



Department of Process Engineering

Ref :...../U.M/F.S.T/2026

قسم هندسة الطرائق

رقم :..... / ج.م.ك.ع.ت//2026

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : **GÉNIE DES PROCÉDÉS**

Option : **GÉNIE CHIMIQUE**

THÈME

**Etude du procédé d'adsorption de l'acide Rouge 14 sur un
charbon actif dopé par un oxyde métallique**

Présenté par

GUENNOUNA Imane

Soutenu le 15 /06 / 2026 devant le jury composé de :

Présidente :	MEKIBES Zohra	MCB	Université de Mostaganem
Examinatrice :	MAHREZ Nouria	MCA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	BENZEKRI BENALLOU Mokhtar	MCA	Université de Mostaganem
Co-Encadrante	KHALILI Khadija	Doctorante	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2025/2026

Remerciements

Tout d'abord, on tient à remercier le bon Dieu Tout-Puissant pour toutes ses bénédictions dont ce travail fait partie.

On tient à exprimer notre profonde gratitude et reconnaissance envers notre encadrant monsieur **M. BENZEKRI BENALLOU**, pour son accompagnement précieux, ses conseils avisés ainsi que son soutien tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous adressons également nos remerciements à notre Co-encadrante, mademoiselle **K. KHALILI**, pour son aide, sa disponibilité et ses encouragements continus.

Nos remerciements s'adressent aussi à madame **Z. MEKIBES**, présidente du jury, pour l'honneur qu'elle nous fait en acceptant de présider ce mémoire.

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

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

Enfin, nous exprimons notre gratitude à toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail, fruit de plusieurs années d'efforts et de persévérance,

À mes très chers parents, aucun mot ne saurait exprimer ma profonde gratitude pour leur amour, leurs sacrifices, leurs encouragements et leurs prières qui m'ont toujours accompagnée tout au long de mon parcours.

À mes frères et sœurs, pour leur soutien, leur affection et tous les beaux moments partagés ensemble.

À mes amies, qui ont été une source de motivation, de joie et de soutien durant cette période.

À mon encadrant, pour ses précieux conseils, sa patience et son accompagnement durant la réalisation de ce mémoire.

À mes enseignants, qui ont contribué à ma formation et m'ont transmis leur savoir avec dévouement.

À mes collègues, avec qui j'ai partagé les efforts, les difficultés et les souvenirs de ce parcours universitaire.

Enfin, à toutes les personnes qui m'ont aidée et soutenue de près ou de loin dans l'accomplissement de ce travail.

Résumé

L'utilisation croissante des colorants synthétiques dans plusieurs secteurs entraîne des risques pour la santé et l'environnement. Face à ces enjeux, le développement de méthodes de dépollution écologiques devient essentiel. Les traitements classiques étant parfois inefficaces pour éliminer certains micropolluants comme les colorants, des procédés complémentaires tels que l'adsorption, l'oxydation avancée sont mis en œuvre. Parmi eux, l'adsorption sur charbon actif se distingue par sa simplicité, son efficacité et son coût relativement abordable.

L'objectif de cette étude expérimentale est d'analyser le comportement thermodynamique et cinétique de l'adsorption du colorant azoïque Rouge Acide 14 à la surface d'un charbon actif préparé. Pour cette étude, les conditions optimales de chaque paramètre ont été déterminées et appliquées au processus d'adsorption. Les paramètres étudiés sont la concentration initiale du colorant, le pH de la solution, la température, le temps de contact ainsi que la masse de l'adsorbant. L'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'efficacité d'un charbon actif préparé pour la dépollution d'une eau contaminée par des colorants.

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

المخلص

يؤدي الاستخدام المتزايد للأصباغ الاصطناعية في العديد من القطاعات إلى مخاطر على الصحة والبيئة. وفي مواجهة هذه التحديات، يصبح تطوير طرق لإزالة التلوث للبيئة أمراً ضرورياً. ونظراً لأن المعالجات التقليدية تكون أحياناً غير فعالة في إزالة بعض الملوثات الدقيقة مثل الأصباغ، يتم استخدام عمليات كيميائية مثل الامتزاز والأكسدة المتقدمة. ومن بينها، يتميز الامتزاز على الفحم النشط بالبساطة والفعالية والتكلفة المعقولة نسبياً.

أنجزت هذه الدراسة التجريبية بهدف دراسة الديناميكا الحرارية وحركية الامتزاز لصبغات الأزويك (الأحمر الحمضي 14) على الفحم النشط المُعد. وقد اخترنا القيم المثالية لكل خاصية وقمنا بتطبيقها على هذه العملية. المعلومات التي تمت دراستها هي التركيز الأولي، ودرجة الحموضة (pH)، ودرجة الحرارة، ووقت التلامس، وكتلة المادة الماصة. الهدف الرئيسي من عملنا هو دراسة إزالة التلوث بواسطة الفحم النشط المُعد من المياه الملوثة بالأصباغ.

الكلمات المفتاحية: الامتزاز، إزالة التلوث، الفحم النشط، الأحمر الحمضي 14.

Abstract

The growing use of synthetic dyes in various sectors poses risks to human health and the environment. In light of these challenges, the development of environmentally decontamination methods has become essential. Since conventional treatments are sometimes ineffective at removing certain micro pollutants such as dyes, complementary processes such as adsorption and advanced oxidation are being implemented. Among these, adsorption on activated carbon stands out for its simplicity, effectiveness, and relatively low cost.

This experimental study was carried out to investigate the thermodynamic and kinetic aspects of the adsorption of an azo dye, Acid Red 14, onto prepared activated carbon. The optimal values of the operating parameters were determined and applied throughout the adsorption process. The parameters examined included the initial dye concentration, solution pH, temperature, contact time, and adsorbent dosage. The main objective of this work was to evaluate the efficiency of the prepared activated carbon in removing dyes from contaminated water and to assess its potential for wastewater treatment applications.

Keywords: Adsorption, removal, Activated carbon, Acid Red 14.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

PARTIE1 : LES COLORANTS

I.1.1. Généralité	3
I.1.2. Définition des colorants	3
I.1.3. Application des colorants.....	4
I.1.4.Toxicité et impact environnmental	4
I.1.5. Procédé de traitement.....	4
I.1.5.1. Chimique	5
I.1.5.2. Biologique	5
I.1.5.3. Physique.....	5

PARTIE 2 : ADSORPTION

I.2.1. Généralités	6
I.2.2. Définition	6
I.2.3. Les types d'adsorption	6
I.2.3.1. Adsorption physique (ou physisorption).....	6
I.2.3.2. Adsorption chimique (ou chimisorption).....	7
I.2.4. Mécanisme d'adsorption.....	7
I.2.5. Les facteurs influencent sur l'adsorption.....	8
I.2.6. Modèles d'isothermes d'adsorption	9
I.2.6.1. Modèle de Langmuir	9
I.2.6.2. Modèle de Freundlich	10
I.2.6.3. Modèle de Temkin	10
I.2.7. Cinétique d'adsorption.....	11
I.2.7.1. Modèle du pseudo premier ordre (modèle de Lagergren).....	11
I.2.7.2. Modèle du pseudo-deuxième ordre.....	11
I.2.7.3. Modèle de diffusion intra-particules	12

PARTIE 3: CHARBON ACTIF

I.3.1. Généralités	13
I.3.2. Définition de charbon actif	13
I.3.3. Les Différents formes du charbon actif	13
I.3.3.1. Charbon actif en poudre (CAP).....	13
I.3.3.2. Charbon actif en grain(CAG).....	14
I.3.3.3. Charbon actif extrudé (CAE)	14
I.3.4. Utilisation du charbon actif.....	15

CHAPITRE II PARTIE EXPERIMENTAL

II.1. Généralité)	16
II.2. Le colorant étudié (Rouge acide 14).....	16
II.2.1. Définition	16
II.2.2. Propriétés physico-chimiques.....	17
II.2.3. Domaines d'utilisation de Rouge acide 14 dans différents secteur	17
II.2.4. Toxicité	18
II.3. Méthode de dosage Rouge Acide 14	18
II.3.1. Dosage par spectrophotométrie	18
II.4. Application à l'adsorption de Rouge Acide 14	20
II.4.1. Détermination de la courbe d'étalonnage	20
II.5. L'effet de la dose de l'adsorbant sur l'adsorption	22
II.6. L'effet de pH sur l'adsorption de Rouge Acide 14	23
II.7. Détermination du temps d'équilibre	24
II.8. Isotherme d'adsorption de Rouge Acide 14	25
II.8.1. Les modèles d'isothermes d'adsorption.....	26
II.9. Thermodynamique d'adsorption de Rouge Acide 14.....	28
II. 9.1. PARAMETRES THERMODYNAMIQUES D'ADSORPTION DE ROUGE ACIDE 14.....	29
II.10. Etudes de cinétique d'adsorption de Rouge Acide 14.....	32
II.10.1. Modèle de pseudo 1 ^{er} ordre	32
II.10.2. Modèle de pseudo 2 ^{ème} ordre	32
II.10.3. Modèle de diffusion intra-particulaire	34
Conclusion générale	36
Bibliographie.....	37

Liste des figures

Figure I.1 Les colorants naturels et synthétiques	3
Figure I.2 Adsorption physique.....	7
Figure I.3 Adsorption chimique	7
Figure I.4 Schéma de mécanisme d'adsorption	8
Figure I.5 La structure de charbon actif.....	13
Figure I.6 Charbon actif en poudre	14
Figure I.7 Charbon actif granulé	14
Figure I.8 Charbon actif extrudé	14
Figure II.1 Rouge acide 14.....	16
Figure II.2 Spectrophotomètre UV-Visible	19
Figure II.3 Principe d'adsorption de la lumière monochromatique par un corps absorbant ...	19
Figure II.4 La courbe d'étalonnage de Rouge Avide 14	21
Figure II.5 Taux d'élimination de Rouge Acide 14 en fonction de la dose d'adsorbant	22
Figure II.6 Taux d'élimination de Rouge Acide en fonction de pH.....	23
Figure II.7 Taux d'élimination de Rouge Acide 14 en fonction du temps.....	24
Figure II.8 L'isotherme d'adsorption de Rouge Acide 14	25
Figure II.9 L'isotherme de Rouge Acide 14 pour le modèle de Langmuir	26
Figure II.10 L'isotherme d'adsorption de Rouge Acide 14 pour le modèle de Freundlich	27
Figure II.11 L'isotherme d'adsorption de Rouge Acide 14 pour le modèle de Temkin.....	27
Figure II.12 Taux d'élimination de Rouge Acide 14 à différentes températures	30
Figure II.13 Évolution de $\ln(K_d)$ en fonction de $(1/T)$ pour l'adsorption de Rouge Acide 14 par l'adsorbant	31
Figure II.14 Cinétique d'adsorption de Rouge Acide 14 de pseudo 1 ^{er} ordre.....	32
Figure II.15 Cinétique d'adsorption de Rouge Acide 14 de pseudo 2 ^{ème} ordre	33
Figure II.16 Cinétique d'adsorption de Rouge Acide 14 de diffusion Intra-particulaire	34

Liste des tableaux

Tableau II.1: Propriétés physico-chimique de Rouge Acide 14 -----	17
Tableau II.2: Élaboration de la courbe d'étalonnage pour la Rouge Acide 14 -----	21
Tableau II.3: Résultats d'isotherme d'adsorption de Rouge Acide 14 pour les trois modèles -----	28
Tableau II.4: Paramètres thermodynamique d'adsorption de Rouge Acide 14 -----	31
Tableau II.5: Résultats obtenue de la cinétique d'adsorption de Rouge Acide 14 de pseudo 1 ^{er} ordre et 2 ^{ème} ordre -----	33
Tableau II.6: Résultats obtenue de la cinétique d'adsorption de Rouge Acide 14 de diffusion Intra- particulaire -----	34

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

L'eau est un élément essentiel dont l'importance à l'échelle mondiale est constamment soulignée. Les activités industrielles et agricoles qui polluent sont un enjeu majeur de nos sociétés développées [1].

L'expansion massive des activités industrielles visant à subvenir aux besoins de notre société s'accompagne inévitablement d'une hausse significative des émissions polluantes [2]. La situation s'avère encore plus grave pour les rejets industriels qui possèdent un caractère beaucoup plus toxique. Les teintures et produits auxiliaires utilisés par le secteur textile peuvent représenter un danger sérieux pour l'environnement, car leur présence dans l'eau, même à des concentrations très faibles, est fortement visible et non désirée ; ainsi, leur introduction dans les écosystèmes aquatiques obstrue la lumière et ralentit donc la photosynthèse. Ils ont aussi tendance à complexer les ions métalliques en générant une micro-toxicité pour la faune et d'autres organismes [3].

À l'heure actuelle, les rejets provenant du secteur textile contiennent une forte concentration de colorants. Ces colorants sont fréquemment utilisés en grande quantité pour optimiser la coloration ; par conséquent, les eaux usées sont fortement chargées en colorants dont la biodégradabilité limitée complique l'application des traitements biologiques, ce qui représente un facteur de détérioration pour l'environnement.

Plusieurs méthodes sont à disposition pour la suppression des colorants par les techniques de traitement traditionnel, comme l'oxydation biologique et chimique, la coagulation et l'adsorption. Cependant, leur efficacité individuelle est limitée. L'adsorption est généralement considérée comme l'approche la plus prometteuse et performante, grâce à son faible coût initial, sa conception simple, sa facilité d'emploi, son indifférence face aux matières toxiques et sa faculté à supprimer les contaminants même dans des solutions diluées [4].

Plusieurs études ont examiné la suppression des colorants dans les liquides aqueux en employant différents matériaux solides, dont le charbon actif. L'adsorption de molécules organiques, telles que les teintures, par le charbon actif a prouvé son efficacité en tant que technique de traitement [5].

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'élimination d'un colorant textile, le Rouge Acide 14, par adsorption sur un charbon actif préparé.

INTRODUCTION GENERALE

Ce manuscrit est structuré en deux chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique portant sur les colorants, le phénomène d'adsorption et les caractéristiques du charbon actif. Il présente les notions fondamentales nécessaires à la compréhension de cette étude.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des protocoles expérimentaux mis en œuvre pour étudier l'adsorption du Rouge Acide 14 sur un charbon actif préparé. L'étude paramétrique réalisée a permis d'évaluer l'influence de plusieurs facteurs opératoires sur la capacité d'adsorption, notamment le temps de contact, la dose d'adsorbant, le pH de la solution et la température. Ce chapitre comprend également l'analyse de la cinétique et de la thermodynamique du processus d'adsorption, ainsi que l'étude des isothermes d'adsorption à travers les modèles de Langmuir, Freundlich et Temkin.
- Enfin, le manuscrit se termine par une conclusion générale.

CHAPITRE I

ETUDE

BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Les colorants

I.1.1. Généralités

Nous habitons un univers où tout est teinté, ces teintures sont de plus en plus synthétiques, grâce à leur production aisée et rapide ainsi qu'à leur vaste gamme de couleurs, comparée aux colorants naturels. Ces colorants sont tous des composés aromatiques capables d'absorber la lumière pour certaines longueurs d'onde grâce à leurs électrons délocalisés [6]. Cependant, sont à l'origine de la pollution une fois évacués dans l'environnement. La production mondiale des colorants est estimée à plus de 80000 t.an⁻¹ et les colorants azoïques sont majoritaires et représentent (60-70 %) [7].

Dans notre étude, nous avons choisi un colorant (Rouge acide 14) comme modèle représentatif des polluants organiques.

I.1.2. Définition des colorants

Les colorants sont des composés chimiques dotés de couleur, qu'ils soient d'origine naturelle ou synthétique, et ils sont généralement de nature organique. Ils ont la capacité de teindre de manière permanente le support sur lequel ils sont appliqués dans certaines circonstances. On se sert de ces composés pour teindre les textiles, les encres, les peintures, les vernis, ainsi que certains produits alimentaires, entre autres [8].

Ces substances se distinguent par leur aptitude à absorber la lumière dans la zone du spectre visible (entre 380 et 750 nm). Elles varient selon leur structure chimique, qu'elle soit organique ou inorganique [9, 10].



Figure I.1 Les colorants naturels et synthétiques

I.1.3. Application des colorants

Les colorants sont utilisés dans une large gamme d'application, notamment :

- ✓ **Textiles** : La teinture des vêtements est l'une des applications les plus importantes des colorants. Les colorants sont utilisés pour donner aux vêtements une variété de couleurs et de motifs.
- ✓ **Aliments** : Les colorants sont utilisés pour ajouter de la couleur aux aliments et aux boissons. Cela peut rendre les aliments plus appétissants et les rendre plus attrayants pour les consommateurs.
- ✓ **Cosmétiques** : Les colorants sont utilisés pour colorer le maquillage, les produits de soin de la peau et les produits capillaires. Cela peut aider à améliorer l'apparence des gens et à leur donner un regain de confiance.
- ✓ **Matériaux de construction** : Les colorants sont utilisés pour colorer le béton, le plastique et d'autres matériaux de construction. Cela peut donner aux bâtiments et aux structures une apparence plus esthétique et les rendre plus résistants aux intempéries.
- ✓ **Arts et loisirs** : Les colorants sont utilisés dans une variété d'activités artistiques, tels que la peinture, le dessin et la sculpture. Ils permettent aux artistes de créer des œuvres d'art vibrantes et expressives [11].

I.1.4. Toxicité et impact environnemental

Les effluents issus des industries textiles, riches en colorants, rejetés dans les rivières, peuvent causer des dommages importants aux espèces animales, végétales ainsi qu'aux microorganismes aquatiques. Leur toxicité entraîne notamment une diminution de l'oxygène dissous dans ces milieux. En raison de leur persistance, ces substances perturbent durablement les mécanismes naturels, affectant la flore (altération du pouvoir d'autoépuration des cours d'eau, inhibition de la croissance des végétaux aquatiques) et la faune (disparition de certaines espèces de poissons et de microorganismes). Ainsi, le traitement des effluents colorés apparaît indispensable pour la préservation de l'environnement [12].

I.1.5. Procédé de traitement

Le traitement des rejets textiles, en raison de leur composition très hétérogène, nécessite la mise en place d'une chaîne de traitement structurée permettant l'élimination progressive des différents polluants à travers plusieurs étapes successives. Dans un premier temps, les impuretés insolubles sont éliminées grâce à des opérations de prétraitement telles que le dégrillage, le

dessablage et le déshuilage. Ensuite, des traitements physico-chimiques sont appliqués afin d'assurer la séparation solide-liquide. De manière générale, les techniques de dépollution se classent en trois catégories : biologiques, chimique et physiques [13].

I.1.5.1. Chimique

- ✓ Oxydation (oxygène, ozone, oxydants tels que NaOCl, H₂O₂)
- ✓ Réduction (Na₂SO₄)
- ✓ Méthode complexométrique
- ✓ Résine échangeuse d'ions

I.1.5.2. Biologique

- ✓ Traitement aérobie
- ✓ Traitement anaérobie

I.1.5.3. Physique

- ✓ Méthodes de précipitation (coagulation, floculation, sédimentation)
- ✓ Adsorption (sur charbon actif)
- ✓ Osmose inverse
- ✓ Filtration
- ✓ Incinération

I.2.1. Adsorption

I.2.1. Généralités

Au fil des dernières années, de nombreuses méthodes d'élimination des polluants colorés dans les effluents ont été mises au point. Parmi ces méthodes, celle qui est la plus bénéfique est le processus d'adsorption. La première proposition du terme « adsorption » remonte au début du XX^e siècle, plus précisément en 1881, par le physicien allemand Heinrich Kayser [14, 15]. L'adsorption est perçue comme l'une des technologies de séparation les plus cruciales, car elle opère sur le principe de la séparation et de la purification des gaz et liquides. Cette séparation est causée par l'attraction exercée sur un matériau poreux. Ainsi, l'adsorption est un phénomène de surface au cours duquel des molécules se fixent à la surface de l'adsorbant [16].

I.2.2. Définition

L'adsorption est un processus physico-chimique qui se manifeste par une variation de concentration à l'interface entre un liquide ou un gaz et une substance solide. On peut définir l'adsorption sur un solide comme le processus de concentration des molécules de solutés d'une phase liquide sur une surface solide (comprenant la surface externe et la surface interne des pores). On désigne le solide par le terme d'adsorbant, tandis que l'on appelle adsorbat le composé sous forme liquide qui subit l'adsorption [17].

I.2.3. Les types d'adsorption

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

I.2.3.1. Adsorption physique (ou physisorption)

La physisorption, ou adsorption physique, est un mécanisme fondé sur des interactions physiques de faible intensité entre les molécules, comme les forces de van der Waals ou les interactions électrostatiques de polarisation. Généralement, ce genre d'adsorption est non spécifique, réversible, rapide et souvent restreint par la diffusion des espèces. Dans le cas de l'adsorption physique, les interactions sont généralement faibles, avec une énergie d'adsorption qui se situe entre 5 et 40 kJ/mol. Ce processus est facilité à basse température et peut avoir lieu en mono- ou multicouche [18].

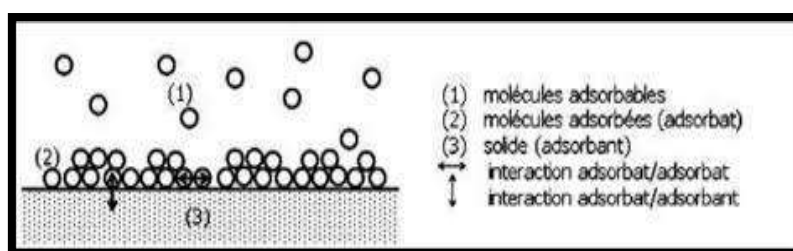


Figure I.2 Adsorption physique

I.2.3.2. Adsorption chimique (ou chimisorption)

En réalité, la chimisorption s'apparente davantage à une réaction chimique. Dans ce cas, le processus résulte d'une interaction chimique entre les molécules d'adsorbant composant la surface du solide et les molécules de soluté avec formation de liens chimiques entre les molécules d'adsorbât et la surface d'adsorbant [19]. Ce genre d'adsorption se produit à des températures élevées et implique une énergie d'interaction considérable, variant entre 40 kJ/mole et 200 kJ/mole [20, 21].

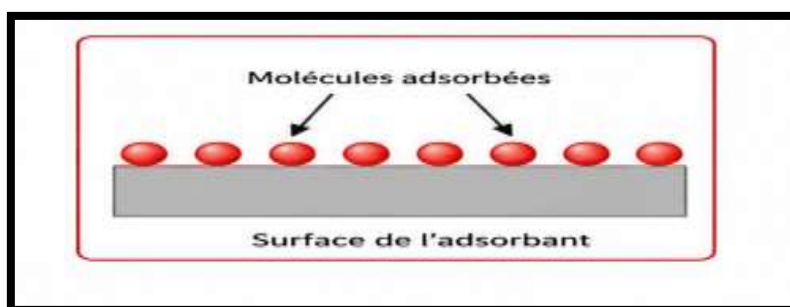


Figure I.3 Adsorption chimique

I.2.4. Mécanisme d'adsorption

Le mécanisme d'adsorption peut être décomposé en plusieurs étapes :

- **La 1^{ère} étape (la diffusion externe) :** correspond au transfert du soluté (un colorant) du sein de la solution à la surface externe des grains. Le transfert de la matière externe dépend des conditions hydrodynamiques de l'écoulement d'un fluide dans un lit adsorbant.
- **La 2^{ème} étape (la diffusion interne) :** les particules de fluide pénètrent à l'intérieur des pores. Elle dépend de gradient de concentration du soluté.
- **La 3^{ème} étape (diffusion de surface) :** elle correspond à la fixation des molécules sur la surface des pores [22].

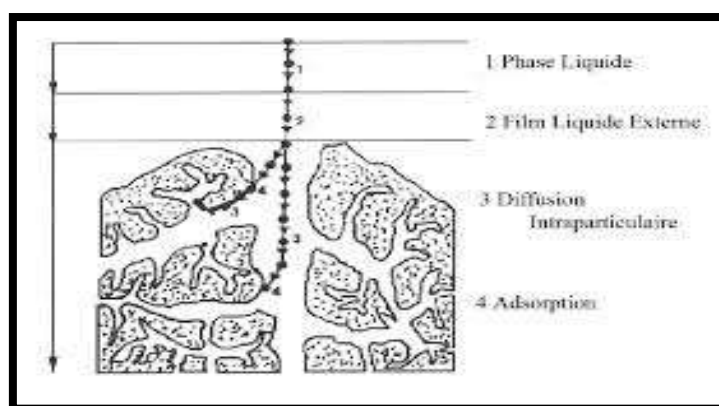


Figure I.4 Schéma de mécanisme d'adsorption

I.2.5. Les facteurs influencent l'adsorption

- **Surface spécifique** : La surface spécifique d'un adsorbant indique la quantité de surface qui est disponible pour attacher les molécules d'adsorbat. Plus la surface est étendue, plus le nombre de sites d'adsorption disponibles s'accroît, ce qui renforce la capacité d'adsorption [23].
- **Temps de contact** : La durée du contact entre l'adsorbant et l'adsorbat constitue un indice essentiel pour analyser les phases de l'adsorption [24].
- **La masse de l'adsorbant** : La masse de l'adsorbant joue un rôle essentiel dans le processus d'adsorption. Pour l'optimisation de la quantité de charbon actif employée [25].
- **pH** : Le pH de l'environnement change la charge de surface de l'adsorbant et l'état ionique de l'adsorbat. Ces changements ont un impact direct sur l'efficacité et le type d'interactions d'adsorption [26].
- **Température** : L'adsorption est un processus global résultant de plusieurs processus à l'interface solide liquide. Elle peut être exothermique ou endothermique. Elle est donc conditionnée par la température. Ainsi, l'augmentation de la température favorise les processus de chimisorption alors que son abaissement favorise l'adsorption physique [27].

I.2.6. Modèles d'isothermes d'adsorption

I.2.6.1. Modèle de Langmuir

C'est le modèle le plus couramment utilisé pour expliquer les résultats obtenus lors de l'adsorption de composés organiques dans une solution aqueuse. L'adsorption sur des surfaces totalement homogènes est décrite par l'isotherme de Langmuir [28].

L'isotherme de Langmuir est représentée par l'équation suivante :

$$q_e = \frac{X}{m} = \frac{K_L \cdot q_{\max} \cdot C_e}{1 + (K_L \cdot C_e)}$$

Avec :

q_e : Quantité adsorbée à l'équilibre par unité de masse de l'adsorbant (mg.L^{-1}).

X : Quantité d'adsorbant (mg).

m : Masse d'adsorbant (g).

C_e : Concentration d'adsorbat à l'équilibre (mg.L^{-1}).

K_L : Constante liée à l'énergie d'adsorption (spécifique pour chaque adsorbant et adsorbat).

$q_{\max}$: Quantité complète maximale adsorbée par unité de masse de l'adsorbant (capacité maximale d'adsorption) (mg.L^{-1}).

La linéarisation de cette fonction par passage aux inverses donne :

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{\max}} \cdot C_e + \frac{1}{K_L \cdot q_{\max}}$$

La courbe représentant (C_e/q_e) en fonction de C_e est une droite dont la pente est égale à $(1/q_{\max})$ et l'ordonnée à l'origine vaut $(1/(K_L \cdot q_{\max}))$.

I.2.6.2. Modèle de Freundlich

Le modèle de Freundlich postule que la surface de l'adsorbant présente une hétérogénéité, caractérisée par une distribution inégale des sites d'adsorption sur celle-ci [29].

Elle se présente sous la forme :

$$q_e = K \cdot C_e^{1/n}$$

Avec :

q_e : Quantité de soluté adsorbé par unité de masse d'adsorbant (mg.g^{-1}).

C_e : Concentration d'adsorbat à l'équilibre.

K et n : constants empiriques caractéristiques du couple adsorbat-adsorbant.

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

$$\log q_e = \log K + \frac{1}{n} \log C_e$$

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

I.2.6.3. Modèle de Temkin

L'isotherme de Temkin prend en compte l'influence des interactions entre l'adsorbat et l'adsorbant, en postulant que la chaleur d'adsorption décroît de manière linéaire avec la couverture de surface. Le modèle de Temkin est donné par l'équation suivante :

$$q_e = \frac{R \cdot T}{b_T} \cdot \ln(K_T \cdot C_e)$$

La forme linéarisée de l'équation s'écrit comme suit :

$$q_e = B_T \cdot \ln(K_T) + B_T \cdot \ln(C_e)$$

$$B_T = \frac{R \cdot T}{b_T}$$

Avec :

R : Constante des gaz parfaits ($8,314 \text{ J.mol}^{-1} \text{ K}$).

T : Température absolue (K).

K_T : Constante d'équilibre associée à l'énergie de liaison maximale (L.mg^{-1}).

B_T : Constante en lien avec la chaleur d'adsorption.

Les constantes $K_{et}B_T$ sont déterminés à partir de l'ordonnée à l'origine et de la pente du tracé de (q_e) en fonction de $(\ln C_e)$, respectivement [30].

I.2.7. Cinétique d'adsorption

Il existe plusieurs modèles cinétiques pour étudier le mécanisme d'adsorption où les plus courants sont expliqués ci-dessous :

I.2.7.1. Modèle du pseudo premier ordre (modèle de Lagergren)

Le plus ancien des modèles cinétiques. Considérant l'adsorption comme limitée par la formation de la liaison entre soluté et site actif, il est exprimé par l'équation suivante :

$$\frac{dq_t}{dt} = K_1 \cdot (q_e - q_t)$$

Avec :

K_1 : Constante de vitesse pour une cinétique du pseudo-premier 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) [31].

L'intégration de l'équation deviant:

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - K_1 \cdot t$$

I.2.7.2. Modèle du pseudo-deuxième ordre

On utilise fréquemment l'équation du pseudo second ordre avec succès pour modéliser la cinétique de la réaction d'adsorption des polluants sur l'adsorbant [32].

Le modèle du pseudo seconde ordre est représenté par la formule suivante :

$$\frac{dq_t}{dt} = K_2 \cdot (q_e - q_t)^2$$

Avec :

K_2 : La constante de vitesse pour une cinétique du deuxième ordre en ($\text{g.mg}^{-1}.\text{min}^{-1}$).

q_t : La capacité d'adsorption à l'instant t .

q_e : La capacité d'adsorption à l'équilibre.

L'équation intégrée donne :

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 \cdot q_e^2} + \frac{1}{q_e} \cdot t$$

I.2.7.3. Modèle de diffusion intra-particules

Comme les deux modèles précédents ne parviennent pas à clarifier le processus de diffusion, Weber et Morris ont proposé un modèle théorique basé sur la diffusion au sein des particules. Il repose sur l'équation:

$$q_t = K_{\text{int}} t^{1/2} + C$$

Avec :

q_t : La quantité adsorbée à l'instant t en ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$).

K_{int} : La constante de diffusion intra-particulaire en ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1/2}$).

C : Constante liée à l'effet de la couche limite externe.

I.3. Charbon actif

I.3.1. Généralité

L'utilisation de charbon actif dans la production d'eau potable a commencé à se déployer dès les années 1950. À ses débuts, au début du siècle, le charbon actif était utilisé de manière sporadique pour la purification des eaux. Par la suite, son utilisation s'est étendue grâce à ses propriétés d'adsorption, notamment pour éliminer les composés organiques qui provoquent des goûts et des odeurs, ainsi que pour la réduction de la concentration générale en matière organique dissoute [33].

I.3.2. Définition de charbon actif

Le charbon actif Aussi connu sous le nom de charbon activé, le charbon actif est un matériau noir riche en carbone qui se présente principalement sous forme granulaire ou en poudre très fine. Il est composé principalement de matière carbonée à structure poreuse. En raison de leur porosité, le charbon actif possède une surface développée immense, un seul gramme pouvant exposer une surface interne dépassant les 1500 m². Cette particularité exclusive est à l'origine de ses propriétés d'adsorption [34].

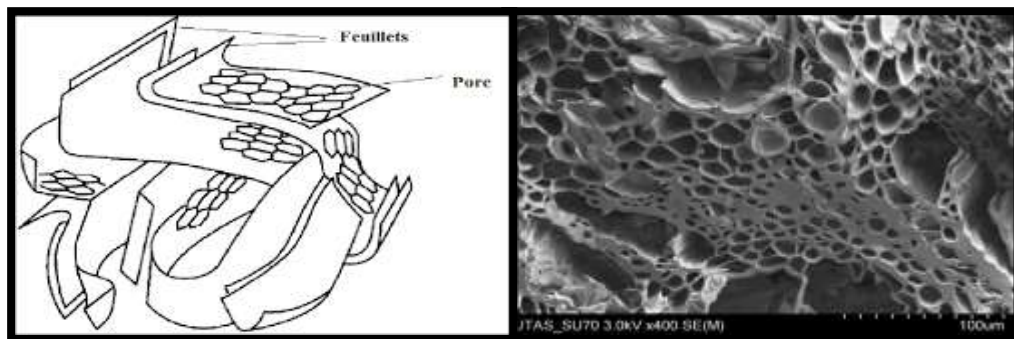


Figure I.5 La structure de charbon actif

I.3.3. Les Différents formes

Le charbon actif peut être utilisé sous plusieurs formes, on distingue :

I.3.3.1. Charbon actif en poudre (CAP)

Les poudres de charbon actif ont une taille de particules inférieure à 100 µm avec un diamètre moyen qui se situent entre 15 et 25 µm. Ils possèdent une surface extérieure et une profondeur de diffusion minimale. Cela entraîne une adsorption extrêmement rapide [35].



Figure I.6 Charbon actif en poudre

I.3.3.2. Charbon actif en grain (CAG)

Le charbon actif en grain présente une taille des particules supérieure à 1 mm, il est caractérisé par un faible diamètre des pores, une grande surface interne et une surface externe relativement faible [36].



Figure I.7 Charbon actif granulé

I.3.3.3. Charbon actif extrudé (CAE)

Le charbon actif extrudé a une forme cylindrique dont le diamètre varie de 0,8 à 5 mm. Il est principalement employé pour des usages en phase gazeuse en raison de sa faible perte de charge, de sa résistance mécanique élevée et de sa faible production de poussière [36].



Figure I.8 Charbon actif extrudé

I.3.4. Utilisation du charbon actif

L'utilisation du charbon actif est répartie en différents domaines comme :

- Traitement des eaux potables et résiduaires.
- Purification de produits industriels.
- Le charbon actif est utilisé pour éliminer les teintes et les impuretés des matières premières. Par exemple, dans le cas de la décoloration du sucre extrait de la canne ou de la betterave.
- On utilise le charbon actif dans les systèmes de climatisation, ainsi que pour la neutralisation des odeurs issues des égouts et des émanations chimiques.
- Les filtres à charbon actif contenus dans certaines voitures, fixent les émanations d'hydrocarbures imbrûlés qui s'échappent des véhicules à l'arrêt.
- Ces dernières années, l'utilisation du charbon actif s'est élargie au traitement des eaux usées en raison non seulement de ses qualités d'adsorbant mais aussi du rôle épurateur joué par les bactéries qui y sont fixées [37].

CHAPITRE II

PARTIE EXPERIMENTALE

II.1. Généralité

Ce travail a été réalisé au laboratoire SEAMM à l'université Abd Elhamid Ibn Badis de Mostaganem. Cette partie est consacrée à la description du protocole expérimental adopté pour étudier l'adsorption du colorant Rouge acide 14. Elle présente les différentes étapes suivies. L'étude porte sur l'influence de plusieurs paramètres, notamment la dose de l'adsorbant, le pH, le temps de contact, la concentration initiale ainsi que la température.

II.2. Le colorant étudié (Rouge acide 14)

II.2.1. Définition

Le colorant alimentaire Rouge Acide 14, aussi appelé Carmoisine ou Azorubine, 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 [38].

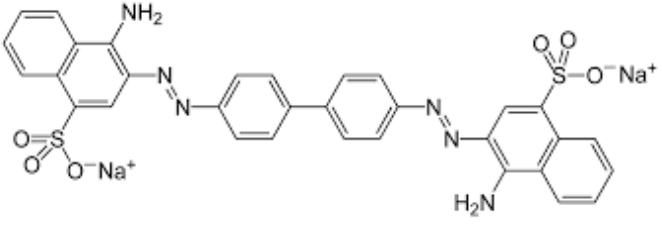


Figure II.1 Rouge acide 14

II.2.2. Propriétés physico-chimiques

Le tableau suivant regroupe quelques propriétés de Rouge acide 14

Tableau II.1: Propriétés physico-chimique

Nom UICPA	Disodium 4-hydroxy-3-(4-sulfonato-1-naphthylazo)-1-naphthalenesulfonate
Synonymes	Azorubine, Carmoisine, CI Food Red 3, CI 14720
Famille	Les colorants azoïques
Formule brute	$C_{20}H_{12}N_2Na_2O_7S_2$
Masse molaire (g/mol)	502,44 g/mol
Aspect	Poudre rouge, soluble dans l'eau
La longueur d'onde	$\lambda = 515 \text{ nm}$
pH (solubilité)	Soluble dans un milieu acide
Structure chimique	

II.2.3. Domaines d'utilisation de Rouge acide 14 dans différents secteurs

Le Rouge acide 14 est un colorant largement utilisé dans plusieurs domaines, notamment l'industrie alimentaire, pharmaceutique, textile et cosmétique.

○ Secteur de l'alimentation

- ✓ **Boissons** : sodas, sirops de fruits, boissons avec ou sans alcool.
- ✓ **Sucreries et glaces** : friandises, gommes à mâcher, produits surgelés, crèmes glacées.
- ✓ **Produits laitiers et desserts** : fromages fondus, douceurs lactées.
- ✓ **Autres produits** : confitures, gelées, marmelades, sauces, articles de boulangerie/pâtisserie, charcuteries (saucisses) et en-cas.
- ✓ **Usage spécifique** : teinture de la coquille des œufs de Pâques.

○ Secteur pharmaceutique : teinture de sirops, revêtements de comprimés et gélules.

○ Secteur textile : la carmoisine est employée pour la teinture des fibres, en particulier les fibres synthétiques, grâce à sa bonne solubilité dans l'eau et son pouvoir colorant élevé, permettant d'obtenir des teintes rouges stables.

II.2.4. Toxicité

Le Rouge acide 14 peut avoir plusieurs effets sur la santé. Elle est fortement soupçonnée de favoriser l'hyperactivité chez les enfants, surtout lorsqu'elle est associée à des conservateurs comme les benzoates. Elle peut également provoquer des réactions allergiques telles que l'urticaire, l'asthme et des troubles gastro-intestinaux, avec un risque accru chez les personnes intolérantes aux salicylates (comme l'aspirine). Bien qu'elle ne soit pas classée comme cancérigène avéré par les grandes instances, certaines sources la considèrent comme potentiellement génotoxique ou cancérigène. Sa dose journalière admissible (DJA) est fixée entre 0 et 4 mg/kg de poids corporel, mais cette limite peut être dépassée chez les forts consommateurs, notamment les enfants [39].

II.3. Méthode de dosage Rouge Acide 14

II.3.1. Dosage par spectrophotométrie

L'analyse spectrophotométrique se fonde sur l'examen de la fluctuation de l'absorption lumineuse par un milieu en relation avec la concentration d'un élément. Cette méthode utilise une lumière sensible monochromatique et est très intéressante parce qu'elle permet de travailler avec de petites quantités de substance sans détruire l'échantillon. Elle s'applique à un très grand nombre de dosages.



Figure II.2 Spectrophotomètre UV-Visible

Les concentrations résiduelles du colorant sont mesurées par spectrophotométrie UV-Visible en utilisant la longueur d'onde d'absorption à laquelle le colorant absorbe le plus de Lumière. Les concentrations de colorant en solution peuvent être déterminées quantitativement selon la loi de Beer-Lambert :

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

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 (en $\text{L.mol}^{-1}.\text{cm}^{-1}$).

ℓ : Épaisseur de la cuve.

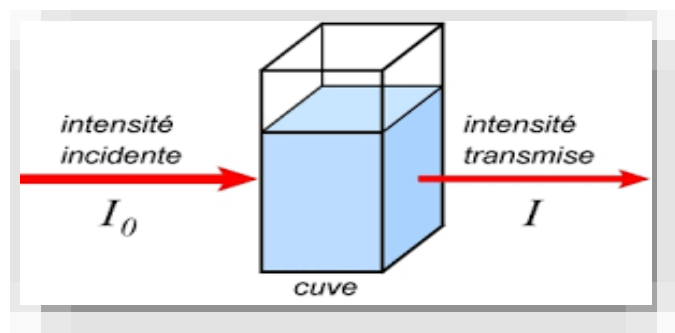


Figure II.3 Principe d'adsorption de la lumière monochromatique par un corps absorbant

En employant l'équation de régression linéaire dérivée d'un tracé d'étalonnage réalisé sur une série de concentration.

La masse adsorbée par gramme d'adsorbant (q_e) et le taux d'élimination (R) pour le colorant examiné, sont déterminés par les équations suivantes :

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)}{m \times 1000} \times V \quad R(\%) = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100$$

Avec :

q_e : Quantité de colorant adsorbé par gramme d'adsorbant (mg.g^{-1}).

C_0 : Concentration initiale du colorant (mg.L^{-1}).

C_e : Concentration du colorant à l'équilibre (mg.L^{-1}).

V : Le volume d'adsorbant (mL).

m : Masse de l'adsorbant (g).

1000 : Coefficient de conversion.

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

II.4.1. Détermination de la courbe d'étalonnage

II.4.1.1. Préparation des solutions mère (SM)

On a élaboré une solution mère en pesant 1 g de Rouge Acide 14, qui a été ensuite dissoute dans une fiole de 1000 mL. On a complété avec de l'eau distillée, ce qui donne une concentration appropriée de 1000 mg/L.

II.4.1.2. Préparation de la solution fille (SF)

Une solution de 200 mg/L a été préparée à partir de 1000 mg/L en prélevant 40 mL et en complétant à 200 mL. Puis, une solution de 50 mg/L a été obtenue à partir de celle de 200 mg/L en prélevant 50 mL et en complétant à 200 mL. Enfin, des échantillons de 25 mL ont été prélevés pour l'établissement de la courbe d'étalonnage.

II.4.1.3. Etablissement de la courbe d'étalonnage

Chaque étalon a été analysé dans le domaine de l'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.2 et représentés graphiquement sur la Figure II.4

Tableau II.2: Élaboration de la courbe d'étalonnage pour la Rouge Acide 14

C (mg/L)	0	2	4	6	8	10	12	14
Abs	0	0,073	0,139	0,252	0,290	0,385	0,443	0,555

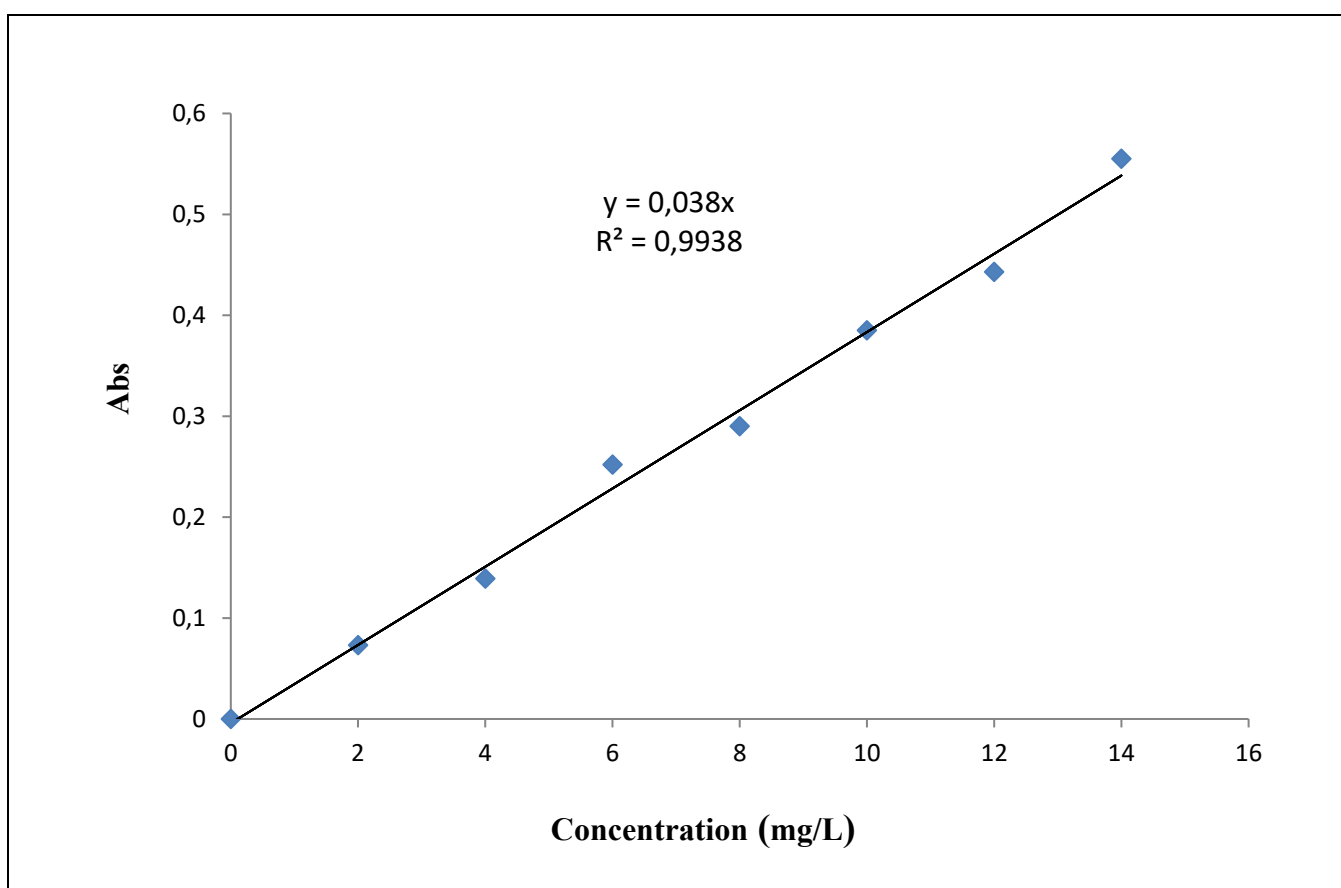


Figure II.4 La courbe d'étalonnage de Rouge Acide 14

On observe que la courbe obtenue est une droite, avec un coefficient de détermination de 0,9938, indiquant un bon ajustement linéaire. L'équation de cette droite, qui relie l'absorbance à la concentration de Rouge Acide 14 est : $(\text{Abs} = 0,038 \times C)$. Cette équation permet de déterminer la concentration d'une solution inconnue de Rouge Acide 14.

II.5. L'effet de la dose de l'adsorbant sur l'adsorption

Une série de flacons est préparée en y introduisant des quantités croissantes d'adsorbant, comprises entre 0,005 et 0,03 g (0,005 ; 0,01 ; 0,015 ; 0,02 ; 0,025 et 0,03 g). À chaque flacon, on ajoute 25 mL d'une solution de Rouge Acide 14 d'une concentration de 50 mg/L. Les mélanges sont ensuite agités pendant deux heures, puis centrifugés avant d'être analysés.

Les résultats de ces mesures sont représentés graphiquement sur la Figure II.5

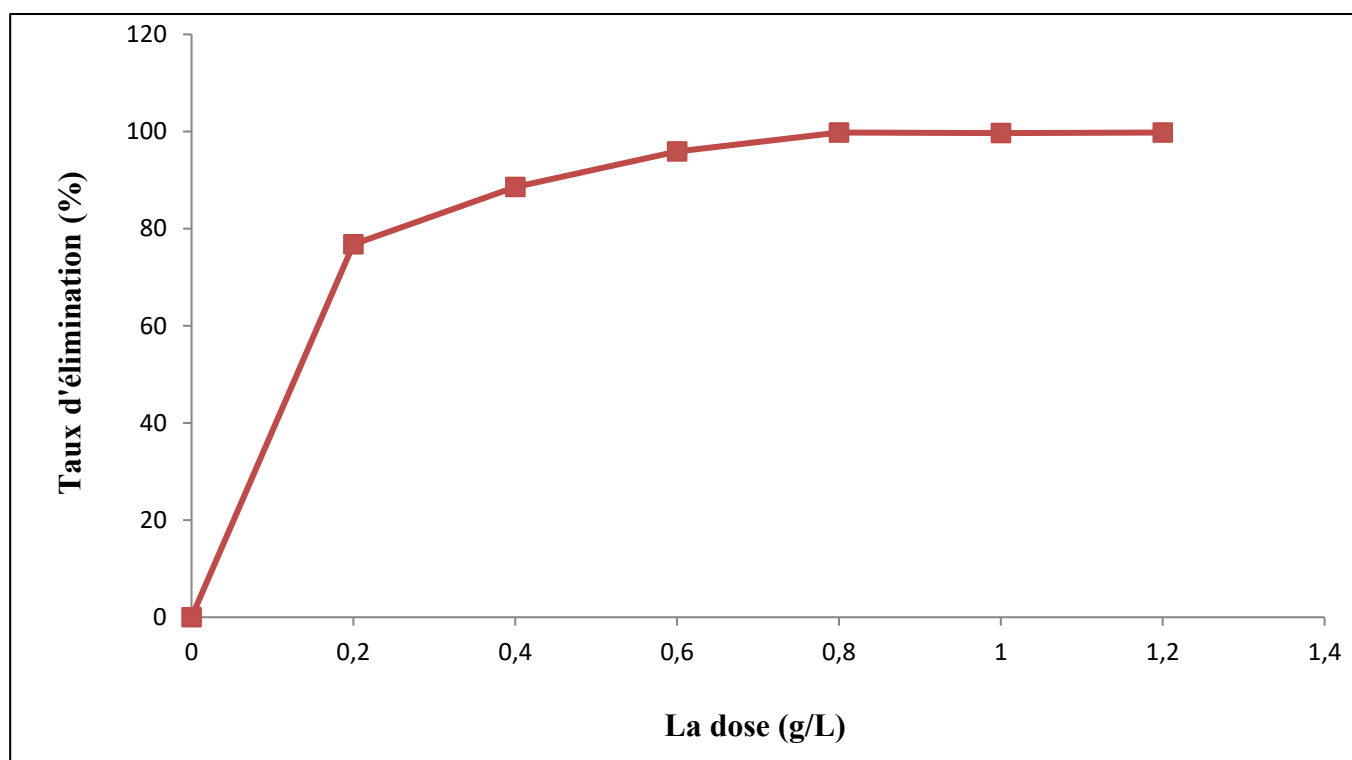


Figure II.5 Taux d'élimination de Rouge Acide 14 en fonction de la dose d'adsorbant

Le taux d'élimination du Rouge Acide 14 augmente avec l'augmentation de la dose d'adsorbant. Cette augmentation est particulièrement rapide aux faibles doses, en raison de la disponibilité d'un plus grand nombre de sites actifs à la surface de l'adsorbant. Par la suite, la courbe tend à se stabiliser progressivement jusqu'à atteindre un plateau, traduisant la saturation des sites d'adsorption disponibles. Ainsi, la dose optimale retenue pour la suite de l'étude est de 0,8 g/L, correspondant à une masse d'adsorbant de 0,02 g.

II.6. L'effet de pH sur l'adsorption de Rouge Acide 14

Le pH, qui signifie potentiel hydrogène, est une évaluation utilisée pour définir si une solution est acide ou basique. Il affecte l'adsorption du fait de la caractéristique l'adsorbant, dont les emplacements possèdent des groupes fonctionnels organiques.

Dans une série de flacons, 25 mL d'une solution de Rouge Acide 14 à une concentration de 100 mg/L ont été introduits. Une masse de 0,02 g de charbon a ensuite été ajoutée à chaque bécher. Le pH des solutions a été ajusté à différentes valeurs comprises entre 2 et 10. Le mélange est agité magnétiquement pendant deux heures, puis centrifugé et analysé par spectrophotométrie.

Les résultats obtenus sont représentés graphiquement sur la figure II.6

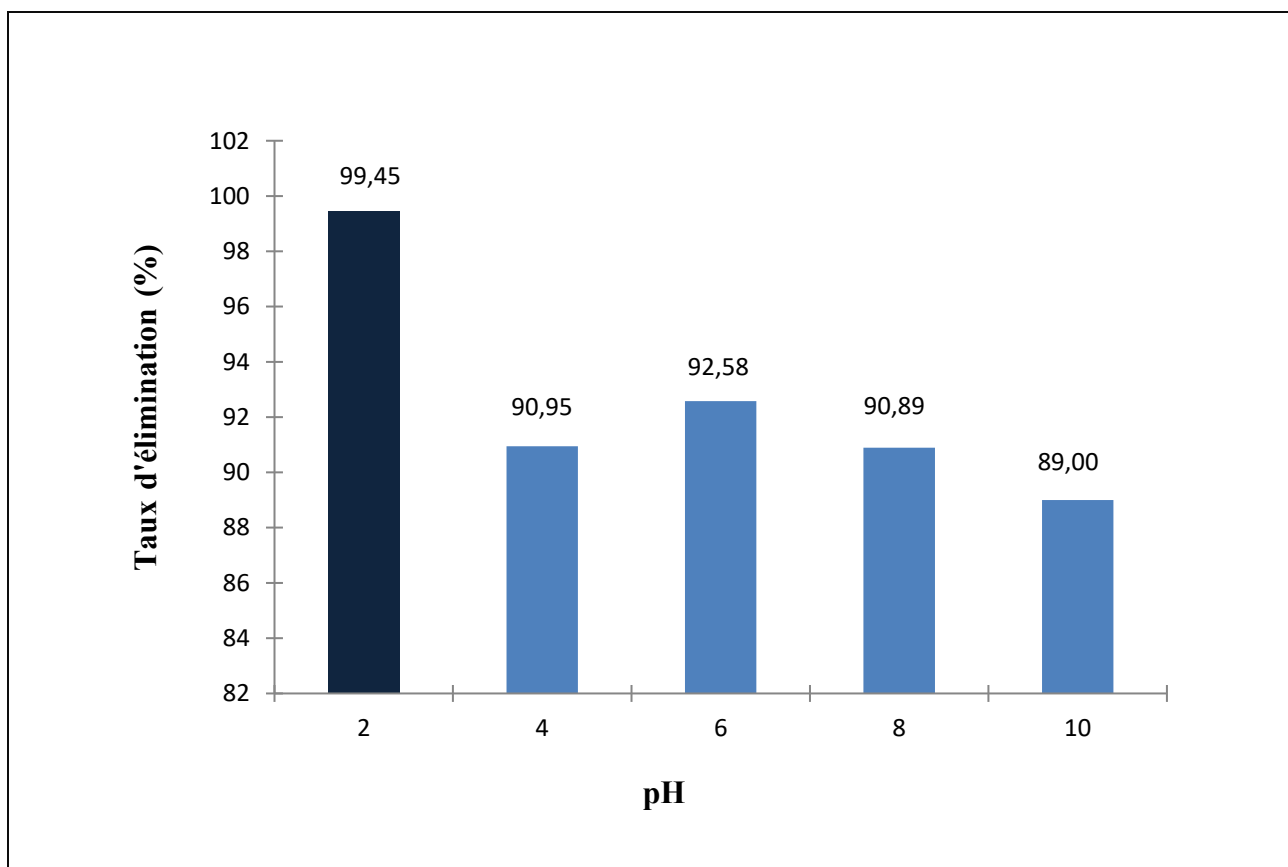


Figure II.6 Taux d'élimination de Rouge Acide en fonction de PH

On observe que l'efficacité d'adsorption est maximale en milieu fortement acide pH =2, ce qui suggère une interaction favorable entre l'adsorbant et la molécule adsorbée. Ensuite, le taux diminue progressivement lorsque le pH augmente, cette peut être expliquée par la nature acide du colorant. En milieu fortement acide, la surface du charbon devient chargée

positivement, ce qui favorise l'attraction électrostatique avec les ions négatifs du Rouge acide 14. Donc l'adsorption devient plus importante.

II.7. Détermination du temps d'équilibre

Dans une série de flacons, 0,02 g de charbon ont été introduits, puis 25 mL de la solution de Rouge acide 14 à une concentration de 100 mg/L à pH =2 ont été ajoutés. Les mélanges ont été soumis à une agitation pendant des durées variables (10, 15, 20, 30, 45, 60, 90 et 120 minutes), puis centrifugés et analysés par spectrophotométrie.

Les résultats obtenus sont représentés graphiquement sur la figure II.7

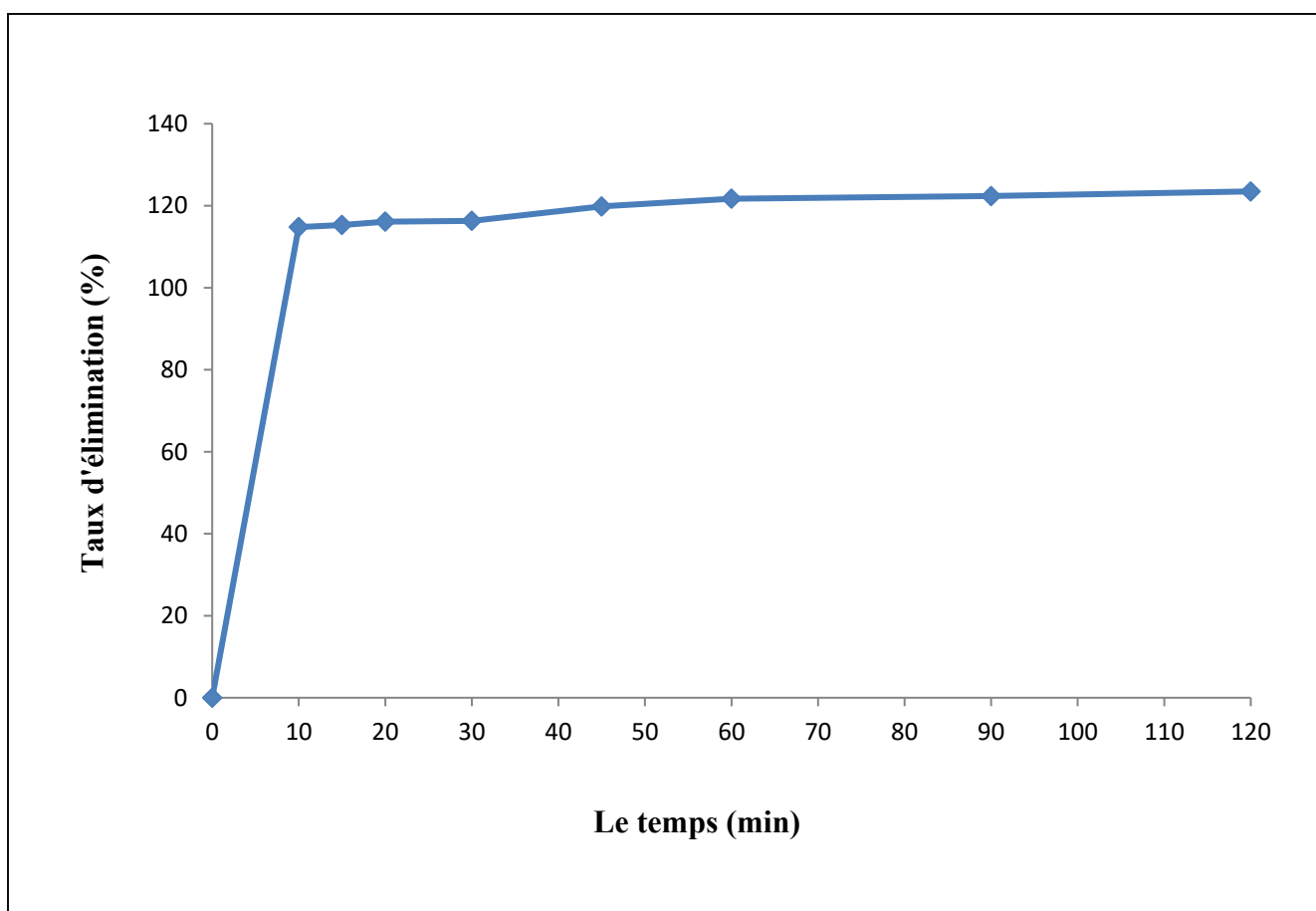


Figure II.7 Taux d'élimination de Rouge Acide 14 en fonction du temps

Le graphique montre que le taux d'élimination augmente rapidement au début du temps, grâce à la disponibilité d'un grand nombre des sites actifs puis se stabilise progressivement. On remarque que la concentration de 100 mg/L donne un meilleur rendement. Le temps de contact retenu pour la suite expériences est fixé à 90 min.

II.8. Isotherme d'adsorption de Rouge Acide 14

L'isotherme d'adsorption décrit la relation à l'équilibre entre la quantité adsorbée et la concentration restante dans la phase fluide. Elle permet de caractériser le comportement d'un adsorbant. Elle est essentielle pour optimiser les procédés d'adsorption.

Dans une série de flacons, contenant 25 mL de solution à pH =2 avec une concentration qui varient entre 50 mg/L à 500 mg /L et 0,02 g de charbon actif est ajouté. L'ensemble est agité pendant un temps de 90 min, puis soumis à une centrifugation avant d'être analysé.

Les valeurs de cette étude sont représentées graphiquement sur la Figures II.8

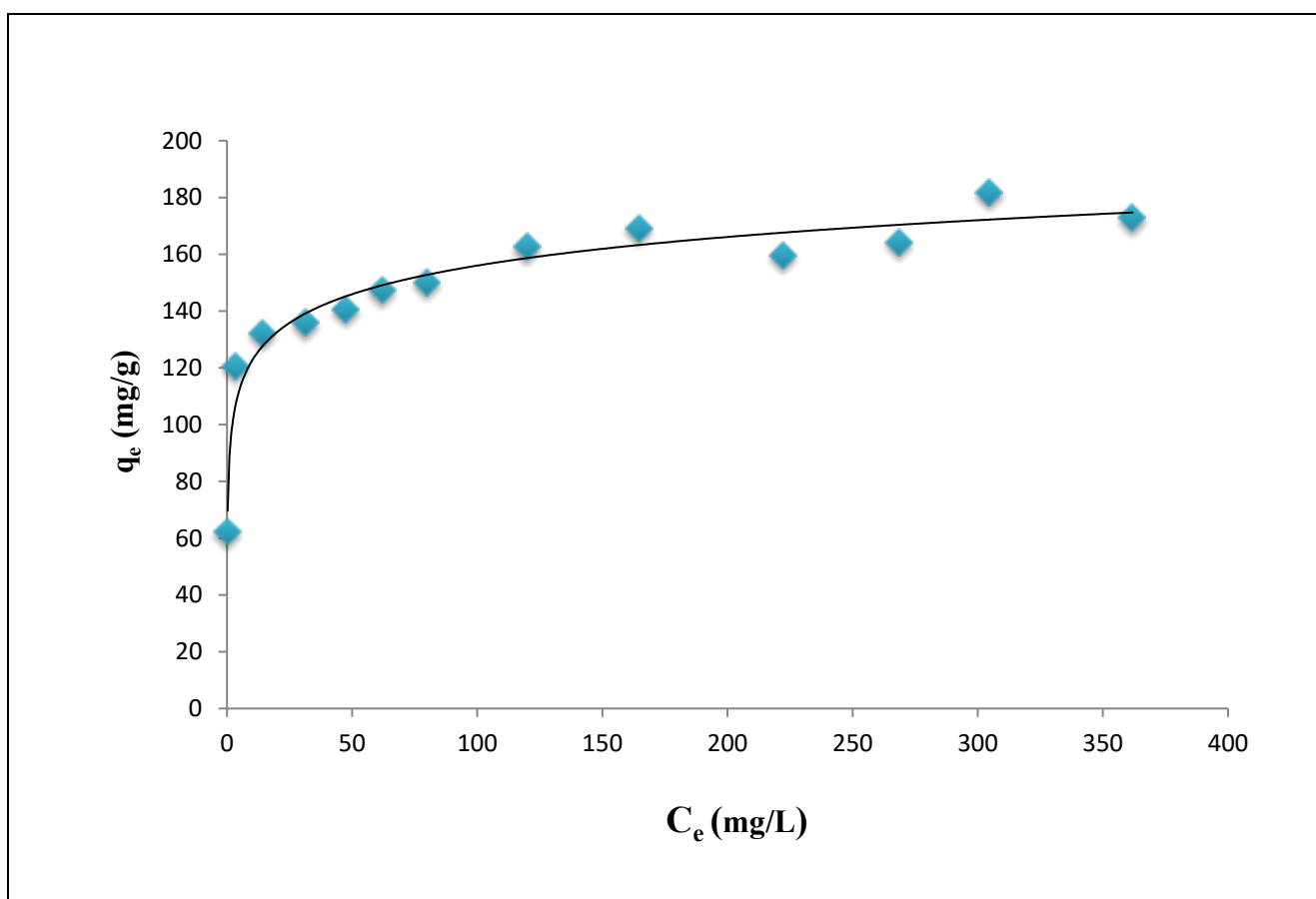


Figure II.8 L'isotherme d'adsorption de Rouge Acide 14

D'après la figure II.8 on remarque que la capacité d'adsorption de Rouge acide 14 augmente avec l'augmentation de la concentration à l'équilibre de l'adsorbat. L'isotherme obtenue présente ensuite un plateau, traduisant la saturation progressive des sites actifs à la surface de l'adsorbant. Ce plateau correspond à la formation d'une monocouche du colorant sur la surface, indiquant que les sites d'adsorption sont occupés de façon homogène.

II.8.1. Les modèles d'isothermes d'adsorption

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

II.8.1.1. Modèle de Langmuir

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

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

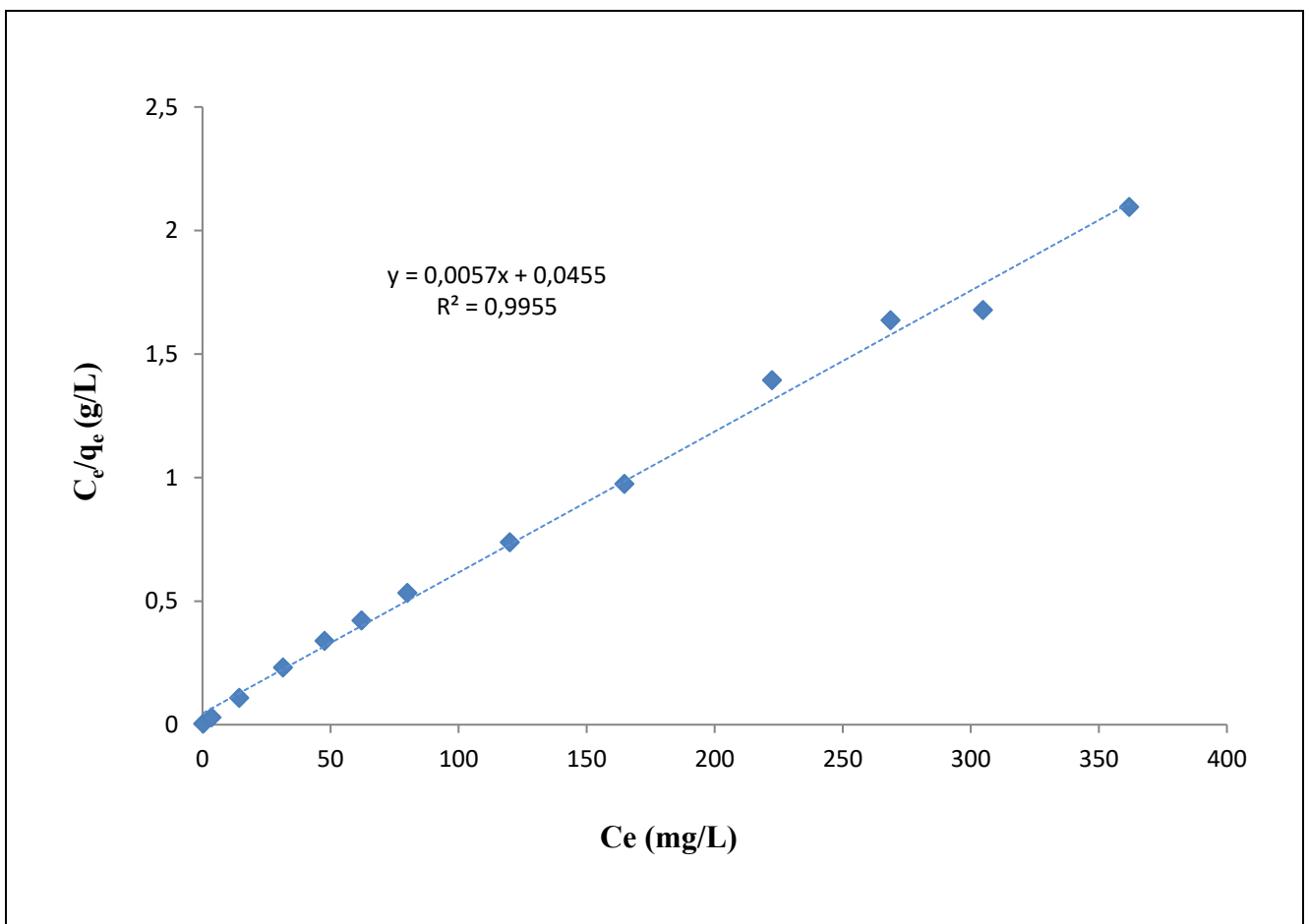


Figure II.9 L'isotherme de Rouge Acide 14 pour le modèle de Langmuir

II.8.1.2. Modèle de Freundlich

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

$$\text{L'équation de Freundlich : } \log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log k_F$$

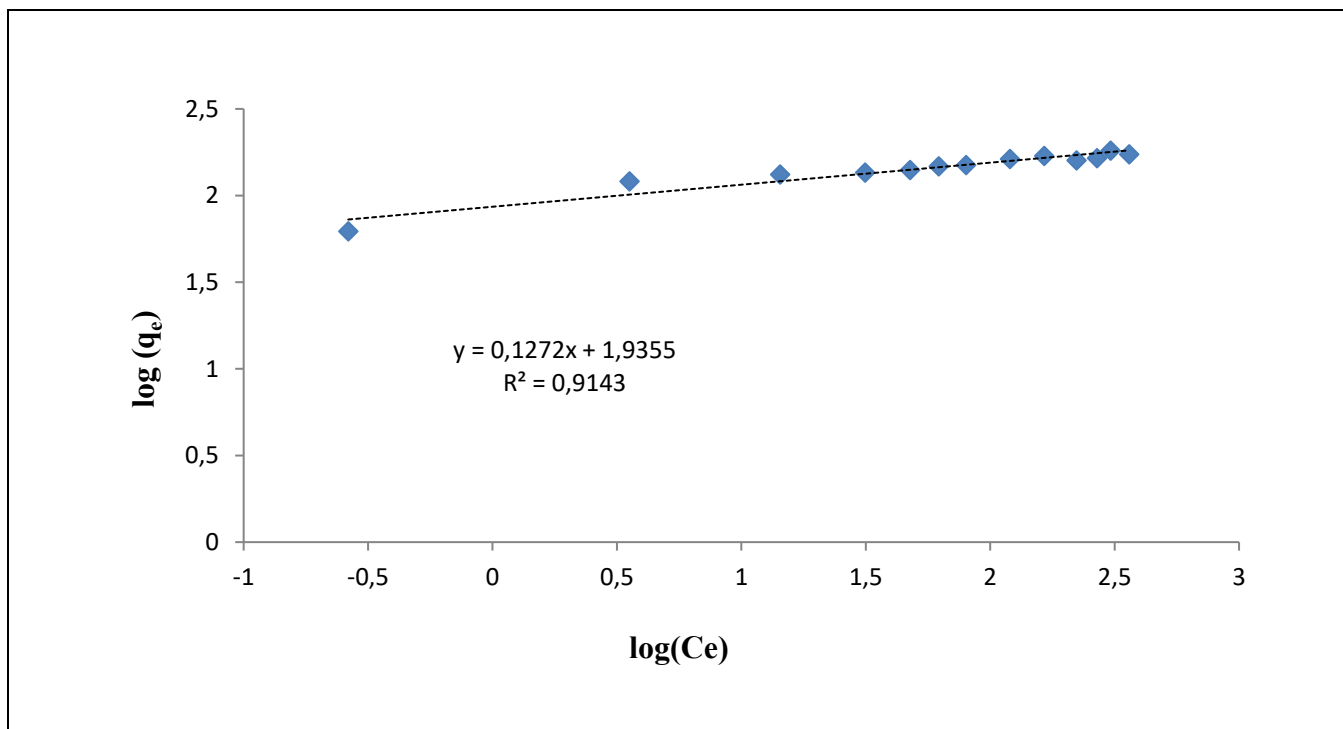


Figure II.10 L'isotherme d'adsorption de Rouge Acide 14 pour le modèle de Freundlich

II.8.1.3. Modèle de Temkin

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

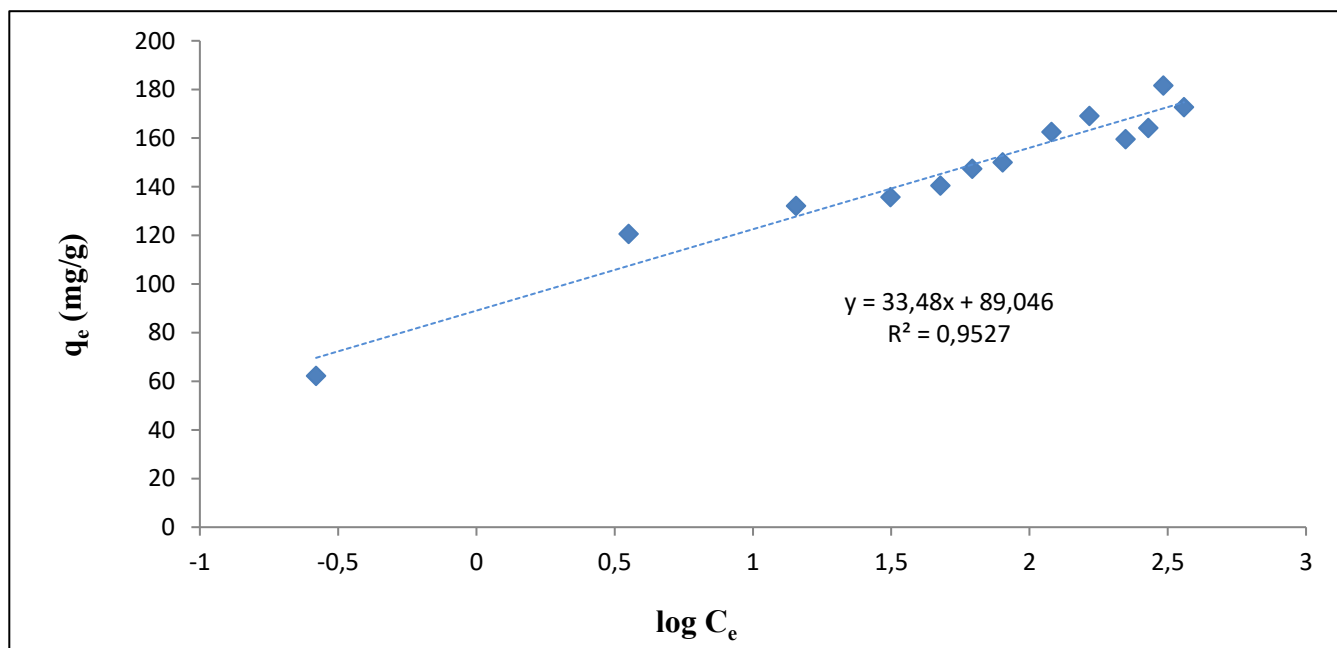


Figure II.11 L'isotherme d'adsorption de Rouge Acide 14 pour le modèle de Temkin

Tableau II.3: Résultats d'isotherme d'adsorption de Rouge Acide 14 pour les trois modèles

Modèle de Langmuir		
$q_{\max}$ (mg.g⁻¹)	K_L (L.mg⁻¹)	R^2
200	0,111	0,995
Modèle de Freundlich		
n	K_F (L.mg⁻¹)	R^2
7,874	86,099	0,914
Modèle de Temkin		
B_T (J.mol⁻¹)	K_T (L.mg⁻¹)	R^2
33,48	456,560	0,952

D'après les figures (II.9, II.10 et II.11) on peut déduire que le modèle le plus adéquat est celui de Langmuir avec une capacité maximale de 200 mg/g ce qui indique une forte capacité de fixation du colorant par l'adsorbant. Pour le modèle de Freundlich, la valeur de $n=7,874$ est supérieure à 1 montre que l'adsorption est favorable. Concernant le modèle de Temkin la valeur positive de $B_T=33,48$ J/mol indique l'existence d'interaction énergétiques entre l'adsorbant et l'adsorbat au cours du processus d'adsorption.

II.9. Thermodynamique d'adsorption de Rouge Acide 14

L'adsorption est toujours associée à un échange de chaleur, qu'il soit exothermique ou endothermique. L'évaluation de la chaleur d'adsorption sert de principal critère pour faire la distinction entre la chimisorption et la physisorption. Les indicateurs thermodynamiques, étroitement liés à la température, constituent aussi des outils précieux pour anticiper le comportement d'adsorption.

Ces paramètres incluent la chaleur d'adsorption, l'énergie d'activation, la variation de l'énergie libre de Gibbs (ΔG°), l'enthalpie (ΔH°) et l'entropie (ΔS°). Leur calcul est essentiel pour définir la nature du processus de conservation [40].

II. 9.1. Paramètres thermodynamiques d'adsorption de Rouge Acide 14

Les paramètres thermodynamiques essentiels sont les suivants

- L'enthalpie standard (ΔH°) : elle renseigne sur le caractère exothermique ($\Delta H^\circ < 0$) ou endothermique ($\Delta H^\circ > 0$) de l'adsorption.
- L'entropie standard (ΔS°) : elle traduit la variation de désordre dans le système au cours du processus d'adsorption.

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

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

D'après les deux équations précédentes on a :

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

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

Et
$$K_d = \frac{q_e}{c_e}$$

Avec :

ΔG° : L'enthalpie libre (KJ.mol⁻¹).

ΔH° : Variation de l'enthalpie (KJ.mol⁻¹).

ΔS° : Variation de l'entropie (J.mol⁻¹.K⁻¹).

T : Température (K).

R : La constante des gaz parfait (8,314 J.K⁻¹.mol⁻¹).

K_d : La constante d'équilibre (coefficient de distribution).

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

Des flacons contenant 25 mL de solution de Rouge Acide 14 à une concentration de 150 mg/L sont ajustés à un pH =2, puis 0,02 g de charbon y sont ajoutés. Ces flacons sont ensuite placés successivement à des températures de 25 °C, 30 °C et 35 °C dans un bain-marie équipé d'un thermostat pour contrôler la température. Le mélange est agité pendant 90 min, puis centrifugé et analysé par spectrophotométrie.

Les résultats sont présentés dans la figure II.12

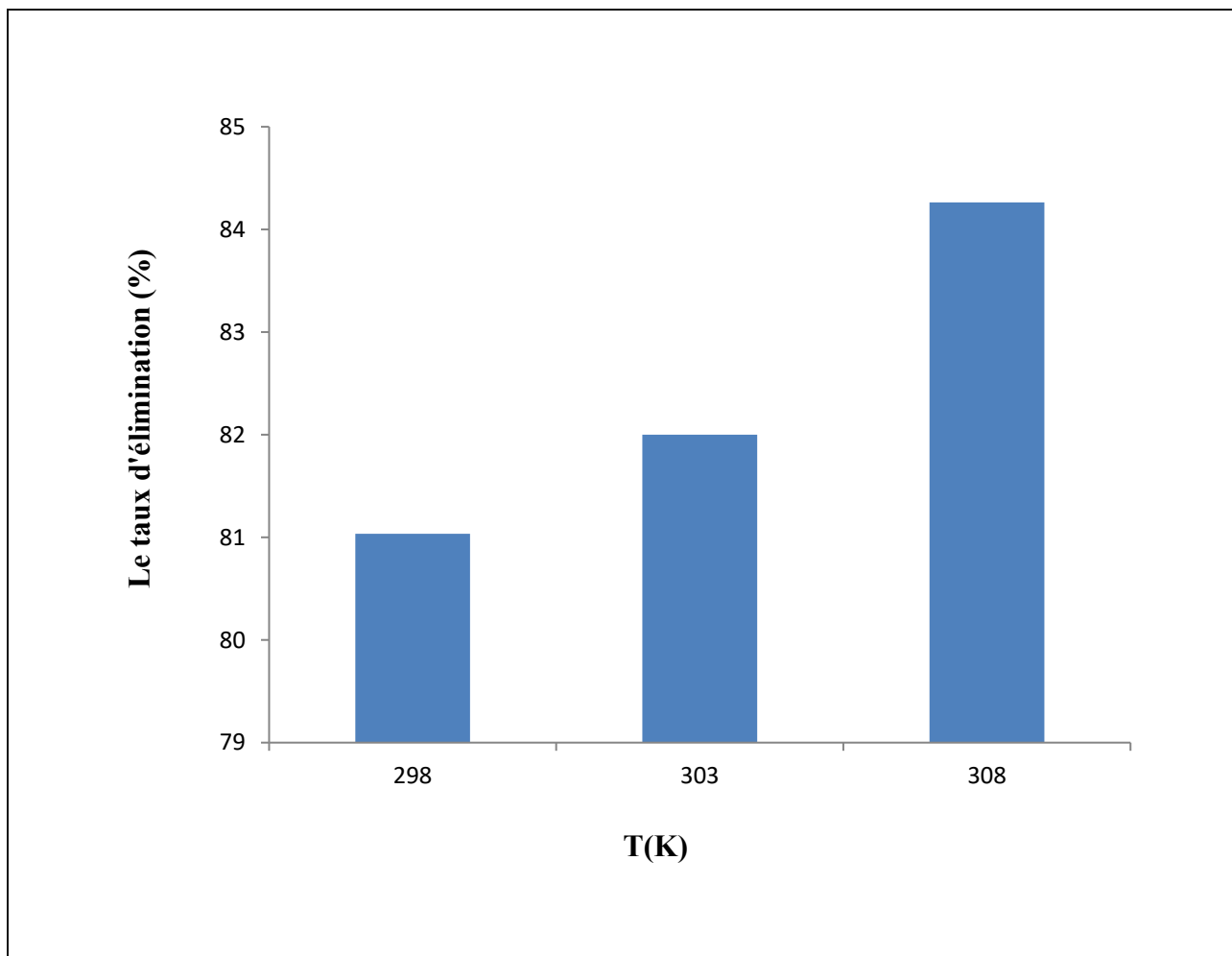


Figure II.12 Taux d'élimination de Rouge Acide 14 à différentes températures

Ce graphique montre que le taux d'élimination (%) du Rouge acide 14 augmente avec la température croissante. Cette observation indique que le processus d'adsorption du Rouge acide 14 sur l'adsorbant est de nature endothermique, c'est-à-dire qu'il absorbe de la chaleur.

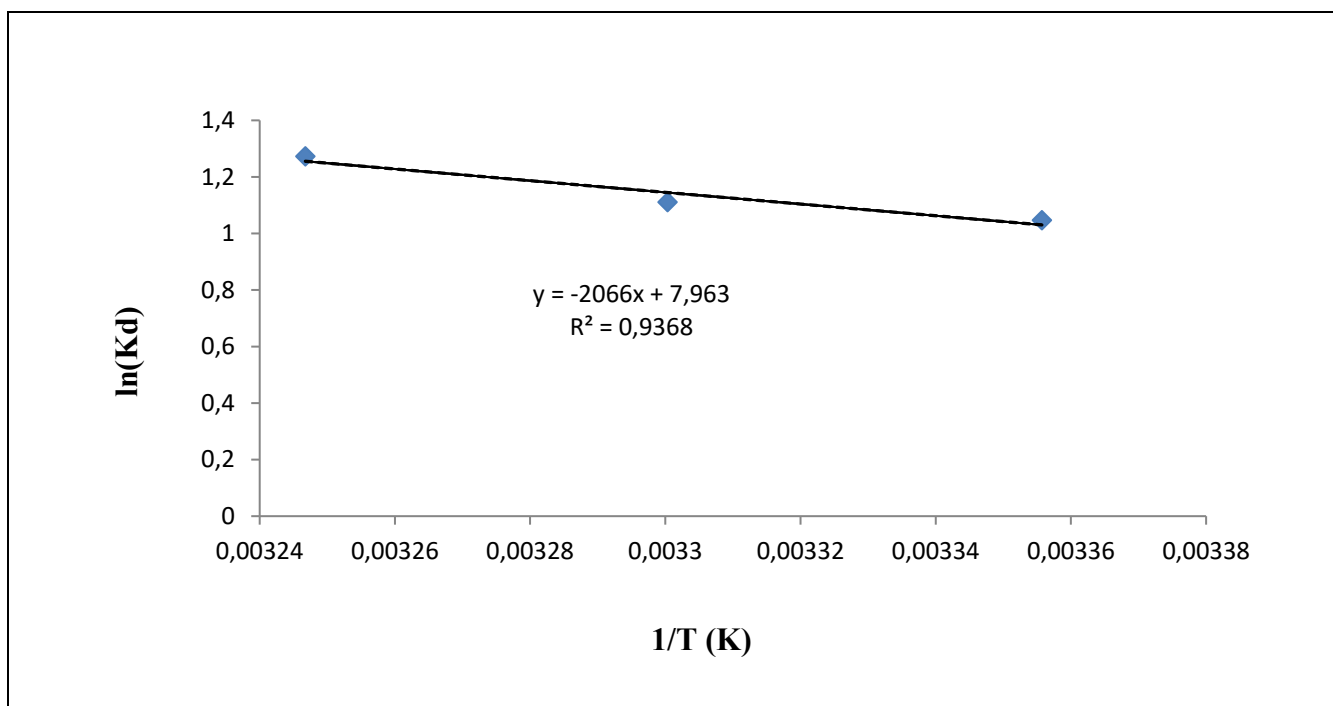


Figure II.13 Évolution de $\text{Ln}(K_d)$ en fonction de $(1/T)$ pour l'adsorption de Rouge Acide 14 par l'adsorbant

Tableau II.4: Paramètres thermodynamiques d'adsorption de Rouge Acide 14

$\Delta G^\circ (\text{KJ.mol}^{-1})$			$\Delta H^\circ (\text{KJ.mol}^{-1})$	$\Delta S^\circ (\text{J.mol}^{-1})$
298(K)	303 (K)	308(K)		
-2,59	-2,79	-3,25	17,18	66

D'après les résultats des paramètres thermodynamiques obtenus dans le tableau II.4 on n'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 positif, ce qui signifie que les molécules de Rouge Acide 14 sont moins organisées à l'interface solide/ liquide lors du processus d'adsorption.

II.10. Etudes de cinétique d'adsorption de Rouge Acide 14

La cinétique d'adsorption de l'Acide Rouge 14 et Rhodamine B sur l'adsorbant a été suivie en appliquant les trois modèles (pseudo-premier et pseudo-deuxième ordre) et le modèle de diffusion intra particulaire.

II.10.1. Modèle de pseudo premier ordre

Modèle cinétique du pseudo premier ordre peut être exprimé par l'équation suivante :
 $\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - K_1 \cdot t$

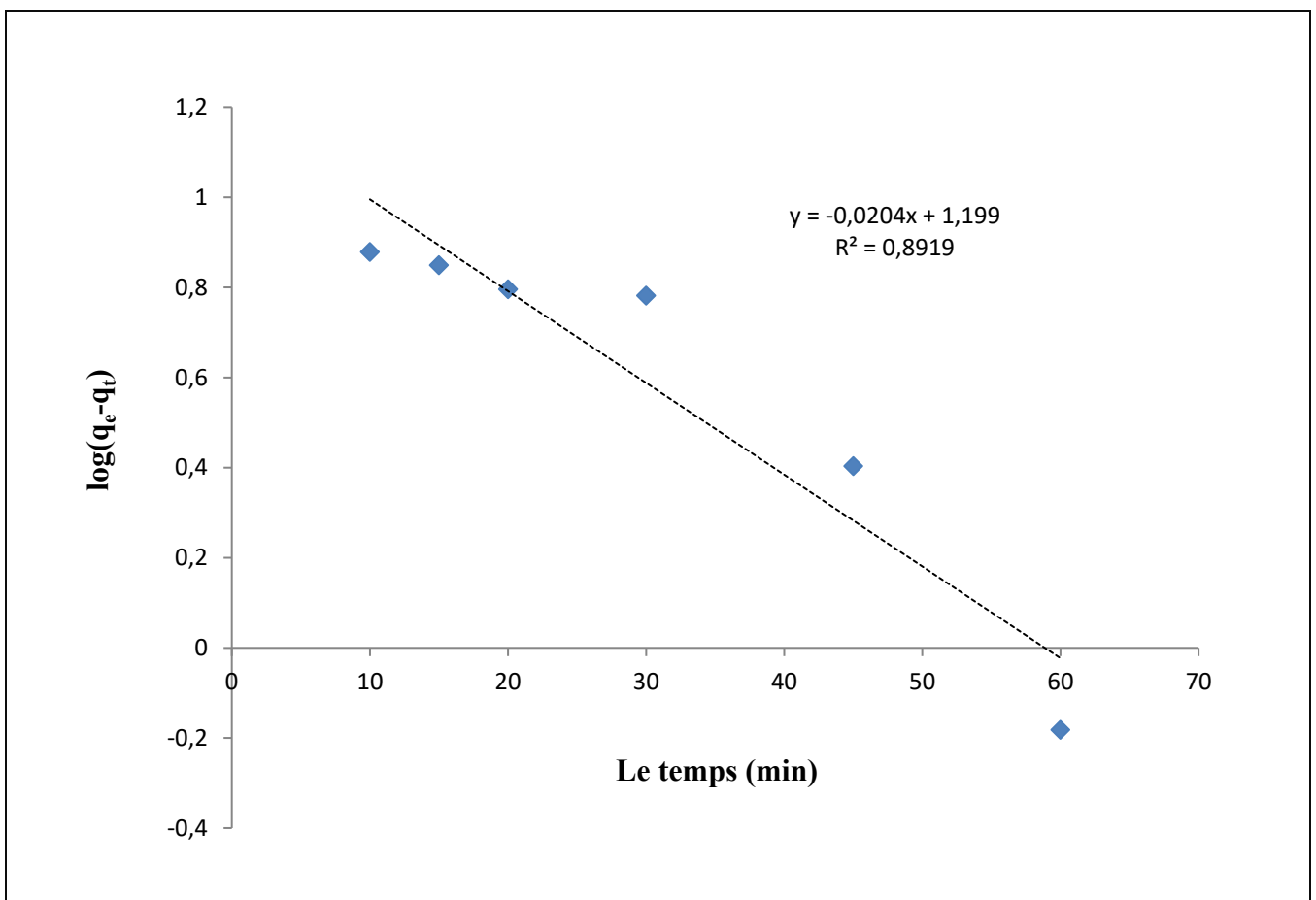


Figure II.14 Cinétique d'adsorption de Rouge Acide 14 de pseudo 1 er ordre

II.10.2. Modèle de pseudo deuxième ordre

Ce modèle peut être exprimé par la relation suivante : $\frac{1}{q_t} = \frac{1}{K_2 \cdot q_e^2} + \frac{1}{q_e} \cdot t$

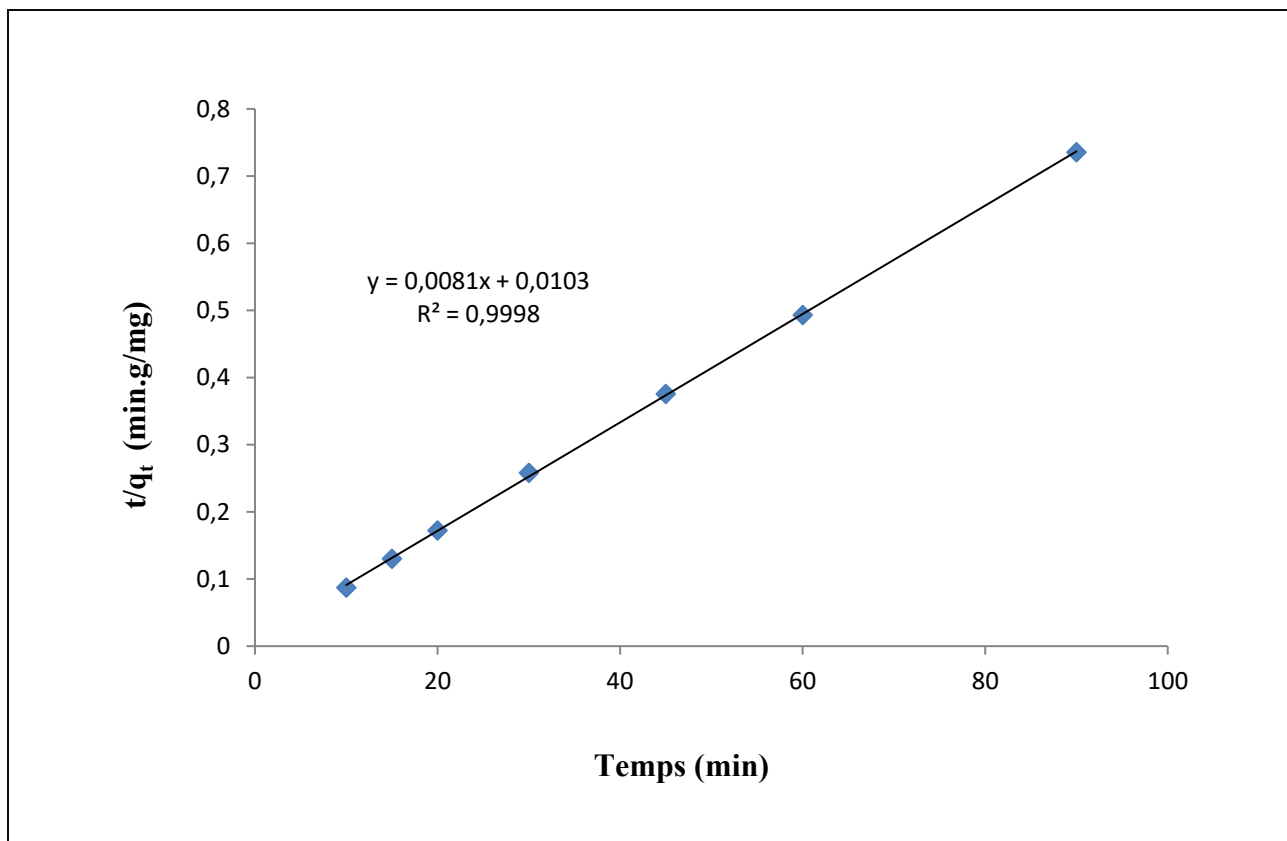


Figure II.15 Cinétique d'adsorption de Rouge Acide 14 de pseudo 2^{ème} ordre

Tableau II.5: 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 ⁻¹)	q_e (cal) (mg.g ⁻¹)	K_1 (min ⁻¹)	R^2
122,368	15,812	0,02	0,891
Modèle cinétique de pseudo 2 ^{ème} ordre			
q_e (exp) (mg.g ⁻¹)	q_e (cal) (mg.g ⁻¹)	K_2 (g.mg ⁻¹ .min ⁻¹)	R^2
122,368	125	0,0064	0.999

II.10.3. Modèle de diffusion intra-particulaire

Ce modèle peut être exprimé par la relation suivante : $q_t = K_{int}t^{1/2} + C$

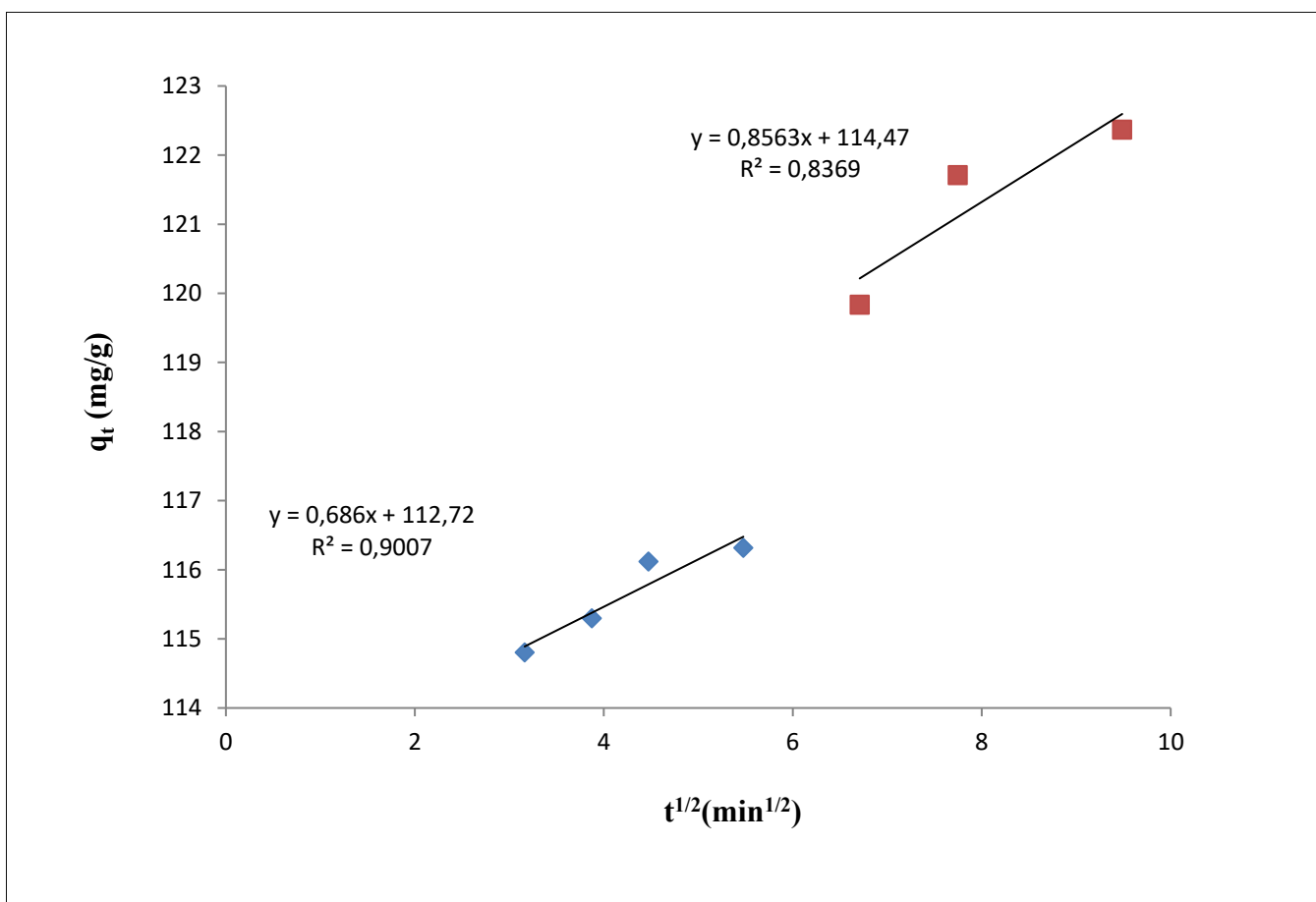


Figure II.16 Cinétique d'adsorption de Rouge Acide 14 de diffusion Intra-particulaire

Tableau II.6: Résultats obtenue de la cinétique d'adsorption de Rouge Acide 14 de diffusion Intra-particulaire

	Étape 1 DIP	Étape 2 DIP
$k_{int}(mg \cdot g^{-1}min^{-1/2})$	0,686	0,856
$C (mg \cdot g^{-1})$	112,7	114,4
R^2	0,900	0,836

D'après les résultats obtenus dans les tableaux II.5 et II.6, on peut conclure que, le cinétique pseudo second ordre est le meilleur modèle pour étudier la cinétique d'adsorption du Rouge acide 14 sur le charbon actif avec un bon coefficient de détermination et une capacité d'adsorption calculée très proche de la valeur expérimentale. Concernant les résultats du modèle de diffusion intra-particulaire indiquent que la diffusion intervient dans le mécanisme d'adsorption, mais qu'elle ne constitue pas l'unique étape contrôlant le phénomène d'adsorption.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de ce travail était d'étudier l'adsorption du colorant Rouge Acide 14 sur un charbon actif dopé par un oxyde métallique, afin d'évaluer les performances de ce matériau dans le traitement des eaux contaminées par les colorants.

Les résultats obtenus ont montré que l'augmentation de la dose d'adsorbant améliore significativement le taux d'élimination du colorant grâce à l'augmentation du nombre de sites actifs disponibles. La dose optimale a été déterminée à **0,8 g/L**, permettant d'obtenir la meilleure efficacité d'élimination du polluant.

Par ailleurs, le pH du milieu influence fortement le processus d'adsorption en modifiant les interactions entre la surface de l'adsorbant et les molécules du colorant. Le meilleur rendement d'élimination a été obtenu à **pH = 2**. L'augmentation du temps de contact favorise l'adsorption jusqu'à l'atteinte de l'équilibre, celui-ci étant atteint après **90 minutes** de contact. Enfin, la température affecte également le phénomène d'adsorption, ce qui confirme l'importance des effets thermodynamiques dans le mécanisme étudié.

L'étude des isothermes d'adsorption a permis d'évaluer l'adéquation des modèles de Langmuir, Freundlich et Temkin aux résultats expérimentaux. Les résultats ont montré que le **modèle de Langmuir** représente le mieux le phénomène d'adsorption du Rouge Acide 14 sur le charbon actif, avec un coefficient de corrélation **$R^2 = 0,995$** et une capacité maximale d'adsorption de **200 mg/g**, traduisant une forte affinité entre l'adsorbant et le colorant.

L'analyse cinétique a révélé que l'adsorption du Rouge Acide 14 suit le **modèle cinétique du pseudo-deuxième ordre**, avec un coefficient de corrélation **R^2 proche de 1**, indiquant une excellente concordance entre les données expérimentales et le modèle théorique. L'étude de la diffusion intra-particulaire a également montré que cette dernière intervient dans le mécanisme global d'adsorption sans toutefois constituer l'étape limitante du processus.

L'étude thermodynamique a permis de déterminer les paramètres thermodynamiques caractéristiques du système étudié. Les résultats obtenus indiquent que l'adsorption du Rouge Acide 14 sur le charbon actif est un processus **physique, spontané et endothermique**, favorisé par l'augmentation de la température.

Bibliographie

En conclusion, les résultats obtenus montrent que le charbon actif dopé par un oxyde métallique constitue un adsorbant efficace pour l'élimination du Rouge Acide 14 à partir de solutions aqueuses. Cette étude met en évidence le potentiel de ce matériau pour le traitement des effluents industriels contenant des colorants et ouvre des perspectives intéressantes pour son application à plus grande échelle dans le domaine de la dépollution des eaux usées.

Pour compléter ce travail, il serait intéressant d'envisager :

- ✓ La caractérisation physicochimique approfondie du matériau adsorbant;
- ✓ L'étude de la régénération et de la réutilisation de l'adsorbant;
- ✓ L'application du procédé à des effluents industriels reels;
- ✓ L'étude d'autres colorants ou mélanges de polluants.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] J. F. Pankow, Aquatic Chemistry Concepts, Lewis Publishers, Chelsea, Michigan (1991).
- [2] M. Daoud, O. Benturki, Activation d'un charbon à base de noyaux de jujubes et application à l'environnement. Adsorption d'un colorant de textile, Revue des Energies Renouvelables SIENR Ghardaïa, 2014, pages 14:155-62.
- [3] H.Kaur, Polluted Environment and Mental Sickness, Shaheed Udham Singh College of Education, Mehlan Chowk, Tehsil Sunam, Distt. Sangrur, March 2015
- [4] Wang, X., Jiang, C., Hou, B., Wang, Y., Hao, C., Wu, J. 2018. "Carbon composite ligninbased adsorbents for the adsorption of dyes." Chemosphere, 206, 587-596.
- [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] Mili A., « Mémoire de magister en chimie université mentouri Constantine », 2009.
- [7] Hedi Ben MANSOUR^{a,b,c*}, Oualid BOUGHZALA^a, Dorra DRIDI^c, Daniel BARILLIER^a, Leila CHEKIR-GHEDIR^{a,b}, Ridha MOSRATI^a « LES COLORANTS TEXTILES SOURCES DE CONTAMINATION DE L'EAU : CRIBLAGE DE LA TOXICITÉ ET DES MÉTHODES DE TRAITEMENT » le 14/10/2010.
- [8] INRS, Dermatoses professionnelles aux colorants, Document pour le médecin de travail, (2004) N °100, 4^{ème} trimestre.
- [9] P. Arnauld, Cours De Chimie Organique, 15^{ème} édition, Dunod éditeur, (1990).
- [10] N. Bouanimba, Modélisation et optimisation de la cinétique de dégradation photocatalytique de polluants organiques en solution, Mémoire de magister, Université Mentouri Constantine Algérie, (2009).
- [11] STRUCTURE-PROPRIETES, E. D. C. (2010). Mohammad-Bassem BILAL (Doctoral Dissertation, Université de Haute Alsace)
- [12] M. Hamzaoui, B. Bestani, N. Benderdouche « The use of linear and nonlinear methods for adsorption isotherm optimization of basic green 4-dye onto sawdust-based activated carbon », J. Mater. Environ. Sci., vol. 9, no 4, p. 1110-1118, 2018.
- [13] S. Ozcan, Y. Şahin Koparal A.S., M.A., Oturan "Degradation of picloram by the electro - Fenton process". J. Hazard. Mater. 153 (1 - 2), 718 - 727.
- [14] Kayser, H. 1881. "Wiedl Ann." 14: 451.

- [15] Deliere, L. 2015. " Adsorption et séparation des gaz rares sur des adsorbants dopés à l'argent." thèse doctorat, Université Claude Bernard-Lyon I.
- [16] Degrément, S. A. 2005. Mémento technique de l'eau. 10ème Ed. *Degrémont-Suez. Rueil Malmaison*, 1718p.
- [17] A., Swiatkowski ., M. Pakula. "Influence of the surface chemistry of modified activated carbon on its electrochemical behaviour in the presence of lead(II) ions". (2004) . vol. 42, pp. 3057 - 3069.
- [18] C.HAIDRA, S.LARBI, Étude thermodynamique et cinétique de l'adsorption des polluants organiques sur Charbon Actif, Mémoire de master, Université de Mostaganem.
- [19] Huchon R. (2006). Activité photocatalytique de catalyseurs déposés sur différents supports (medias) application a la conception d'un photoréacteurs pilote. Thèse de doctorat. Université Claude Bernard – Lyon.
- [20] Guechi E. (2013). 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.
- [21] Hamouche A. (2013). Etude cinétique et thermodynamique de l'adsorption des métaux lourds par l'utilisation des adsorbants naturels. Thèse de doctorat. Université M'Hamed Bougara – Boumerdes.
- [22] Mlle Benamraoui Faouzia, Elimination des colorants cationiques par des charbons actifs synthétisés à partir des résidus de l'agriculture, Diplôme de magister, Université Ferhat Abbas Setif-1, 2014, page 10,11
- [23] 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.
- [24] A. Soria, A. katia. Etude comparative de la cinétique d'adsorption de BM sur le charbon actif entre un lit fluidisé et un réacteur batch. Mémoire de master, (2016).
- [25] B. Mouna, A. Aziza. Elimination du chrome hexavalent par adsorption sur le charbon actif obtenu à partir de liège. Mémoire de master, (2019).
- [26] Dąbrowski, A. (2001). Adsorption-fromtheory to practice. *Advances in Colloid and Interface Science*, 93(1-3), 135–224.
- [27] Y.C.Sharma, C.H.Weng, Removal of chromium (VI) from water and wastewater by using riverbed sand: Kinetic and equilibrium studies. *Journal of Hazardous Materials* 142,p.449–454, (2007).

- [28] Weber W. J, McGinley R.M, Katz L.E., Sorption phenomena in effects on contaminant transport, Water. Research, 1991, 25, p.499-528.
- [29] W. Stumm, J.J. Morgan, Aquatic chemistry, Ed.2, Wiley inter-science J., Wiley & sons (1981).
- [30] R.Desjardins ; Le traitement des eaux ; 2eme Edition, école polytechnique de Montréal ;(1997).
- [31] SID Nabila, Valorisation des déchets agroalimentaires (cas des coquilles de noix et grains d'olives, Mémoire de master, université KASDI MERBAH OUARGLA, 2019.
- [32] Ho Y.S., McKay G. (1999). Competitive Sorption of Copper and Nickel Ions from Aqueous Solution Using Peat. *Adsorption* 5: 409-417.
- [33] Xu. J., Chen. L., Qu. H., Jiao. Y., Xie. J., Xing. G., Preparation and characterization of activated carbon from reedy grassleaves by chemical activation with H₃PO₄. *Applied Surface Science* 320 (2014) 674–680.
- [34] F. Rodriguez-Reinoso. Carbon, 36, (1998), pp 159.
- [35] Villa p, (2003). La culture de l'olivier. Edition De Vecchi S.A.Paris. (78).
- [36] N. Yahiaoui. Etude 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), pp 35, 37, 38, 45.
- [37] Mémento Technique de l'eau ,9 éme édition dégrément suez, Paris, France, 1989.
- [38] 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).
- [39] M.BENYAH, Étude sur les principaux Colorants alimentaires de large consommation en Algérie par les enfants. Mémoire de master, Université de Tlemcen, (2023-2024).
- [40] Y.HACHELAF, A.FOURLOUL, Etude de l'élimination de la Rhodamine B par le procédé d'adsorption sur un adsorbant d'origine végétale, Mémoire de master, Université de Mostaganem, (2024-2025).