industriel et technologique.

Plusieurs techniques physico-chimiques et biologiques peuvent être utilisées pour éliminer la couleur du colorant contenant des eaux usées. Parmi ces méthodes nous citant la coagulation, la floculation, la filtration membranaire, l'oxydation chimique et l'échange d'ions mais chaque technique à ses propres limites. [2]

Le principe du traitement par adsorption est de les colorer par un matériau solide appelé adsorbant. Il existe, dans la littérature, plusieurs matériaux solides (argiles, zéolites, alumines activées, boue, biomasses, résidus agricoles, sous-produits industriels et charbon actif...) pouvant être utilisés dans des procédés de décoloration des eaux.

Les charbons actifs fabriqués à partir des résidus d'agriculture ont été largement utilisés comme adsorbants pour traiter les effluents riches en métaux lourds en raison de leur structure poreuse très importante.

La valorisation des résidus d'agriculture sans générer de polluants est un grand déchet et est recommandée pour un développement industriel durable afin de préserver l'environnement. Tous les matériaux bon marché tels que les déchets de la biomasse : la peau de pomme, les noyaux des dattes, les noyaux d'olives, les noyaux de pêche, les épis de maïs, les grains de café et le marc de

Introduction Générale

café, les déchets de thé, la bagasse, la coquille de noix de coco et les noyaux d'abricot avec une teneur élevée en carbone peuvent être utilisés comme précurseurs pour la production de charbon actif. Ces précurseurs moins chers et renouvelables par rapport au charbon actif commercial.

L'utilisation du charbon actif est restée pendant longtemps et jusqu'à ce jour l'adsorbant le plus efficace, grâce à sa forte capacité d'adsorption due essentiellement à sa grande surface spécifique.

L'objectif de cette étude est de valoriser un déchet végétal existant sur le territoire national en vue de l'élimination des polluants organique tel que le Réactive Noir 5 et le Rhodamine B.

Ce mémoire comprend deux parties :

Une recherche bibliographique contenant des rappels sur l'adsorption et les adsorbants.

Une partie expérimentale, dans laquelle on étudie l'effet de paramètres influençant l'adsorption tels que, la température, le pH, la dose et le temps de contact et une application concernant l'adsorption des deux colorants étudiés et enfin une étude cinétique de l'adsorption effectuée sur les polluants choisis.



CHAPITRE I
L'ADSORPTION

I.1 Introduction

Le procédé de séparation par adsorption constitue aujourd'hui une des technologies les plus importantes, il est largement utilisé pour la dépollution et la purification dans des domaines très variés, par exemples les industries agroalimentaires, pétrochimiques et chimiques, aux applications environnementales et pharmaceutiques.

Dans ce chapitre nous allons donner quelques généralités sur l'adsorption pour mieux définir l'importance de ce processus, expliquer sa cinétique, ses caractéristiques et les éléments influents l'adsorption [3].

I.2 Définition de l'adsorption

Le terme adsorption est défini comme étant le passage d'espèces chimiques d'une phase liquide ou gazeuse vers une surface solide. Le processus d'adsorption à l'interface soluté/solide est une accumulation des substances inorganiques ou bien organiques à la surface d'un solide [4]. Le solide sur lequel l'adsorption a lieu est appelé adsorbant et le fluide qui va s'adsorber adsorbat. Ce phénomène dépend à la fois de cette interface et des propriétés physico-chimiques de l'adsorbat [5]. L'adsorption est un phénomène spontané qui se produit pour diminuer la tension superficielle d'une surface.

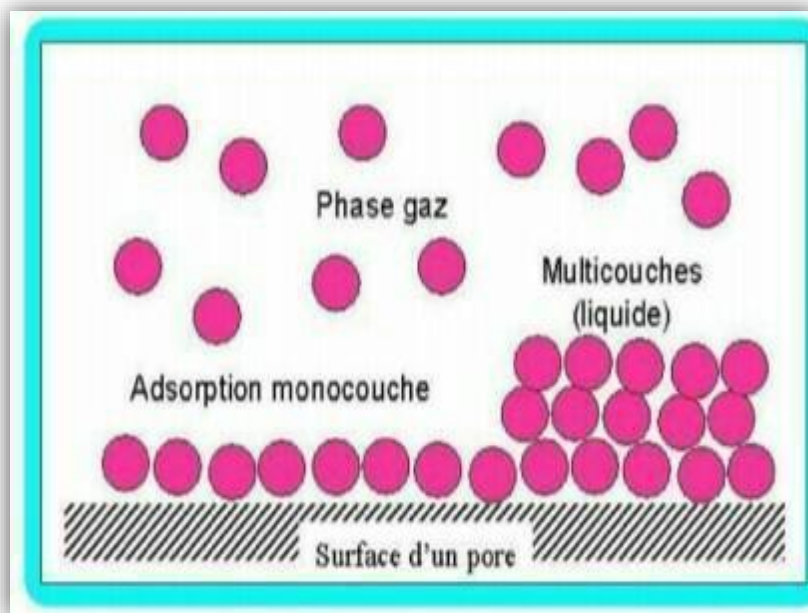


Figure. I. 1 Schéma simplifié représentant le phénomène d'adsorption [6].

I.3 Types d'adsorption

Selon la nature de liaisons présentes entre l'adsorbant et les molécules adsorbées, deux types d'adsorption sont désignés : adsorption physique et adsorption chimique.

I.3.1 Adsorption physique (physisorption)

L'adsorption physique ou physisorption est le type d'adsorption le plus courant, la plupart des procédés d'adsorption séparatives étant basés sur la physisorption [7].

L'adsorption physique est un phénomène réversible (c'est-à-dire que les molécules adsorbées peuvent être facilement résorbées en diminuant la pression ou en augmentant la température) qui résulte de l'attraction entre les molécules d'adsorbant composant la surface du solide et les molécules du soluté, ces forces attractives de nature physique relativement faibles, du type force de Vander Waals. Plusieurs couches d'atomes ou de molécules peuvent se déposer de cette manière [8].

I.3.2 L'adsorption chimique (ou chimisorption)

La chimisorption est un phénomène d'adsorption qui met en jeu une ou plusieurs liaisons chimiques covalentes ou ioniques entre l'adsorbat et l'adsorbant. La chimisorption est généralement irréversible, produisant une modification des molécules adsorbées. Ces dernières ne peuvent pas être accumulées sur plus d'une monocouche. Par ce type d'adsorption, les molécules directement liées au solide [9]. La chaleur d'adsorption, relativement élevée est comprise entre 20 et 200 Kcal/mol [10].

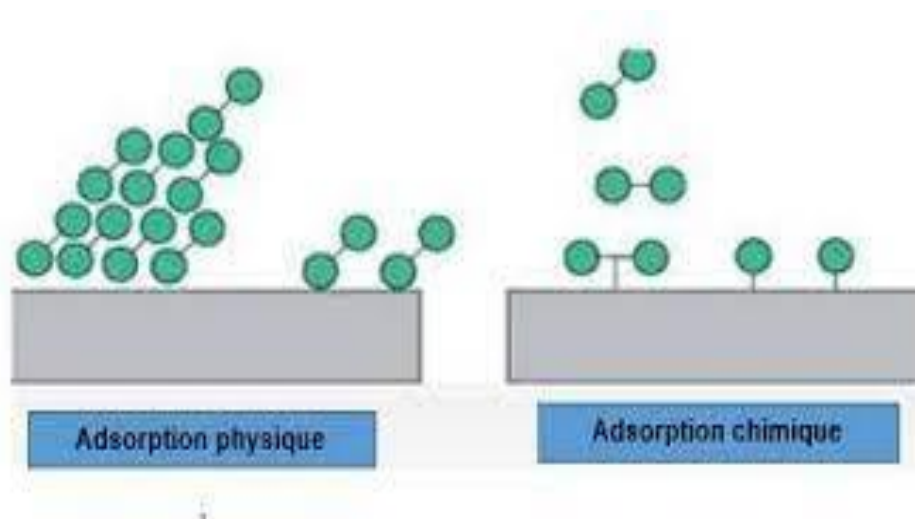


Figure. I. 2 Schéma de l'adsorption physique [11].

I.3.3 Différence entre chimisorption et physisorption [12].**Tableau. I. 1** Comparaison entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique.

Propriétés	Adsorption physique	Adsorption chimique
Types de liaison	Liaison de Van Der Waals	Liaison chimique
Température de processus	Relativement faible comparé à la température d'ébullition de l'adsorbat	Plus élevée que la température d'ébullition de l'adsorbat
Individualité des Molécules	L'individualité des molécules est conservée	Destruction de l'individualité des molécules
Désorption	Facile	Difficile
Cinétique	Rapide, indépendante de la température	Très Lente
Chaleur d'adsorption	Inférieur à 10 kcal/mol	Supérieur à 10 kcal/mole
Energies de liaison	0 et 40 kJ/mol	> 40 kJ/mol
Etat de surface	Adsorption en plusieurs couches possible	Adsorption en monocouche

I.4 Facteurs influençant le phénomène d'adsorption**I.4.1 Effet de la température**

L'adsorption est un phénomène endothermique ou exothermique suivant le matériau adsorbant et la nature de molécules adsorbées [13].

I.4.2 Effet de la surface spécifique

La surface spécifique est définie comme étant la surface d'un solide par unité de masse, elle est exprimée en (m^2/g). En effet, plus la taille est petite plus la surface de contact sera grande. Ce qui va alors augmenter son pouvoir de rétention. En outre, cette surface s'accroît lorsque le support est poreux. Son estimation est conventionnellement fondée sur des mesures de la capacité d'adsorption d'une monocouche de l'adsorbant [14].

I.4.3 Effet de l'agitation

Les expériences montrent que le type d'agitateur utilisé et intensité de l'agitation ont une influence parfois non négligeable sur la quantité adsorbée [15].

I.4.4 L'effet du pH

Le pH peut conditionner à la fois la charge superficielle de l'adsorbant ainsi que la structure de L'adsorbat. La technique de traitement à adopter dépendra fortement de la valeur du pH [16].

I.4.5 La nature de l'adsorbat

Suivant la polarité d'adsorbants et d'adsorbat, le taux d'adsorption est différent. Plus une substance est polaire, plus grande est son adsorption sur une surface non polaire [17].

I.5 Cinétique d'adsorption

La cinétique d'adsorption est définie par l'évolution de la quantité adsorbée en fonction du temps de contact adsorbant/adsorbat. La vitesse d'adsorption d'un soluté à partir d'une solution dépend de nombreux facteurs, notamment la nature de l'adsorbant, l'adsorbat, ainsi que de la vitesse d'agitation du milieu [18].

L'adsorption des adsorbats est relativement rapide sur un solide non poreux. L'équilibre est atteint en quelques minutes. Cependant, l'adsorption sur un solide poreux est beaucoup plus lente [19].

En effet, plusieurs modèles cinétiques sont utilisés afin de décrire le mécanisme de transport de l'adsorbat à l'intérieur des particules de l'adsorbant. Ils permettent aussi de déterminer certains paramètres cinétiques comme la constante de vitesse et la quantité maximale adsorbée à l'équilibre. Ces modèles sont dépendants de la nature et de la complexité du matériau adsorbant.

Trois cas peuvent se présenter [20] :

- Le matériau solide adsorbant est non poreux et il y'aura adsorption rapide sur les surfaces qui sont directement accessibles.
- Le matériau adsorbant est poreux et les surfaces adsorbants ne sont pas toutes également accessibles. La vitesse d'adsorption dépend de l'adsorption proprement dite et de la vitesse de diffusion dans les espaces poreux.
- Le matériau poreux est complexe avec des pores de tailles différentes (micro-mésopores) ; la vitesse d'adsorption dépendra de plusieurs phénomènes dont la diffusion dans les micropores et la convection-dispersion dans les méso et les macropores.

Parmi les plus connus dans la littérature, nous allons citer trois modèles cinétiques lors de notre travail : le modèle de pseudo-premier ordre, le modèle de pseudo-second ordre et le modèle de diffusion intra particulaire.

I.5.1 Modèle pseudo-premier ordre

Le modèle de pseudo-premier ordre [21] a été établi pour l'adsorption en phase liquide. Il s'applique dans plusieurs systèmes liquide-solide, et suggère que l'adsorption à un instant (t) est Proportionnelle à la différence entre la quantité adsorbée à l'équilibre (q_e) et quantité (q_t) adsorbée à cet instant [22], il n'est applicable que dans les premières minutes du phénomène d'adsorption et suggère que l'adsorption est réversible.

Suivant ce modèle, l'adsorption est d'autant plus rapide que le système est loin de l'équilibre.

Ce modèle s'exprime selon la forme différentielle suivante [23].

$$\frac{dq_t}{dt} = K_1(q_e - q_t) \dots \dots \dots (\text{eq. 1})$$

Où :

K₁ : la constante de vitesse pour une cinétique de pseudo première ordre (min⁻¹) ;

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

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

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

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - k_1 \times t \dots \dots \dots (\text{eq. 2})$$

Les paramètres cinétiques de ce modèle peuvent être obtenus en traçant la droite :

Log (q_e - q_t) = f(t) avec k₁ est la pente de ce droit.

I.5.2 Modèle pseudo-second ordre

Le modèle de pseudo-second ordre est fréquemment utilisé en adsorption. Ce modèle a été appliqué dans l'adsorption sur charbon actif, des argiles ou d'autres adsorbants. Selon [24].

Ce modèle est basé sur les hypothèses suivantes :

- L'adsorption se déroule sur des sites localisés et il n'y a pas d'interaction entre les molécules adsorbées.
- La vitesse de désorption est négligeable devant celle d'adsorption.
- Le maximum d'adsorption correspond à la formation d'une monocouche d'adsorbats sur la surface de l'adsorbant.

Dans ce cas, le modèle pseudo-second ordre peut être exprimée comme suit [25] :

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \dots \dots \dots (\text{eq. 3})$$

Où :

k₂ : la constante de vitesse pour une cinétique de pseudo deuxième ordre (mg .g⁻¹ .min⁻¹) ;

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

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

L'intégration de l'équation donne :

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k \times q_e^2} + \frac{t}{q_e} \dots \dots \dots (\text{eq. 4})$$

Les paramètres cinétiques de ce modèle peuvent être obtenus en traçant la droite :

t / q_t = f (t) , où 1/q_e est la pente de cette droite.

I.5.3 Model de diffusion intraparticulaire

Selon [26], la vitesse d'adsorption peut être contrôlée soit par l'étape de transfert de la masse externe, la diffusion intraparticule, l'adsorption sur les sites d'adsorption, ou par combinaison de deux ou trois étapes.

Le modèle de la diffusion intraparticulaire a pour but d'étudier l'existence du mécanisme de diffusion lors de l'adsorption, et il est basé sur l'équation suivante donnée [27] :

$$q_t = k_{\text{int}} t^{1/2} + C \dots \dots \dots (\text{eq. 5})$$

Avec

k_{int} : est la constante de la diffusion intraparticulaire en (mg/g. min^{1/2}) ;

C : est l'ordonnée à l'origine (mg/g), il représente l'effet de l'épaisseur de la couche limite, et cet effet est proportionnel à l'augmentation de l'intersection C .

Lorsque la diffusion intraparticulaire est impliquée dans le procédé d'adsorption, la courbe $q_t = f(t^{1/2})$ sera linéaire.

Si cette courbe passe par l'origine, alors la diffusion intraparticulaire est la seule étape de limitation de la vitesse de l'ensemble du processus d'adsorption [28].

I.6 Isotherme d'adsorption

Une isotherme est une courbe qui représente la relation entre la quantité de soluté adsorbée par unité de masse d'adsorbant (q_e) et la concentration de soluté en solution (C_e), à l'équilibre [29].

Une courbe d'isotherme permet essentiellement de [30] :

- Déterminer le taux de recouvrement de la surface de l'adsorbant par un adsorbat.
- Identifier le type d'adsorption pouvant se produire.
- Choisir l'adsorbant qui conviendrait le mieux à la rétention de l'adsorbat.

Cependant, les isothermes d'adsorption n'expliquent pas les mécanismes d'adsorption. Ces courbes permettent seulement une comparaison entre différents systèmes [30]. La quantité du soluté adsorbée à l'équilibre q_e est donnée par l'équation suivante [31] :

$$q_e = (C_0 - C_e) \times \frac{V}{m} \dots \dots \dots (\text{eq. 6})$$

Où :

C_0 : concentration initiale du soluté adsorbat en (mg/L) ;

C_e : concentration de soluté à l'équilibre dans la solution en (mg/L) ;

m : masse de l'adsorbant (g);

q_e : quantité adsorbée par unité de masse de l'adsorbant en (mg/g);

v : volume de la solution (L).

I.6.1 Classification des isothermes d'adsorption

Giles et collaborateurs (1974) ont proposé les modèles d'adsorption dont quatre types particuliers, représentés dans la figure I.4 [34]. Sont maintenant considérés comme les quatre formes principales d'isothermes généralement observées [32].

Le type d'isotherme obtenu permet de tirer des conclusions qualitatives sur les interactions entre l'adsorbant et l'adsorbat dont les plus importantes sont les suivantes [33] :

- La forme de l'isotherme ;
- L'existence de pallier sur les isothermes.
- Le type d'adsorption (mono, polymoléculaire).
- L'orientation des molécules adsorbées.

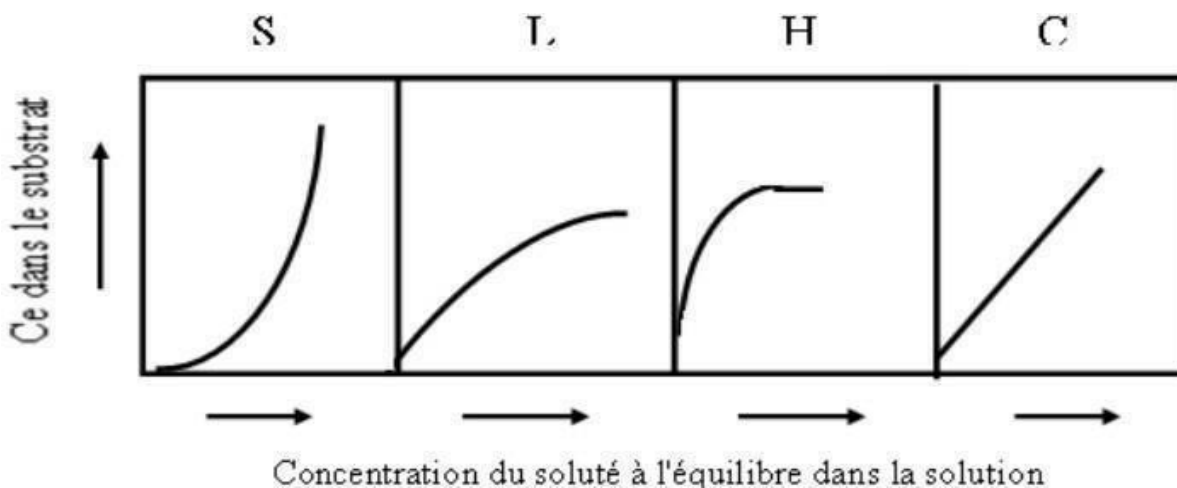


Figure. I. 3 Classification des isothermes d'adsorption selon Giles [34].

- **Type S (Sigmoïde)** : Indique une adsorption verticale de molécules monofonctionnelles polaires sur un adsorbant polaire. Ici le solvant rivalise avec le soluté pour l'occupation des sites de l'adsorbant.
- **Type L (Langmuir)** : Langmuir normal, indique l'adsorption à plat de molécules bifonctionnelles. Dans ce cas l'adsorption du solvant est faible et celle du soluté sur le solide se fait en monocouche.
- **Type C (Partition Constante)** : Ligne droite, cela signifie qu'il y a compétition entre le solvant et le soluté pour occuper les sites, toujours avec le même partage.
- **Type H (Haute affinité)** : Cas particulier de l'isotherme du type L S'obtient lorsqu'il y a chimisorption du soluté.

La partie initiale de l'isotherme est presque verticale, car la quantité adsorbée apparaît importante à concentration quasiment nulle du soluté dans la solution.

I.6.2 Modélisation des isothermes d'adsorption

Les propriétés de surface des adsorbants peuvent être déterminées par les études d'isothermes d'adsorption. Il existe dans la littérature un grand nombre de modèles théoriques qui ont été développés pour décrire les isothermes du processus d'adsorption. Les modèles les plus utilisés sont ceux de Langmuir, Freundlich et Temkin.

I.6.2.1 Modèle de Freundlich

Le modèle d'adsorption de Freundlich est un modèle semi-empirique. Il est basé sur l'hypothèse d'une surface hétérogène de l'adsorbant avec formation de plus d'une couche sur la surface.

Le modèle suppose une distribution énergétique non uniforme des sites d'adsorption sur la surface de l'adsorbant. Le modèle de Freundlich est exprimé par l'équation suivante [35] :

$$q_e = K_F \times C_e^{\frac{1}{n}} \dots \dots \dots (\text{eq. 7})$$

Avec :

q_e : Capacité d'adsorption en (mg/g) ;

K_F : Constante de Freundlich ($L \text{ mg}^{-1}$) ;

$\frac{1}{n}$: Constante se rapportant à l'intensité de l'adsorption en coordonnées logarithmiques.

La forme linéaire de cette équation est la suivante :

$$\log(q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n} \times (\log C_e) \dots \dots \dots (\text{eq. 8})$$

On note que : pour $\frac{1}{n} > 1$, On a une forte adsorption tandis que pour $\frac{1}{n} < 1$, on a une faible adsorption.

I.6.2.2 Modèle de Langmuir

Le modèle de Langmuir, proposé en 1918, est l'un des modèles les plus utilisés dans la littérature pour les phénomènes d'adsorption en phase liquide. Il est applicable à l'adsorption mono-moléculaire du soluté à la surface de l'adsorbant à l'équilibre [36], Il repose sur les hypothèses suivantes :

- L'énergie d'adsorption de tous les sites est identique et indépendante des autres espèces déjà adsorbées sur des sites voisins ;
- La réaction est instantanée et réversible ;
- Il n'y a pas d'interaction entre les espèces adsorbées ;
- La chaleur d'adsorption est indépendante de la surface et donc indépendante du nombre de molécules déjà adsorbées ;

- Chaque site n'est susceptible de fixer qu'une molécule.

Pour une température donnée, la quantité adsorbée q_e est liée à la capacité maximale d'adsorption b , à la concentration à l'équilibre C_e du soluté et à la constante d'affinité K_L par l'équation :

$$q_e = \frac{b \times K_L \times C_e}{1 + K_L \times C_e} \dots \dots \dots (\text{eq. 9})$$

Avec :

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

b : Capacité d'adsorption à la saturation (mg/g) et qui correspond à la formation d'une monocouche.

K_L : Coefficient d'adsorption (L/mg).

C_e : Concentration du substrat à l'équilibre (mg/L).

La transformée linéaire de ce modèle a pour équation :

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{b} + \frac{1}{b \times K_L} \dots \dots \dots (\text{eq. 10})$$

I.6.2.3 Modèle de Temkin

La dérivation de l'isotherme de Temkin suppose que l'abaissement de la chaleur d'adsorption est linéaire plutôt que logarithmique, et l'adsorption est caractérisée par une distribution uniforme des énergies de liaison jusqu'à une certaine énergie maximale de liaison [37].

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

$$q_e = \frac{R \times T}{b_T} \times \log(K_T \times C_e) \dots \dots \dots (\text{eq. 11})$$

Avec :

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

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

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

T : température absolue (K) ;

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

K_T : constante d'équilibre (L/mg).

I.7 Grandeurs thermodynamiques

Le phénomène d'adsorption est toujours accompagné d'un effet thermique qui peut être soit exothermique ($\Delta H < 0$) ou endothermique ($\Delta H > 0$). La mesure de la chaleur ΔH est le principal critère qui permet de différencier la chimisorption de la physisorption. Par ailleurs, l'évaluation de

ΔG (énergie libre de Gibbs) permet de prévoir la spontanéité (ou pas) d'un processus, tandis que grâce à ΔS , on peut apprécier le degré de désordre du couple adsorbat-adsorbant. Les grandeurs thermodynamiques sont déterminées à partir de l'équation de Van't Hoff :

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

Où :

K_d : Coefficient de distribution ;

ΔH : Enthalpie (J/mol) ΔS : Entropie (J/mol K);

T : Température absolue (K) ;

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

Le coefficient de distribution représente le rapport entre la concentration adsorbé et la concentration dans la solution, soit :

$$K_d = C_{\text{ads}}/ C_e \dots \dots \dots (\text{eq.13})$$

Le tracé linéaire est obtenu en portant $\ln K_d$ en fonction de l'inverse de la température, l'enthalpie standard, ΔH , et l'entropie standard, ΔS , sont déduites de la pente et de l'ordonnée à l'origine, respectivement. L'équation suivante donne l'énergie libre de Gibbs, ΔG :

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \dots \dots \dots(\text{eq.14})$$



**Chapitre II :
Charbon actif**

II.1 Introduction

Le charbon actif (CA) également appelé « charbon activé » est un matériau carboné qui peut se présenter sous forme granulaire ou pulvérulente. Sa structure est formée de feuillets de carbone arrangés de manière irrégulière laissant des interstices entre eux. L'espace libre entre ces feuillets est à l'origine d'une porosité importante. Bien que le carbone soit l'élément majoritaire du CA, il peut également contenir des quantités variables d'oxygène et d'hydrogène mais également des traces d'hétéroatomes (chlore, phosphore, soufre) [38].

Le charbon actif a tout d'abord été utilisé pour améliorer les qualités organoleptiques d'une eau en éliminant les matières organiques responsables de goûts, d'odeurs et de couleur. Avec l'accroissement de la pollution, son emploi s'est étendu à l'élimination de nombreux polluants et micropolluants tels que les phénols, les hydrocarbures, les pesticides, les détergents, et même certains métaux lourds [39].

Malgré son utilisation répandue dans les processus d'adsorption, le plus grand obstacle de son application par les industries est lié à son coût prohibitif. Ces dernières années, toutefois, il a eu un intérêt croissant dans la production de charbon actif à partir de différents précurseurs tels que les sous-produits agricoles et des déchets résiduels. En fait, tout matériau pas cher à haute teneur en carbone et contenant une faible teneur en éléments inorganiques peut être utilisée en tant que matière première pour la production du charbon actif. Les sous-produits agricoles se sont avérés être des matières premières prometteuses pour la production de charbons actifs en raison de leur disponibilité à un faible prix [40].

II.2 Définition

Le charbon actif est un matériau constitué de matière carbonisée à structure poreuse [41], il peut être préparé à partir de toute matière solide contenant une grande proportion de carbone, d'origine végétal, comme l'écorce, de noix de coco, coques, noyaux d'olives [42,43], d'origine animale, comme l'os [44] ou d'origine minérale, comme le kaolin [45].

On appelle charbon actif tout charbon ayant subi une préparation particulière par carbonisation, suivie d'une activation physique ou chimique [41,46] où un processus combinant les deux étapes peut être appliqué et qui, de ce fait, possède à un haut degré de propriété de fixer et de retenir certaines molécules amenées à son contact. Le charbon actif se caractérisant par sa grande surface spécifique, par sa structure poreuse, par sa thermo-stabilité et par sa structure amorphe. Composée principalement d'atomes de carbone [47].

II.3 Les différentes formes du charbon actif

Les formes de charbon actif les plus utilisés sont :

II.3.1 Le charbon actif extrudé

Le charbon actif extrudé est de forme cylindrique avec des diamètres allant de 0.8mm à 5mm. Il est principalement utilisé pour des applications en phase gazeuse à cause de sa faible perte de charge, de sa grande résistance mécanique et de sa faible teneur en poussières [48].



Figure. II. 1 L'aspect du Charbon actif extrudé [48].

II.3.2 Le charbon actif en poudre

Les charbons actifs en poudre présentent une granulométrie inférieure à 100 μm avec un diamètre moyen situé entre 15 et 25 μm . Ils ont une large surface externe et une faible profondeur de diffusion, ce qui engendre une vitesse d'adsorption très rapide, mais sa difficulté de manipulation limite son utilisation industrielle [48].



Figure. II. 2 L'aspect du charbon actif en poudre [48].

- **Les avantages et les inconvénients d'un charbon actif en poudre**

Les avantages et les inconvénients d'un charbon actif en poudre sont mentionnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau. II. 1 Avantages et inconvénients du charbon actif en poudre.

Avantages	Inconvénients
Le charbon actif en poudre est 2 à 3 fois moins cher que le charbon actif en granulé.	Le charbon actif en poudre ne peut pas être régénéré quand il est mélangé avec des boues d'hydroxyde.
Des quantités supplémentaires peuvent être rajoutées en cas de pointes de pollution accidentelles ou temporaires.	Il est difficile d'enlever les dernières traces d'impuretés sans ajouter une quantité très importante de charbon actif en poudre. La détection des pointes de pollution est problématique et sa concentration applicable est limitée.
L'adsorption est rapide dans la mesure où une grande partie de la surface de contact est directement disponible.	

II.3.3 Le charbon actif en grains

La forme granulaire du charbon est caractérisée par une taille des particules supérieure à 1mm, un faible diamètre des pores, une grande surface interne et une externe relativement faible. Il en résulte que les phénomènes de diffusion à l'intérieur des pores prennent une grande importance dans le processus d'adsorption [48].



Figure. II. 3 L'aspect du charbon actif en grain [48].

- **Les avantages et les inconvénients des charbons actifs granulés**

Les avantages et les inconvénients des charbons actifs granulés sont mentionnés dans le tableau ci-dessous : [48]

Tableau. II. 2 avantages et inconvénients du charbon actif en granulés.

Avantages	Inconvénients
La durée de vie du charbon actif granulé dépend de l'abattement de la matière organique et du lissage des points de pesticide. Le choix du type de charbon actif est également déterminant sur le rendement d'élimination.	Durée de vie limitée.
	Pré-filtration : les carburants dissous et matières en particules peuvent rapidement encrasser Le charbon, nécessitant un prétraitement.
Le charbon actif granulé a une capacité d'adsorber une partie de presque toutes les vapeurs.	Coût: le besoin de remplacer régulièrement le charbon épuisé rend le charbon actif granulé plus cher que le stripping pour des concentrations élevées de contaminants. Déchets dangereux : tout le charbon doit être finalement jeté, puisque il ne peut être régénéré qu'un certain nombre de fois, ou pas du tout Dans le cas de l'adsorption de métaux ou de résidus d'explosifs. Selon les caractéristiques du charbon épuisé, il peut être jeté comme déchet dangereux, ce qui augmenterait le coût et responsabilité.
Il a une grande capacité d'adsorption Pour les substances organiques en particulier les solvants.	
Il retient un grand nombre de substances chimiques en même temps.	
Il fonctionne bien dans un domaine large de température et d'humidité.	

II.4 Propriétés du charbon actif

II.4.1 Structure poreuse d'un charbon actif

Un charbon actif est un matériau poreux, qui possède des cavités ou des canaux (Figure II.5) [49], appelés pores, dont les parois sont responsables d'une augmentation de l'aire spécifique. Un pore est par définition une cavité plus profonde que large, qui existe dans un grain de matière (Figure II.5) [49]. Selon la classification I.U.P.A.C. (International Union of Pure and Applied Chemistry), les tailles de pores sont réparties en 3 groupes [50].

- **Macropores** : ils possèdent un rayon moyen compris entre 500 et 1000 Å et peut atteindre jusqu'à 20000. L'ordre de grandeur de leurs aires massiques (0,5 à 2 m² /g) montre qu'ils influencent faiblement la capacité d'adsorption.
- **Mésopores** : ils ont un rayon compris entre 18-20 Å et 500-1000 Å. Leurs surfaces spécifiques (25 à 75 m². g⁻¹) montrent qu'ils peuvent influencer moyennement la capacité d'adsorption.

En effet, les phénomènes de condensation capillaire ne peuvent se dérouler qu'à l'intérieur de ces mésopores. Ils sont considérés comme des pores de transition en contrôlant le passage des adsorbats vers les micropores.

- **Micropores** : ils constituent pratiquement l'essentiel de la surface spécifique totale (95 %). Leur rayon qui est inférieur à 18-20 Å (de l'ordre de la taille des molécules simples) leur confère un très grand rôle dans le processus d'adsorption. Concernant le pouvoir adsorbant du charbon actif, il a été clairement établi que la porosité peut limiter les capacités de ce matériau vis-à-vis des molécules complexes, principalement celles à haut poids moléculaire. Ce qui va contrôler la vitesse de diffusion des substrats à l'intérieur des particules du charbon actif.

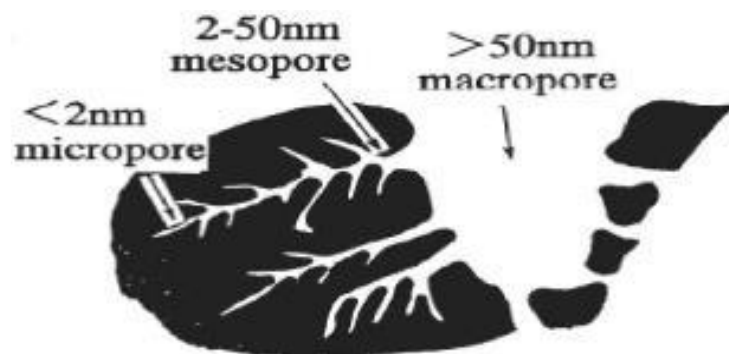


Figure. II. 4 Représentation schématique des différents types de pores [49].

II.4.2 La surface spécifique

La surface spécifique d'un adsorbant est par définition la surface par unité de masse. Elle est généralement exprimée en m^2/g , représentant l'aire disponible pour adsorber une monocouche de molécules. La surface spécifique dépend directement de la porosité : plus la microporosité est grande et plus la surface spécifique est importante [51]. L'adsorption sur la surface des macropores est souvent négligeable par rapport à celle dans les micropores et les mésopores.

II.4.3 La densité

Plus le charbon est activé, plus il est léger. La densité indique le niveau d'activation du charbon actif. Elle conditionne l'efficacité des traitements et c'est également un élément déterminant de son prix. La densité du charbon actif utilisé pour le traitement de l'eau est en général comprise entre 0.20 et 0.55 g/cm^3 . L'expérience montre que quand la densité est supérieure à 0.35 g/cm^3 , le lit du charbon actif fonctionne mieux [52].

II.4.4 La teneur en cendres

Elle est importante car elle peut gêner la mise en place du charbon. La teneur en cendres du charbon actif appliqué au traitement de l'eau devra être la plus basse possible, surtout si l'eau est dure, et en aucun cas, dépasser 10 % [53,54].

II.4.5 Le taux d'humidité

Le taux d'humidité consiste à quantifier l'eau physiquement liée au charbon actif et est exprimée avec une valeur qui varie entre 1 et 5 % en masse de la teneur en eau.

II.4.6 Indice d'iode

La performance du charbon actif est évaluée par sa capacité d'adsorption de l'iode, prise comme substance de référence. L'indice est proportionnel au nombre de micropores. Plus il est grand, meilleur est le niveau d'activation et donc meilleure capacité d'adsorption.

II.5 Utilisations du charbon actif

Le charbon actif est utilisé dans de nombreux domaines [55], on cite :

1) Filtration

- Décontamination de l'eau potable : le charbon actif retient un grand nombre de composés organiques, tels les pesticides. Cet usage représente 20 % du marché mondial.
- Masques à gaz.
- Filtres à cigarettes.
- Filtres utilisés dans les installations de ventilation en circuit fermé (par exemple, hotte de cuisine).
- Filtration de polluants organiques (en particulier les traitements médicamenteux).

2) Industrie

- Décoloration des eaux : eau potable et autres liquides alimentaires (bière, boissons gazeuses, etc..).
- Traitement des effluents liquides.
- Détachage des vins blancs, comme le Champagne produit à partir de pinot noir (raisin noir à jus blanc) : les pigments de la peau du raisin, qui peuvent colorer le jus, sont absorbés par un charbon activé chimiquement et exempt de fer afin d'éviter la casse ferrique du vin.
- Décoloration du sucre.
- Décaféinassions du café : avec de l'eau.
- Stockage de l'hydrogène (nano fibres de charbon actif ou de dérivés du charbon).

- Support pour métaux catalytiques ultra divisés (par exemple : platine ou nickel sur charbon actif).
- L'élimination des hydrocarbures dans l'eau.

3) Médecine

- Anti-diarrhéique dans les cas des diarrhées.
- Aigreurs d'estomac, aérophagies, flatulences.
- Epuration digestive et abaissement du taux de cholestérol.
- Traitement de l'intoxication alimentaire.
- Antidote en cas d'intoxication par médicaments, produits chimiques, métaux lourds, détergents, solvants organiques.

II.6 Régénération de charbon actif

Le charbon actif est un produit relativement couteux, c'est pourquoi il est très souvent régénéré il existe quatre méthodes de régénération [55].

II.6.1 Régénération à la vapeur

Cette méthode est réservée à la régénération des charbons actifs qui simplement adsorbé des produits très volatils cependant, le traitement à la vapeur peut être utile pour déboucher la surface des grains de charbons et désinfecté le charbon.

II.6.2 Régénération thermique

Cette opération est réalisée par pyrolyse ou en brulant les matières organiques adsorbées par les charbons actifs dans le but d'éviter d'enflammer les charbons, ils sont chauffés aux alentours de 800°C au sein d'une atmosphère contrôlée.

II.6.3 Régénération chimique

Procédés utilisant un solvant utilisé à une température de 100°C et avec un pH important. L'utilisation de cette méthode réside dans la minimisation des pertes de charbons (environ 1%). Les polluants son ensuit détruit par incinération.

II.6.4 Régénération biologique

Bien que le procédé de la régénération biologique soit remis en question, le fait expérimental demeure, a conditions que les bactéries son capable de minéraliser la matière organique du charbon.



CHAPITRE III
PARTIE
EXPERIMENTALE

III.1 Introduction

Dans cette partie, nous avons étudié l'adsorption de deux colorants basiques utilisés dans l'industrie de textile qui sont le Réactif Noir 5 et Rhodamine B.

L'influence des différents paramètres sur le processus d'adsorption a également été étudiée tels que le temps de contact, la masse de l'adsorbant, la température, la concentration de colorant et le pH. La cinétique d'adsorption a été mise en évidence et modélisée grâce à l'exploitation de trois modèles ; pseudo premier ordre ; pseudo deuxième ordre et la diffusion intraparticulaire en dernier lieu on a fait l'application des différents modèles des isothermes de l'adsorption.

III.2 Caractéristiques des molécules à étudiées

III.2.1 Réactif Noir 5 (RB5)

Le Réactif Noir est synthétisé et commercialisé par l'entreprise Sigma-aldrich sous une appellation codée et commercialisée : Réactive Black 5. Il rentre dans la catégorie des colorants acides azoïques, très solubles dans l'eau (200 g/L à 80 °C), et les solutions aqueuses.

Tableau. III. 1 Quelques propriétés physico-chimiques du Réactif Noir (RB5).

Propriétés	Réactif Noir 5
Formule chimique	$C_{26}H_{21}N_5Na_4O_{19}S_6$
Masse moléculaire	991.82
Point de fusion	>300 °C
Densité	1,21 g / cm ³ à 20 ° C
λ_{max}	597 (nm)
Caractérisation chimique	Colorant acide anionique azoïque
Etat	Poudreux
Couleur	Noir

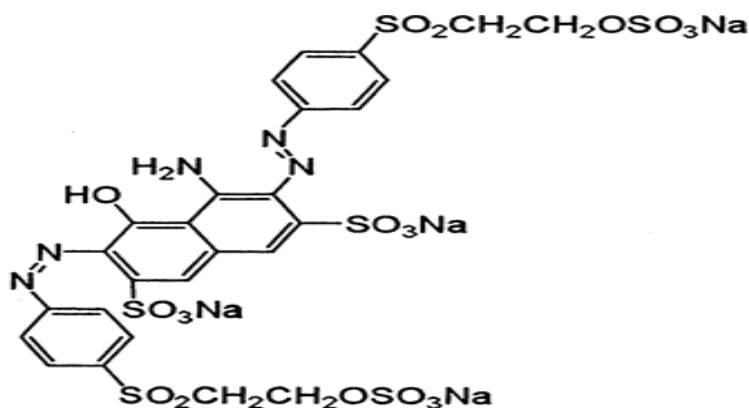


Figure. III. 1 Squelette de Réactif Noir 5 (RB5).

III.2.2 Colorant Rhodamine B

Le colorant choisi est un colorant industriel, il s'agit du Rhodamine B dont la structure chimique est donnée ci-dessous. A l'état solide, il est sous forme de poudre fine et de couleur rose. Il appartient à la famille des colorants basiques solubles dans l'eau.

Tableau. III. 2 Propriétés physico-chimique de la Rhodamine B.

Propriétés chimiques	Propriétés physiques
Formule brute : $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$	$T_{\text{fusion}} : 210-211\text{ }^{\circ}\text{C}$
Masse molaire l : $479,01 \pm 0,028\text{ g/mol}$	Solubilité : $50\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ à $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans l'eau
$\lambda_{\text{max}}\text{ (nm)}=555$	

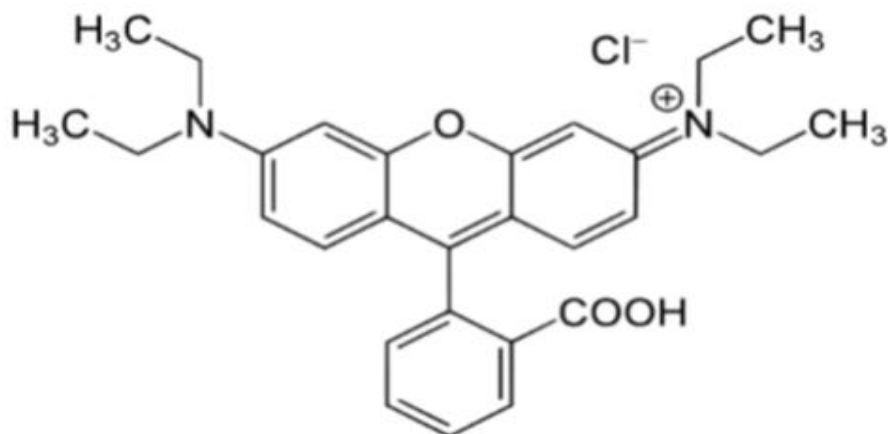


Figure. III. 2 Structure chimique de la molécule du colorant Rhodamine B (RhB).

III.3 La spectrophotométrie UV-Visible

La spectrophotométrie ultra-violet / visible est une technique d'analyse quantitative, qui consiste à mesurer l'abondance ou la densité optique d'une substance chimique donnée, en solution. La méthode repose sur la loi de BEER-LAMBERT.



Figure. III. 3 Spectrophotomètre UV visible.

- **Loi de béer-Lambert**

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

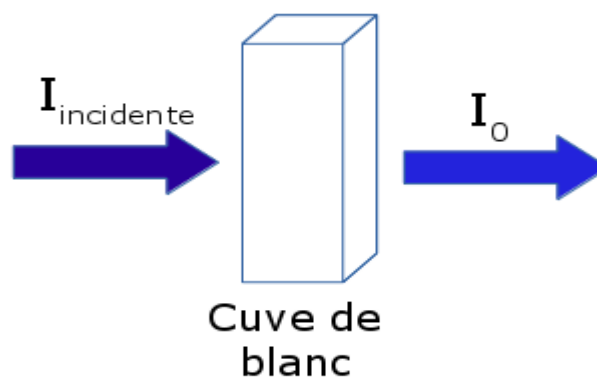


Figure. III. 4 Cuve UV.

La loi de Beer Lambert s'exprime sous la forme suivante :

$$A = \log (I_0 / I) = (1/T) = KC1 \dots \dots \dots (\text{eq.15})$$

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.

L : épaisseur de la cuve.

III.4 Établissement la courbe d'étalonnage

III.4.1 Préparation de solution mère de RB5 et RhB

A l'aide d'une balance analytique et spatule, on met 0,5 g de colorant dans une fiole jaugée 500 mL et on ajoute l'eau distillée (ED) jusqu'au trait de jauge. La concentration correspondante est 1000 mg/L. A partir de cette solution mère (SM) nous avons effectué tous les protocoles expérimentaux de cette étude.



Figure. III. 5 solution mère des deux colorants.

III.4.2 Préparation des solutions étalons

Des étalons ont été préparés à partir de la solution mère, avec des concentrations variant de 2 à 44 mg/L pour RB5 et de 1 à 7 mg/L pour RhB.

Un spectrophotomètre ultra-violet/visible a été utilisé pour analyser chaque étalon, avec une longueur d'onde de 595 nm pour RB5 et de 554 nm pour RhB, qui a été déterminée par balayage. Les résultats obtenus sont représentés graphiquement sur les figures (III.6) et (III.7).

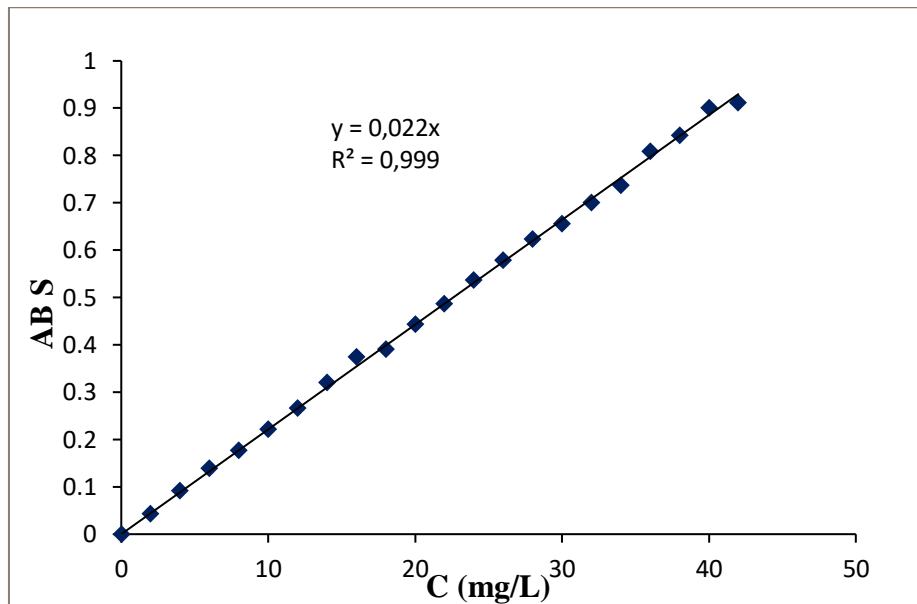


Figure. III. 6 Courbe d'étalonnage de Réactif Noir 5.

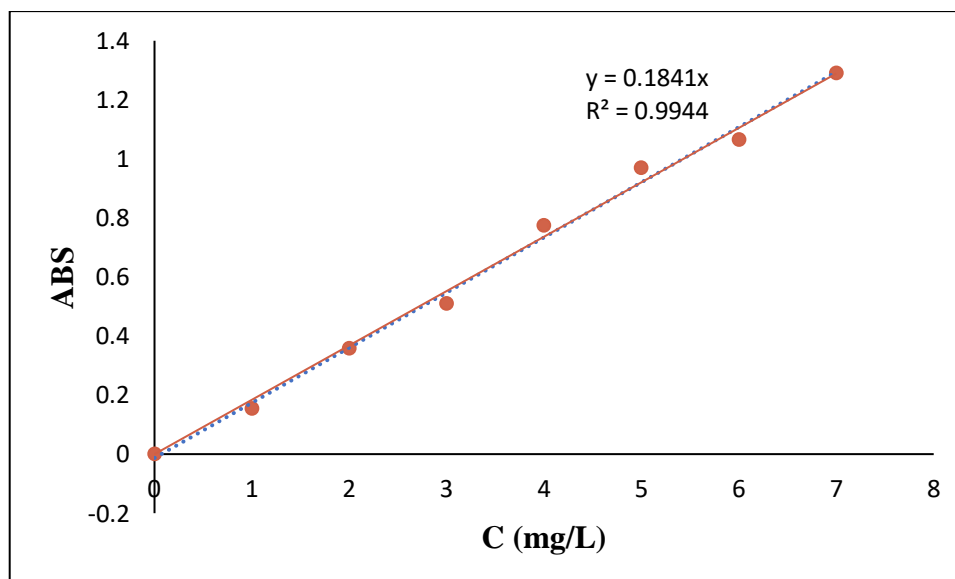


Figure. III. 7 Courbe d'étalonnage de Rhodamine B.

L'équation de la droite donnant l'absorbance en fonction de la concentration du RB5 est $A=0,022 C$, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,999$ et L'équation de la droite donnant l'absorbance en fonction de la concentration pour la RhB est $A = 0,184 C$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,994$, ce qui peut être considéré comme un bon ajustement linéaire. Cette équation est utilisée pour calculer la concentration d'équilibre (C_{eq}) d'une solution donnée.

III.5 Effet du temps

Dans le but de déterminer le temps optimal de contact entre l'adsorbant et l'adsorbat, nous avons préparé deux solutions de RB5 de concentration égale 100 mg/L et 200 mg/L, et deux solutions de RhB de concentration égale 300 mg/L et 400 mg/L.

Dans une série des béchers, nous avons prélevé 25 mL de la solution préparée mise en contact avec 0,025 g de charbon actif. Les solutions ont été agitées au bout de 10 min à 240 min, puis centrifugé en vue de séparer l'adsorbant du l'adsorbat, et analysé à l'aide spectrophotométrie. Les résultats obtenus et représentés graphiquement sur Les figures (III.8) et (III.9).

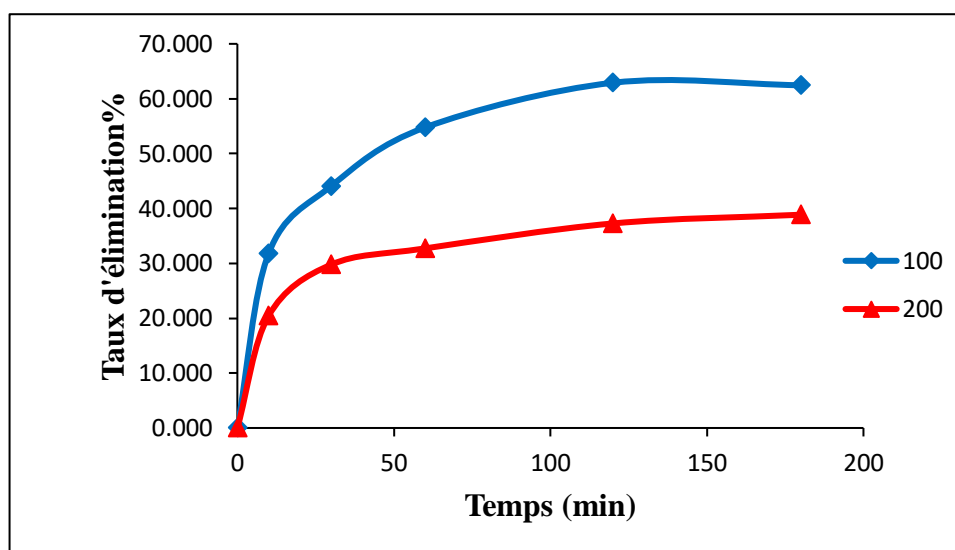


Figure. III. 8 Taux d'élimination du Réactif Noir 5 en fonction du temps d'agitation.

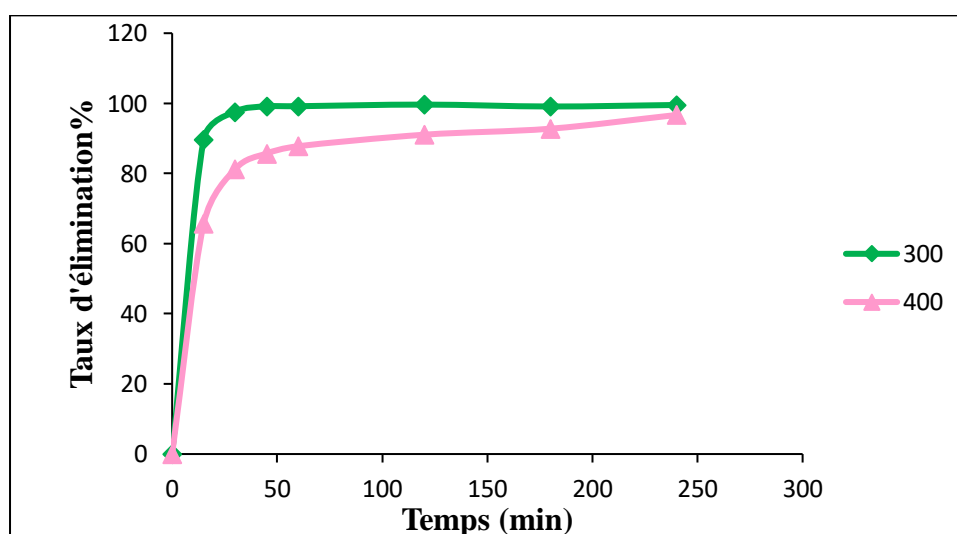


Figure. III. 9 Taux d'élimination du Rhodamine B en fonction du temps d'agitation.

D'après les résultats de figure III.8 et III.9, nous avons remarqué que le taux d'élimination du Réactif Noir 5 et Rhodamine B augmente avec l'évolution de temps. Après 120 min pour RB5 et 60 min pour RhB nous avons remarqué qu'il y a formation d'un palier de saturation et que le taux d'élimination reste presque stable donc le temps 120 min et 60 min est considéré comme temps optimal pour cette application. L'expérience a été réalisée pour deux concentrations pour s'assurer que le temps d'équilibre est valable même si les concentrations changent.

III.6 Effet de dose

Pour étudier l'effet de la masse sur l'adsorption des deux solutions RB5 de concentration 200 mg/L et RhB de concentration est de 300 mg/L. On ajoute dans une série de béchers des quantités croissantes de notre charbon actif, soit 0,015 g, 0,025 g, 0,05 g, 0,1 g et 0,2 g, respectivement. À chaque bécher, on ajoute 25 mL de la solution polluant. Ensuite agité pendant une période de 2 heures et 1 heures respectivement, puis centrifugé pendant 15 min et analysé à l'aide d'un spectrophotomètre. Résultats obtenus sont représentés graphiquement sur Les figures (III.10) et (III.11).

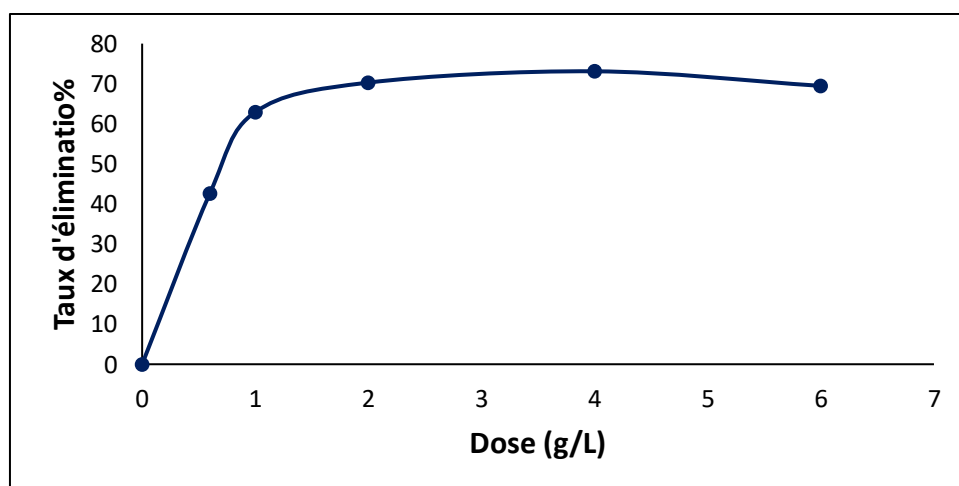


Figure. III. 10 Taux d'élimination du Réactif Noir 5 en fonction de dose d'agitation.

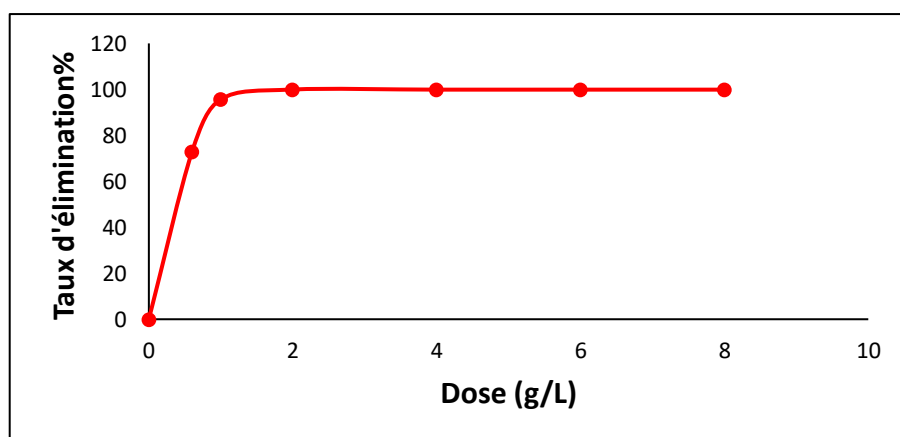


Figure. III. 11 Taux d'élimination du Rhodamine B en fonction de dose d'agitation.

Selon les résultats de figure (III.10) et (III.11). Les courbes on voit que le taux d'élimination de RB5 et RhB augmente avec l'augmentation de la dose de l'adsorbant, jusqu'à une dose d'adsorbant de 4 g/L et 2 g/L respectivement qui exprime le point de saturation ou la capacité convient à une caractéristique d'équilibre entre le charbon actif et la substance présente dans la solution aqueuse. Cette dose est prise en considération pour le reste de nos expériences.

III.7 Influence du pH

Le pH de la solution est un facteur qui permet le contrôle de processus d'adsorption. Beaucoup d'études indiquent que le pH de la solution est un facteur important pour déterminer le potentiel d'adsorption des composés organiques, cationiques et anioniques, Les études préalables ont montré que la capacité d'adsorption augmente lorsque le pH diminue.

Les étapes des expériences dictent que dans une série d'errals on introduit 25 mL de solution du Réactif Noir 5 (200 mg/L) et du Rhodamine B (400 mg/L) de pH différents 2, 4, 6, 8, 10 (pH \pm 0,1) ce dernier est ajusté par l'ajout de HCl et NaOH (0,1 N), on y ajoute 4 g/L pour RB5 et 2 g/L pour RhB d'adsorbant. L'ensemble est agité pendant 120 min pour RB5 et 60 min pour RhB, filtré puis analysé par le spectrophotomètre pour déterminer la concentration d'équilibre de chaque échantillon.

Les résultats de la variation du taux d'adsorption en fonction du pH représenté graphiquement dans les figures (III.12) et (III.13).

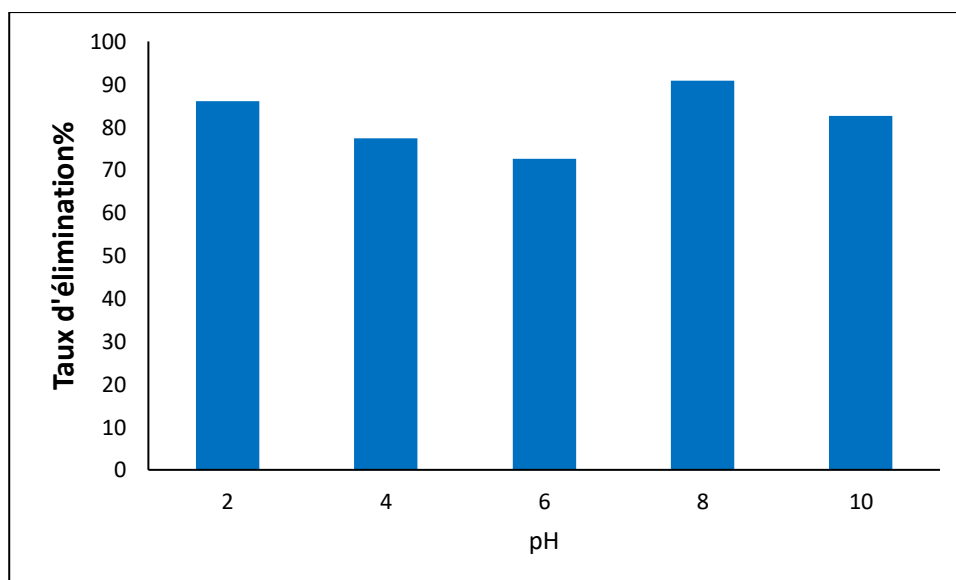


Figure. III. 12 Taux d'élimination du RB5 en fonction de pH

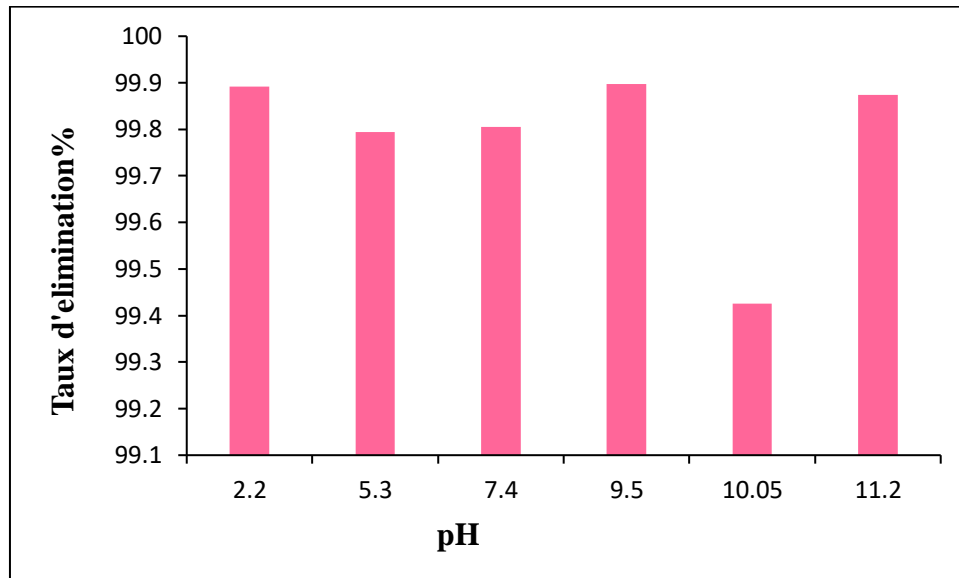


Figure. III. 13 Taux d'élimination du RhB en fonction de pH

Selon les illustrations, il est observé que le taux d'élimination le plus élevé est obtenu généralement à un pH basique pour RB5 et à un pH acide pour RhB, et que le taux d'élimination atteint son maximum à un pH de 8 pour RB5 et à un pH de 2,2 pour RhB. On établira ce pH en utilisant l'isotherme d'adsorption.

III.8 Cinétique d'adsorption du RhB et du RB5

Plusieurs modèles de cinétique ont été utilisés afin d'interpréter les données expérimentales, pour donner des informations essentielles pour l'utilisation de ces charbons actifs dans le domaine d'adsorption.

La cinétique d'adsorption du RhB et RB5 sur l'adsorbant a été suivie en appliquant les modèles de Lagergren (pseudo-premier et pseudo-deuxième ordre) et le modèle de diffusion intra particulaire. Nous citons les modèles cinétiques étudiés pour l'élimination du RhB et RB5 par l'adsorbant avec deux concentrations différentes.

Nous avons ajouté 25 mL de solutions du RhB et de solution du RB5 dans une série de béchers. Nous avons également ajouté 2 g/L d'adsorbant pour RhB et 4 g/L pour RB5. Nous avons agité l'ensemble pendant 5 ; 10 ; 15 ; 30 ; 60 et 120 minutes, puis nous avons centrifugé et analysé. Les résultats sont représentés sur les figures (II.14), (II.15), (II.16) et (II.17).

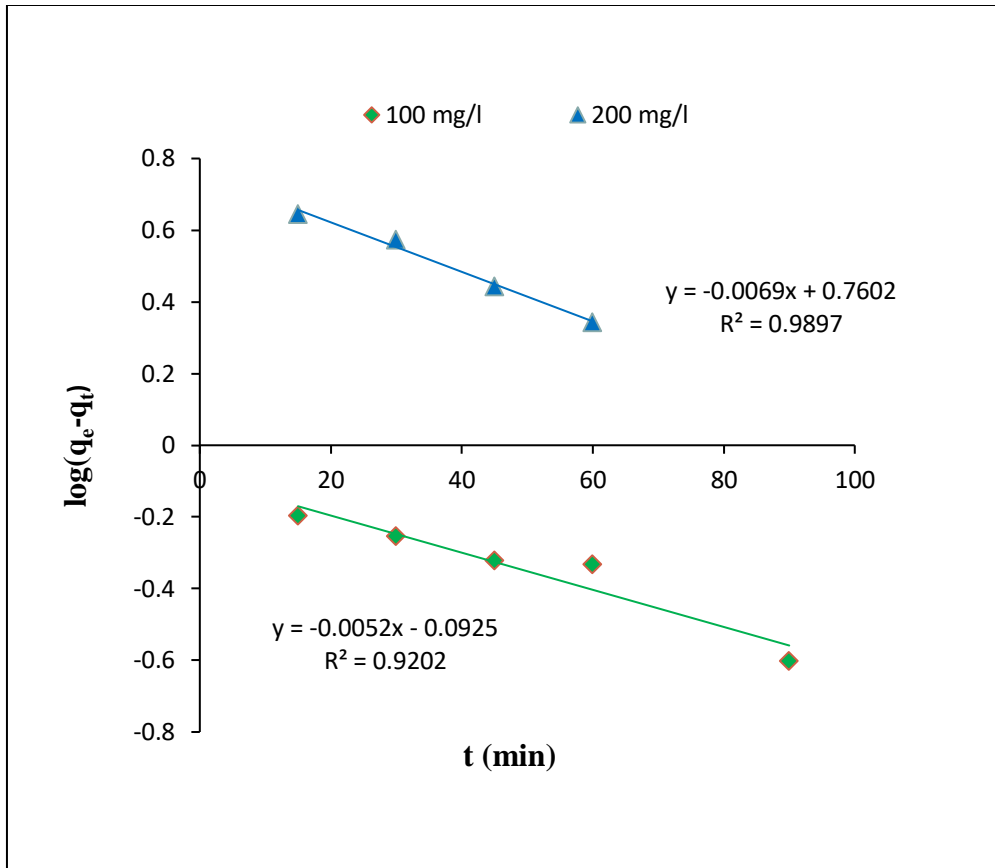


Figure. III. 14 Représentation graphique de la cinétique d'adsorption du RB5 (1^{er} ordre)

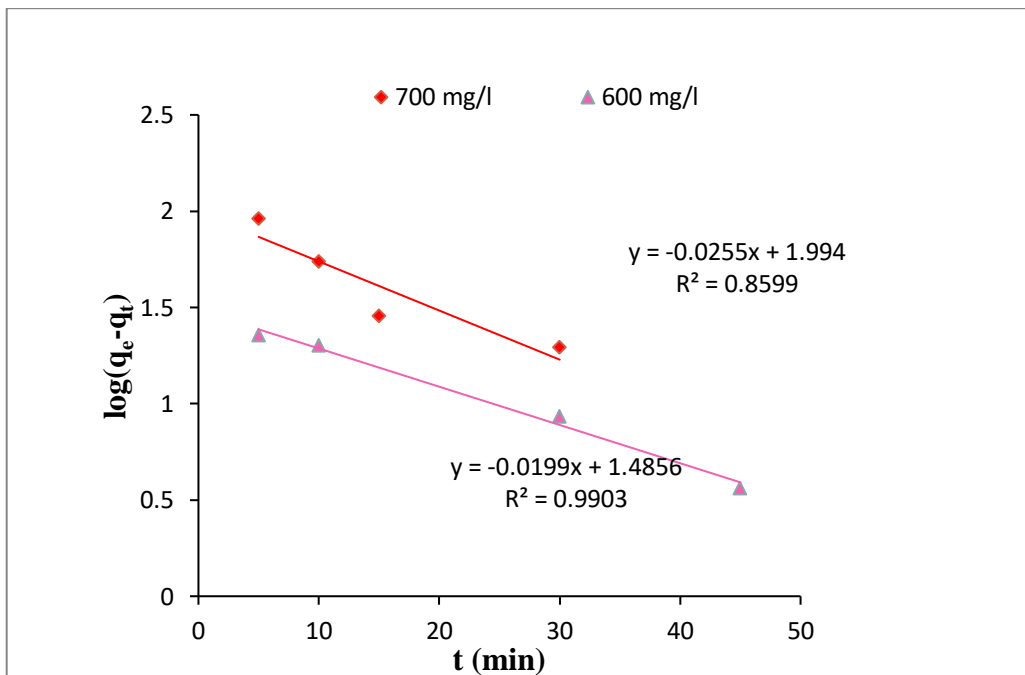


Figure. III. 15 Représentation graphique de la cinétique d'adsorption du RhB (1^{er} ordre)

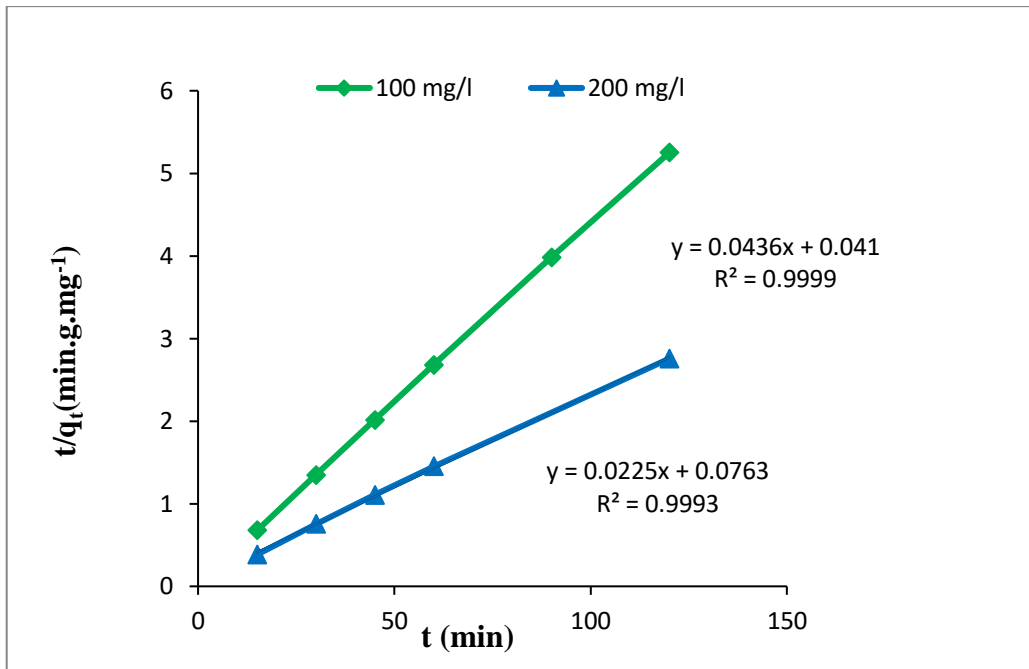


Figure. III. 16 Représentation graphique de la cinétique d'adsorption du RB5 (2^{ème} ordre)

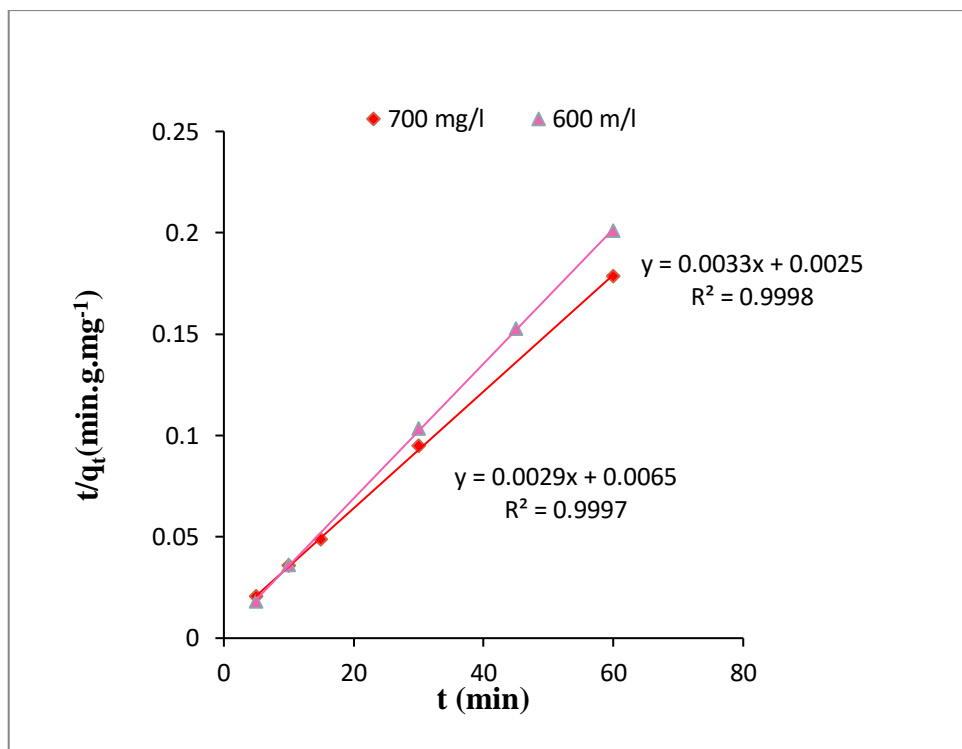


Figure. III. 17 Représentation graphique de la cinétique d'adsorption du RhB (2^{ème} ordre)

Tableau. III. 3 Les paramètres cinétiques d’adsorption du RhB et RB5 .

C ₀ (mg/L)	q _{e exp} (mg/g)	Pseudo 1 ^{er} ordre			Pseudo 2 ^{ème} ordre		
		k ₁ (min ⁻¹)	q _{e cal} (mg/g)	R ²	q _{e cal} (mg/g)	k ₂ mg.g ⁻¹ .min ⁻¹	R ²
Réactif Noir 5							
100	22,863	0,005	0,809	0,92	23,255	0,0451	0,999
200	43,545	0,006	5,754	0,989	45,454	0,006	0,999
Rhodamine B							
600	298,595	0,019	30,549	0,99	303,03	0,0045	0,999
700	335,985	0,025	98,627	0,859	344,827	0,001	0,999

Le meilleur modèle établi pour l’étude de la cinétique d’adsorption est choisi selon le facteur de corrélation. Plus ce facteur est élevé plus le modèle est favorable pour l’étude du processus d’adsorption.

A partir des résultats de tableau (III. 3), on remarque que la cinétique d’adsorption du RB5 et RhB ne convient pas au pseudo-premier ordre. Le modèle qui présente un facteur de corrélation le plus élevé est celui du modèle de pseudo-second-ordre avec un facteur R²=0,999 pour toutes les concentrations, on peut en déduire donc que le modèle de pseudo-second-ordre est celui qui décrit mieux le processus d’adsorption des deux colorants sur le charbon actif. Nous voyons aussi que les quantités adsorbées calculées par ce modèle sont presque proches à des quantités adsorbées expérimentalement.

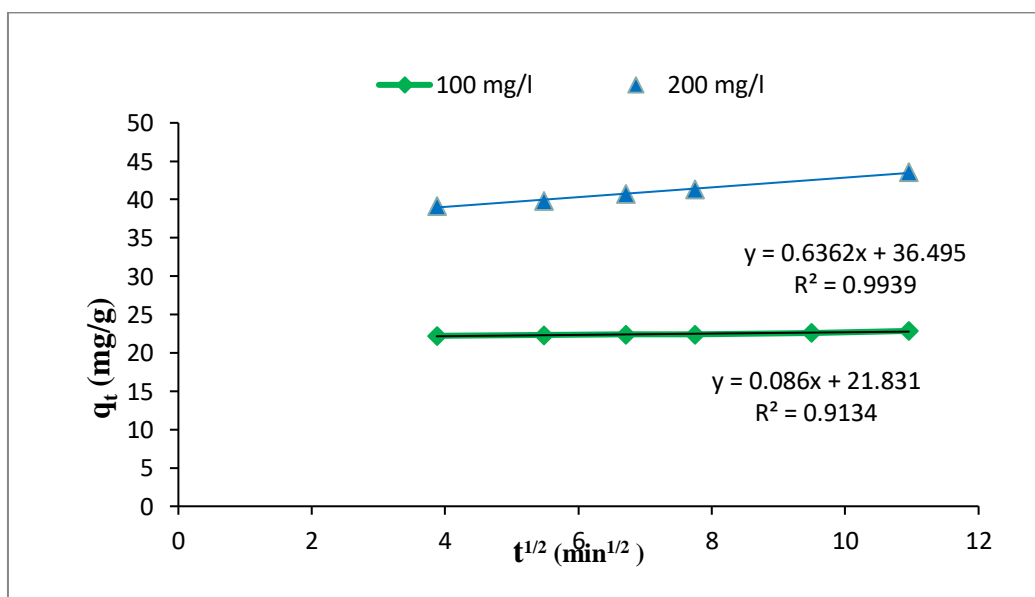


Figure III. 18 Représentation graphique de la diffusion intra-particulaire pour l’adsorption du RB5.

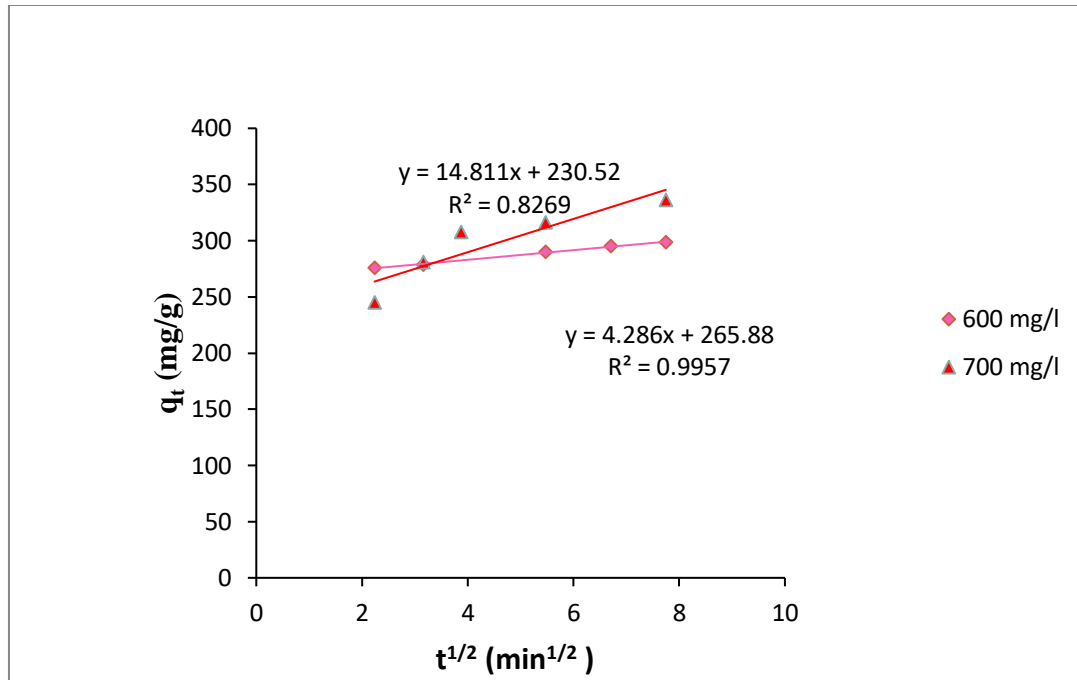


Figure. III. 19 Représentation graphique de la diffusion intra-particulaire pour l’adsorption du RhB.

Tableau. III. 4 Les paramètres cinétiques d’adsorption du RhB et RB5.

C_0 (mg/L)	Diffusion intraparticulaire		
	K_{int} mg/g. min ^{1/2}	C (mg/g)	R^2
Réactif Noir 5			
100	0,086	21,83	0,913
200	0,636	36,49	0,993
Rhodamine B			
600	4,286	265,8	0,995
700	14,81	230,5	0,826

Si la diffusion intraparticulaire était l’étape déterminante dans le processus d’adsorption alors la droite correspondante devrait passer par l’origine. Ce n’est pas ce cas-là que nous observons sur la Figure (II.18), (III .19), alors on peut dire que la diffusion intraparticulaire n’est pas l’étape limitante de cette réaction.

III.9 Isothermes d'adsorption

L'isotherme d'adsorption est une caractéristique qui représente l'équilibre thermodynamique Adsorbant-adsorbat.

Pour étudier l'isotherme d'adsorption, on prépare une série des béchers contenant 25 mL de solution de concentration de RB5 qui varient entre 30 et 1000 mg/L et ajusté un pH=8 et introduit 4 g/L de charbon actif dans des béchers sont agités pendant 2 heures, Et pour la solution RhB qui varient entre 300 et 1200 mg/L et nous gardons le pH =2,2 de solution avec 2 g/L de charbon actif dans des béchers sont agités pendant 1 heures, puis centrifugés et analysés.

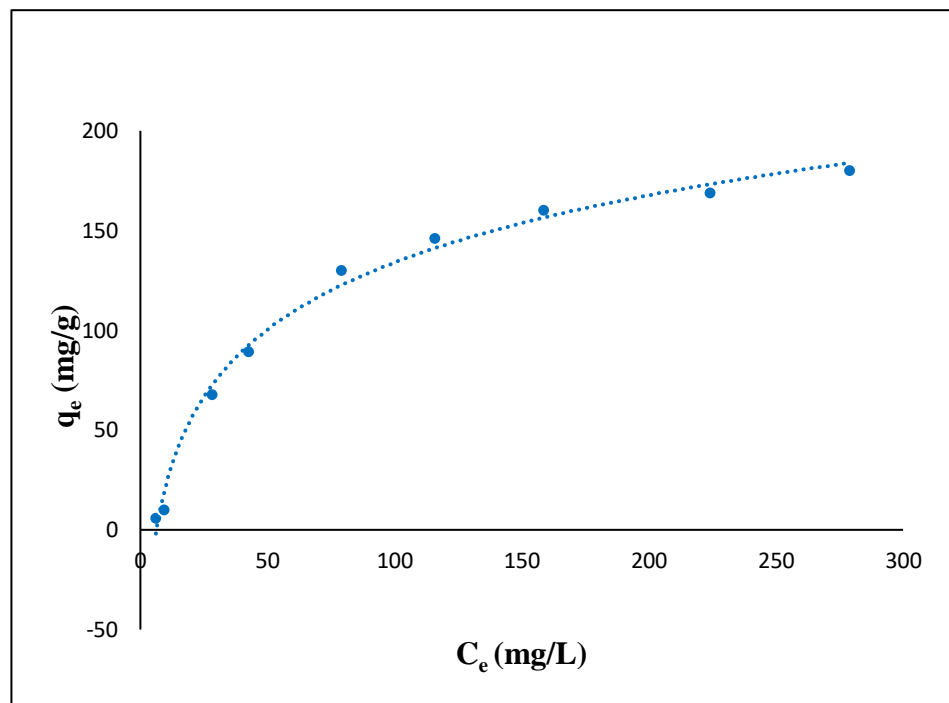


Figure. III. 20 Isotherme d'adsorption de RB5.

Suivants la figure (III.20) On observe que la quantité adsorbée augmente avec l'augmentation de la concentration du polluant jusqu'à atteindre un palier, ce qui indique la saturation des sites de la surface du charbon actif donc formation d'une monocouche, l'isotherme suit le type L pour RB5 suivant la norme de Giles.

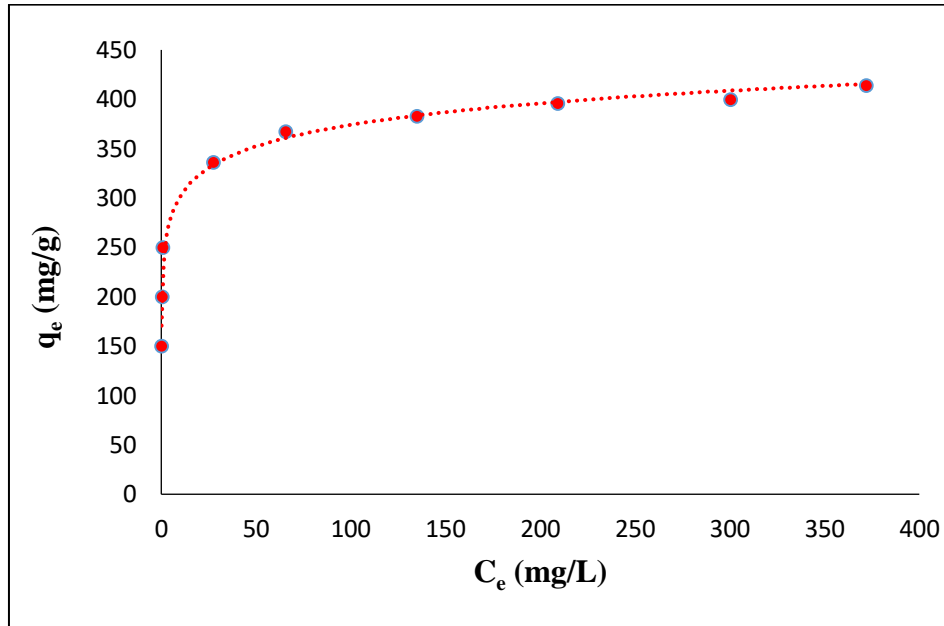


Figure. III. 21 Isotherme d'adsorption de RhB.

D'après la figure (III.21) On observe que la quantité adsorbée augmente avec l'augmentation de la concentration du polluant jusqu'à atteindre un palier, ce qui indique la saturation des sites de la surface du charbon actif donc formation d'une monocouche, l'isotherme suit le type H pour RhB suivant la norme de Giles.

III.9.1 Modélisation des isothermes d'adsorption

Les résultats de modélisation de l'isotherme d'adsorption du RB5 et RhB, selon les modèles de Langmuir, Freundlich, Tamkin, sont présentés dans les figures (III.22-24).

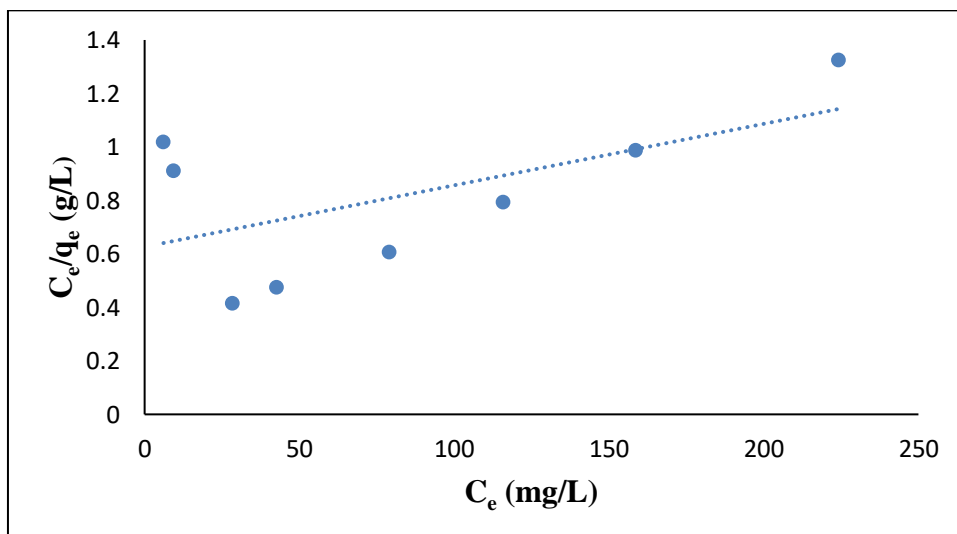


Figure. III. 20 Le modèle de Langmuir linéarisée pour RB5.

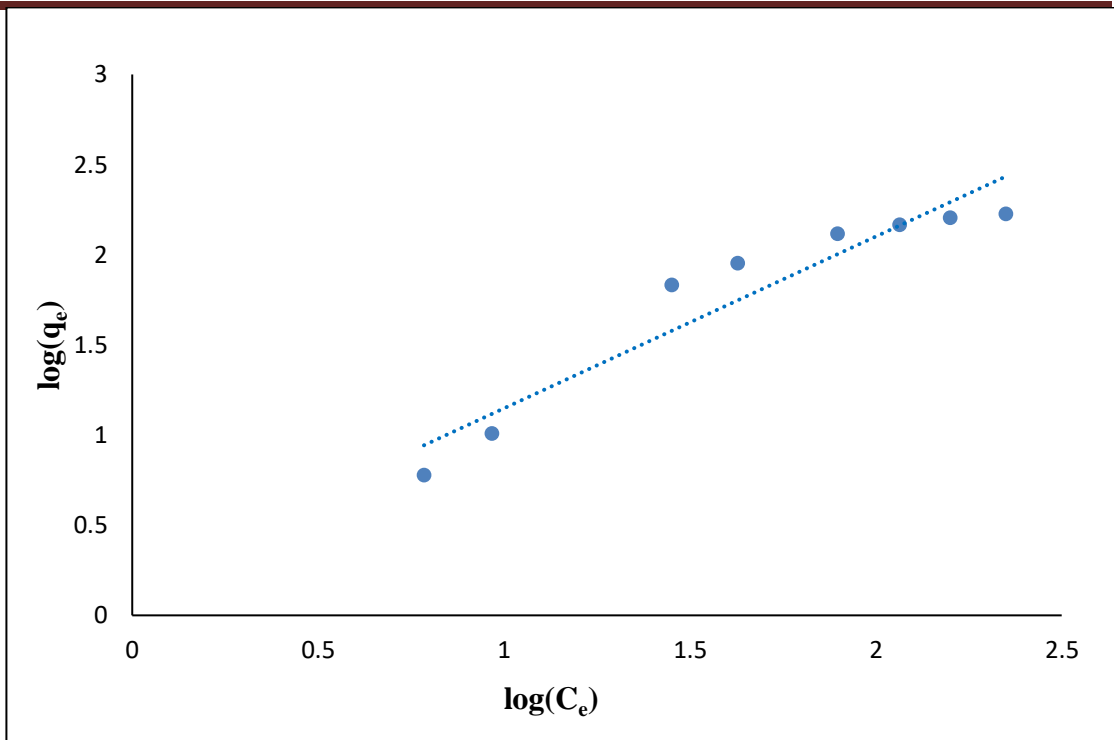


Figure. III. 21 Le modèle de Freundlich linéarisée pour RB5.

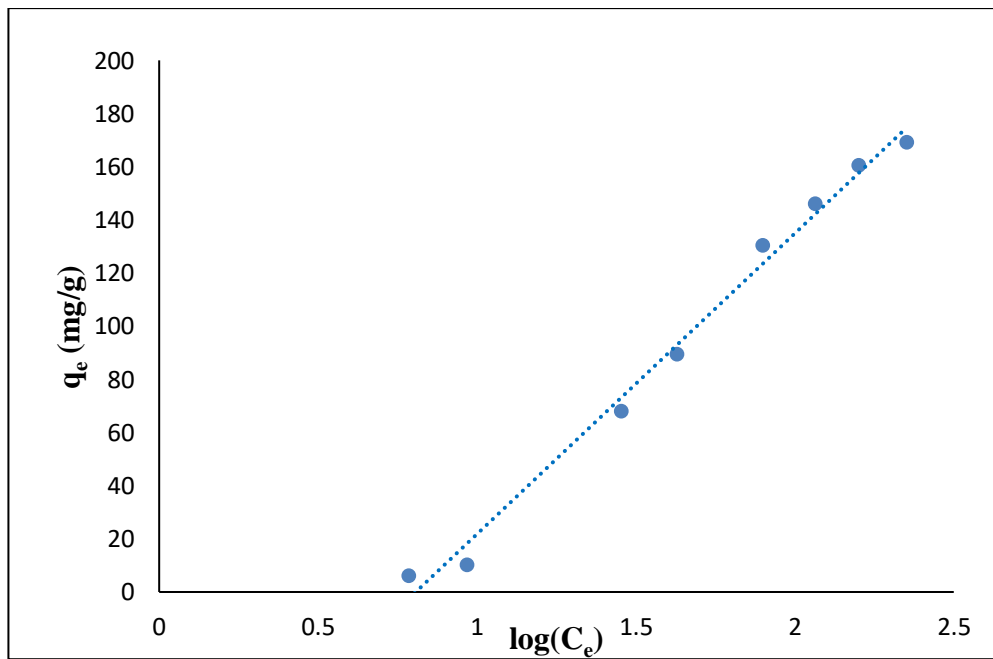


Figure. III. 22 Le modèle de Temkin linéarisée pour RB5.

Tableau. III. 5 Les principaux paramètres de chaque modèle RB5.

Freundlich			Langmuir			Temkin		
n	K _F (L/mg)	R ²	b (mg/g)	K _L (L/mg)	R ²	b _T	K _T	R ²
1,049	1,569	0,9087	180,227	0,003	0,342	21,893	0,156	0,991

- La représentativité d'un modèle théorique vis-à-vis de données expérimentales est basée sur le coefficient de détermination, R².
- On remarque que le modèle de Langmuir ne décrit pas les isothermes expérimentales, car le coefficient de détermination, R² sont faibles.
- Suivant les résultats illustrés sur le tableau (III.5) le modèle de Temkin convient parfaitement à cette adsorption avec une coefficient de détermination R²=0,9907, la constante n de Freundlich supérieur à 1 confirme qu'il y a une grande affinité entre l'adsorbant et l'adsorbat.

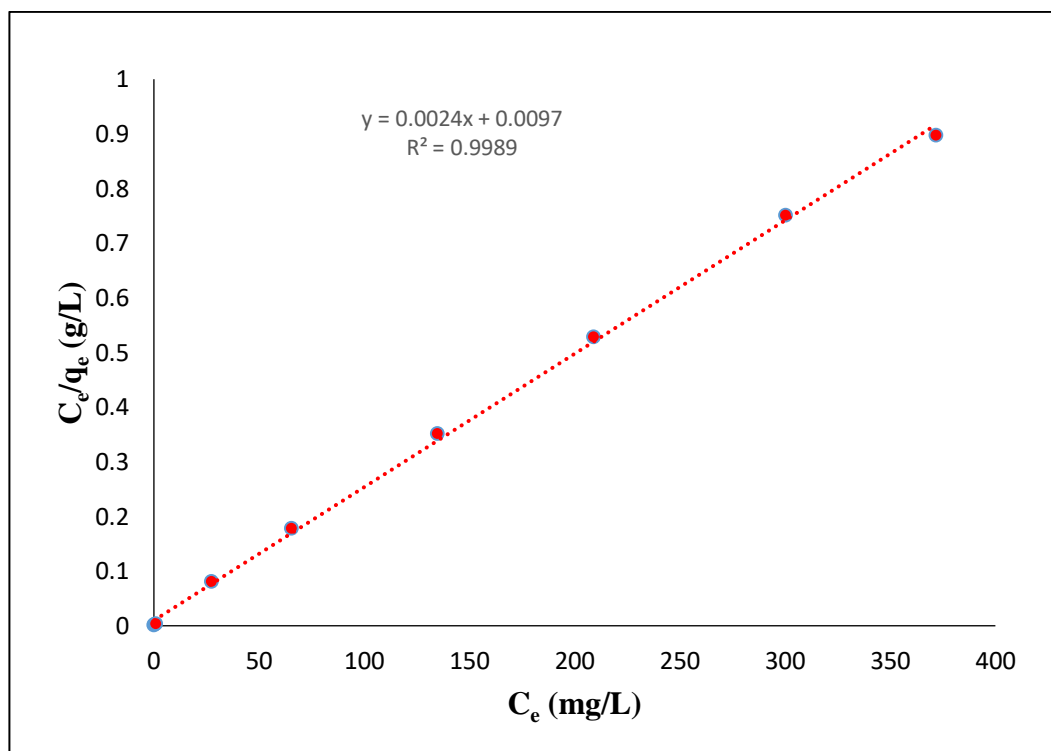


Figure. III. 23 Le modèle de Langmuir linéarisée pour RhB.

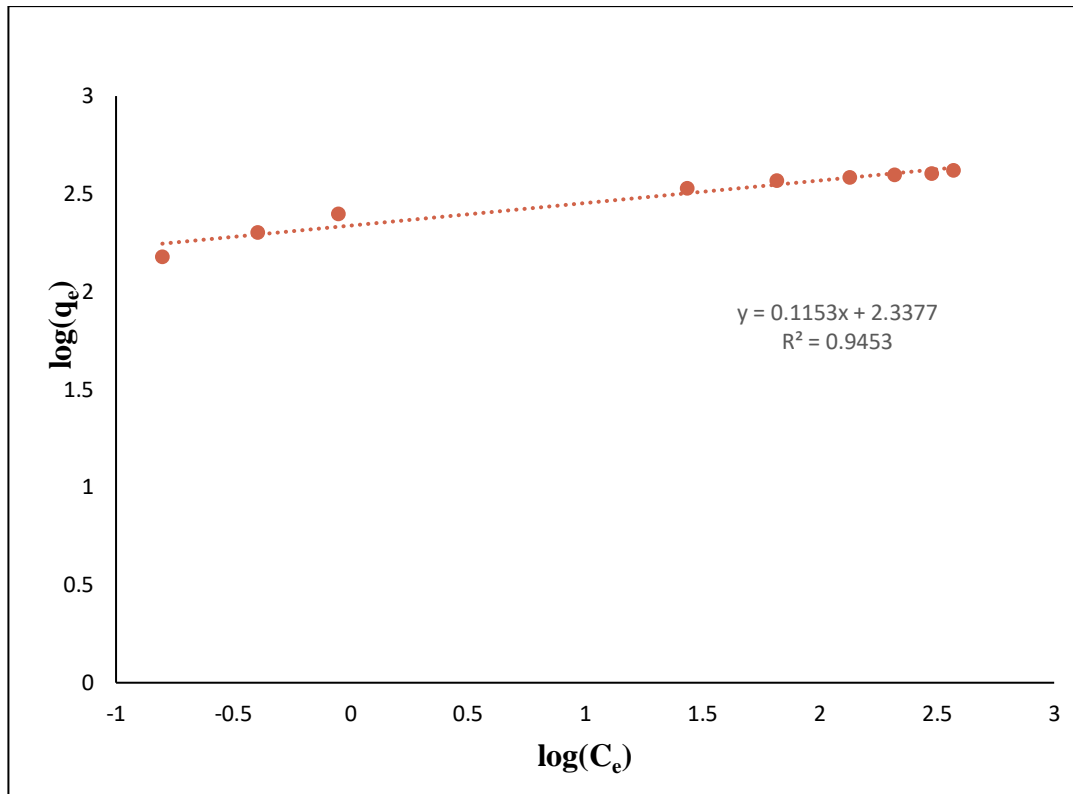


Figure. III. 24 Le modèle de Freundlich linéarisée pour RhB.

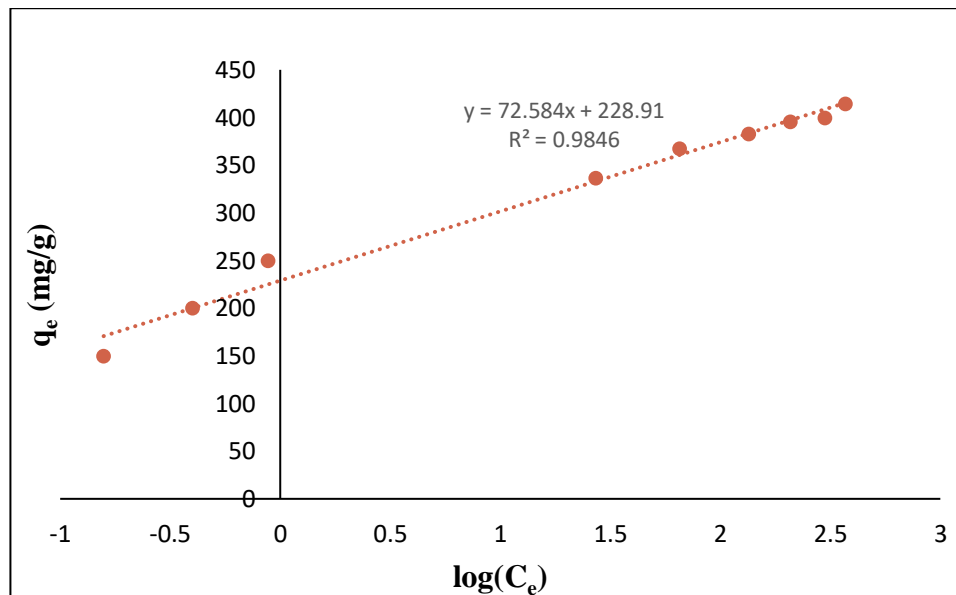


Figure. III. 25 Le modèle de Temkin linéarisée pour RhB.

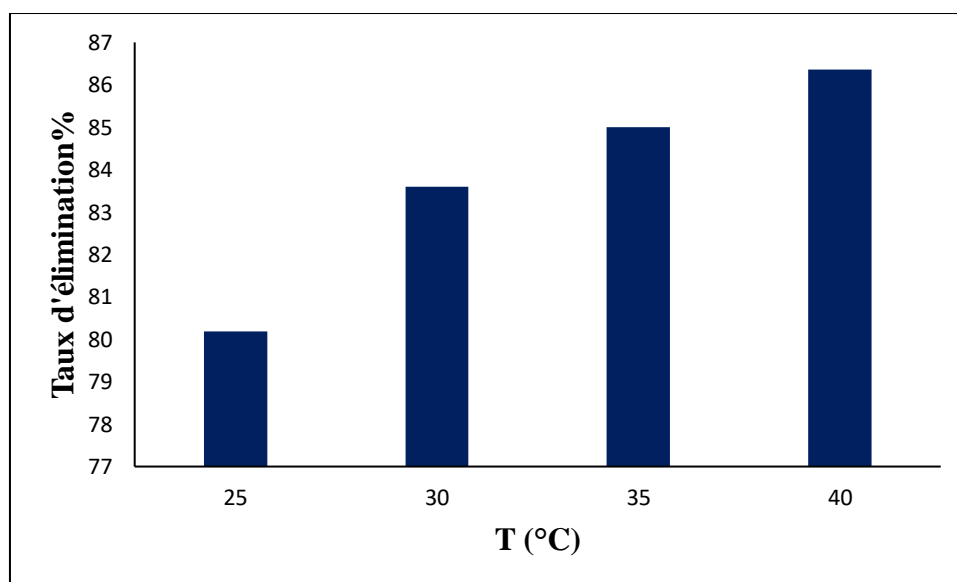
Tableau. III. 6 Les principaux paramètres de chaque modèle RhB.

Freundlich			Langmuir			Temkin		
n	K_F (L/mg)	R^2	b (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	b_T	K_T	R^2
8,673	217,62	0,945	416,66	0,247	0,999	78,558	1424,706	0,985

On observe que l'isotherme d'adsorption est simulée correctement par le modèle linéaire de Langmuir avec un coefficient de détermination de 0.9948 avec une capacité d'adsorption de 414,66 mg/g, la constante n de Freundlich supérieur à 1 confirme qu'il y a une grande affinité entre l'adsorbant et l'adsorbant.

III.10 L'effet de la température

Afin d'étudier l'influence de la température sur l'adsorption du polluant par le charbon actif, dans des flacons on a préparé 4 échantillons de 25 mL de solution de RB5 de concentration égale à 200 mg/L et la dose égale à 4 g/L de l'adsorbant et régler le pH=8, et de solutions de RhB de concentration égale 600 mg/L et la dose 2 g/L de l'adsorbant et le pH de solution égale à 2,2 placés à des températures 25, 30, 35 et 40 °C dans un bain marie muni d'un thermostat permettant de contrôler la température, chaque flacon est agité pendant 2 heures pour RB5 et 1 heure pour RhB, puis centrifuger et analyser par spectrophotométrie UV visible.

**Figure. III. 26** Taux d'élimination du RB5 en fonction de température.

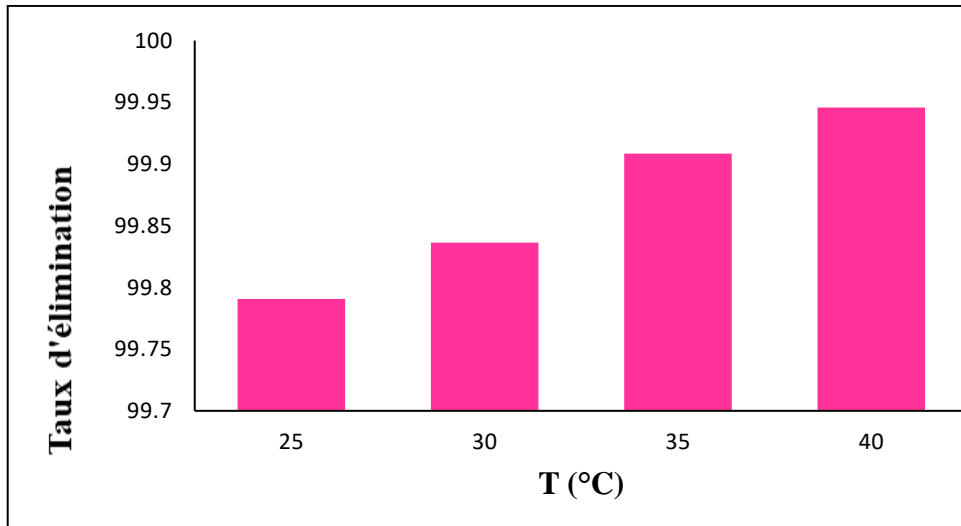


Figure. III. 27 Taux d'élimination du RhB en fonction de température.

Selon les illustrations, on observe que plus la température est élevée plus l'adsorption est meilleure.

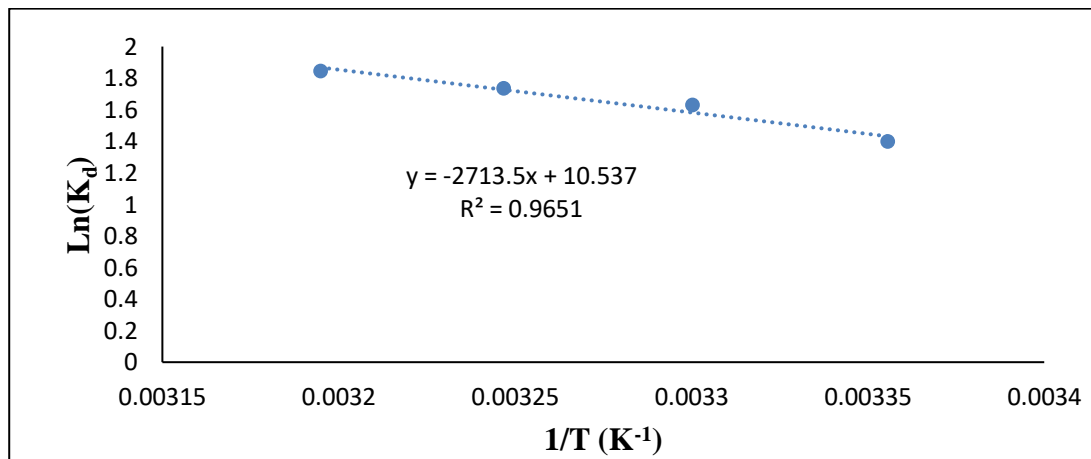


Figure. III. 28 Evolution de Ln (K_d) en fonction de (1/T) pour l'adsorption du RB5.

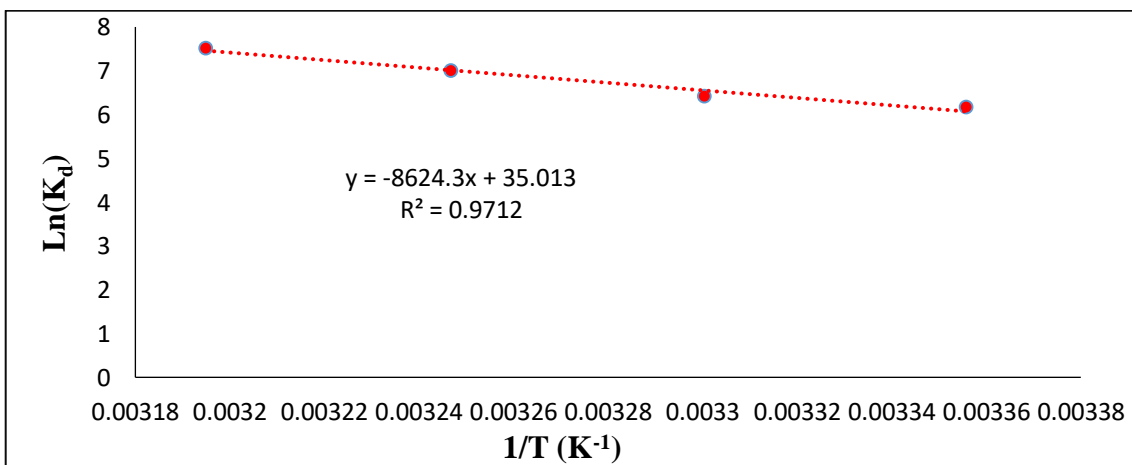


Figure. III. 31 Evolution de Ln (K_d) en fonction de (1/T) pour l'adsorption du RhB.

Tableau. III. 7 Paramètres thermodynamiques d'adsorption.

Colorant	ΔG (kJ/mol)				ΔH (kJ/mol)	ΔS (kJ/mol.K)
	298 K	303 K	308 K	313K		
RhB	-15,271	-16,144	-17,906	-19,551	71,667	0,290
RB5	-3,459	-4,099	-4,438	-4,798	22,549	0,088

D'après le tableau ci-dessus, Les valeur négatifs de l'enthalpie libre ΔG montre que le processus d'adsorption du RB5et RhB est spontané et favorable, Les valeur positive de ΔH indique que l'adsorption est endothermique ce qui signifie que l'adsorption est favorisée par une augmentation de la température, Les valeurs positives de ΔS suggèrent que les molécules adsorbées à l'interface solide-liquide sont moins ordonnées.

Conclusion générale

Conclusion générale

Pour certains pays, la décontamination de l'eau reste un problème majeur qu'il est urgent de traiter écologiquement. De nombreuses recherches se concentrent sur la préparation de certains adsorbants à faible coût à partir de déchets naturels pour une utilisation dans le Traitement de l'eau. L'objectif de ce travail était l'étude de l'élimination du RB5 et du RhB par adsorption sur charbon actif. Il a inclus plusieurs effets variables sur le charbon actif et la substance adsorbée, afin de déterminer les meilleurs résultats et les plus idéaux pour l'adsorption complète et pour la purification de l'eau contaminée en colorants. Les résultats de ces effets sont : Les essais réalisés au cours de notre travail ont eu pour objectif l'application du procédé d'adsorption.

- La masse idéale du charbon actif pour une meilleure adsorption est de 0,1 g pour RB5 et de 0,05 g pour Rh B.
- Le temps de contact pour une absorption le plus complet est de 120 min pour RB5 et 60 min pour RhB.
- L'influence du pH : les résultats étaient meilleurs pour un pH =8 pour RB5 et un pH =2,2 de solution pour RhB.
- Le modèle cinétique pseudo-second ordre représente mieux cette adsorption avec une capacité d'adsorption calculée presque égale à celle expérimentale pour les deux colorants.
- Le modèle Temkin convient parfaitement à cette adsorption avec un coefficient $R^2 = 0,9907$ pour RB5.
- Le modèle de Langmuir représente convenablement le processus de l'adsorption de RhB avec une capacité d'adsorption 416,66 mg/g et un coefficient $R^2 = 0,9989$.
- La constante de Freundlich $n > 1$ prouve qu'il y a une affinité entre l'adsorbant et l'adsorbat.
- Les valeurs des paramètres thermodynamiques (ΔG , ΔH et ΔS) révèlent que la réaction d'adsorption est spontanée et endothermique et moins ordonnée à l'interface solide-liquide.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Bentahar, Y. (2016). Caractérisation physico-chimique des argiles marocaines: application à l'adsorption de l'arsenic et des colorants cationiques en solution aqueuse (Doctoral dissertation, COMUE Université Côte d'Azur (2015-2019); Université Abdelmalek Essaâdi (Tétouan, Maroc)).
- [2] Rana, T, Gupta, S, Kumar, D, Sharma, S, Rana, M, Rathore, VS, Pereira, Ben M.J,(2004), Toxic effects of pulp and paper-mill effluents on male reproductive organs and some systemic parameters in rats, Environ, Toxicol, Pharmacol, 18 (1), 1-7.
- [3] BENKHANNOUCHE. N, LEDJERI. A, Adsorption des métaux lourds sur le minerai de phosphate naturel de kef Es Sennoun (Tébessa) et l'apatite synthétique, Mémoire master, Université Bejaia, (2013).
- [4] Y.J.M. Montgomery, Consulting engineers, INS: Water traitement principales and designs,Ed. J. Wiley & Sons, New York. (1985).
- [5] W.J.Jr.Weber, P.M. Mc Ginley, L.E. Katz, Sorption phenomena in subsurface systems: concepts, models and effects on contaminant fate and transport, Water Res. 25 (1991) 499-528.
- [6] Boulkrah H. Etude comparative de l'adsorption des ions plomb sur différents adsorbants, Mémoire de Magister, l'université du 20 août 1955-Skikda, 2008.
- [7] GALVEZ-CLOUTIER, Rosa, IZE, Sylvaine, et ARSENAULT, Sylvain. Manifestations et moyens de lutte contre l'eutrophication. Vecteur environnement, 2002, vol. 35, no 6, p. 18. GALVEZ-CLOUTIER, Rosa, IZE, Sylvaine, et ARSENAULT, Sylvain. Manifestations et moyens de lutte contre l'eutrophication. Vecteur environnement, 2002, vol. 35, no 6, p. 18.
- [8] DERONZIER, G. et CHOUBERT, J. M. Traitement du phosphore dans les petites stations d'épuration à boues activées. Comparaisons techniques et économiques des voies de traitement biologique et physico-chimique. 2004.
- [9] R. Calvet, M. Terce, J.C. Arvieu, Ann. Agron 31 (1980) 385-427.

Références bibliographiques

- [10] M.A. Ferro-Garcia, J. Rivera-Utrilla, I. Bantista-Teled, A.C. Moreno-Castilla, *Langmuir* 14 (1998) 1880-1886.
- [11] vivadifferences.com/physical-and-chemical-adsorption/.
- [12] Khalfaoui A. Etude Expérimentale de L'élimination de Polluants Organiques et Inorganiques par Adsorption sur des Matériaux Naturels : Application aux Peaux d'Orange et de Banane, Thèse de Doctorat, Université Mentouri -Constantine,2012.
- [13] S. E. CHITOUR, chimie de surfaces, introduction à la catalyse, Edition OPU Alger (1981).
- [14] (School of Chemistry, 1969)
- [15] R. CALVET, le sol, propriété et fonctions, tome I constitution et structure, phénomènes aux interfaces, Editions France Agricole, 2003, P318.
- [16] Brevet APG-RCC : PCT / FR 99 / 00748 du 31 mars 1999.
- [17] A. KOHEIL, Activation d'un précurseur naturel en vue de l'élimination des polluants organiques dans les solutions simples et binaires, Mémoire de Master, Analyse Spectral en Chimie, Université de Mostaganem, 2015.
- [18] Guignard. D (1992). L'essentiel de la cinétique et de la thermodynamique chimique. Edition Eyrolles, Paris.
- [19] Degremont. E.G (1996). Polyamines adsorbées sur silice caractérisation physicochimique : Application au traitement des eaux : Etude préliminaire. Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, France.
- [20] Errais. E (2011). Réactivité de surface d'argiles naturelles Etude de l'adsorption de colorants anioniques. Thèse de doctorat en géochimie de l'environnement, université de Strasbourg. France
- [21] Lagergren. S, et Svenska. B.K (1898). Zurtheorie der sogenannten adsorption gelösterstoffe. *Veternskapsakad Handlingar*, No 24 (4), pp. 1-39
- [22] Gherbi. N (2008). Etude expérimentale et identification du processus de rétention des cations métalliques par des matériaux naturels. Thèse de doctorat en génie des procédés. Université de Constantine. Algérie.

Références bibliographiques

- [23] Ho. Y.S, NgJ. Y et Mckay. G (2000). Kinetics of pollutant sorption by biosorbents. Separation and purification methods, Vol. 29 (2), pp.189-232.
- [24] Ho. Y.S et Mckay. G (2002). Application of Kinetic Models to the Sorption of Copper (II) on to Peat. Adsorption Science & Technology Vol. 20 No. 8, pp. 797-815.
- [25] Ho. Y.S et Mckay. G (1998). Comparison of chemisorption kinetic models applied to pollutant removal on various sorbents. Trans IChemE, Vol 76 (Part B), pp.332-340
- [26] Kumar. P, Sudha. S, Chand. Set Srivastava. V.C (2010). Phosphate removal from aqueous solution using Coir-Pith activated carbon. Separation Science and Technology, N° 45, pp. 1463-1470, doi : 10.1080/01496395.2010.485604
- [27] Weber. W.J et Morris. J.C (1963). Kinetics of adsorption on carbon from solution. J. Sanit. Eng. Div. Am. Soc. Civ. Eng, No89, pp. 31–60.
- [28] Deng. L, et Shi. Z (2015). Synthesis and characterization of a novel Mg–Al hydrotalcite-loaded kaolin clay and its adsorption properties for phosphate in aqueous solution. Journal of Alloys and Compounds, N° 637, pp.188–196, doi: 10.1016/j.jallcom.2015.03.022
- [29] CHITOUR, Chems Eddine. Physico-chimie des surfaces : adsorption gaz-solide et liquide-solide. 2ème Edition. 1992, OPU. Alger.
- [30] SLEJKO, Frank. Adsorption Technology: A step by step approach to process evaluation and application. Marcel Dekker. 1986. 58(6), p 1145-1151.
- [31] G. Limousin, J. P. Gaudet, L. Charlet, S. Szenknect, V. Barthes, M. Krimissa, Sorption isotherms: A review on physical bases, modelling and measurement –Applied Geochemistry, 22, (2007), 249-275.
- [32] Y. ANCER et N. GOUGAM, « Etude de l'adsorption de colorants textiles par un adsorbant d'origine minérale », mémoire de master Ecole Nationale Polytechnique, 2016.
- [33] N. Naib, Etude du procédé d'adsorption du phénol sur du charbon actif à base de grignon d'olive, modélisation par les plans d'expérience, Boumerdes : Mémoire de Magister, Université M'Hammed Bougara, 2006.
- [34] BOUALLA.N, et BENZIANE.A, « Étude expérimentale sur l'élimination des nitrates par adsorption sur des argiles activées et non activées de la sebka d'Oran » Afrique science 07(2)

Références bibliographiques

(2011), 56 – 73.

- [35] Freundlich H.M.F. (1926). Colloid and Capillary Chemistry, Methuen, London, UK
- [36] M. DJAB, Modification de la bentonite par des sels de Bis imidazolium - Application à l'adsorption d'un colorant textile (Orange Téton) -. 2012.
- [37] M.I.Temkin., V.Pyzhev; Kinetics of ammonia synthesis on promoted iron catalysts; Acta Physicochim, URSS:12 (1940), 327–356.
- [38] N. Kania, A. Ponchel et E. Monflier, 2011 « La catalyse organométallique en phase aqueuse assistée par des charbons actifs », Techniques de L'ingénieur, en 142
- [39] P. Mouchet, 2000 « Traitement des eaux avant utilisation. Substances dissoutes », technique de l'ingénieur, g 1171
- [40] A.A. Ahmad, A. Idris, 2013 « Preparation and characterization of activated carbons derived from bio-solid: a review » Desalination and Water Treatment, 1-15
- [41] Z. Heidarinejad, M.H. Dehghani, M. Heidari, G. Javedan, I. Ali, M.Sillanpää, Methods for preparation and activation of activated carbon: a review, Environmental Chemistry Letters, (2020) 1-23.
- [42] A. Gherbia, A. Chergui, A. Yeddou, S. Selatnia Ammar, N. Boubekeur, Removal of methylene blue using activated carbon prepared from date stones activated with NaOH, Global NEST Journal, 21 (2019) 374-380.
- [43] S.F. Lütke, A.V. Igansi, L. Pegoraro, G.L. Dotto, L.A. Pinto, T.R. Cadaval Jr, Preparation of activated carbon from black wattle bark waste and its application for phenol adsorption, Journal of Environmental Chemical Engineering, 7 (2019) 103396.
- [44] O. Olafadehan, K. Abhulimen, A. Adeleke, C. Njoku, K. Amoo, Production and characterization of derived composite biosorbents from animal bone, African Journal of Pure and Applied Chemistry, 13 (2019) 12-26.
- [45] A.A. Tunde, Adsorption of ciprofloxacin HCl from aqueous solution using activated kaolin, World Scientific News, 145 (2020) 62-73.
- [46] L.A. Amola, T. Kamgaing, D.R.T. Tchuifon, C.D. Atemkeng, S.G. Anagho, Activated Carbons Based on Shea Nut Shells (*Vitellaria paradoxa*): Optimization of Preparation by Chemical Means Using Response Surface Methodology

Références bibliographiques

- and Physicochemical Characterization, Journal of Materials Science and Chemical Engineering, 8 (2020) 53-72.
- [47] A. Valério Filho, R. Xavaré Kulman, L. Vaz Tholozan, A.R. Felkl de Almeida, G. Silveira da Rosa, Preparation and Characterization of Activated Carbon Obtained from Water Treatment Plant Sludge for Removal of Cationic Dye from Wastewater, Processes, 8 (2020) 1549.
- [48] Yahiaoui, Nouara. "étude de l'adsorption des composés phénoliques des margines d'olive sur carbonate de calcium, hydroxyapatite et charbon actif." Thèse de magister en chimie de l'Environnement. Université mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, (2012)., 35, 37, 38, 45.
- [49] Z. MEKIBES, Fixation de polluants émergents par des supports ligno-cellulosiques, Université de Mostaganem, Algérie, 2021.
- [50] R. Calvet, M. Terce, J.C. Arvieu, Ann. Agron p. 31, 385-427, (1980).
- [51] M.M. Tang and Roger Bacon. Carbon 2 (1964) 211-20.
- [52] Conférence « Traitement de potabilisation des eaux de surface : adsorption sur charbon actif », Eau de Paris, 2006.
- [53] LU Jinyan, (Etude comparative sur les charbons actifs), Synthèse technique, Office international de l'eau-SNIDE, Février 2005.
- [54] N. BOUZIANE, (ELIMINATION DU 2-MERCAPTOBENZOTHIAZOLE PAR VOIE PHOTOCHEMIQUE ET PAR ADSORPTION SUR LA BENTONITE ET LE CHARBON ACTIF EN POUDRE), Magister en chimie, Université Mentouri de Constantine, 30/5/2007
- [55] H. HALIMA, « Traitement et gestion des eaux au niveau de l'entreprise SEOR, Station de Sidi Lahdjel », mémoire de master Pétrochimie, université des sciences et technologies de mostaganem, (2022/2023)

Références bibliographiques
