

Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche

Scientifique

Université de Ghardaïa

Faculté des Sciences et Technologies

Département de tronc communs en sciences et technologies



Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : Sciences de la Matière

Filière : Chimie

Spécialité : Chimie analytique

Intitulé

**Production et caractérisation d'un adsorbant biosourcé à
partir des déchets de palmier dattier**

Présenté par :

- **Amna Bahaz**
- **Nivine Maroua Rouighi**

Soutenu publiquement le 7 juin 2026 devant le jury composé de :

Hadj Daoud Bouras	Professeur, Université de Ghardaïa	Président
Mounir Daoud	Professeur, Université de Ghardaïa	Encadrant
Djehad Bentarfa	Maître de conférences « B », Université de Ghardaïa	Examinatrice

Année universitaire : 2025/2026

Résumé

Cette étude a pour objectif l'élaboration d'un biosorbant à faible coût, obtenu à partir de pétiole du palmier dattier, destiné à l'élimination du colorant organique orange de méthyle (OM) présent dans les eaux contaminées, par un procédé d'adsorption. Le matériau adsorbant (PT) a été chimiquement activé à l'aide d'hydroxyde de potassium (KOH), puis caractérisé par la détermination du point de charge nulle (pH_{PZC}), évalué 9,5.

L'étude expérimentale a porté sur l'influence de plusieurs paramètres opératoires, notamment le pH, la température, le temps de contact et la concentration initiale du colorant, afin d'évaluer les performances adsorption du matériau préparé. Les résultats obtenus montrent une capacité d'adsorption élevée du biosorbant vis-à-vis de l'orange de méthyle.

L'analyse des données expérimentales révèle un bon ajustement aux modèle cinétique de pseudo-second ordre, ainsi qu'aux modèle d'isotherme de Langmuir. La capacité maximale d'adsorption (Q_m) déterminée à partir du modèle de Langmuir a été estimée à $51,8 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. Par ailleurs, l'étude thermodynamique indique que le processus d'adsorption est spontané et endothermique.

À la lumière de ces résultats, le biosorbant élaboré apparaît comme une alternative prometteuse, économique et efficace pour l'élimination des polluants organiques dans les eaux usées, avec un potentiel d'application dans les technologies de traitement des eaux.

Mots-clés :

Pétiole de Palmier Dattier ; Orange de Méthyl ; Adsorption ; Matériau Adsorbant ; Activation chimique

Abstract

In this study, a low-cost biosorbent was prepared from date palm (*Phoenix dactylifera* L.) petioles and chemically activated with potassium hydroxide (KOH) for the adsorption of Methyl Orange (MO) from aqueous solutions. The prepared material (PT) was characterized by determining its point of zero charge (pH_{PZC}), which was found to be 9.5.

The adsorption performance of the biosorbent was evaluated by investigating the effects of pH, temperature, contact time, and initial dye concentration. The results showed that the prepared biosorbent effectively removed Methyl Orange from water, with a maximum adsorption capacity Q_m of 51.8 mg/g. The adsorption kinetics were best described by the pseudo-second-order model, while the equilibrium data fitted the Langmuir isotherm, indicating monolayer adsorption on a homogeneous surface. In addition, thermodynamic analysis showed that the adsorption process was spontaneous and endothermic.

Overall, the results suggest that KOH-treated date palm petioles can serve as an effective, inexpensive, and environmentally friendly biosorbent for the removal of organic dyes from wastewater, making this material a promising candidate for future water treatment applications.

Keywords:

Date Palm Petiole; Methyl Orange; Adsorption; Adsorbent Material; Chemical Activation

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تحضير مادة حيوية مازة منخفضة التكلفة انطلاقاً من كرب نخيل التمر، وذلك بهدف إزالة صبغة الميثيل البرتقالي (Methyl Orange, MO) من المياه الملوثة باستعمال تقنية الامتزاز. تم تنشيط المادة المازة (PT) كيميائياً باستخدام هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH)، ثم توصيفها من خلال تحديد نقطة الشحنة الصفرية (pH_{PZC})، والتي قُدرت بـ 9.5.

شملت الدراسة التجريبية تقييم تأثير عدة عوامل تجريبية، من بينها الـ pH، ودرجة الحرارة، وزمن التلامس، والتركيز الابتدائي للصبغة، وذلك من أجل دراسة كفاءة المادة المحضرة في عملية الامتزاز.

يُبين تحليل النتائج التجريبية توافق عملية الامتزاز بشكل جيد مع نموذج الحركة من الرتبة الثانية الزائفة، بالإضافة إلى نموذج لانغمير للإيزوثرمات. وقد بلغت السعة القصوى للامتزاز (Q_m) المحسوبة وفق نموذج لانغمير 51.8 mg/g. كما أظهرت الدراسة الترموديناميكية أن عملية الامتزاز تلقائية وماصة للحرارة.

وبناءً على هذه النتائج، تبيّن أن المادة الحيوية المازة المحضرة تُعد بديلاً واعداً، اقتصادياً وفعالاً لإزالة الملوثات العضوية من المياه المستعملة، مع إمكانية تطبيقها في تقنيات معالجة المياه.

الكلمات المفتاحية:

كرب نخيل التمر؛ الميثيل البرتقالي؛ الامتزاز؛ المادة المازة؛ التنشيط الكيميائي.

Remerciements

*À celui qui nous a appris que le chemin du savoir ne se construit qu'avec
patience et persévérance,*

à celui qui a été pour nous un excellent enseignant, un guide,

à notre honorable professeur et encadreur,

Pr. Mounir Daoud

*Nous restons aujourd'hui incapables d'exprimer toute notre gratitude pour le
soutien, les conseils et les encouragements que vous nous avez apportés tout
au long de la réalisation de ce mémoire.*

*Vous avez été pour nous un véritable soutien dans chaque moment de difficulté
et d'hésitation, ainsi qu'une lumière éclairant notre chemin dans le domaine
de la recherche et du savoir.*

*Nous vous dédions ce modeste travail, qui n'aurait jamais pu être achevé sans
la grâce de Dieu, puis grâce à vos efforts, votre sincérité et votre dévouement.*

*Nous prions Dieu de vous accorder santé, bonheur et réussite, et de vous
récompenser pour tout ce que vous nous avez transmis.*

*Veillez trouver ici l'expression de notre profond respect, de notre
reconnaissance et de notre fidélité.*

Merci infiniment.

Bahaz Amina

Rouighi nivine maroua

Dédicace

Louange à Allah, une louange digne de Sa grandeur et de Son immense bienfait. Louange à Allah par la grâce duquel les bonnes œuvres s'accomplissent, Lui qui a éclairé notre chemin vers le savoir et nous a permis d'atteindre ce moment béni. À Lui les louanges, du début jusqu'à la fin, en toute circonstance.

Les difficultés que j'ai rencontrées tout au long de mon parcours m'ont appris que la force naît des épreuves, et que chaque obstacle n'est pas une fin, mais un nouveau départ vers le meilleur. Après dix-huit années de travail, de persévérance et de patience, je remercie Allah de m'avoir permis d'atteindre cet objectif et de réaliser cette réussite, fruit d'un long effort et d'un grand espoir. J'ai également compris que le véritable succès rend l'être humain plus humble et plus déterminé à avancer encore davantage.

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, qui ont toujours été mon soutien, ma force et ma source de prières tout au long de ma vie. Ils m'ont entourée de leur amour et de leurs encouragements sans jamais se lasser. Qu'Allah les protège, leur accorde santé, bonheur et longue vie.

À ma chère grand-mère, qu'Allah lui fasse miséricorde, dont le souvenir, la tendresse et les prières sincères demeurent à jamais gravés dans mon cœur. Je prie Allah de faire de sa tombe un jardin parmi les jardins du Paradis et de lui accorder la plus vaste de Ses miséricordes.

À mes chers frères et sœurs, qui ont toujours été une source d'amour, de soutien et de réconfort tout au long de mon parcours, et dont la présence dans ma vie est une véritable bénédiction.

À ma chère amie, Rouighi Nivine Maroua, qui a partagé avec moi les moments de fatigue, d'inquiétude et de doute avant les instants de joie et de réussite.

Je dédie cet ouvrage à celui qui m'a soutenu dans mes moments les plus difficiles ,à celui qui m'a donné de la force par ses paroles et du courage par sa présence.

Je dédie également ce travail à toutes les personnes qui m'ont offert un mot bienveillant, un soutien sincère ou une prière venant du cœur, et qui ont contribué, de près ou de loin, à la poursuite de ce chemin.

Amina

Dédicace

Louange à Allah, une louange digne de la majesté de Son noble visage et de la grandeur de Son autorité. Louange à Allah par la grâce duquel les bonnes œuvres s'accomplissent et grâce à qui les objectifs et les souhaits se réalisent.

À ma chère famille...

Vous êtes le plus grand bienfait qu'Allah m'ait accordé et la source de ma force à chaque étape de ce parcours. Grâce à vous, les difficultés se sont dissipées et, par votre soutien et votre patience, ce rêve que j'ai longtemps poursuivi s'est réalisé.

Ce succès ne m'appartient pas uniquement, mais il est le fruit de votre soutien constant, de vos sacrifices sincères et de votre affection qui a toujours été mon refuge et mon appui dans les moments de faiblesse. Vous méritez avant moi toute la reconnaissance et la gratitude.

À ma chère amie, Bahaz Amina...

Je te remercie pour ton amitié sincère, pour ta présence à mes côtés dans les moments de fatigue et d'inquiétude, et pour tes paroles qui ont toujours été une source de force et de soutien pour moi. Ta présence a rendu ce parcours plus léger et plus beau, et a donné au succès un goût particulier et précieux.

À vous tous, je dédie ce modeste travail, en témoignage de ma profonde gratitude et de ma fidélité, et en reconnaissance de tout l'amour, du soutien et de l'aide que vous m'avez apporté.

Nivine Maroua

Liste des tableaux

Tableau 1 Produits chimiques et équipements utilisés	35
Tableau 2 Caractéristiques physico-chimiques de l'orange de méthyle (OM) (Melouki <i>et al.</i> , 2020)	38
Tableau 3 Paramètres de la modélisation cinétique de l'adsorption	48
Tableau 4 Paramètres de la modélisation des isothermes d'adsorption	51
Tableau 5 Paramètres thermodynamiques de l'adsorption du l'orange de méthyle (OM)	54
Tableau 6 Étude comparative de la capacité maximale d'adsorption de l'orange de méthyle (OM).....	54

Liste des figures

Figure 1 Agencement et composition de la cellulose, hémicellulose et lignine (Qin et al., 2022)	17
Figure 2 Groupements fonctionnels de surfaces	21
Figure 3 Schéma de mécanisme de transport de l'adsorbat au sein d'un grain (1- diffusion externe, 2- diffusion interne (dans les pores), 3- diffusion de surface) (Kärger et al., 2021).....	25
Figure 4 Différents types d'isotherme d'adsorption (Giles et al., 1974).....	27
Figure 5 Classification des colorants azoïques selon la couleur obtenue.....	32
Figure 6 Application des colorants textiles lors du procédé de teinture industrielle	33
Figure 7 Impacts directs et indirects des colorants (Slama et al., 2021)	34
Figure 8 Représentation schématique de l'absorbance par UV	36
Figure 9 Protocole de préparation du biosorbant à partir des pétioles de palmier dattier	37
Figure 10 Structure chimique de l'orange de méthyle.....	38
Figure 11 Préparation des solutions du colorant Orange de méthyle (OM).....	38
Figure 12 Courbe d'étalonnage de l'orange de méthyle (MO)	43
Figure 13 Courbe de détermination du pH_{PZC}	44
Figure 14 Courbe cinétique d'adsorption de l'Orange de méthyle (MO)	45
Figure 15 Modélisation de la cinétique d'adsorption du (OM) par pseudo premier ordre.	46
Figure 16 Modélisation de la cinétique d'adsorption du (OM) par pseudo second ordre.	47
Figure 17 Isotherme d'adsorption de l'orange de méthyle (MO)	49
Figure 18 Modélisation de l'isotherme d'adsorption selon le modèle de Langmuir....	50
Figure 19 Modélisation de l'isotherme d'adsorption selon le modèle de Freundlich.	51
Figure 20 Effet du pH sur l'adsorption de l'orange de méthyle (MO)	53

Liste des abréviations

PT	Pétiole traite
Abs	Absorbance (nm)
OM	Orange de Méthyle
pH _{PZC}	pH de point de charge nulle
PPO	Modèle pseudo premier ordre
PSO	Modèle pseudo second order
Q _m	La capacité maximale d'adsorption (mg/g)
Q _t	Quantité adsorbée à l'instant t (mg/ g)
Q _e	Quantité adsorbée à l'équilibre (mg/ g)
C ₀	Concentrations de l'adsorbat à l'état initial (mg /L)
C _e	Concentration de l'adsorbant à l'équilibre (mg /L)
C _t	Concentrations de l'adsorbat à l'instant t (mg /L)
m	Masse adsorbant (g)
R (%)	Le taux d'adsorption
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
n	L'intensité d'adsorption
V	Volume de la solution (substrat) (L)
K _L	Coefficient de Langmuir (L/mg)
K _F	Le premier coefficient de l'équation de Freundlich qui représente la capacité d'adsorption mg/g (L/mg) ^{1/n}
K _C	Constante thermodynamique de distribution d'adsorption
K ₁	Constante de vitesse d'adsorption de PPO (min ⁻¹)
K ₂	Constante de vitesse d'adsorption de PSO (g.mg ⁻¹ .min ⁻¹)
R	Constante des gaz parfaits (8,314 J/mol K)
T	Température absolue (K)
ΔG°	Le changement d'énergie de Gibbs (kJ/mol)
ΔH°	Le changement d'enthalpie (J/mol)
ΔS°	Le changement d'entropie (J/mol. K)

Sommaire

Résumé.....	1
Liste des tableaux.....	7
Liste des figures.....	8
Liste des abréviations	9
Sommaire.....	10
Introduction Générale	13
Chapitre I	15
Matériaux Adsorbants.....	15
I.1 Introduction	15
I.2 Précurseur des biomatériaux.....	15
I.2.1 Définition de la biomasse	15
I.2.2 Composition chimique de la biomasse	16
I.2.2.1 Cellulose.....	16
I.2.2.2 Hémicellulose	16
I.2.2.3 Lignine.....	17
I.3 Méthodes d'activation de la biomasse	17
I.3.1 Traitement Thermochimique	18
I.3.1.1 Activation physique	18
I.3.1.2 Activation chimique.....	18
I.3.1.3 Activation combinée.....	19
I.3.2 Traitement chimique de la biomasse	19
I.4 Propriétés des matériaux adsorbants issus de la biomasse	19
I.4.1 Propriétés physiques	19
I.4.1.1 Surface spécifique.....	19
I.4.1.2 Porosité et structure poreuse	20
I.4.2 Propriétés chimiques.....	20
I.5 Caractérisation du biosorbant.....	21
I.5.1 Détermination du pH au point de charge nulle (pH_{PZC}).....	21
I.6 Applications des biomatériaux adsorbants dans le traitement des eaux.....	21
I.6.1 Élimination des métaux lourds	21
I.6.2 Élimination des colorants organiques	22
I.6.3 Adsorption des composés organiques toxiques	22
I.6.4 Traitement des eaux usées industrielles et domestiques	22
Chapitre II.....	23
Généralité sur	23

l'adsorption.....	23
II.1 Introduction.....	24
II.2 Types d'adsorption	24
II.2.1 Adsorption physique	24
II.2.2 Adsorption chimique.....	24
II.3 Mécanisme d'adsorption	24
II.3.1 Diffusion externe (transfert de masse externe).....	24
II.3.2 Diffusion interne (transfert intra-particulaire).....	25
II.3.1 Diffusion de surface	25
II.4 Cinétique d'adsorption	25
II.4.1 Modèle cinétique pseudo-première ordre (modèle Lagergren).....	25
II.4.2 Modèle du cinétique pseudo-seconde ordre	26
II.5 Isotherme d'adsorption	26
II.5.1 Classification des isothermes d'adsorption	26
II.5.2 Modalisation des isothermes d'adsorption	27
II.5.2.1 Isothermes de Freundlich	27
II.5.2.2 Isothermes de Langmuir.....	27
II.6 Facteur influençant d'adsorption	28
II.7 Paramètre thermodynamique	29
Chapitre III	30
Colorants	30
III.1 Introduction	31
III.2 Classification des colorants.....	31
III. 2.1 Selon la structure chimique.....	31
III. 2.2 Selon l'origine.....	32
III. 2.3 Selon l'application	32
III.3 Impact des colorants sur l'environnement	33
III.4 Toxicité des colorants.....	34
III.5 Techniques de traitement des colorants	34
III.5.1 Adsorption	34
III.5.2 Techniques physico-chimiques	35
Partie.....	34
Expérimentale	34
IV.1 Introduction	35
IV.2 Objectif du travail	35
IV.3 Matériels, produits chimiques et équipements utilisés	35
IV.4 .1. Principe de fonctionnement du spectroscopie UV-Visible	36

IV.5 Synthèse du matériau	36
IV.5.1. Préparation de l'adsorbant (biosorbant).....	36
IV.5.2. Synthèse du biosorbant.....	37
IV.6 Caractérisations chimiques	37
IV.6.1. Détermination du pH de point de charge nulle (pH_{PZC}).....	37
IV.7 Préparation d'une solution adsorbant (colorant)	37
IV.7.1. Préparation de solutions files de OM.....	38
IV.8 Courbe d'étalonnage du OM	39
IV.9 Etude d'adsorption de l'orange de méthyle (MO)	39
IV.9.1 Cinétique d'adsorption.....	39
IV.9.2. Isotherme d'adsorption	40
IV.9.3. Effet du pH.....	40
IV.9.4. Effet de la température.....	40
Résultat	42
Et Discussion	42
V.1 Introduction	43
V.2 Courbe d'étalonnage	43
V.3 Caractérisations chimiques	44
V.3.1 Détermination du pH de point de charge nulle (pH_{PZC})	44
V.4 Etude de la cinétique d'adsorption	45
V.4.1 Modèle pseudo premier ordre (PPO).....	45
V.4.2 Modèle pseudo seconde ordre (PSO).....	46
V.5 Etude de l'isotherme d'adsorption du OM	48
V.5.1 Modélisation de Langmuir	49
V.5.2 Modélisation Freundlich	50
V.6 Effet du pH	52
V.7 Etude thermodynamique	53
V.8 Etude comparatives	54
Conclusion Générale	55
Référence	56

INTRODUCTION

GENERALE



Introduction Générale

L'eau constitue une ressource fondamentale indispensable à la vie ainsi qu'au développement socio-économique. Toutefois, elle est de plus en plus exposée aux pollutions issues des activités industrielles et humaines.

Parmi les principaux contaminants, les colorants industriels représentent une problématique majeure, en raison de leur présence fréquente dans les eaux usées des industries textiles, du cuir et du papier, ainsi que de leur structure chimique complexe qui les rend difficiles à éliminer et fortement résistants à la biodégradation (Khongthaw et al., 2024)

Ces composés engendrent des impacts négatifs significatifs sur l'environnement et la santé humaine, ce qui rend nécessaire le développement de solutions efficaces de traitement des eaux. Dans ce contexte, la technique d'adsorption se distingue comme l'une des méthodes les plus performantes, simples et économiquement avantageuses ((Bethi et al., 2021).

Le principe c'est repose sur le transfert des molécules de colorants de la phase liquide vers la surface d'un matériau solide appelé adsorbant. Plusieurs matériaux peuvent être utilisés à cet effet, notamment les argiles, les zéolithes, la biomasse et le charbon actif, ce dernier étant particulièrement efficace en raison de sa grande surface spécifique et de son forte capacité d'adsorption.

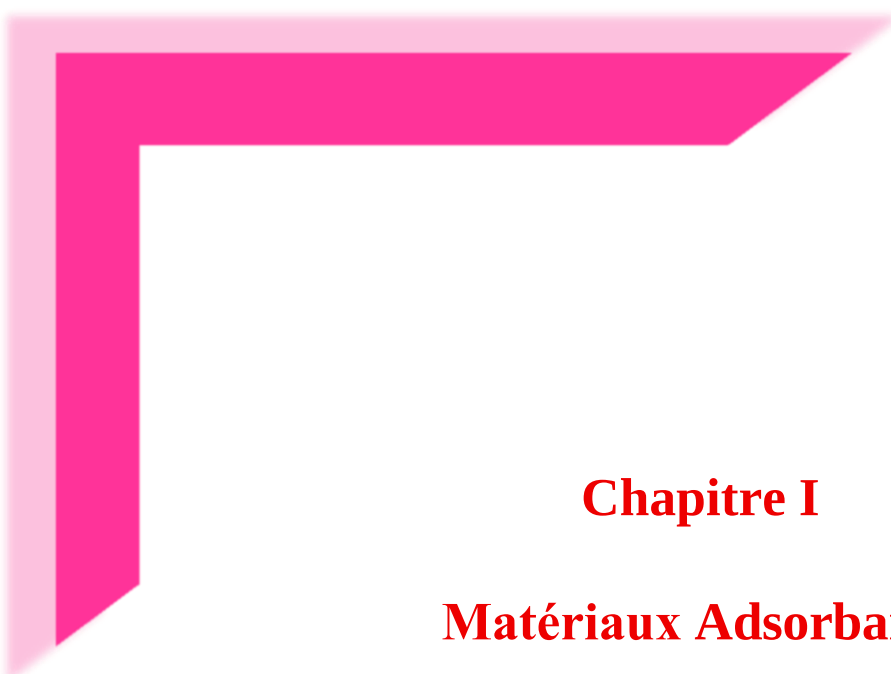
Dans ce travail, nous présentons les résultats de l'étude d'adsorption du colorant orange de méthyle sur une biomasse issue du pétiole de palmier dattier. Pour mener cette étude, plusieurs paramètres ont été analysés, notamment le temps de contact, la masse de l'adsorbant, l'influence du pH et la température et détermination du point de charge nulle (pHpzc).

Ce travail est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique portant sur les matériaux adsorbants, le phénomène d'adsorption ainsi que les colorants en général.

Le deuxième chapitre présente la partie expérimentale de l'étude, incluant les matériaux et les méthodes utilisés, ainsi que les protocoles analytiques appliqués.

Le troisième chapitre est dédié à la présentation, l'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux.



Chapitre I

Matériaux Adsorbants

I.1 Introduction

Les adsorbants sont des matériaux solides qui peuvent fixer et retenir à leur surface des substances nommées adsorbats, par le biais d'un phénomène appelé adsorption. Ce processus repose sur des interactions physiques ou chimiques entre la surface de l'adsorbant et les molécules présentes dans un milieu liquide ou gazeux. La capacité d'adsorption dépend principalement de la surface spécifique, de la porosité, ainsi que de la présence de groupes fonctionnels actifs à la surface du matériau (Abegunde et al., 2020). L'adsorption est largement employée dans divers domaines, notamment le traitement des eaux, la purification de l'air, la séparation des gaz et plusieurs procédés industriels. Parmi les adsorbants les plus couramment utilisés figurent le charbon actif, les zéolithes, les argiles, ainsi que d'autres matériaux poreux capables de capturer différents polluants présents dans l'eau ou l'air (Rouquerol et al., 2013).

I.2 Précurseur des biomatériaux

I.2.1 Définition de la biomasse

La biomasse représente une source d'énergie renouvelable constituée de différentes matières organiques issues de la photosynthèse, un processus utilisant le dioxyde de carbone, l'eau et l'énergie solaire présents dans l'atmosphère (Zhang et al., 2010). Elle regroupe notamment les végétaux, les animaux ainsi que les micro-organismes.

Contrairement aux combustibles fossiles, qui sont des ressources non renouvelables, la biomasse est largement disponible dans la nature et possède un potentiel important pour la production d'énergie, telle que la chaleur et l'électricité, ainsi que pour la production de carburants renouvelables comme les bio-huiles et le biogaz.

Elle constitue également une source intéressante de composés chimiques à forte valeur ajoutée (Qin et al., 2022). En outre, on utilise la biomasse riche en composés lignocellulosiques et en fonctions chimiques actives pour fabriquer des adsorbants biosourcés. Ces adsorbants biosourcés permettent d'éliminer les polluants présents dans les eaux usées.

I.2.2 Composition chimique de la biomasse

La biomasse contient de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine, et les proportions de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine changent selon l'origine et la nature du matériau. La cellulose, l'hémicellulose et la lignine sont importants pour préparer le charbon actif. Le charbon actif possède une structure poreuse, une surface très grande et une forte capacité d'adsorption. La structure poreuse, la surface très grande et la forte capacité d'adsorption du charbon actif permettent au charbon actif d'éliminer les polluants dans l'eau et dans l'air (Qin et al., 2022).

I.2.2.1 Cellulose

La cellulose constitue le principal composant de la biomasse, Il s'agit d'un polymère naturel de grande masse moléculaire dont l'unité de base est le cellobiose, caractérisé par un degré de polymérisation élevé ($DP > 1000$). Ce polymère est formé d'unités de β -D-glucopyranose reliées entre elles par des liaisons glycosidiques de type β ($1 \rightarrow 4$), avec une formule chimique générale $(C_6H_{10}O_5)_n$, où n représente le nombre d'unités β -D-glucopyranose. Les chaînes de cellulose s'associent entre elles grâce à des liaisons hydrogène et à des interactions de Van der Waals, conduisant à la formation de fibrilles de cellulose qui confèrent au matériau une bonne résistance mécanique (Ragauskas et al., 2014).

I.2.2.2 Hémicellulose

L'hémicellulose est un polymère ramifié qui se compose de différents monomères de sucre. L'hémicellulose renforce la paroi végétale en liant les fibres de cellulose sous forme de microfibrilles et en s'associant à la lignine voir (Figure 1). L'hémicellulose contribue ainsi au renforcement de la structure des cellules végétales (Azelee et al., 2023). Contrairement à la cellulose, l'hémicellulose possède un degré de polymérisation plus faible, généralement compris entre 100 et 200, ce qui rend l'hémicellulose plus sensible à la dégradation thermique. La molécule contient plusieurs monosaccharides. Ces monosaccharides sont surtout des pentoses comme le xylose et l'arabinose, et des hexoses tels que le mannose, le galactose, le glucose, l'acide glucuronique et l'acide galacturonique (Qin et al., 2022).

I.2.2.3 Lignine

La lignine est un polymère aromatique de nature phénolique. La lignine possède des structures amorphes, relativement stables, hydrophobes et d'une masse moléculaire élevée. Les principaux constituants de la lignine sont les alcools coumarylique, coniférylique et sinapylique voir (Figure 1). Chaque alcool porte un noyau benzénique dans sa structure chimique (Ragauskas et al., 2014). La lignine est souvent décrite comme une colle naturelle des cellules végétales. La lignine assure l'imperméabilité, le soutien mécanique et la protection contre les attaques oxydatives et microbiennes ((Mohammadi & Mahmoudi Alemi, 2021)).

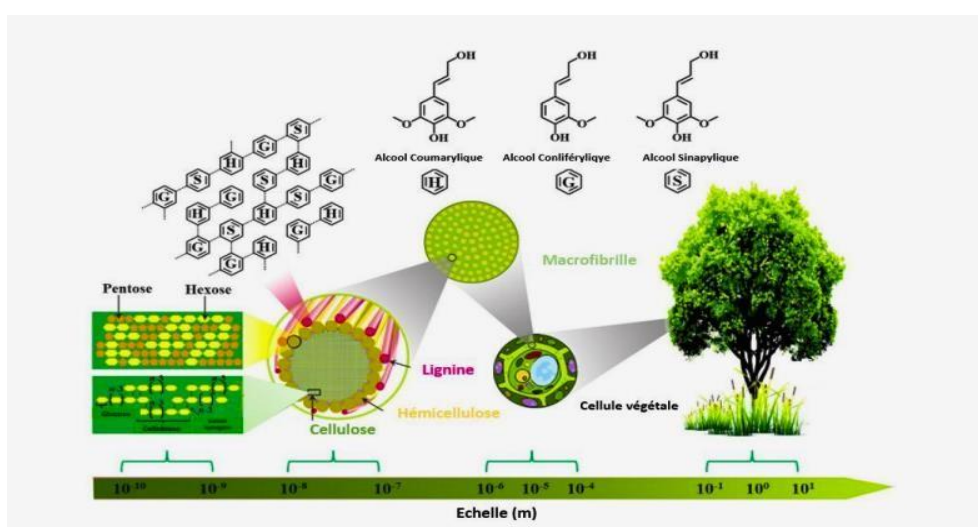


Figure 1 Agencement et composition de la cellulose, hémicellulose et lignine (Qin et al., 2022)

I.3 Méthodes d'activation de la biomasse

La biomasse naturelle contient des impuretés qui réduisent l'efficacité de la biomasse naturelle à adsorber les polluants, comme les métaux lourds et les colorants dans l'eau. Pour rendre la biomasse naturelle plus efficace, la biomasse naturelle est soumise à des traitements d'activation. Les traitements d'activation augmentent la surface spécifique, la porosité et le nombre de groupes fonctionnels actifs à la surface du matériau. Les méthodes principales sont l'activation physique, l'activation chimique et l'activation combinée. La préparation de la biomasse comprend le broyage et le tamisage. Le broyage et le tamisage réduisent la taille des particules et augmentent la surface de contact (Ragauskas et al., 2014).

I.3.1 Traitement Thermochimique

I.3.1.1 Activation physique

L'activation physique consiste à soumettre la biomasse à des traitements thermiques afin de développer sa porosité et sa surface spécifique, sans utilisation de réactifs chimiques.

Les principales techniques d'activation physique sont les suivantes

- **Pyrolyse ou carbonisation** : elle consiste à chauffer la biomasse en absence d'oxygène (sous atmosphère inerte tel que N_2) à des températures supérieures à $400^{\circ}C$ afin d'éliminer les composés volatils et de former une structure riche en carbone.
- **Gazéification partielle** : cette méthode repose sur l'utilisation de vapeur d'eau (H_2O) ou de dioxyde de carbone (CO_2) à haute température, généralement comprise entre 850 et $1100^{\circ}C$. Ce traitement favorise l'ouverture et l'élargissement des pores du matériau carbonisé (Foo & Hameed, 2010).

I.3.1.2 Activation chimique

L'activation chimique consiste à traiter la biomasse à l'aide d'agents chimiques avant ou pendant l'étape de carbonisation, dans le but d'augmenter la surface spécifique et d'introduire des groupes fonctionnels actifs à la surface du matériau. Les principaux agents chimiques utilisés sont :

- **Les agents alcalins** : tels que $NaOH$ et KOH , qui favorisent la formation de micropores et augmentent la réactivité de la surface.
- **Les acides** : comme H_3PO_4 et H_2SO_4 , qui contribuent au développement de la porosité et à l'élimination de certaines impuretés.
- **Les sels** : notamment K_2CO_3 , qui agit comme catalyseur de carbonisation et améliore la structure poreuse du matériau.

Cette méthode présente plusieurs avantages, notamment une porosité plus développée et une capacité d'adsorption plus élevée comparativement à l'activation physique (W.-J. Liu et al., 2015).

I.3.1.3 Activation combinée

L'activation combinée consiste à associer des traitements physiques et chimiques afin d'améliorer les propriétés adsorbantes des matériaux. En général, une étape de traitement thermique est réalisée avant la modification chimique. Cette approche permet non seulement d'augmenter la surface spécifique du matériau, mais également d'enrichir sa surface en groupements fonctionnels actifs. La synergie entre ces deux traitements contribue à renforcer les performances d'adsorption vis-à-vis de divers polluants, en particulier les colorants. De nombreuses études ont ainsi montré que les méthodes combinées constituent une stratégie efficace pour la production de charbons activés à partir de déchets agricoles, offrant des résultats particulièrement prometteurs en matière d'adsorption (Shan et al., 2022).

I.3.2 Traitement chimique de la biomasse

L'activation chimique de la biomasse consiste à traiter la biomasse par des agents chimiques tels que les acides (H_2SO_4 et H_3PO_4) ou les bases (KOH) afin de modifier sa structure de surface et d'améliorer ses propriétés adsorbantes. Ce traitement permet d'éliminer certaines impuretés, de développer de nouveaux groupes fonctionnels actifs à la surface du biosorbant.

I.4 Propriétés des matériaux adsorbants issus de la biomasse

Les matériaux adsorbants dérivés de la biomasse présentent diverses propriétés physiques et chimiques qui expliquent leur efficacité dans l'élimination des polluants présents dans les milieux aqueux et gazeux. Ces caractéristiques jouent un rôle déterminant dans les mécanismes d'adsorption et influencent directement les performances du matériau ainsi que sa capacité à retenir les substances indésirables (Shan et al., 2022).

I.4.1 Propriétés physiques

I.4.1.1 Surface spécifique

La surface spécifique correspond à la surface totale disponible pour l'adsorption par unité de masse de l'adsorbant. Elle constitue l'un des paramètres fondamentaux qui

gouvernent les phénomènes d'adsorption. En effet, une surface spécifique plus développée offre un nombre plus important de sites actifs susceptibles d'interagir avec les molécules adsorbées. Par conséquent, l'augmentation de cette surface se traduit généralement par une amélioration de la capacité d'adsorption du matériau et de son efficacité dans l'élimination des polluants. Ainsi, la surface spécifique est souvent considérée comme un indicateur clé de la performance des adsorbants (Bardestani et al., 2019).

I.4.1.2 Porosité et structure poreuse

La porosité correspond à la fraction de vide présente dans un matériau adsorbant et peut atteindre jusqu'à 80 % du volume total du matériau. Cette propriété dépend principalement de la taille des pores, de leur forme ainsi que de leur répartition dans la structure interne du matériau. La structure poreuse joue un rôle essentiel dans le transfert et la diffusion des molécules adsorbées vers les sites actifs. Selon leur diamètre, les pores sont généralement classés en trois catégories principales :

- **Micropores** : diamètre inférieur à 2 nm.
- **Mésopores** : diamètre compris entre 2 et 50 nm.
- **Macropores** : diamètre supérieur à 50 nm.

La présence combinée de ces différentes catégories de pores améliore l'accessibilité des polluants à la surface adsorbant et contribue à l'augmentation de l'efficacité du processus d'adsorption.

I.4.2 Propriétés chimiques

Les matériaux adsorbants présentent à leur surface une variété de groupements fonctionnels, tels que les groupements carboxyliques, anhydrides carboxyliques, phénoliques, carbonyles et lactones. Ces fonctions chimiques jouent un rôle clé dans les processus d'adsorption, car elles modulent le caractère hydrophile du matériau ainsi que ses propriétés électrochimiques et acido-basiques. La présence de ces groupements facilite les interactions entre la surface adsorbante et les molécules ou ions polluants, ce qui améliore significativement la capacité d'adsorption du matériau (Qin et al., 2022).

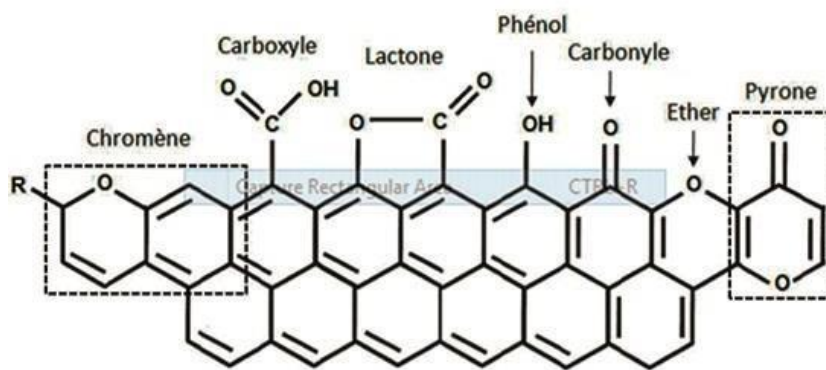


Figure 2 Groupements fonctionnels de surfaces

I.5 Caractérisation du biosorbant

I.5.1 Détermination du pH au point de charge nulle (pH_{PZC})

Le pH au point de charge nulle (pH_{PZC}) désigne le pH auquel la surface du matériau adsorbant ne porte aucune charge nette. Ce paramètre est crucial, car il influence les interactions électrostatiques entre la surface du matériau et les espèces adsorbées dans la solution. En fonction du pH du milieu, la surface peut devenir soit positivement, soit négativement chargée, ce qui impacte directement l'adsorption des ions et des molécules polluantes (Khalifa et al., 2023).

I.6 Applications des biomatériaux adsorbants dans le traitement des eaux

Les biomatériaux adsorbants sont largement utilisés dans le traitement des eaux contaminées en raison de leur faible coût, de leur disponibilité abondante et de leur caractère écologique. Issus de différentes sources de biomasse, telles que les déchets agricoles, les résidus végétaux, les noyaux ou encore les coques, ces matériaux possèdent des groupements fonctionnels capables de fixer divers polluants présents dans l'eau. Parmi leurs principales applications, on peut citer :

I.6.1 Élimination des métaux lourds

Les biomatériaux adsorbants sont utilisés pour éliminer plusieurs métaux lourds présents dans les effluents industriels, notamment le plomb (Pb^{2+}), le cadmium (Cd^{2+}), le cuivre (Cu^{2+}) et le chrome (Cr^{6+}). Les groupements fonctionnels présents à la surface

de la biomasse, tels que les groupements hydroxyles, carboxyles et phénoliques, interagissent avec les ions métalliques et favorisent leur fixation à la surface du matériau adsorbant, améliorant ainsi l'efficacité du procédé d'adsorption (Crini & Lichtfouse, 2018).

I.6.2 Élimination des colorants organiques

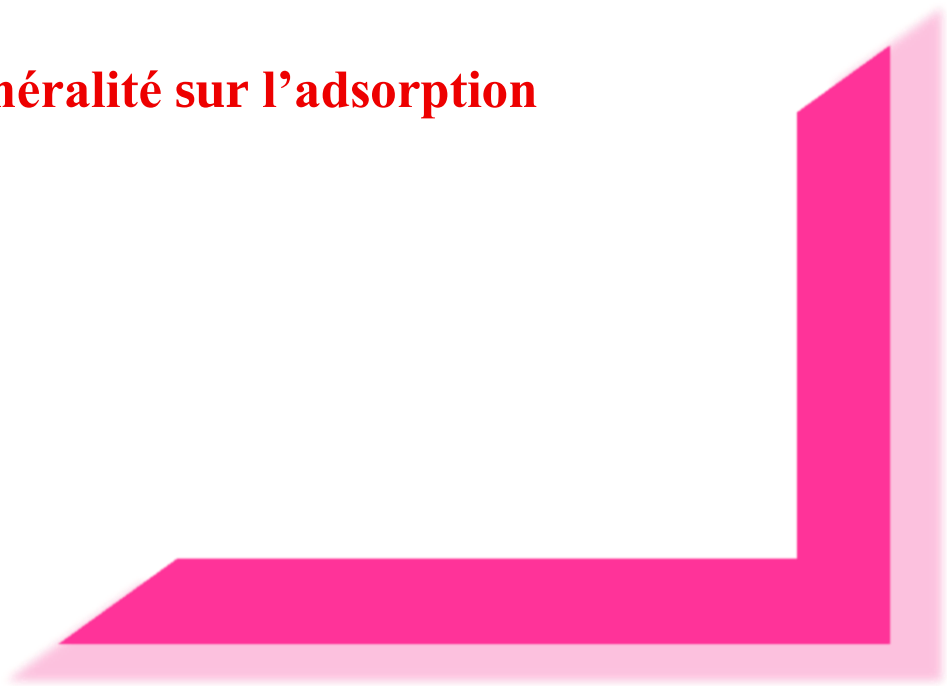
Les biomatériaux adsorbants sont couramment utilisés pour éliminer les colorants organiques provenant des industries textiles, du cuir et du papier. Leur structure poreuse et leur grande surface spécifique leur permettent de capturer efficacement les molécules de colorants à leur surface, contribuant ainsi à réduire la pollution des milieux aquatiques (Crini & Lichtfouse, 2018).

I.6.3 Adsorption des composés organiques toxiques

Les biomatériaux adsorbants peuvent aussi servir à éliminer divers composés organiques toxiques présents dans les eaux usées, tels que les pesticides, les composés phénoliques et certains résidus pharmaceutiques. Le processus d'adsorption repose sur plusieurs mécanismes, notamment les interactions électrostatiques, les liaisons hydrogène et les forces de Van der Waals, qui facilitent la fixation des polluants organiques à la surface du matériau adsorbant. (Crini & Lichtfouse, 2018).

I.6.4 Traitement des eaux usées industrielles et domestiques

Les biomatériaux adsorbants sont largement employés dans les procédés de traitement des eaux usées industrielles et domestiques afin de diminuer la concentration des polluants avant leur rejet dans l'environnement. Leur utilisation contribue à améliorer la qualité des eaux traitées tout en proposant une solution économique et respectueuse de l'environnement pour la dépollution des effluents aqueux (Crini & Lichtfouse, 2018).



Chapitre II

Généralité sur l'adsorption

II.1 Introduction

L'adsorption est un phénomène physico-chimique qui se traduit par une modification de la concentration à l'interface entre deux phases non miscibles. Différents types d'interfaces existent selon la nature des phases : gaz/liquide, gaz/solide, liquide/liquide, liquide/solide et solide/solide. Pour chaque type, on peut distinguer les cas où les phases sont pures ou forment des mélanges. L'adsorption sur un solide correspond à la fixation physique des molécules à sa surface, grâce à des forces d'interaction faibles, telles que les forces de Van der Waals (Rouquerol et al., 2013).

II.2 Types d'adsorption

Les études expérimentales portant sur les différents phénomènes d'adsorption permettent de distinguer deux catégories fondamentales : l'adsorption physique et l'adsorption chimique.

II.2.1 Adsorption physique

L'adsorption physique est gouvernée par des interactions intermoléculaires faibles de type Van der Waals. Elle se caractérise par de faibles énergies d'interaction, une réversibilité élevée et se produit généralement à basse température (Tan et al., 2015).

II.2.2 Adsorption chimique

L'adsorption chimique repose sur la formation de liaisons chimiques entre l'adsorbant et l'adsorbat, impliquant un transfert ou un partage d'électrons. Ce type d'adsorption se caractérise par des énergies d'interaction élevées et par une modification de l'état électronique de la molécule adsorbée (Rouquerol et al., 2013).

II.3 Mécanisme d'adsorption

Le processus d'adsorption d'une espèce dissoute à la surface d'un solide adsorbant se déroule suivant plusieurs étapes successives de transfert de matière :

II.3.1 Diffusion externe (transfert de masse externe)

Les molécules du soluté migrent depuis la phase liquide vers la surface externe des particules de l'adsorbant sous l'effet du gradient de concentration.

II.3.2 Diffusion interne (transfert intra-particulaire)

Les espèces adsorbables pénètrent à l'intérieur de la structure poreuse de l'adsorbant et diffusent à travers le liquide contenu dans les pores jusqu'aux sites actifs internes.

II.3.1 Diffusion de surface

Dans certains matériaux poreux, les molécules adsorbées peuvent également migrer le long de la surface interne des pores, favorisant ainsi leur répartition sur les sites d'adsorption disponibles (Kärger et al., 2021).

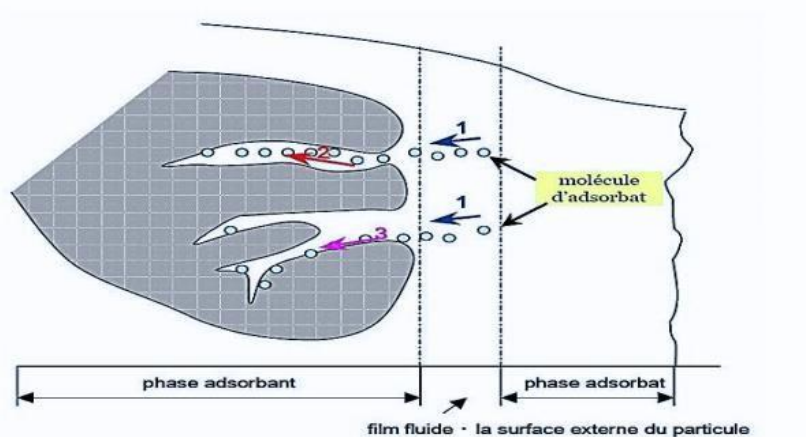


Figure 3 Schéma de mécanisme de transport de l'adsorbat au sein d'un grain (1- diffusion externe, 2- diffusion interne (dans les pores), 3- diffusion de surface) (Kärger et al., 2021)

II.4 Cinétique d'adsorption

Différents modèles cinétiques ont été développés dans la littérature pour mieux comprendre les mécanismes d'adsorption et évaluer les paramètres cinétiques du processus, tels que la vitesse d'adsorption et la capacité d'adsorption à l'équilibre. Parmi ces modèles, les plus couramment utilisés sont les modèles pseudo-premier ordre de Lagergren et pseudo-deuxième ordre.

II.4.1 Modèle cinétique pseudo-première ordre (modèle Lagergren)

Le modèle pseudo-premier ordre (PPO) suppose que la vitesse d'adsorption est proportionnelle au nombre de sites actifs disponibles à la surface de l'adsorbant. Il permet de déterminer la constante de vitesse K_1 ainsi que la capacité adsorbée à l'équilibre Q_e (Tran et al., 2017).

$$\frac{dQ}{dt} = K_1(Q_e - Q_t) \quad \text{Équation (1)}$$

$\frac{dQ}{dt}$: vitesse d'adsorption à un instant t

Q_e : quantité d'adsorbat à l'équilibre

K_1 : constante de vitesse de PPO

Q_t : quantité d'adsorbat à un instant t

En intégrant cette équation, on obtient l'équation linéaire suivante :

$$\ln(Q_e - Q_t) = -K_1 t + \ln Q_e \quad \text{Équation (2)}$$

II.4.2 Modèle du cinétique pseudo-seconde ordre

Le modèle pseudo-seconde ordre (PSO) repose sur l'hypothèse d'une chimisorption, impliquant des interactions chimiques entre l'adsorbat et la surface de l'adsorbant, comme un échange ou un partage d'électrons. Ce modèle, caractérisé par la constante cinétique K_2 , décrit généralement avec plus de précision les phénomènes d'adsorption chimique. (H. Wang et al., 2024).

$$\frac{dQ}{dt} = K_2(Q_e - Q_t)^2 \quad \text{Équation (3)}$$

$\frac{dQ}{dt}$: vitesse d'adsorption à un instant t

Q_e : quantité d'adsorbat à l'équilibre

K_2 : constante de vitesse de PSO

Q_t : quantité d'adsorbat à un instant t

En intégrant cette équation, on obtient l'équation linéaire suivante :

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{Q_e} t + \frac{1}{K_2 Q_e^2} \quad \text{Équation (4)}$$

II.5 Isotherme d'adsorption

II.5.1 Classification des isothermes d'adsorption

Selon l'IUPAC, cinq types d'isothermes ont été identifiés pour l'adsorption des molécules en phase gazeuse, tandis que Giles et Smith ont proposé, en 1974, une classification comprenant quatre types d'isothermes pour l'adsorption des molécules en phase liquide (J. Liu et al., 2025).

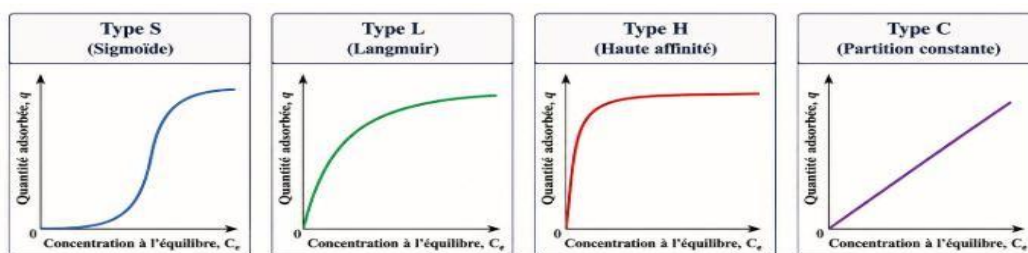


Figure 4 Différents types d'isotherme d'adsorption (Giles et al., 1974)

II.5.2 Modalisation des isothermes d'adsorption

Les modèles d'isothermes d'adsorption sont largement utilisés pour interpréter le comportement des molécules adsorbées à l'équilibre entre la phase liquide et la surface de l'adsorbant. Ils apportent des informations essentielles sur la nature de la surface adsorbante ainsi que sur le mécanisme d'adsorption.

II.5.2.1 Isothermes de Freundlich

Est adapté aux surfaces hétérogènes et aux phénomènes d'adsorption en multicouches. Il permet d'estimer la capacité d'adsorption et l'intensité des interactions entre l'adsorbat et l'adsorbant.

$$Q_e = K_F C_e^{1/n} \quad \text{Équation (5)}$$

L'isotherme de Freundlich est généralement représentée sous forme linéaire suivante :

$$\ln Q_e = \frac{1}{n} \ln C_e + \ln K_F \quad \text{Équation (6)}$$

Avec K_F : Constante tenant compte de la capacité d'adsorption (L/g) qui caractérise le pouvoir adsorbant du solide, lorsque K_F augmente, la capacité d'adsorption augmente (Foo & Hameed, 2010).

$1/n$: Paramètre relié à l'intensité d'adsorption.

II.5.2.2 Isothermes de Langmuir

Repose sur l'hypothèse d'une adsorption en monocouche sur une surface homogène comportant des sites actifs identiques, sans interaction entre les espèces adsorbées. Ce

modèle permet de déterminer la capacité maximale d'adsorption et l'affinité du matériau adsorbant vis-à-vis du soluté (Li et al., 2019).

Langmuir a établi une équation de la forme :

$$\frac{Q_e}{Q_m} = \frac{K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad \text{Équation (7)}$$

Avec :

Q_e : Quantité des solutés adsorbée par unité de masse du l'adsorbant à l'équilibre (mg/g)

Q_m : Quantité maximale de soluté adsorbée par gramme d'adsorbant nécessaire pour couvrir la surface d'une couche mono moléculaire (mg/g)

K_L : Constante de Langmuir corrélée à l'énergie d'adsorption (L/mg).

La linéarisation de l'équation de Langmuir permet de déduire la quantité maximale Q_m et la constante K_L :

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{Q_m K_L} + \frac{C_e}{Q_m} \quad \text{Équation (8)}$$

Si cette équation est vérifiée, on doit obtenir en coordonnées C_e/Q_e= f (C_e) une droite de pente 1/Q_m et d'ordonnée à l'origine 1/Q_m × K_L

II.6 Facteur influençant d'adsorption

L'efficacité de l'adsorption dépend de plusieurs paramètres physicochimiques influençant les interactions entre l'adsorbant et l'adsorbat.

1) Température : l'adsorption physique est favorisée à basse température, tandis que l'adsorption chimique nécessite généralement des températures plus élevées.

2) pH de la solution : il affecte la charge de surface de l'adsorbant, la structure de l'adsorbat ainsi que le mécanisme d'adsorption (Tan et al., 2015).

3) Masse de l'adsorbant : elle influence directement la capacité de rétention des polluants et le rendement du procédé (Tan et al., 2015).

4) Concentration initiale de l'adsorbat : une augmentation de la concentration du polluant modifie la capacité d'adsorption et la vitesse du processus.

5) Temps de contact (temps d'équilibre) : il détermine la durée nécessaire pour atteindre l'équilibre d'adsorption (Fayoud et al., 2015).

6) Caractéristiques de l'adsorbat : la taille moléculaire, la solubilité et l'énergie de liaison influencent fortement l'adsorption.

7) Caractéristiques de l'adsorbant : la surface spécifique, la porosité, la taille des pores et la polarité du matériau jouent un rôle essentiel dans la performance adsorbante.

II.7 Paramètre thermodynamique

Dans les systèmes d'adsorption solide-liquide, l'évaluation des paramètres thermodynamiques est indispensable pour caractériser la spontanéité et la nature du processus. La thermodynamique de l'adsorption est généralement étudiée à travers la détermination de la variation de l'énergie libre standard de Gibbs (ΔG°) ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$), de l'enthalpie standard (ΔH°) ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$) et de l'entropie standard (ΔS°) ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

Ces paramètres sont déterminés à partir des relations suivantes :

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_e \quad \text{Équation (9)}$$

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T \Delta S^\circ \quad \text{Équation (10)}$$

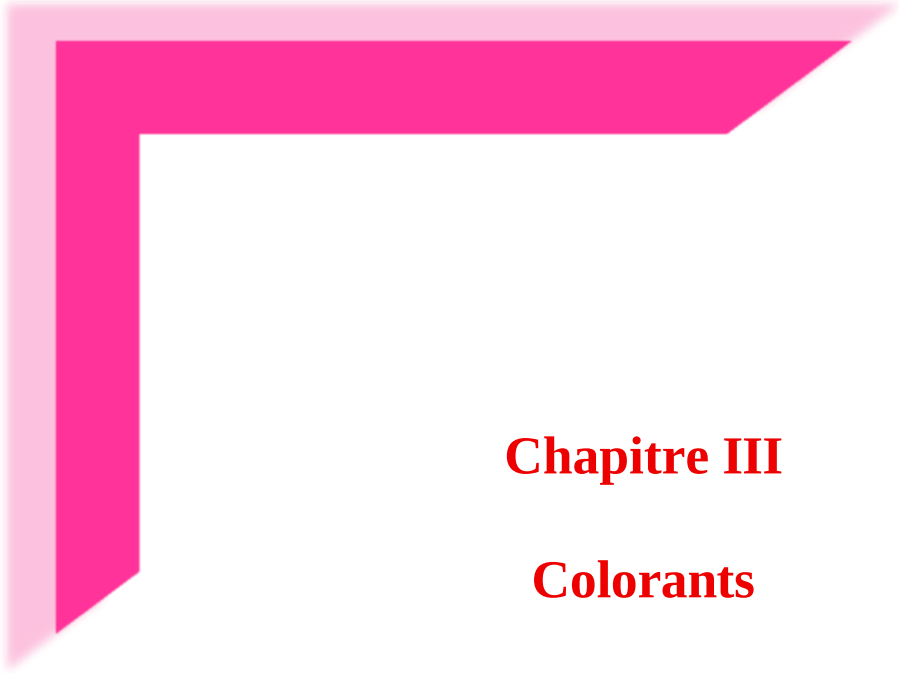
Où :

$$K_e = \frac{C_{ads}}{C_e}$$

- **R** : constante des gaz parfaits ($8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
- **T** : température absolue (K)
- **K_e** : constante d'équilibre thermodynamique
- **C_{ads}** : quantité adsorbée à l'équilibre
- **C_e** : concentration de l'adsorbat à l'équilibre en solution

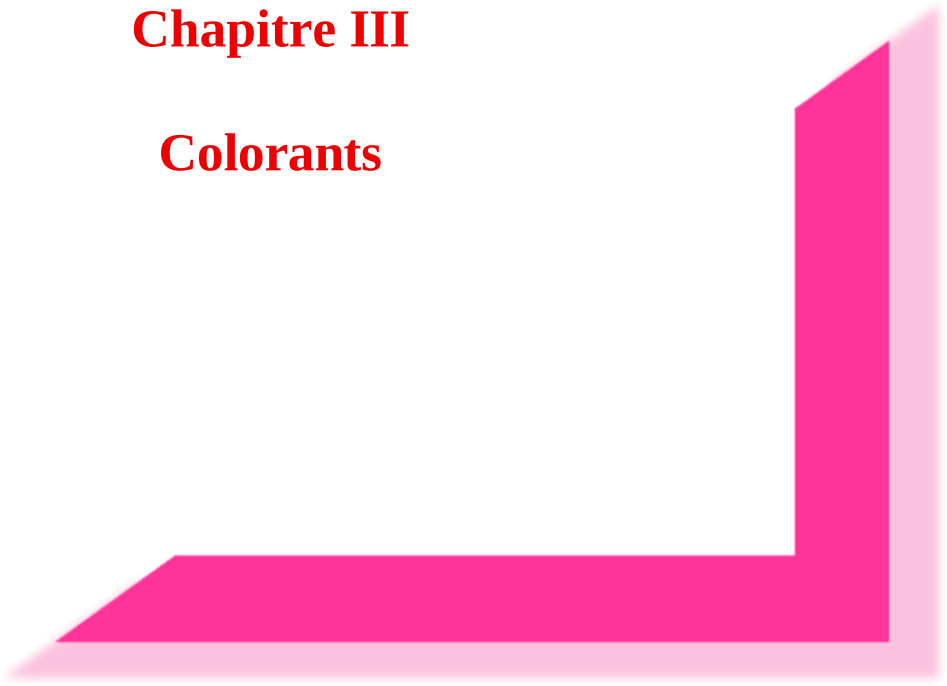
En combinant les équations précédentes, on obtient la relation linéaire suivante :

$$\ln K_e = - \frac{\Delta G^\circ}{RT} = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad \text{Équation (11)}$$



Chapitre III

Colorants



III.1 Introduction

Les colorants sont des composés d'origine naturelle ou synthétique qui confèrent une coloration stable à divers matériaux, tels que les textiles, le papier, le cuir, ainsi que certains produits alimentaires. Leur structure chimique comprend généralement des groupes chromophores, responsables de l'absorption sélective de la lumière et donc de la couleur, ainsi que des groupes auxochromes qui renforcent l'intensité colorante et améliorent leur affinité et fixation sur les supports. Grâce à ces caractéristiques, les colorants jouent un rôle essentiel dans de nombreux secteurs industriels, notamment les industries textile, pharmaceutique, cosmétique et agroalimentaire. (Yagub et al., 2014).

III.2 Classification des colorants

Les colorants peuvent être classés selon plusieurs critères, notamment leur origine, leur structure chimique et leur domaine d'application. Cette classification facilite une meilleure compréhension de leurs propriétés physico-chimiques ainsi que de leur comportement dans les milieux aqueux et les systèmes industriels.

III. 2.1 Selon la structure chimique

Les colorants sont classés selon leur structure moléculaire en différentes familles, dont les principales sont les colorants azoïques, caractérisés par le groupement $-N=N-$ et largement utilisés dans l'industrie textile en raison de leur grande diversité chromatique et de leur stabilité. Les colorants anthraquinoniques, dérivés de l'anthraquinone, présentent une bonne résistance à la lumière et aux agents chimiques. D'autres familles importantes, telles que les colorants triphénylméthanes et xanthènes, sont également utilisées dans divers secteurs industriels (Yagub et al., 2014).

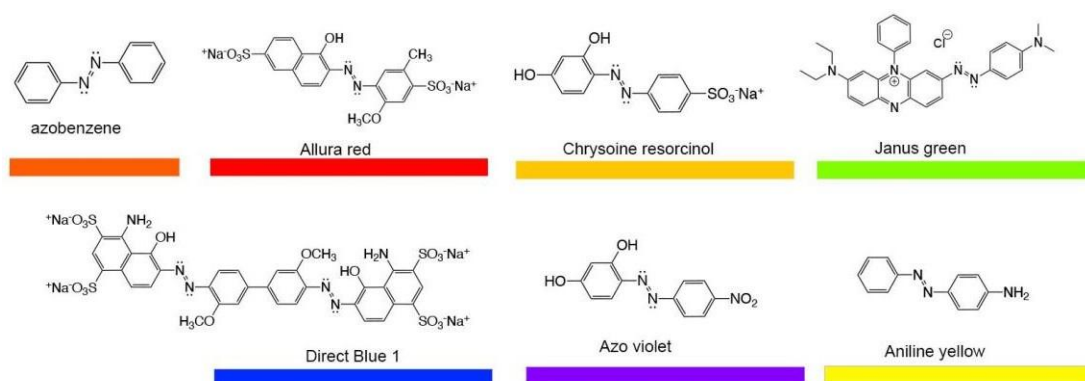


Figure 5 Classification des colorants azoïques selon la couleur obtenue

III. 2.2 Selon l'origine

Les colorants peuvent être classés selon leur origine en deux grandes catégories : les colorants naturels et les colorants synthétiques. Les colorants naturels sont extraits de sources végétales ou animales, tandis que les colorants synthétiques sont obtenus par synthèse chimique. Ces derniers dominent largement le marché industriel en raison de leur faible coût de production et de leur stabilité chimique élevée.

III. 2.3 Selon l'application

Une autre classification importante des colorants repose sur leur domaine d'application. On distingue principalement les colorants textiles, alimentaires et industriels. Parmi eux, les colorants textiles constituent la fraction la plus importante des rejets industriels dans les eaux usées, ce qui en fait une source majeure de pollution environnementale. Leur élimination représente ainsi un enjeu crucial dans les procédés de traitement des eaux contaminées (Periyasamy, 2024).



Figure 6 Application des colorants textiles lors du procédé de teinture industrielle

III.3 Impact des colorants sur l'environnement

Les colorants peuvent avoir des impacts significatifs sur l'environnement, tant de manière directe qu'indirecte (Slama et al., 2021). Directement, leur utilisation industrielle peut provoquer la pollution des eaux, de l'air, ainsi que la production de déchets solides. Lorsqu'ils sont rejetés dans les milieux aquatiques, les colorants peuvent être toxiques pour les organismes vivants et réduire la pénétration de la lumière dans l'eau, perturbant ainsi l'équilibre des écosystèmes aquatiques. Par ailleurs, les émissions atmosphériques issues des procédés industriels peuvent contenir des composés organiques volatils nocifs. Indirectement, la forte consommation d'eau et d'énergie liée à la fabrication et à l'utilisation des colorants contribue à l'épuisement des ressources naturelles et à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (Al-Tohamy et al., 2022).

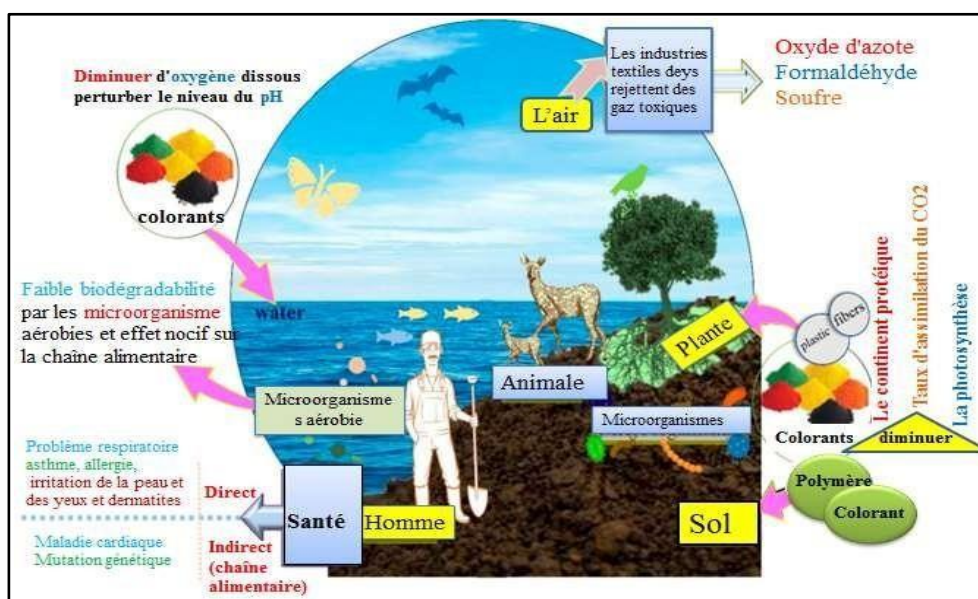


Figure 7 Impacts directs et indirects des colorants (Slama et al., 2021)

III.4 Toxicité des colorants

La production et l'utilisation des colorants naturels ont un impact environnemental nettement inférieur à celui des colorants et pigments synthétiques. En revanche, les colorants synthétiques génèrent fréquemment des sous-produits toxiques et persistants, qui peuvent causer une pollution importante lorsqu'ils sont rejetés dans le milieu naturel sans traitement adéquat. Ces effluents peuvent entraîner une dégradation significative des écosystèmes aquatiques et représenter un risque potentiel pour la santé humaine ainsi que pour l'environnement (Periyasamy, 2024).

III.5 Techniques de traitement des colorants

III.5.1 Adsorption

L'adsorption est une technique de traitement très efficace et largement utilisée pour éliminer les colorants présents dans les eaux usées, grâce à sa forte capacité à fixer les polluants à la surface des matériaux adsorbants. Les colorants fortement colorés ainsi que les composés organiques difficiles à dégrader ne sont pas facilement éliminés par les méthodes chimiques ou biologiques classiques, rendant le traitement des eaux usées particulièrement complexe. Dans ce contexte, les procédés combinés sont souvent privilégiés, et l'adsorption reste l'une des méthodes les plus performantes pour assurer

une purification efficace et améliorer le rendement d'élimination des contaminants. (Olukanni et al., 2013).

III.5.2 Techniques physico-chimiques

Les techniques de traitement physico-chimiques font partie des méthodes les plus efficaces pour éliminer les colorants des eaux usées, car elles reposent sur la fixation des polluants à la surface de matériaux spécialement conçus pour une forte capacité de purification (Olukanni et al., 2013). Les composés fortement colorés et les substances organiques résistantes à la dégradation sont parmi les polluants les plus difficiles à éliminer par les procédés chimiques ou biologiques conventionnels, rendant ainsi le traitement des eaux industrielles particulièrement complexe. Dans ce contexte, les procédés intégrés de traitement sont adoptés comme des solutions avancées et performantes pour améliorer la qualité de l'eau, grâce à leur efficacité élevée, leur simplicité de mise en œuvre et leur capacité à réduire significativement la concentration des polluants.



Partie

Expérimentale

IV.1 Introduction

Ce chapitre décrit la méthodologie scientifique adoptée dans cette étude, en détaillant les différentes étapes de préparation des matériaux utilisés ainsi que leur mise en œuvre. Il présente également les techniques analytiques et les instruments de mesure employés pour le suivi et l'analyse du processus d'adsorption.

Les expériences ont été réalisées au laboratoire de chimie de la Faculté des Sciences et de la Technologie de l'Université de Ghardaïa, dans des conditions expérimentales rigoureusement contrôlées afin de garantir la précision et la fiabilité des résultats obtenus.

IV.2 Objectif du travail

Cette étude a pour objectif l'élaboration d'un matériau biosourcé à partir d'un déchet local issu du palmiers dattiers (pétiole) de la région de Ghardaïa (Algérie). Les performances du matériau synthétisé ont été évaluées à travers l'étude de l'adsorption du colorant anionique orange de méthyle (OM).

IV.3 Matériels, produits chimiques et équipements utilisés

Tableau 1 Produits chimiques et équipements utilisés

Produits	Équipements utilisés
- Orange de méthyle (MO) ; M=327.33g/mol - Hydroxyde de sodium NaOH (40g/mol ;0.01N) - Acide chlorhydrique HCl (36.46 g/mol ,0.01N ; P=37% ; d=1.19) - Chlorure de Sodium (NaCl)	 Spectrophotomètre-UV visible UviLine 9400  pH mètre

**Agitation Mécanisme**

IV.4 .1. Principe de fonctionnement du spectroscopie UV-Visible

La spectrophotométrie d'absorption repose sur la mesure de la diminution de l'intensité d'un rayonnement lumineux après avoir traversé un échantillon, ce qui permet de déterminer quantitativement les espèces chimiques absorbantes. La quantité de lumière absorbée est directement proportionnelle à la concentration du composé en solution, selon la loi de Beer-Lambert, principe fondamental de cette technique. Le domaine spectral ultraviolet-visible (UV-Visible) constitue ainsi une méthode analytique de référence, largement utilisée pour les analyses quantitatives, grâce à sa sensibilité, sa précision et sa fiabilité dans la détermination des concentrations des composés chimiques en solution (Rouessac & Rouessac, 2013).

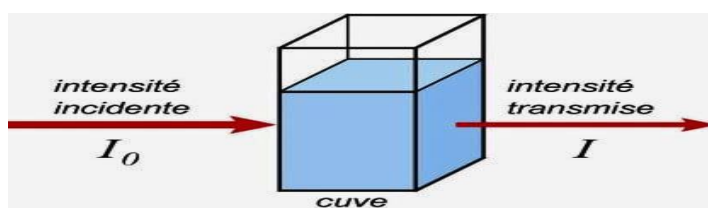


Figure 8 Représentation schématique de l'absorbance par UV.

IV.5 Synthèse du matériau

IV.5.1. Préparation de l'adsorbant (biosorbant)

Les résidus de pétiole de palmier dattier, utilisés comme biomasse, ont été collectés dans l'oasis de Ben Isguen, à Ghardaïa, durant la saison de récolte des dattes en 2025. Après la collecte, la biomasse a été lavée à l'eau du robinet pour éliminer la poussière et les impuretés, puis rincée à l'eau distillée. Elle a ensuite été séchée dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures.

IV.5.2. Synthèse du biosorbant

Environ 20 g de biomasse ont été pesés puis traités avec une solution d'hydroxyde de potassium (KOH) de concentration 1 N. Après un temps de contact, de l'eau distillée a été ajoutée au mélange, qui a ensuite été chauffé à reflux à 100 °C pendant 2 heures. Le matériau obtenu a été lavé à l'eau distillée jusqu'à l'obtention d'un pH neutre, puis filtré et séché à 105 °C pendant 48 heures.



Figure 9 Protocole de préparation du biosorbant à partir des pétiotes de palmier dattier

IV.6 .1. Détermination du pH de point de charge nulle (pH_{PZC})

La charge de surface du biosorbant PK a été déterminée par la méthode du pH au point de charge nulle (pH_{PZC}), en utilisant une solution de chlorure de sodium (NaCl) à 0,01 N, dont le pH a été ajusté de 2 à 12 à l'aide de solutions de HCl (0,01 N) et de NaOH (0,01 N). Une masse de 0,1 g de biosorbant a été ajoutée à chaque solution, puis les échantillons ont été agités continuellement à 200 tours par minute pendant 24 heures. Le pH final a ensuite été mesuré, et la différence entre les valeurs initiales et finales a permis d'évaluer le comportement de la charge de surface du biosorbant en fonction du pH du milieu (Perrard et al., 2006).

IV.7 Préparation d'une solution adsorbat (colorant)

L'orange de méthyle (MO) est un colorant azoïque anionique acide appartenant à la famille des azobenzènes. Également connu sous le nom d'hélianthine, il est largement

utilisé comme indicateur coloré dans les réactions chimiques. Ce colorant possède des propriétés physico-chimiques spécifiques, et ses solutions ont été préparées à l'aide d'eau distillée (Melouki et al., 2020).

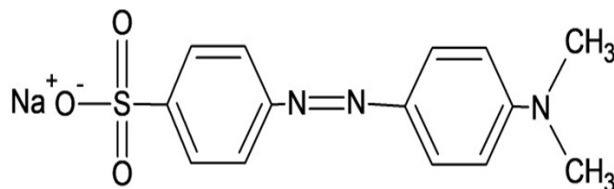


Figure 10 Structure chimique de l'orange de méthyle

Tableau 2 Caractéristiques physico-chimiques de l'orange de méthyle (OM) (Melouki et al., 2020).

Paramètre	Méthylorange
- Noms chimiques - Indice de couleur (CI) - Formule chimique	Acide 4-, benzène sulfonique (forme acide) 4-, benzène sulfonate de sodium (sel de sodium) CI Acid Orange 52
Masse molaire (g·mol⁻¹)	C ₁₄ H ₁₄ N ₃ O ₃ S Na
λ max (nm)	464
pKa	3,30
Solubilité dans l'eau à 20 °C (g/L)	5,20

IV.7.1. Préparation de solutions files de OM

Une solution mère de l'orange de méthyle de concentration 100 mg/L a été préparée par dissolution de 0,05 g du colorant dans 500 mL d'eau distillée. Des solutions de différentes concentrations (20, 40 et 50 mg/l) ont ensuite été obtenues par dilution successive de la solution initiale.



Figure 11 Préparation des solutions du colorant Orange de méthyle (OM)

IV.8 Courbe d'étalonnage du OM

Une série de solutions diluées de différentes concentrations (5, 10, 20, 30 et 40 mg/L) a été préparée dans un volume constant de 10 mL. Les solutions ont été placées dans des tubes à essai, puis l'absorbance a été mesurée dans la plage spectrale de 400 à 800 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible. L'objectif de cette procédure était de déterminer la longueur d'onde maximale d'absorption du colorant orange de méthyle. Les résultats du balayage spectral ont montré que l'absorbance maximale est obtenue à une longueur d'onde de 468 nm, valeur retenue comme optimale pour le suivi des expériences d'adsorption ultérieures.

IV.9 Etude d'adsorption de l'orange de méthyle (MO)

IV.9.1 Cinétique d'adsorption

L'effet du temps de contact sur l'adsorption de l'orange de méthyle a été étudié pour différentes concentrations initiales du colorant. Dans ce cadre, des solutions aqueuses de 10 mL de OM ont été préparées à des concentrations initiales de 20, 40 et 60 mg/L. Une masse fixe de 10 mg de biosorbant a été ajoutée à chaque solution. Les mélanges ont ensuite été soumis à une agitation continue durant un temps déterminé t . Les expériences ont été réalisées à température ambiante, maintenue constante tout au long du processus afin d'assurer la reproductibilité des résultats. Après chaque temps de contact, les échantillons ont été analysés à l'aide du spectrophotomètre UV-Visible afin de suivre l'évolution de la concentration résiduelle du colorant et de déterminer le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre d'adsorption (Revellame et al., 2020). La quantité adsorbée a été calculée suivant la relation suivante :

$$Q_t = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad \text{Équation (12)}$$

- Q_t : la quantité de OM adsorbée à l'instant t (mg/g).
- C_0 : la concentration initiale (mg/L).
- C_e : la concentration résiduelle à l'instant t (mg/L).
- V : le volume de la solution de OM (L).
- m : la masse de l'échantillon exprimé en gramme (g).

IV.9.2. Isotherme d'adsorption

L'isotherme d'adsorption de l'orange de méthyle a été étudié avec des concentrations initiales de 5 à 200 mg/L (5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 et 200 mg/L) dans 10 mL de solution pour chaque essai dans un flacon. L'équipe du laboratoire a ajouté 10 mg de biosorbant à chaque échantillon. L'agitateur magnétique a maintenu les mélanges en agitation continue pendant le temps d'équilibre (30 minutes) pour atteindre l'équilibre d'adsorption. L'appareil a mesuré l'absorbance des mélanges pour calculer la quantité adsorbée et tracer la courbe d'isotherme d'adsorption.

IV.9.3. Effet du pH

L'influence du pH sur le processus d'adsorption a été étudiée dans des milieux aqueux présentant différentes valeurs de pH (4, 6, 8, 10 et 12). Le pH d'une solution de l'orange de méthyle, de concentration initiale 40 mg/L, a été ajustée à l'aide de solutions de HCl et de NaOH (0,1 N). Par la suite, une masse de 10 mg de biosorbant a été introduite dans chaque échantillon. Les systèmes ont ensuite été soumis à une agitation continue pendant 30 minutes, dans le but d'évaluer de manière précise l'effet du pH sur la performance d'adsorption.

IV.9.4. Effet de la température

L'effet de la température sur la capacité d'adsorption a été étudié en utilisant une solution de l'orange de méthyle de concentration initiale 40 mg/L, préparée à raison de 10 mL par essai. À chaque échantillon, une masse de 10 mg de biosorbant a été ajoutée. Les systèmes ont ensuite été soumis à une agitation continue pendant 30 minutes, dans des conditions expérimentales strictement contrôlées. Les essais ont été réalisés à différentes températures (25 °C, 35 °C et 45 °C) afin d'évaluer de manière précise l'influence de ce paramètre thermodynamique sur le processus d'adsorption et sur la performance du matériau adsorbant (Aruna Janani et al., 2023).



Résultats

Et Discussion

Et Discussion

V.1 Introduction

Cette section présente les résultats expérimentaux obtenus lors de l'adsorption du colorant orange de méthyle sur un matériau adsorbant issu des pétioles de palmier dattier. L'étude porte sur le comportement d'adsorption du matériau dans différentes conditions opératoires contrôlées.

V.2 Courbe d'étalonnage

Les résultats de l'analyse spectrophotométrique de l'orange de méthyle sont présentés dans la Figure 12. Le spectre d'absorption du colorant orange de méthyle a été enregistré dans le domaine UV-Visible, sur une plage spectrale comprise entre 400 et 800 nm. Les résultats obtenus ont permis de déterminer la longueur d'onde maximale d'absorption ($\lambda_{\max}$) du colorant située à 468 nm, laquelle a été adoptée par la suite pour l'ensemble des analyses spectrophotométriques. La figure suivante illustre le spectre obtenu est illustrée en dessous.

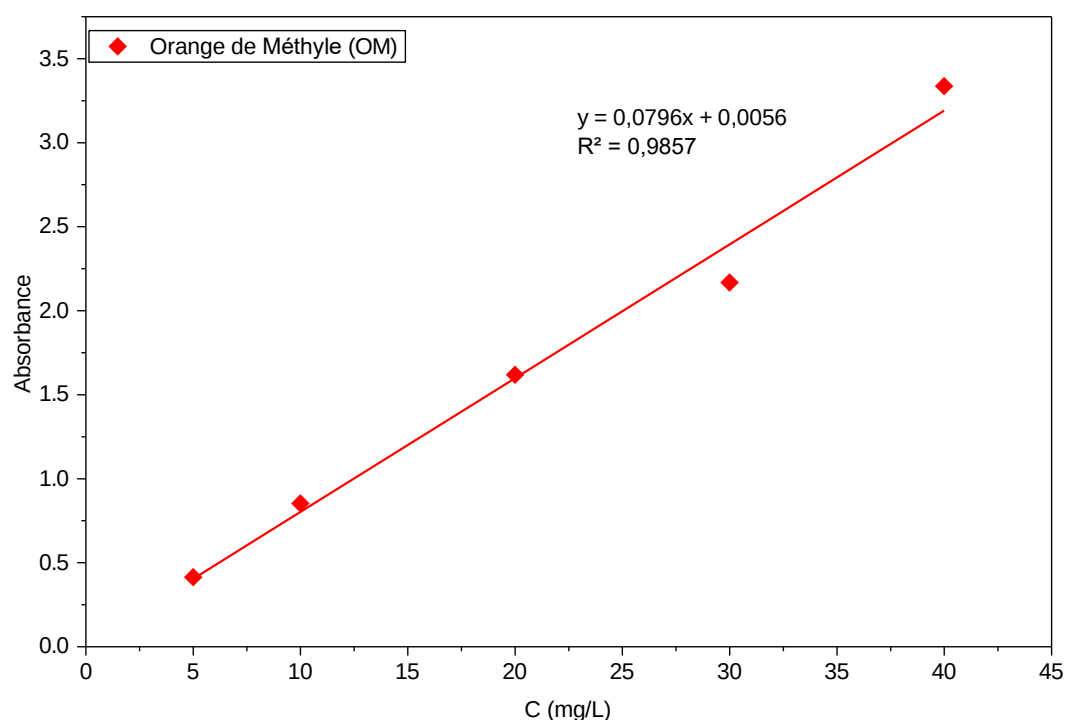


Figure 12 Courbe d'étalonnage de l'orange de méthyle (MO)

V.3 Caractérisations chimiques

V.3.1 Détermination du pH de point de charge nulle (pH_{PZC})

Les résultats obtenus lors de la détermination du point de charge nulle (pH_{PZC}) sont présentés dans la Figure 13. Cette figure montre que la valeur du pH_{PZC} du matériau adsorbant est d'environ 9,5. Cette valeur peut être attribuée à l'activation chimique de la biomasse par une solution de KOH, qui confère au matériau un caractère globalement basique. Ainsi, lorsque le pH du milieu est inférieur à 9,5, la surface du biosorbant est majoritairement chargée positivement, alors qu'elle devient négativement chargée pour des valeurs de pH supérieures à cette valeur (Jedynak & Charmas, 2024). Ce changement de charge est lié aux phénomènes de protonation et de déprotonation des groupements fonctionnels présents à la surface du matériau en fonction du pH de la solution. Par conséquent, les milieux acides et neutres sont particulièrement favorables à l'adsorption des colorants anioniques, en raison des interactions électrostatiques attractives qui s'établissent entre la surface positivement chargée du biosorbant et les espèces anioniques du colorant. Ces interactions favorisent la fixation des molécules de colorant et contribuent ainsi à améliorer l'efficacité du processus d'adsorption.

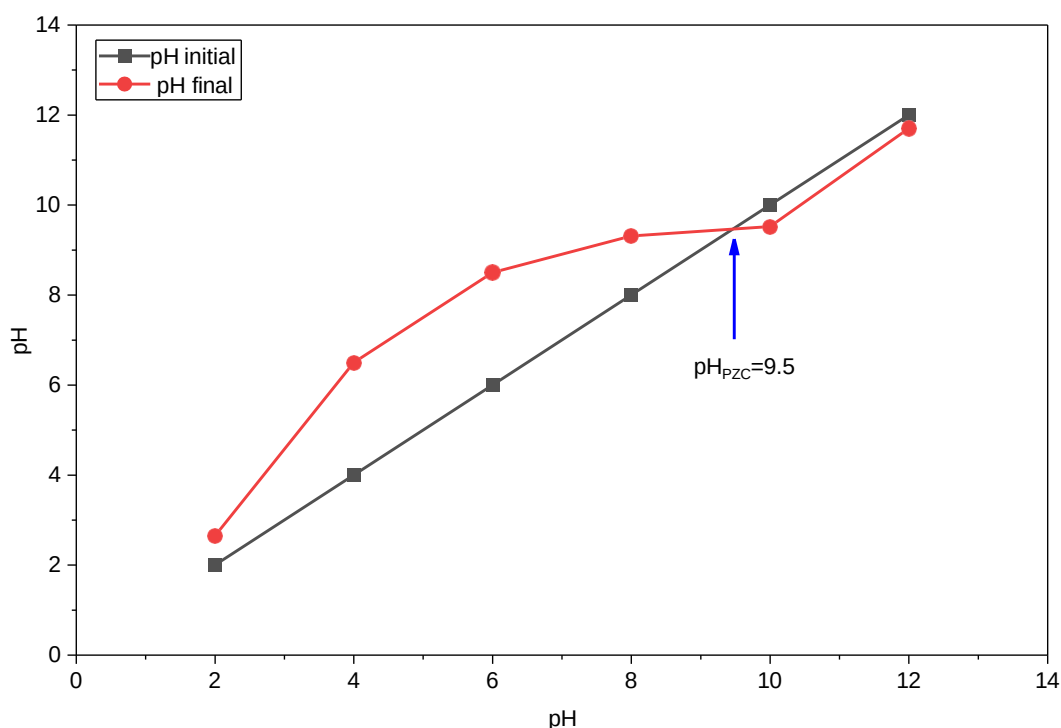


Figure 13 Courbe de détermination du pH_{PZC}

V.4 Etude de la cinétique d'adsorption

La Figure 14 présente l'évolution de la capacité d'adsorption du matériau PK dans l'élimination de l'orange de méthyle à différentes concentrations initiales (20, 40 et 60 mg/l). Les résultats obtenus montrent que l'état d'équilibre est atteint après seulement 30 minutes, ce qui traduit une cinétique d'adsorption rapide ainsi qu'une efficacité remarquable du matériau dans l'élimination du colorant à partir de la solution (Mittal et al., 2007). Sur la base de ces observations, les modèles cinétiques du pseudo-premier ordre (PPO) et du pseudo-second ordre (PSO) ont été appliqués afin d'interpréter le mécanisme d'adsorption.

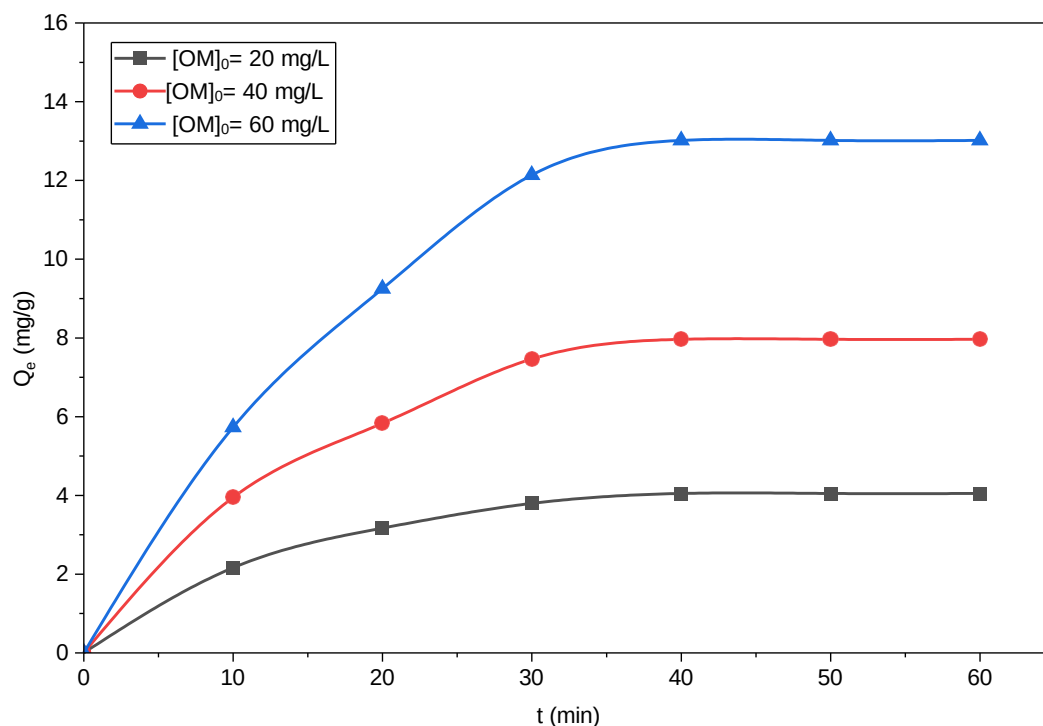


Figure 14 Courbe cinétique d'adsorption de l'Orange de méthyle (MO)

V.4.1 Modèle pseudo premier ordre (PPO)

L'étude cinétique de l'adsorption de l'orange de méthyle sur le biosorbant PK a été réalisée à l'aide du modèle du pseudo-premier ordre (PPO). Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 15. Les droites issues de la représentation de $\ln(Q_e - Q_t)$ en fonction du temps présentent une bonne linéarité, avec des coefficients de détermination (R^2) de 0,9829, 0,9560 et 0,9462 pour les concentrations initiales de 20, 40 et 60 mg/L, respectivement. Ces résultats montrent que le modèle du pseudo-premier

ordre décrit de manière satisfaisante la cinétique d'adsorption. Toutefois, les capacités d'adsorption calculées ($Q_{e, \text{cal}}$), représentées dans le Tableau 3, sont systématiquement supérieures aux valeurs expérimentales ($Q_{e, \text{exp}}$), ce qui indique que ce modèle ne reproduit pas parfaitement le comportement expérimental du système.

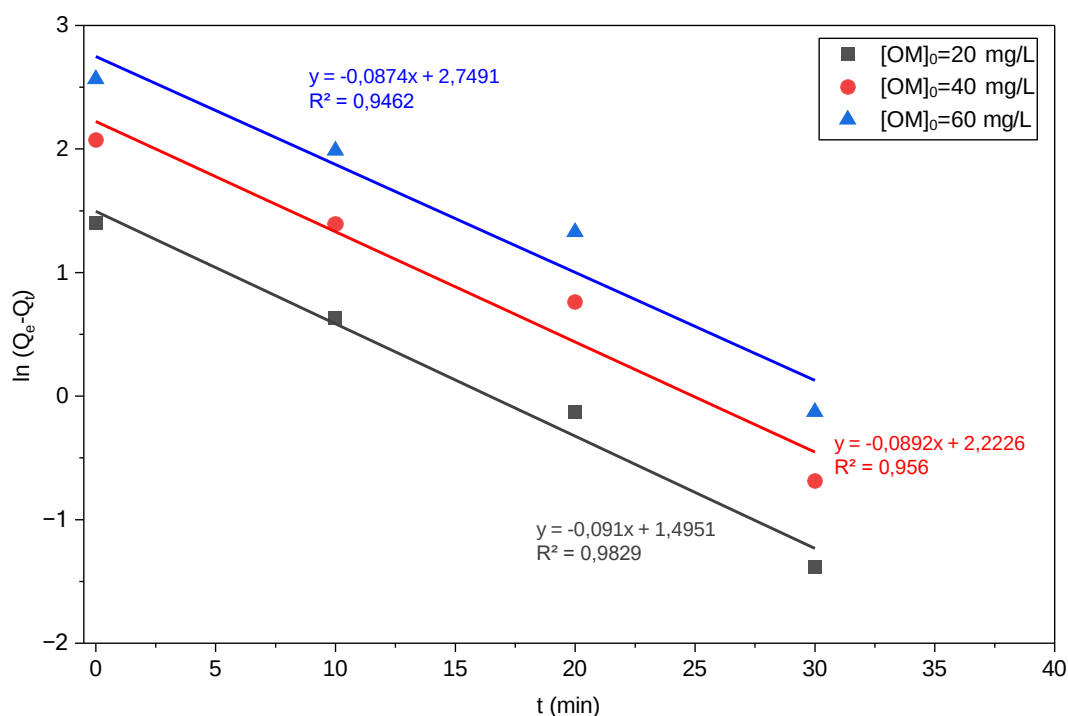


Figure 15 Modélisation de la cinétique d'adsorption du (OM) par pseudo premier ordre.

V.4.2 Modèle pseudo seconde ordre (PSO)

La Figure 16 présente la représentation linéaire du modèle cinétique du pseudo-second ordre (PSO) appliqué à l'adsorption de l'orange de méthyle sur le biosorbant PK. Les droites obtenues présentent une bonne linéarité, avec des coefficients de détermination (R^2) compris entre 0,9716 et 0,9904. Les valeurs calculées de la capacité d'adsorption à l'équilibre sont globalement plus proches des valeurs expérimentales que celles obtenues avec le modèle du pseudo-premier ordre. Les constantes cinétiques (Tableau 3) K_2 diminuent légèrement lorsque la concentration initiale augmente, ce qui peut être attribué à la saturation progressive des sites actifs du biosorbant. Ces résultats montrent

que le modèle du pseudo-second ordre décrit convenablement la cinétique d'adsorption de l'orange de méthyle sur le matériau étudié (Raji et al., 2022).

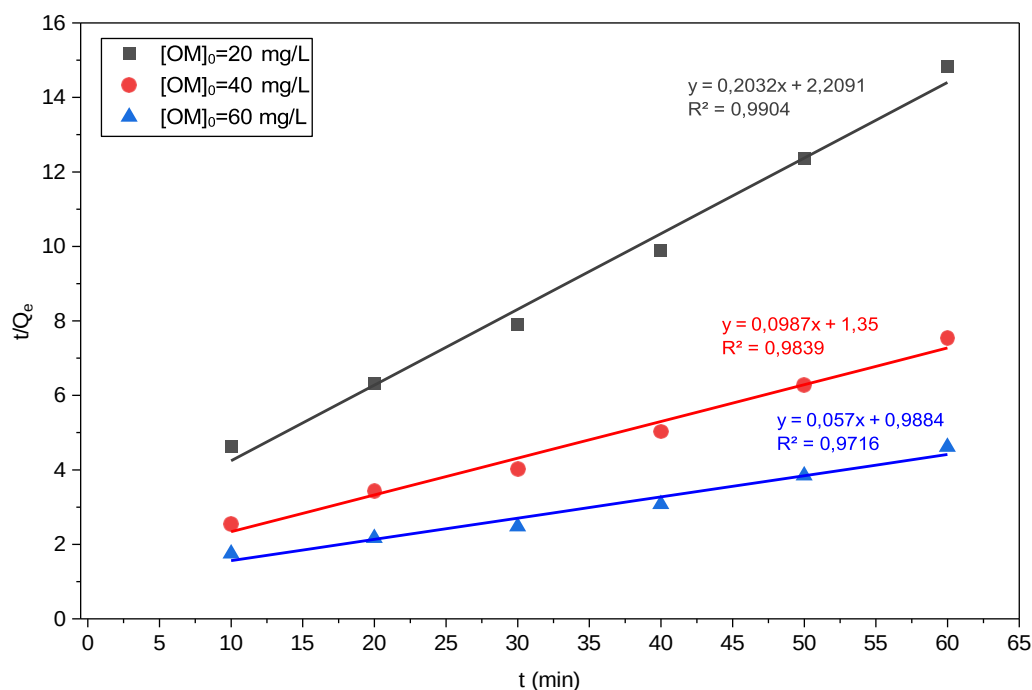


Figure 16 Modélisation de la cinétique d'adsorption du (OM) par pseudo second ordre.

Les paramètres cinétiques obtenus à partir des modèles du pseudo-premier ordre (PPO) et du pseudo-second ordre (PSO) sont regroupés dans le Tableau 3. Les deux modèles présentent des coefficients de détermination relativement élevés, indiquant qu'ils permettent tous deux de décrire la cinétique d'adsorption de l'orange de méthyle sur le biosorbant PK. Néanmoins, le modèle du pseudo-second ordre fournit, dans l'ensemble, des coefficients de détermination légèrement supérieurs à ceux du modèle du pseudo-premier ordre. De plus, les valeurs calculées de la capacité d'adsorption à l'équilibre obtenues avec le modèle PSO sont plus proches des valeurs expérimentales, bien que des écarts subsistent, en particulier aux concentrations initiales les plus élevées. Ainsi, le modèle du pseudo-second ordre apparaît comme le plus approprié pour décrire la cinétique d'adsorption de l'orange de méthyle sur le biosorbant PK. Ce résultat suggère que les interactions entre les molécules du colorant et les sites actifs du matériau jouent un rôle important dans le déroulement du processus d'adsorption.

Tableau 3 Paramètres de la modélisation cinétique de l'adsorption.

Modèle cinétique	Relation linéaire	Paramètre	[OM] ₀ (mg/l)		
			20	40	60
		$Q_{e, \text{exp}}$ (mg/g)	4,05	7,96	13,02
PPO	$\ln(Q_e - Q_t) = -K_1 t + \ln Q_e$	$Q_{e, \text{cal}}$ (mg/g)	6,48	14,79	20,22
		K_1	0,091	0,089	0,087
		R^2	0,9829	0,956	0,9462
PSO	$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{Q_e} t + \frac{1}{K_2 Q_e^2}$	$Q_{e, \text{cal}}$ (mg/g)	4,92	10,13	17,54
		K_2	0,02	0,007	0,009
		R^2	0,9904	0,9839	0,9716

V.5 Etude de l'isotherme d'adsorption du OM

Les résultats de l'étude de l'isotherme d'adsorption d'orange de méthyle sur le biosorbant PK sont présentés dans la Figure 17. Cette figure représente l'évolution de la capacité d'adsorption à l'équilibre (Q_e) en fonction de la concentration d'équilibre (C_e) pour des concentrations initiales comprises 5 à 200 mg/L. Les résultats obtenus montrent que la courbe suit une isotherme de type L selon la classification de Giles (Giles et al., 1974), ce qui indique que le processus d'adsorption se déroule sur une surface globalement homogène de l'adsorbant. Ce comportement est cohérent avec une adsorption en monocouche sur une surface homogène comportant un nombre fini de sites actifs.

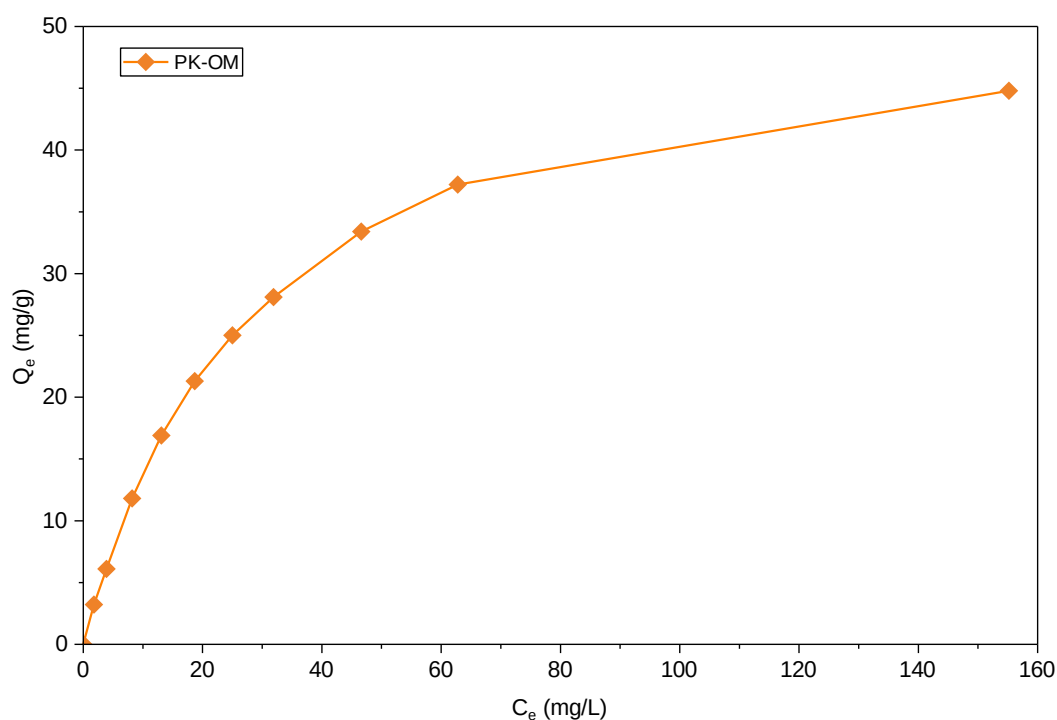


Figure 17 Isotherme d'adsorption de l'orange de méthyle (MO).

V.5.1 Modélisation de Langmuir

Les résultats de la modélisation de l'isotherme d'adsorption selon le modèle de Langmuir sont présentés dans la Figure 18. Ce modèle repose sur l'hypothèse que l'adsorption des molécules de soluté s'effectue par la formation d'une monocouche à la surface de l'adsorbant, sur des sites d'adsorption homogènes et énergétiquement équivalents, sans interaction entre les molécules adsorbées (Tazerouti & Amrani, 2010). La linéarisation de l'équation de Langmuir, obtenue à partir de la représentation de $1/Q_e$ en fonction de $1/C_e$, a permis de déterminer la capacité maximale d'adsorption (Q_m) ainsi que la constante de Langmuir (K_L). Les résultats indiquent que la capacité

maximale d'adsorption du biosorbant vis-à-vis de l'orange de méthyle est de 51,8 mg/g.

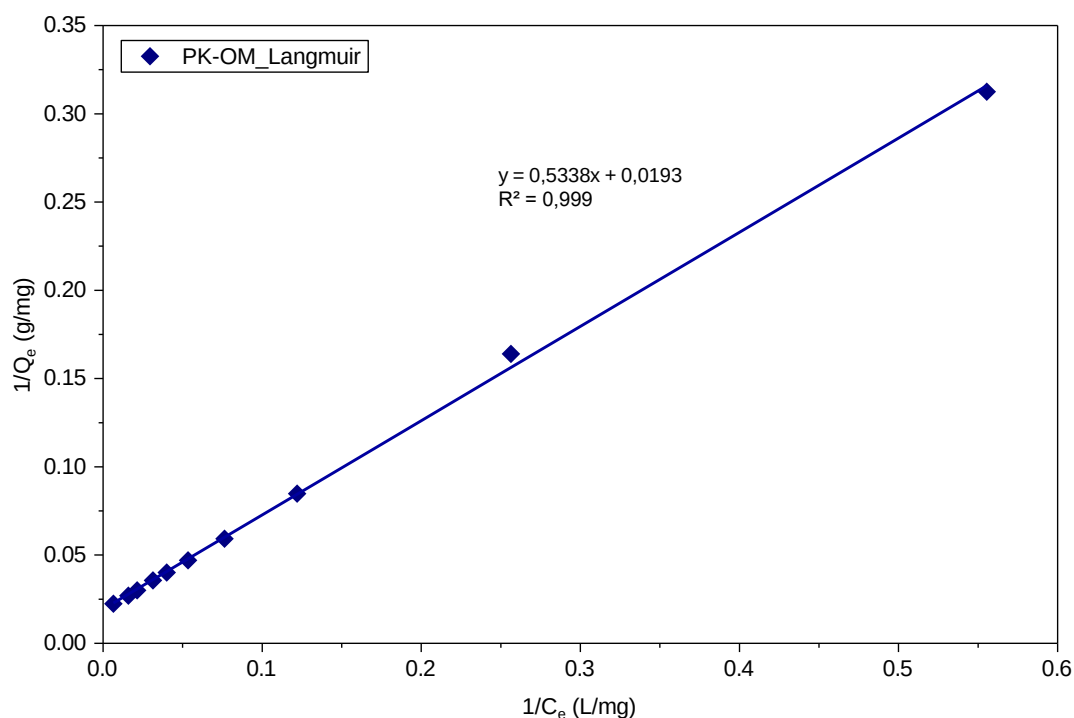


Figure 18 Modélisation de l'isotherme d'adsorption selon le modèle de Langmuir.

V.5.2 Modélisation Freundlich

La Figure 19 présente la représentation linéaire de l'isotherme de Freundlich, obtenue en traçant $\ln Q_e$ en fonction de $\ln C_e$ pour l'adsorption de l'orange de méthyle (OM) sur le biosorbant. Les points expérimentaux présentent une bonne linéarité, indiquant que le modèle de Freundlich décrit de manière satisfaisante les données expérimentales. Ce modèle suppose une adsorption sur une surface hétérogène présentant des sites d'adsorption de différentes énergies. La représentation graphique a permis de déterminer les constantes caractéristiques du modèle, notamment K_F et n . Les résultats obtenus sont regroupés dans le Tableau 4.

Modèle	L'équations	Paramètres	
Langmuir	$Y = 0,5338x + 0,0193$	Qm (mg/g)	51,8
		K _L (L/mg)	0,0361
		R ²	0,999
Freundlich	$Y = 0,6177x + 1,0732$	K _F (mg/g (L/mg) ^{1/n})	2,9
		N	1,6
		R ²	0,9458

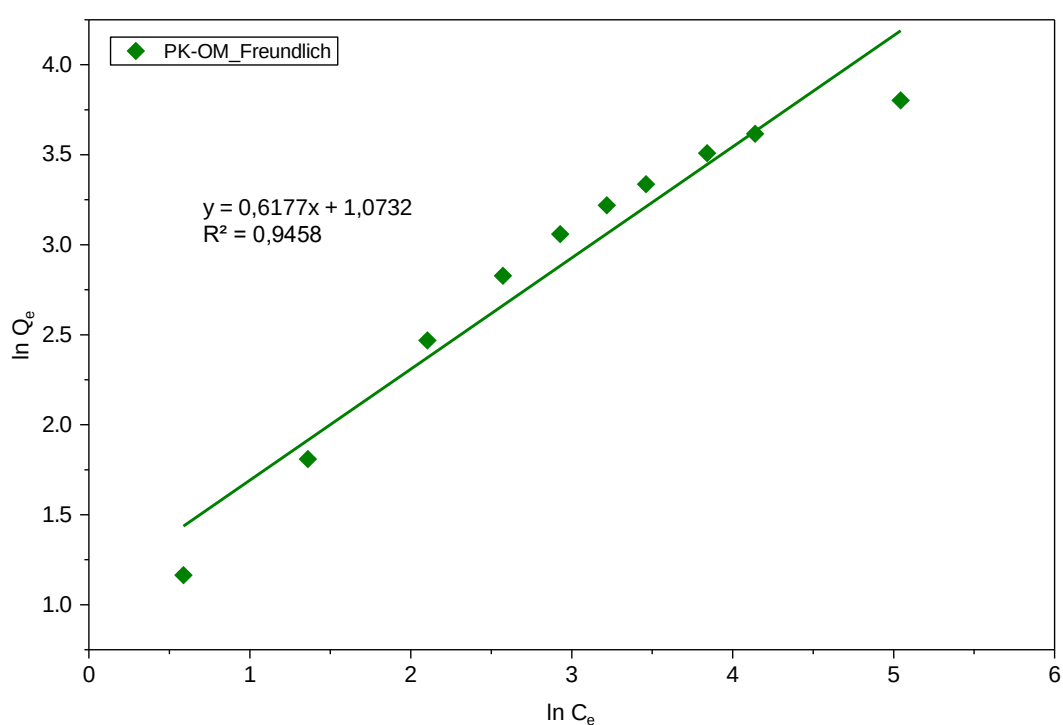


Figure 19 Modélisation de l'isotherme d'adsorption selon le modèle de Freundlich.

Tableau 4 Paramètres de la modélisation des isothermes d'adsorption

Les paramètres obtenus à partir des modèles de Langmuir et de Freundlich sont présentés dans le [Tableau 4]. L'analyse des coefficients de détermination montre que le modèle de Langmuir décrit beaucoup mieux les résultats expérimentaux que celui de Freundlich. En effet, la valeur de R^2 obtenue pour le modèle de Langmuir (0,999) est très proche de l'unité, tandis que celle du modèle de Freundlich est de 0,9458. Cela indique que l'adsorption de l'orange de méthyle sur le biosorbant est principalement

représentée par le modèle de Langmuir. La capacité maximale d'adsorption (Q_m) calculée à partir de ce modèle est de 51,8 mg/g, ce qui montre que le biosorbant possède une bonne capacité de rétention vis-à-vis de l'orange de méthyle. Par ailleurs, la constante de Langmuir ($K_L = 0,0361$ L/mg) traduit une affinité favorable entre les molécules du colorant et les sites actifs présents à la surface du biosorbant. Le modèle de Freundlich fournit également un ajustement acceptable des données expérimentales, bien que moins satisfaisant que celui de Langmuir. La valeur de n , égale à 1,6, est supérieure à 1, ce qui indique que l'adsorption est favorable dans les conditions étudiées. Par ailleurs, la constante K_F (2,9 mg/g (L/mg)^{-1/n}) reflète la capacité d'adsorption du matériau selon ce modèle. Dans l'ensemble, les résultats obtenus montrent que le modèle de Langmuir est le plus approprié pour décrire le comportement d'adsorption de l'orange de méthyle sur le biosorbant étudié.

V.6 Effet du pH

Les résultats de l'étude de l'effet du pH sur l'adsorption de l'orange de méthyle par le biosorbant PK sont présentés dans la (Figure 20). Ils montrent que la capacité maximale d'adsorption du colorant est obtenue à pH = 4. Ce comportement est étroitement lié à la charge superficielle du biosorbant, qui dépend du pH du milieu.

Lorsque le pH est inférieur au pH_{PZC} , la surface du biosorbant est globalement chargée positivement. Cette charge favorise les interactions électrostatiques attractives entre les sites actifs du matériau et les ions anioniques de l'orange de méthyle, ce qui améliore l'efficacité de l'adsorption. En revanche, lorsque le pH augmente au-delà du pH_{PZC} , la surface du biosorbant devient progressivement négativement chargée. Il en résulte des répulsions électrostatiques avec les espèces anioniques du colorant, entraînant une diminution progressive de la capacité d'adsorption (Q_e). Ces observations sont en accord avec celles rapportées par (Serban et al., 2023), qui ont également montré que l'adsorption de l'orange de méthyle sur un charbon actif commercial est plus efficace en milieu acide qu'en milieu basique.

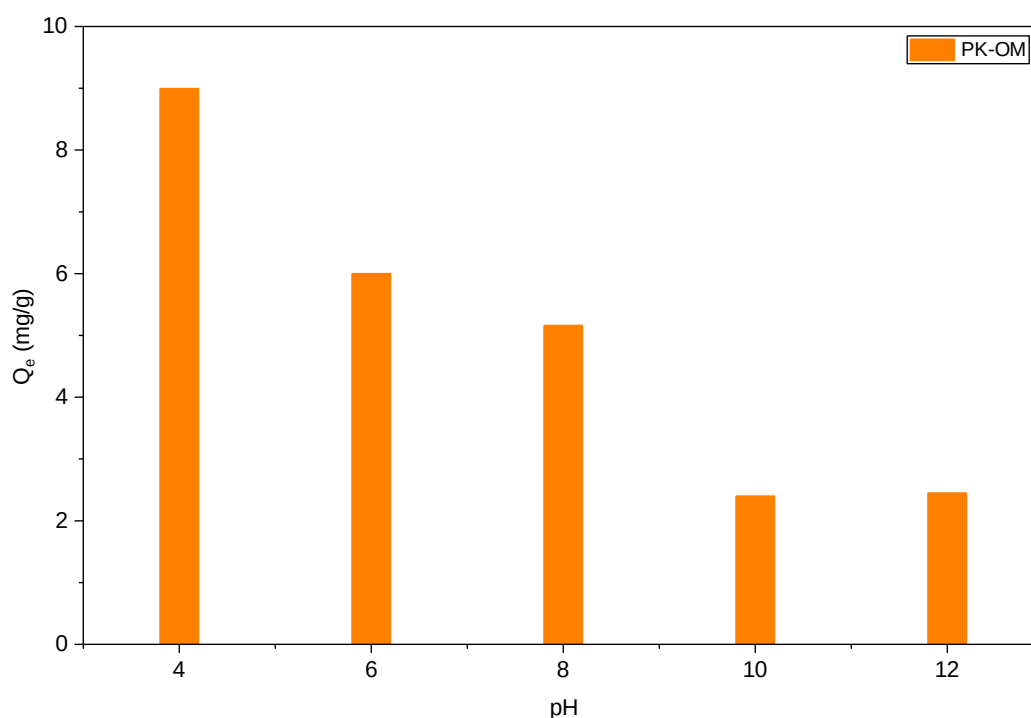


Figure 20 Effet du pH sur l'adsorption de l'orange de méthyle (MO).

V.7 Etude thermodynamique

Les paramètres thermodynamiques de l'adsorption de l'orange de méthyle sur le biosorbant PK ont été déterminés à partir de l'équation de Van't Hoff. Les valeurs de l'enthalpie standard (ΔH°), de l'entropie standard (ΔS°) et de l'énergie libre de Gibbs (ΔG°) sont regroupées dans le [Tableau 5]. La représentation graphique de l'équation de Van't Hoff présente une bonne linéarité avec un coefficient de détermination élevé ($R^2 = 0,9966$), ce qui indique une bonne corrélation entre les données expérimentales et le modèle appliqué.

La valeur positive de l'enthalpie standard d'adsorption ($\Delta H^\circ = 3032 \text{ J/mol}$) indique que le processus d'adsorption est de nature endothermique, c'est-à-dire qu'il nécessite un apport d'énergie pour se produire. La valeur négative de l'entropie standard ($\Delta S^\circ = -1,4 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$) suggère une diminution du désordre du système lors de l'adsorption, probablement liée à une organisation plus importante des molécules de colorant à l'interface adsorbant/solution.

Les valeurs de l'énergie libre de Gibbs obtenues aux différentes températures étudiées (303, 313 et 323 K) sont positives (3449 ; 3463 et 3477 J/mol), indiquant que le processus d'adsorption n'est pas thermodynamiquement spontané dans les conditions

expérimentales étudiées. Par ailleurs, les valeurs de ΔG° restent très proches les unes des autres et n'augmentent que très légèrement avec la température. Cette faible variation suggère que l'augmentation de la température entre 303 et 323 K n'influence que faiblement la spontanéité du processus d'adsorption.

Tableau 5 Paramètres thermodynamiques de l'adsorption du l'orange de méthyle (OM)

ΔH° (J/mol)	ΔS° (J/mol. K)	R^2	ΔG° (J/mol)		
			298 K	308 K	318 K
3032	-1,4	0,9966	3449	3463	3477

V.8 Etude comparatives

L'étude comparative révèle que les charbons actifs restent les adsorbants les plus performants, avec des capacités pouvant atteindre 927 mg/g, grâce à leur surface spécifique développée et leurs nombreux sites actifs. Le biosorbant à base de pétiole activé par KOH, utilisé dans ce travail, affiche quant à lui une capacité de 51,8 mg/g une valeur plus modeste, mais qui prend tout son sens au regard de l'origine naturelle et du faible coût du matériau. Issu d'une biomasse agricole peu valorisée, ce biosorbant s'inscrit dans une logique d'économie circulaire et représente une alternative accessible et écologiquement cohérente pour le traitement des eaux colorées.

Tableau 6 Étude comparative de la capacité maximale d'adsorption de l'orange de méthyle (OM)

Adsorbant	Nature de l'adsorbant	Capacité d'adsorption Q_m (mg/g)	Référence
Charbon actif à base de citrate de potassium	Matériau carboné poreux	927	(S. Wang et al., 2023)
Charbon actif issu de sciure de caoutchouc	Matériau carboné poreux	111,11	(Kalogiannakis, 2010)
Composite Fe–Mn	Composite métallique	405,11	(Deb, 2017)

Charbon actif conventionnel	Matériau carboné poreux	113,63	(Messaoudi, 2005)
Charbon actif à base de maïs	Matériau carboné poreux	107,527	(AJEBLI, 2023)
Pétiole modifiée par KOH	Biomasse activé	51,8	Cette étude

Conclusion Générale

26/06/2016



Conclusion Générale

Ce travail avait pour objectif d'évaluer l'efficacité d'un biosorbant issu de résidus agricoles locaux, le pétiole de palmier dattier (PK), pour l'élimination du colorant orange de méthyle (OM) en solution aqueuse par adsorption en système discontinu.

Le point de charge nulle (pH_{PZC}), déterminé à pH 9,5, a permis de mieux comprendre le comportement du matériau selon le pH du milieu et d'expliquer les meilleures performances observées en milieu acide, où l'équilibre d'adsorption est atteint en seulement 30 minutes environ.

Sur le plan cinétique, le modèle de pseudo-second (PSO) ordre décrit le mieux les données expérimentales ($R^2 = 0,9904$), ce qui indique que l'adsorption est principalement gouvernée par des interactions chimiques entre le colorant et la surface du matériau. L'analyse des isothermes, quant à elle, montre une excellente adéquation avec le modèle de Langmuir ($R^2 = 0,9990$), suggérant une adsorption en monocouche sur une surface relativement homogène, avec des sites actifs équivalents.

L'ensemble de ces résultats confirme que le biosorbant à base de pétiole de palmier dattier constitue une alternative sérieuse, à la fois économique et écologique, pour le traitement des eaux contaminées par des colorants organiques. Cette approche, ancrée dans une logique de valorisation des sous-produits agricoles, ouvre des perspectives concrètes pour une gestion plus durable des ressources hydriques.

.

Références

- Abegunde, S. M., Idowu, K. S., Adejuwon, O. M., & Adeyemi-Adejolu, T. (2020). A review on the influence of chemical modification on the performance of adsorbents. *Resources, Environment and Sustainability*, 1, 100001.
- AJEBLI, S. (2023). *Procédés d'adsorption et de bio-photocatalyse pour l'élimination d'un antirétroviral par des matériaux synthétisés: Charbon actif, Bio-composite, Bio-nanocomposite et Verre semiconducteur*.
- Al-Tohamy, R., Ali, S. S., Li, F., Okasha, K. M., Mahmoud, Y. A.-G., Elsamahy, T., Jiao, H., Fu, Y., & Sun, J. (2022). A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 231, 113160.
- Aruna Janani, V., Gokul, D., Dhivya, N., Nesarani, A., Mukilan, K., Suresh Kumar, A., & Vignesh Kumar, M. (2023). Optimization studies on methyl orange (MO) dye adsorption using activated carbon nanoadsorbent of ocimum basilicum linn leaves. *Journal of Nanomaterials*, 2023(1), 7969512.
- Azelee, N. I. W., Mahdi, H. I., Cheng, Y.-S., Nordin, N., Illias, R. M., Rahman, R. A., Shaarani, S. M., Bhatt, P., Yadav, S., & Chang, S. W. (2023). Biomass degradation: Challenges and strategies in extraction and fractionation of hemicellulose. *Fuel*, 339, 126982.
- Bardestani, R., Patience, G. S., & Kaliaguine, S. (2019). Experimental methods in chemical engineering: specific surface area and pore size distribution measurements—BET, BJH, and DFT. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 97(11), 2781–2791.
- Bethi, B., Sonawane, S. H., Bhanvase, B. A., & Bhasarkar, J. B. (2021). Introduction to nanomaterials for wastewater treatment. In *Handbook of nanomaterials for wastewater treatment* (pp. 3–25). Elsevier.
- Crini, G., & Lichtfouse, E. (2018). *Green adsorbents for pollutant removal: innovative materials* (Vol. 10). Springer.
- Deb, A. (2017). Adsorption of methyl orange dye using Fe-Mn composite powder as adsorbent. *Int J Eng Res*, 6, 475–479.
- Fayoud, N., Younssi, S. A., Tahiri, S., & Albizane, A. (2015). Etude cinétique et thermodynamique de l'adsorption de bleu de méthylène sur les cendres de bois (Kinetic and thermodynamic study of the adsorption of methylene blue on wood ashes). *J. Mater. Environ. Sci*, 6(11), 3295–3306.
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10.
- Giles, C. H., Smith, D., & Huitson, A. (1974). A general treatment and classification of the solute adsorption isotherm. I. Theoretical. *Journal of Colloid and Interface Science*, 47(3), 755–765.

- Jedynak, K., & Charmas, B. (2024). Adsorption properties of biochars obtained by KOH activation. *Adsorption*, 30(2), 167–183.
- Kalogiannakis, M. (2010). *Proceedings of the 7th International Conference on Design and Emotion*.
- Kärger, J., Ruthven, D. M., & Valiullin, R. (2021). Diffusion in nanopores: inspecting the grounds. *Adsorption*, 27(3), 267–281.
- Khalifa, E. Ben, Azaiez, S., Magnacca, G., Cesano, F., Benzi, P., & Hamrouni, B. (2023). Synthesis and characterization of promising biochars for hexavalent chromium removal: application of response surface methodology approach. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(4), 4111–4126.
- Khongthaw, B., Chauhan, P. K., Chishty, N., Kumar, D., Velmurugan, A., Singh, A., Bhtoya, R., Devi, N., Nene, A., & Sadeghzade, S. (2024). Aqueous phase textile dye degradation by microbes and nanoparticles: a review. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2024(1), 8845873.
- Li, B., Yin, W., Xu, M., Tan, X., Li, P., Gu, J., Chiang, P., & Wu, J. (2019). Facile modification of activated carbon with highly dispersed nano-sized α -Fe₂O₃ for enhanced removal of hexavalent chromium from aqueous solutions. *Chemosphere*, 224, 220–227.
- Liu, J., Yao, K., Yu, L., & Zhang, L. (2025). Metal-phenolic networks enhanced metal-organic frameworks for efficient tetracycline removal. *Chemical Engineering Science*, 122241.
- Liu, W.-J., Jiang, H., & Yu, H.-Q. (2015). Development of biochar-based functional materials: toward a sustainable platform carbon material. *Chemical Reviews*, 115(22), 12251–12285.
- Melouki, S., Reffas, A., Merrouche, A., Reinert, L., & Duclaux, L. (2020). Biochars issus de roseau commun pour l'adsorption du méthylorange en solution aqueuse. *Revue Des Sciences de l'Eau*, 32(4), 349–367.
- Messaoudi, L. (2005). Réflexions sur l'élaboration d'un dictionnaire spécialisé bilingue français-arabe. BOUHLEL Ezzedine:" *La Fonction Sujet et Les Paradigmes Afférents En Français*, 93.
- Mittal, A., Malviya, A., Kaur, D., Mittal, J., & Kurup, L. (2007). Studies on the adsorption kinetics and isotherms for the removal and recovery of Methyl Orange from wastewaters using waste materials. *Journal of Hazardous Materials*, 148(1–2), 229–240.
- Mohammadi, S., & Mahmoudi Alemi, F. (2021). Simultaneous control of formation and growth of asphaltene solids and wax crystals using single-walled carbon nanotubes: an experimental study under real oilfield conditions. *Energy & Fuels*, 35(18), 14709–14724.

- Olukanni, O. D., Adenopo, A., Awotula, A. O., & Osuntoki, A. A. (2013). Biodegradation of malachite green by extracellular laccase producing *Bacillus thuringiensis* RUN1. *Journal of Basic & Applied Sciences*, 9, 543.
- Periyasamy, A. P. (2024). Recent advances in the remediation of textile-dye-containing wastewater: prioritizing human health and sustainable wastewater treatment. *Sustainability*, 16(2), 495.
- Perrard, A., Joly, J., Bourane, A., Olry, P., & Gallezot, P. (2006). Nouveaux catalyseurs métalliques supportés sur tissus de carbone activé à base de cellulose. *ACTUALITE CHIMIQUE*, 295, 104.
- Qin, F., Zhang, C., Zeng, G., Huang, D., Tan, X., & Duan, A. (2022). Lignocellulosic biomass carbonization for biochar production and characterization of biochar reactivity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112056.
- Ragauskas, A. J., Beckham, G. T., Biddy, M. J., Chandra, R., Chen, F., Davis, M. F., Davison, B. H., Dixon, R. A., Gilna, P., & Keller, M. (2014). Lignin valorization: improving lignin processing in the biorefinery. *Science*, 344(6185), 1246843.
- Raji, Y., Nadi, A., Rouway, M., Jamoudi Sbair, S., Yassine, W., Elmahboub, A., Cherkaoui, O., & Zyade, S. (2022). Efficient adsorption of methyl orange on nanoporous carbon from agricultural wastes: characterization, kinetics, thermodynamics, regeneration and adsorption mechanism. *Journal of Composites Science*, 6(12), 385.
- Revellame, E. D., Fortela, D. L., Sharp, W., Hernandez, R., & Zappi, M. E. (2020). Adsorption kinetic modeling using pseudo-first order and pseudo-second order rate laws: A review. *Cleaner Engineering and Technology*, 1, 100032.
- Rouessac, F., & Rouessac, A. (2013). *Chemical analysis: modern instrumentation methods and techniques*. John Wiley & Sons.
- Rouquerol, J., Rouquerol, F., Llewellyn, P., Maurin, G., & Sing, K. (2013). *Adsorption by powders and porous solids: principles, methodology and applications*. Academic press.
- Serban, G. V., Iancu, V. I., Dinu, C., Tenea, A., Vasilache, N., Cristea, I., Niculescu, M., Ionescu, I., & Chiriac, F. L. (2023). Removal efficiency and adsorption kinetics of methyl orange from wastewater by commercial activated carbon. *Sustainability*, 15(17), 12939.
- Shan, J., Li, C., Zhang, Z., Zhang, J., Wang, X., & Huang, X. (2022). Application of biomass adsorbents in the treatment of heavy metals in wastewater: a review. *Desalination and Water Treatment*, 267, 108–120.
- Slama, H. Ben, Chenari Bouket, A., Pourhassan, Z., Alenezi, F. N., Silini, A., Cherif-Silini, H., Oszako, T., Luptakova, L., Golińska, P., & Belbahri, L. (2021). Diversity of synthetic dyes from textile industries, discharge impacts and treatment methods. *Applied Sciences*, 11(14), 6255.

- Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y., & Yang, Z. (2015). Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. *Chemosphere*, 125, 70–85.
- Tazerouti, N., & Amrani, M. (2010). Adsorption du Cr (VI) sur la lignine activée. *Revue Des Sciences de l'eau*, 23(3), 233–245.
- Tran, H. N., You, S.-J., Chao, H.-P., & Wang, Y.-F. (2017). Sustainable biochar derived from agricultural wastes for removal of methylene green 5 from aqueous solution: adsorption kinetics, isotherms, thermodynamics, and mechanism analysis. In *Air, Gas, and Water Pollution Control Using Industrial and Agricultural Solid Wastes Adsorbents* (pp. 255–292). CRC Press.
- Wang, H., Zhao, L., & Hou, W. (2024). Pseudo-second-order kinetic equation for describing the effect of sorbent and sorbate concentrations. *Langmuir*, 40(7), 3559–3568.
- Wang, S., Dou, J., Zhang, T., Li, S., & Chen, X. (2023). Selective adsorption of methyl orange and methylene blue by porous carbon material prepared from potassium citrate. *ACS Omega*, 8(38), 35024–35033.
- Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S., & Ang, H. M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: a review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 209, 172–184.
- Zhang, L., Xu, C. C., & Champagne, P. (2010). Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. *Energy Conversion and Management*, 51(5), 969–982.

ANNEXE





Approval for Final Printing of a Master's Dissertation

	Name and Surname	Signature
Examiner 1	Bouras Hadj Daoud	
Examiner 2	Djehad Bentarfa	
Supervisor	Daoud Mounir	

I, the undersigned, Mr. Hadj Daoud Bouras

President of the jury for the students: Amna Bahaz and Nivine Maroua Rouighi.

Field: Chemistry; Specialization: Analytical Chemistry

Thesis Title: Production et caractérisation d'un adsorbant biosourcé à partir des déchets de palmier dattier.

Hereby authorize the above-mentioned student(s) to print and submit their final manuscript to the department.

Ghardaia: 06/ 07/2026

President of the jury



Head of the department

نيس قسم التعليم المشترك
في العلوم والتكنولوجيا
شويبة فيصل

