

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ DE SAÏDA - Dr MOULAY TAHAR

جامعة سعيدة – د. مولاي الطاهر

Faculté des Sciences et Technologie

كلية العلوم والتكنولوجيا

Département de Science de la matière

قسم علوم المادة

MEMOIRE

Elaboré en vue de l'obtention du diplôme de master en Chimie

Spécialité : Chimie Inorganique

Intitulé :

Application d'une matrice naturelle « Noyau de dattes » dans l'élimination de la Rhodamine B des eaux usées.

Présenté par :

M^{elle} Mohammédi Chaima

Soutenu le 17/06/2026, devant le jury composé de :

M ^r ZEBIDA Mourad	MCA	Université de Saida - Dr MOULAY Tahar	Président
M ^{me} BOUTALEB Nadia	MCA	Université de Saida - Dr MOULAY Tahar	Encadrante
M ^{me} OULD KADDA Zahra	MCA	Université de Saida - Dr MOULAY Tahar	Examinatrice

Année Universitaire 2025/2026

Remerciement

Remerciement

Avant tout, je rends grâce à Dieu pour m'avoir insufflé la volonté, la force et la patience nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

À travers ce modeste mémoire, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrante, Madame **Boutaleb Nadia**, Maître de conférences "A" à l'Université de Saïda. Je la remercie chaleureusement pour son précieux accompagnement scientifique, ses conseils avisés et son soutien constant tout au long de la réalisation de ce projet.

J'adresse également mes sincères remerciements à Monsieur **ZEBIDA Mourad** maître de conférences "A" à l'université de Saïda, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury, ainsi que pour ses remarques constructives. Mes remerciements vont aussi à madame **OULD KADDA Zahra**, maître de conférences "A" à l'Université de Saïda, pour avoir accepté d'examiner ce travail, et pour l'intérêt qu'elle lui a accordé.

Dédicace

Dédicace

À celle qui a tracé le chemin de la science pas à pas, et qui a su résister à tous les défis ; à moi-même, qui ne m'ai pas déçue, et qui ai enduré la fatigue et les nuits blanches pour atteindre aujourd'hui cet accomplissement avec toute ma fierté et ma dignité

À la source de la générosité et de la tendresse, à ceux dont les prières sont le secret de ma réussite et dont les sourires illuminent mon chemin... Mes chers parents, mon père et ma mère, que Dieu les préserve et leur accorde santé et longue vie.

À mes piliers dans la vie et à ma source de force... **Mes frères et sœurs : Hayat, Yasmine, Mohamed Amine et Zine El Abidine**, avec qui j'ai partagé les jours et les souvenirs. À ma précieuse et grande famille... La "**Famille Mohammedi**", dont je suis si fier de faire partie.

À tous ceux qui m'ont tendu une main secourable, partagé un conseil, ou dédié une prière en mon absence, et qui m'ont soutenue tout au long de mon parcours académique et professionnel pour que ce mémoire puisse voir le jour.

À mes compagnes de route et de tendres souvenirs... Mes amies de l'université, avec qui j'ai partagé les moments de fatigue et de joie, et les bancs d'études.

À vous tous, je dédie le fruit de mon travail et de ma réussite

Listes des abréviation

Liste des abréviations

RB : Rhodamine B

NDB : noyaux de dattes bruts

NDC : noyau de dattes calcinés

T : Température

C : Concentration

R(%) : Rendement

t : Temps de contact

k₁: Constante de vitesse d'adsorption du pseudo-premier ordre

k₂ : Constante de vitesse d'adsorption du pseudo-second ordre

q_e : Quantité adsorbée

C₀ : Concentration initiale de l'adsorbat

C_e : Concentration de l'adsorbat à l'équilibre

m : Masse de l'adsorbant en gramme

V : Volume de la solution prélevé

q_{max} : Quantité maximale adsorbée ou capacité maximale d'adsorption du solide

K_L : Constante d'équilibre de Langmuir

K_f : Constante d'équilibre de Freundlich

ΔH° : Enthalpie standard

ΔS° : Entropie standard

ΔG° : Energie libre standard

FT-IR : infra rouge à transformée de fourier

NaOH : Hydroxyde de sodium

HCl : L'acide Chlorhydrique

H₃PO₄ : L'acide phosphorique

DCO : Demande chimique en oxygène

DBO: Demande biologique en oxygène

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Formule chimique de l'eau.	3
Figure I.2 : Réaction d'un écosystème aquatique aux pollutions dans un bassin versant.	4
Figure I.3. Rejets industriels dans un cours d'eau.	5
Figure I.4. Eaux usées fortement colorées provenant de l'industrie textile	5
Figure I.5: Exemple de Colorants d'origine végétale.	9
Figure I.6: Structure chimique de la Rhodamine B	14
Figure II.1 : Schéma du phénomène d'adsorption.	19
Figure II.2 : Structure poreuse d'un matériau adsorbant.	23
Figure II.3: Schéma du mécanisme de transport de l'adsorbat au sein d'un grain	25
Figure II.4 : Palmier dattier Phoenix dactylifera	28
Figure II.5 : Composition chimique du noyau de dattes.	29
Figure II.6: Structure poreuse du charbon actif.	31
Figure II.7: Différentes formes de charbon actif.	33
Figure II.8 : Procédé de traitement des eaux usées par le charbon actif	34
Figure II.9 : Procédé de traitement des eaux usées par le charbon actif.	35
Figure III.1 : Lavage des noyaux de dattes.	41
Figure III.2 : Séchage des noyaux de dattes	42
Figure III.3 : Broyage et tamisage des noyaux de dattes.	42
Figure III.4 : Spectrophotomètre infra-rouge à transformée de Fourier Agilent Cary 630.	43
Figure III.5 : Spectre infrarouge à transformée de Fourier des noyaux de dattes brutes.	43
Figure III.6 : Charbon actif préparé à partir des noyaux de dattes.	45
Figure III.7 : Agitation du charbon Avec H_3PO_4 (4heure).	45
Figure III.8 : Filtration de charbon actif	45
Figure III.9 : Séchage de charbon actif à 100°C.	45
Figure III.10 : Tamisage de charbon actif.	46
Figure III.11 : Spectre infrarouge à transformée de Fourier du charbon actif.	46
Figure III.12 : Préparation des solutions diluées de la Rhodamine B.	48
Figure III.13 : Courbe d'étalonnage de la Rhodamine B.	49
Figure III.14 : Influence de la masse de l'adsorbant sur le rendement de l'élimination	50
Figure III.15 : Effet du temps de contact sur le rendement d'élimination de la (RB)	51
Figure III.16 : Effet de la concentration du colorant sur le rendement de l'élimination de la (RB) [m=0.35g /NDB, m=0.2g /NDC], t= 15 min, T=20°C (ambiante).	52
Figure III.17 : Influence de la température sur le rendement d'élimination de la (RB).t=15 min, [m=0.35g /NDB, m=0.2g /NDC], [5×10^{-5} mol/l].T=20° (ambiante).	53
Figure III.18 : Influence du pH sur le rendement d'élimination de la RB. t=15 min, [m=0.35g /NDB, m=0.2g /NDC], T°=25° , C [5×10^{-5} mol/l] (RB).	54

LISTE DES FIGURES

Figure III.19 : Détermination des constantes des vitesses du pseudo 1er ordre de l'adsorption du (RB) par NDB et NDC.	56
Figure III.20 : Détermination des constantes des vitesses de pseudo second ordre de l'adsorption de la (RB) par NDB et NDC.	57
Figure III.21 : Linéarisation de Langmuir de la RB par (NDB).	58
Figure III.22 : Linéarisation de Langmuir de la RB par (NDC).	58
Figure III.23 : Linéarisation de l'isotherme de Freundlich de la RB par (NDB).	59
Figure III.24 : Linéarisation de l'isotherme de Freundlich de la RB par (NDC).	59
Figure III.25 : Paramètres thermodynamiques d'adsorption du RB par NDB.	61
Figure III.26 : Paramètres thermodynamiques d'adsorption du RB par NDC.	62

Listes des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Longueur d'onde des couleurs	08
Tableau I.2 : Toxicité des colorants (influence sur la santé humaine)	12
Tableau I.3 : Propriétés physico-chimique de la Rhodamine B	13
Tableau II.1 : Tableau comparatif entre la chimisorption et la physisorption	20
Tableau III.1 : Tableau des réactifs chimique utilisés	40
Tableau III.2 : Constantes des deux études cinétiques d'adsorption de RB par NDB et NDC	57
Tableau III.3 : Constantes des deux isothermes d'adsorption du RB par NDB et NDC	60
Tableau III.4 : Paramètres thermodynamique du RB par NDB et NDC	62

Table des matières

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Chapitre I : Revue bibliographique sur les polluants/pollution	
Introduction	3
I. Notions sur l'eau	3
I.1.1. Définition, structure et propriétés	3
I.1.2. Pollution de l'eau	3
I.2. Sources de pollution	4
I.2.1. Pollution naturelle	4
I.2.2. Pollution industrielle	4
I.2.3. Pollution atmosphérique	5
I.2.4. Pollution urbaine	6
I.2.5. Pollution agricole	6
I.3. Types de polluants	6
I.3.1. Matières organiques fermentescibles	6
I.3.2. Nutriments	6
I.3.3. Métaux lourds	6
I.3.4. Composés organiques de synthèse	6
I.3.5. Pesticides	7
I.4. Processus influençant la pollution	7
I.4.1. Processus physiques	7
I.4.2. Processus chimiques	7
I.4.3. Processus biologiques	7
I.4.4. Facteurs influençant	7
I.5. Cas des colorants	7
I.5.1 . Définition d'un colorant	7
I.5.2. Origine de colorants	9
I.5.2.1. Colorants d'origine végétale	9
I.5.2.2. Colorants d'origine animale	10
I.5.2.3. Colorants d'origine minérale	10
I.5.2.4. Colorants synthétiques	10
I.6 Impact des colorants sur les êtres vivants et l'environnement	10
I.7 Utilisation des colorants	11
I.8 Toxicité des colorants	11
I.9. Colorants étudiées	12
I.9.1 Rhodamine B	12
I.9.1.1 Propriétés physico-chimiques	13
I.10. Impact environnemental et toxicité	14
I.11. Traitement et élimination	14

Table des matières

Références bibliographiques	15
Chapitre II : Revue bibliographique sur le procédé d'adsorption	
II.1 Introduction	18
II 2. Types d'adsorption	18
II 2.1. L'adsorption chimique (chimisorption)	18
II 2.2 .L'adsorption physique (physisorption)	
II 3. Facteurs influençant l'adsorption	20
II 3.1. Influence du PH sur l'adsorption	20
II 3.2. Influence de la température	20
II 3.3. Influence de la nature de l'adsorbant sur l'adsorption	20
II 3.4. Influence de la concentration sur l'adsorption	20
II.3.5. Influence de la surface spécifique	21
II.3.6. Influence de la porosité	22
II.3.7. Influence de la polarité	22
II.3.8. Influence du temps de contact	22
II.4. Classification des adsorbants selon la polarité	22
II.5. Mécanisme d'adsorption	23
II.6. Modélisation des cinétiques d'adsorption	24
II.6.1. Cinétique du pseudo premier ordre	24
II.6.2. Cinétique du pseudo second ordre	24
II.7. Modèles d'isothermes d'adsorption	25
II.7.1. Modèle de Langmuir	25
II.7.2. Modèle de Freundlich	25
II.7.3. Modèle de Temkin	26
II.8. Classification des isothermes d'adsorption	26
II.9. Dattes et les noyaux des dattes	27
II.9.2. Biogéographie	28
II.9.3. Variétés de dattes	29
II.9.4. Structure d'un noyau de datte	29
II.9.5. Valorisation des noyaux de dattes	30
II.9.5. Incorporation dans l'alimentation humaine ou animale	30
II.9.6. Valorisation des noyaux de dattes	30
II.9.6.1. Adsorbants low-cost	31
II.9.6.2. Charbon actif	31
II.9.6.2.1 Définition	32
II.9.6.2.2 Origine et fabrication	32
II.9.6.2.3 Morphologie	33
II.9.6.2.4 Structure et propriétés	33
II.9.6.2.5 Propriétés et applications	33
II.9.6.2.6 Activation du charbon actif	34

Table des matières

Conclusion	36
Chapitre III : Etude de l'adsorption de la RB par les biomatériaux (NDB et NDC)	
INTRODUCTION	40
III.1. Matériels et verreries utilisés	40
III.1.2.Réactifs chimiques utilisés	40
III.2.Préparation du biomatériau	40
III.2.1.Noyaux de dattes	41
III.2.1.1.Caractérisation physico-chimique du biomatériau noyaux de dattes	42
III.2.2 Charbon actif à partir des noyaux de datte :	44
III.2.2.1 Activation de charbon actif	44
III.2.2.2 Caractérisation physico-chimique du biomatériau charbon actif :	46
III.3. Etude paramétriques	47
III.3.1. Préparation des solutions diluées et courbes d'étalonnages	48
III.3.2. Etablissement de la courbe d'étalonnage	49
III.3.3. Effet de la masse de l'adsorbant	49
III.3.4. Etude cinétique	51
III.3. 5. Effet de la concentration	52
III.3.6. Effet de la température	53
III.3.7. Effet du pH	54
III.4.1. Modélisation de la cinétique d'adsorption	55
III.4.2. Isothermes d'adsorption	58
III.4.3. Etude thermodynamique de l'adsorption du RB sur les noyaux de dattes et le charbon actif.	60
Références bibliographiques	63
Conclusion générale	65

INTRODUCTION GÉNÉRALE



INTRODUCTION GENERALE

L'eau représente une ressource vitale indispensable à la survie des êtres vivants et au fonctionnement des écosystèmes naturels. Elle joue un rôle fondamental dans les processus biologiques, chimiques et physiques qui régulent la vie sur Terre. En plus de son importance écologique, elle constitue également un élément central dans le développement économique et social des sociétés modernes, notamment dans les secteurs de l'agriculture irriguée, de l'industrie manufacturière et de la production d'énergie. [1]

En effet, l'eau intervient directement dans la régulation du climat, le transport des nutriments et le maintien de la biodiversité. Elle est également essentielle à l'hygiène, à la santé publique et à la sécurité alimentaire. Ainsi, la disponibilité d'une eau de qualité constitue un enjeu majeur pour les états et les organisations internationales, qui cherchent à garantir un accès équitable et durable à cette ressource stratégique. [2]

Cependant, malgré son importance stratégique, cette ressource est aujourd'hui fortement menacée. Au cours des dernières décennies, la croissance démographique rapide, l'urbanisation non contrôlée et l'industrialisation intensive ont exercé une pression croissante sur les ressources hydriques mondiales. Cette pression se traduit principalement par une dégradation progressive de la qualité de l'eau, due à l'introduction massive de polluants d'origines diverses, ce qui entraîne un déséquilibre des écosystèmes aquatiques et une diminution de la disponibilité de l'eau potable. [3]

Par ailleurs, les activités agricoles modernes contribuent également à cette dégradation à travers l'utilisation excessive d'engrais chimiques et de pesticides. Ces substances, transportées par les eaux de ruissellement, contaminent les nappes phréatiques et les cours d'eau, aggravant ainsi la pollution diffuse. À cela s'ajoutent les rejets domestiques et urbains qui, en l'absence de systèmes de traitement efficaces, accentuent la détérioration de la qualité des eaux. [4]

Parmi ces polluants, les colorants organiques occupent une place particulièrement préoccupante. Leur utilisation est très répandue dans de nombreux secteurs industriels tels que le textile, le cuir, le papier, les plastiques, les peintures et même certaines industries alimentaires. Leurs rejets dans les eaux usées, souvent sans traitement efficace, constitue une source majeure de pollution environnementale. [5]

Introduction générale

Les colorants se caractérisent par une structure chimique complexe ainsi qu'une grande stabilité moléculaire, ce qui les rend très résistants aux processus naturels de dégradation. Cette stabilité entraîne leur persistance dans les milieux aquatiques, provoquant des impacts négatifs multiples tels que la réduction de la pénétration de la lumière, la perturbation des chaînes alimentaires aquatiques et des effets toxiques potentiels sur les organismes vivants et la santé humaine. [6]

En outre, certains colorants présentent des propriétés mutagènes et cancérigènes, ce qui renforce leur dangerosité et nécessite la mise en place de solutions de traitement efficaces. Leur accumulation dans les milieux naturels peut engendrer des effets irréversibles sur la faune et la flore, tout en compromettant la qualité des ressources en eau destinées à la consommation humaine. [7]

Face à cette problématique environnementale croissante, le traitement des eaux contaminées par les colorants est devenu une priorité scientifique et technologique. Les méthodes conventionnelles présentent souvent des limites liées à leur coût élevé, leur efficacité variable et leur impact environnemental secondaire. Dans ce contexte, les procédés utilisant des matériaux naturels comme adsorbants apparaissent comme une alternative prometteuse, durable et économiquement viable. [8]

Ces matériaux, souvent issus de déchets agricoles ou industriels, offrent des avantages considérables tels que leur faible coût, leur disponibilité et leur respect de l'environnement. Leur utilisation s'inscrit dans une approche de développement durable visant à valoriser les ressources locales tout en réduisant l'impact environnemental des activités humaines. [9]

Notre travail vise à étudier et modéliser l'adsorption d'un colorant organique, la Rhodamine B, à partir de solutions aqueuses en utilisant comme adsorbants un biomatériau élaboré à partir de noyaux de dattes ainsi qu'un charbon actif obtenu par calcination de ces noyaux.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Le premier chapitre de ce travail est consacré à une étude bibliographique sur la pollution et les polluants organiques et inorganiques.

Introduction générale

Le second chapitre porte sur le phénomène d'adsorption et son intérêt dans l'élimination de polluants, ainsi qu'une description générale du biomatériau utilisé et son application dans le domaine de l'adsorption.

L'ensemble des résultats expérimentaux obtenus lors de la présente étude de l'adsorption des polluants par les noyaux de dattes et les charbons actifs est présenté dans le troisième chapitre.

Références bibliographiques

- [1] Ben Aïssa, A. (2016). Les ressources en eau en Algérie et la problématique de la gestion durable. Mémoire de Magister, Université d'Alger 3, Alger, Algérie.
- [2] Bouguerra, S. (2018). L'importance de l'eau dans le développement durable. Mémoire de Master, Université Constantine 1, Constantine, Algérie.
- [3] Ministère des Ressources en Eau. (2020). Rapport sur la situation des ressources hydriques en Algérie. Alger, Algérie.
- [4] Ghriche, M. (2019). Impact de la pollution agricole sur la qualité des eaux souterraines. Mémoire de Master, Université de Ouargla, Ouargla, Algérie.
- [5] Saâdaoui, F. Z. (2021). Étude de la pollution des eaux par les colorants industriels et méthodes de traitement. Mémoire de Master, Université de Sétif 1, Sétif, Algérie.
- [6] Hamdi, A. (2017). Élimination des colorants par adsorption sur charbon actif. Mémoire de Magister, Université d'Annaba, Annaba, Algérie.
- [7] Bouchareb, N. (2018). Effets des polluants organiques sur l'environnement et la santé. Mémoire de Master, Université de Tlemcen, Tlemcen, Algérie.
- [8] Benyoussef, K. (2022). Techniques de traitement des eaux polluées par les colorants. Thèse de Doctorat, Université de Batna 1, Batna, Algérie.
- [9] Derbal, L. (2020). Utilisation des matériaux naturels pour l'élimination des polluants aqueux. Mémoire de Master, Université de Biskra, Biskra, Algérie.

CHAPITRE I

REVUE

BIBLIOGRAPHIQUE SUR

LA

POLLUTION /POLLUANTS

I.1. Notions sur l'eau

I.1.1. Définition, structure et propriétés:

L'eau est une molécule chimique de formule H_2O , constituée de deux atomes d'hydrogène liés à un atome d'oxygène par des liaisons covalentes sa structure moléculaire adopte une forme angulaire avec un angle d'environ $104,5^\circ$, ce qui lui confère une forte polarité électrique. Cette polarité est à l'origine de nombreuses propriétés physico-chimiques exceptionnelles qui expliquent son rôle fondamental dans la nature. [1]

Grâce à cette polarité, les molécules d'eau établissent entre elles des liaisons hydrogène, responsables de caractéristiques importantes telles que : un pouvoir solvant très élevé permettant la dissolution d'un grand nombre de substances ioniques et polaires, une capacité thermique élevée qui contribue à la régulation climatique, une tension superficielle importante favorisant des phénomènes biologiques essentiels, ainsi qu'une densité maximale à $4^\circ C$ jouant un rôle crucial dans la survie des organismes aquatiques en hiver.[2]

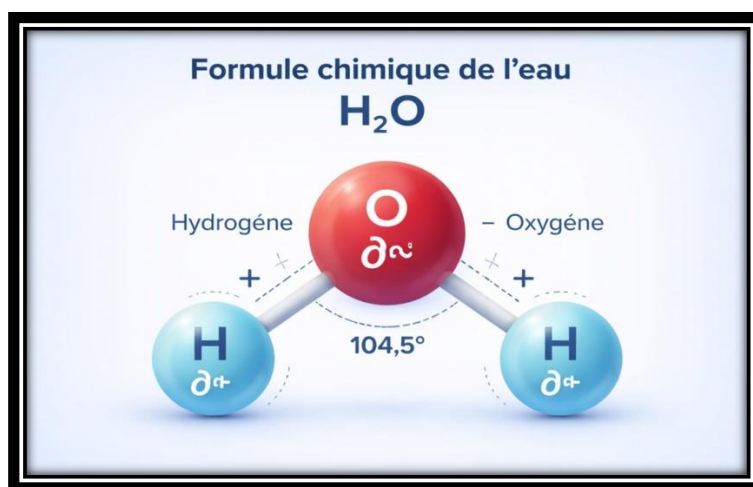


Figure I.1 : Formule chimique de la molécule d'eau (H_2O).

I.1.2. Pollution de l'eau

La pollution de l'eau est définie comme toute modification des propriétés physiques, chimiques ou biologiques de l'eau, entraînant une altération de sa qualité en la rendant impropre à ses usages domestiques, agricoles ou industriels. Cette pollution peut également avoir des effets néfastes sur les organismes vivants et l'équilibre des écosystèmes aquatiques [3]. Elle se manifeste sous plusieurs formes complémentaires : pollution physique (changement de couleur, température ou turbidité), pollution chimique (présence de substances toxiques comme les

métaux lourds ou les colorants), et pollution biologique (présence de micro-organismes pathogènes). L'évaluation de cette pollution repose sur des indicateurs comme la DBO, la DCO, le pH et la conductivité électrique, qui permettent de déterminer le degré de contamination d'une eau donnée. [4]

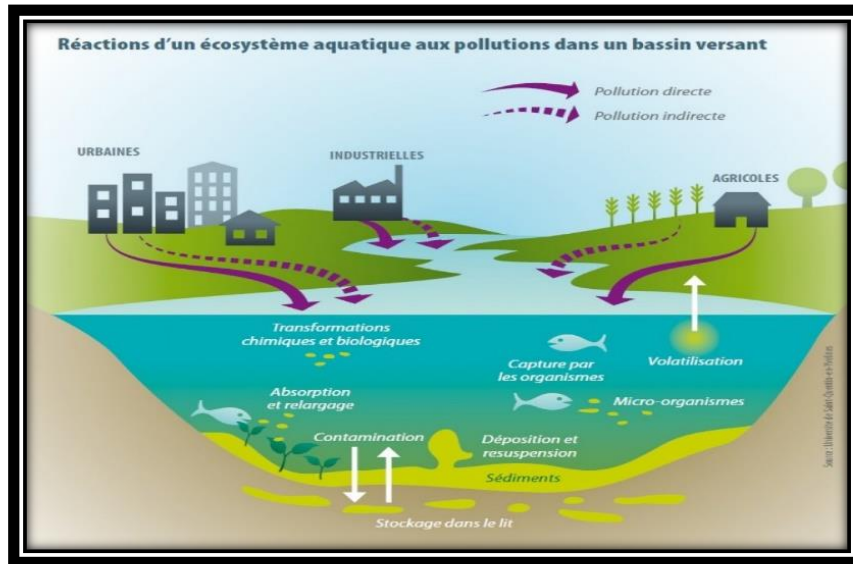


Figure I.2 : Réaction d'un écosystème aquatique aux pollutions dans un bassin versant.

I.2. Sources de pollution

I.2.1. Pollution naturelle

La pollution naturelle est causée par des phénomènes indépendants des activités humaines. Elle inclut l'érosion des sols qui entraîne le transport de particules vers les milieux aquatiques, les éruptions volcaniques qui libèrent des substances chimiques dans l'environnement, ainsi que la décomposition naturelle de la matière organique. Bien que naturelle, cette pollution peut influencer temporairement la qualité de l'eau. [5]

I.2.2. Pollution industrielle

La pollution industrielle représente l'une des principales sources de dégradation des ressources en eau. Elle résulte des rejets d'effluents industriels contenant des substances toxiques telles que les métaux lourds, les solvants organiques, les hydrocarbures et les colorants synthétiques. L'industrie textile est particulièrement concernée en raison de sa forte consommation d'eau et de la production d'effluents fortement colorés et difficilement traitables.[6]



Figure I.3 : Rejets industriels dans un cours d'eau.



Figure I.4 : Eaux usées fortement colorées provenant de l'industrie textile

I.2.3. Pollution atmosphérique

La pollution atmosphérique affecte indirectement la qualité de l'eau à travers les précipitations acides. Les oxydes de soufre et d'azote présents dans l'air qui se dissolvent dans les gouttes de pluie, formant des acides qui modifient le pH des eaux de surface et perturbent les écosystèmes aquatiques. [7]

I.2.4. Pollution urbaine

Elle provient des activités domestiques et des rejets urbains, notamment les eaux usées domestiques, les déchets solides et les effluents des réseaux d'assainissement. Ces rejets contiennent des matières organiques, des détergents et des micro-organismes pathogènes. [8]

I.2.5. Pollution agricole

L'agriculture intensive constitue une source importante de pollution hydrique en raison de l'utilisation massive d'engrais chimiques et de pesticides. Ces substances sont entraînées par ruissellement vers les eaux de surface ou infiltrées vers les nappes souterraines, entraînant une contamination durable. [9]

I.3. Types de polluants**I.3.1. Matières organiques fermentescibles**

Ces matières proviennent principalement des rejets domestiques et industriels. Leurs dégradations biologiques consomment l'oxygène dissous dans l'eau, provoquant un déséquilibre écologique pouvant conduire à la mort de certaines espèces aquatiques. [9]

I.3.2. Nutriments

Les nitrates et phosphates sont essentiels à la croissance des végétaux, mais leur excès entraîne un phénomène appelé eutrophisation, caractérisé par une prolifération excessive d'algues et une diminution de l'oxygène dans l'eau. [9]

I.3.3. Métaux lourds

Les métaux lourds tels que le plomb, le mercure et le cadmium sont hautement toxiques. Ils ne se dégradent pas dans l'environnement et s'accumulent dans les tissus vivants, entraînant des effets graves sur la santé humaine et animale. [9]

I.3.4. Composés organiques de synthèse

Ces composés regroupent les colorants, les solvants et les hydrocarbures. Ils sont généralement résistants à la biodégradation et peuvent persister longtemps dans les milieux aquatiques. [10]

I.3.5. Pesticides

Les pesticides sont utilisés pour protéger les cultures agricoles, mais leur utilisation excessive entraîne une contamination des eaux et des effets toxiques à long terme sur les organismes vivants. [11]

I.4. Processus influençant la pollution

I.4.1. Processus physiques

Ils comprennent la dilution, la dispersion et la sédimentation des polluants, qui influencent leur répartition dans les milieux aquatiques. [12]

I.4.2. Processus chimiques

Ils incluent l'oxydation, l'hydrolyse et la précipitation, qui modifient la structure chimique des polluants et leur toxicité. [13]

I.4.3. Processus biologiques

Ces processus reposent sur l'activité des micro-organismes capables de dégrader certaines substances organiques, bien que certains polluants comme les colorants restent résistants. [14]

I.4.4. Facteurs influençant

La température, le pH et la concentration en oxygène dissous influencent fortement ces processus. [14]

I.5. Cas des colorants

I.5.1. Définition

Un **colorant** est une substance chimique, naturelle ou synthétique, qui possède la capacité de donner une couleur à un matériau ou de modifier sa couleur initiale. Ces matériaux peuvent être utilisés dans des domaines très variés, tels que les textiles, le papier, les plastiques, les produits alimentaires, les cosmétiques et même certains médicaments.

D'un point de vue scientifique, la couleur d'un colorant provient de sa structure moléculaire. En effet, certaines parties de la molécule, appelées chromophores, absorbent

certaines longueurs d'onde de la lumière visible. La lumière non absorbée est réfléchiée, et c'est cette lumière réfléchiée qui est perçue par l'œil humain comme une couleur. [14]

On distingue généralement deux types de matières colorantes :

- **Les colorants (teintures)** : substances solubles dans le milieu (souvent l'eau), capables de pénétrer dans le matériau à colorer et de s'y fixer.
- **Les pigments** : substances insolubles qui restent en surface et nécessitent un liant pour adhérer au support. [15,16]

Propriétés essentielles des colorants :

- **La couleur** (propriété optique)
- **L'affinité avec le support** (propriété chimique). [17]

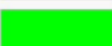
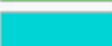
Désignation	Couleur	Longueur d'onde (nm)	Fréquence (THz)
Rouge		~ 625 - 740	~ 480 - 405
Orange		~ 590 - 625	~ 510 - 480
Jaune		~ 565 - 590	~ 530 - 510
Vert		~ 520 - 565	~ 580 - 530
Cyan		~ 500 - 520	~ 600 - 580
Bleu		~ 450 - 500	~ 670 - 600
Indigo		~ 430 - 450	~ 700 - 670
Violet		~ 380 - 430	~ 790 - 700

Tableau I.1: Longueur d'onde des couleurs.

I.5.2. Origine des colorants

Il y a deux principales catégories de colorants : les colorants naturels et ceux fabriqués par synthèse chimique. À partir de 1500 avant notre ère, les Égyptiens ont commencé à produire des teintures en utilisant le safran pour le jaune, le pastel pour le bleu, la garance pour le rouge, ainsi que l'indigo et la pourpre. Depuis lors, la plupart des colorants utilisés sont d'origine végétale, provenant d'extraits de plantes, d'arbres ou de lichens, ou bien d'origine animale, provenant d'insectes tels que le kermès et la cochenille, ou encore de mollusques comme la pourpre, voire même de micro-organismes. Cependant, le nombre de colorants naturels disponibles n'a jamais dépassé quelques dizaines. Ces colorants naturels sont extraits des éléments naturels par des procédés simples tels que le chauffage ou le broyage. Parmi eux, on distingue généralement deux catégories principales : les colorants à mordant et les colorants de cuve [17].

I.5.2.1. Colorants d'origine végétale :

La majorité des colorants naturels relèvent de cette classification. Ils proviennent de différentes parties des plantes telles que les fleurs, les fruits, les graines, les feuilles, les écorces, les troncs, les racines, et autres. En Inde, on recense près de 450 plantes utilisées comme colorants [18].



Figure I.5. Exemple de Colorants d'origine végétale.

I.5.2.2. Colorants d'origine animale

Malheureusement, les colorants d'origine animale ne proposent pas une gamme étendue de teintes. Les noirs sont les plus communs et peuvent être obtenus à partir de divers animaux. Ce processus implique la calcination, généralement des os, dans un environnement clos, tel qu'un récipient hermétique. Une fois calcinée, la matière devient friable et peut être broyée pour obtenir le colorant. En ce qui concerne la fabrication du colorant rouge, dérivé de l'exsudation de corps desséchés d'insectes, notamment la cochenille, elle suit à peu près les mêmes étapes que celles des colorants végétaux [18].

I.5.2.3. Colorants d'origine minérale

Les colorants naturels minéraux sont issus de roches primitives extraites dans des carrières, puis séchées, broyées et parfois calcinées pour obtenir différentes teintes. Leur résistance aux rayons UV et aux conditions météorologiques est remarquable, les rendant idéaux pour les enduits traditionnels, les badigeons, la coloration des chaux, des plâtres et des ciments. Ces colorants minéraux tirent leur teinte de l'oxyde de fer, parfois associé à l'oxyde de manganèse [19,20].

I.5.2.4. Colorants synthétiques

Les colorants synthétiques sont créés à partir de composés dont les matières premières comprennent des molécules telles que le benzène, qui est obtenu par la distillation de la houille. À partir de ces matières premières, une série de procédés chimiques est employée, généralement impliquant le remplacement d'un ou plusieurs atomes d'hydrogène de la substance de départ par des éléments ou des radicaux spécifiques. C'est ainsi que sont produits les intermédiaires, qui sont ensuite utilisés dans la fabrication du colorant final [21].

I.6. Impact des colorants sur les êtres vivants et l'environnement

Les colorants sont des composés qui se dégradent difficilement par les microorganismes, et ils présentent un danger pour la santé humaine, les animaux et l'environnement. Ils peuvent entraîner divers effets néfastes sur la santé humaine, certains étant carcinogènes, mutagènes et tératogènes, susceptibles de provoquer des affections telles que des nausées, des hémorroïdes, des ulcères cutanés et muqueux, ainsi que de graves irritations du système respiratoire [22,23]. Les eaux résiduaires issues des processus utilisant des colorants organiques présentent des niveaux élevés de demande biochimique en oxygène (DBO) et de

demande chimique en oxygène (DCO), ainsi que des concentrations élevées de matières solides. Environ 5 à 25 % des colorants appliqués sur les tissus ne sont pas fixés et se retrouvent dans les eaux usées, ce qui représente un risque de pollution pour les cours d'eau et les écosystèmes aquatiques, affectant notamment la faune et la flore [23]. De plus, les agents colorants peuvent perturber la transmission de la lumière dans l'eau, ce qui bloque la photosynthèse des plantes aquatiques.

I.7. Utilisation des colorants

L'industrie des colorants représente un secteur économique important en raison de la grande diversité des produits pouvant être colorés. Parmi les principales applications, on trouve :

- Les pigments, largement utilisés dans l'industrie des matières plastiques.
- Les encres et le papier, essentiels pour l'imprimerie.
- Les colorants alimentaires, très utilisés dans l'industrie agroalimentaire.
- Les pigments pour peintures, matériaux de construction et céramiques, indispensables dans le secteur du bâtiment.
- Les colorants capillaires, couramment employés dans l'industrie cosmétique.
- Les colorants et conservateurs utilisés dans l'industrie pharmaceutique.
- Les colorants pour carburants et huiles, notamment dans l'industrie automobile.

En outre, de nombreuses autres applications existent, notamment dans le domaine textile (mode et décoration), les transports, la construction ainsi que le secteur médical, parmi d'autres [22,23].

I.8. Toxicité des colorants

La toxicité des colorants est principalement liée à la méconnaissance de leurs structures chimiques, qui varient selon les types, ainsi qu'à leurs conditions d'utilisation. Plusieurs études ont mis en évidence les effets toxiques et/ou cancérogènes des colorants azoïques, ce qui impose le traitement préalable des effluents les contenant avant leur rejet dans l'environnement naturel. Cette toxicité est essentiellement attribuée à la présence de groupements potentiellement cancérogènes tels que les noyaux aromatiques, phtaliques, cyanurés, ainsi que certains sels de

baryum et de plomb. Sous forme électrophile ou radicalaire, ces composés peuvent interagir avec les bases pyrimidiques de l'ADN et de l'ARN, entraînant des altérations du code génétique, des mutations et une augmentation du risque de cancer [24,25].

Tableau I.2 : Toxicité des colorants (influence sur la santé humaine)

CODE	NOM	TEINTE	ORIGINE	RISQUES
ETT1	Bixyde de Titane	Blanc	Minéral	Cancérigène
E160bii	Extraits d'annate à base de norbixine	Orange	Végétal	Allergène
E160b	Roccou	Orange	Végétal	Allergène
E151	Noir brillant BN	Noir	De synthèse	Asthme, allergène
E150d	Caramel au sulfite d'ammonium	Brun	De synthèse	Toxique à haute dose peut –être cancérigène , allergène
E150b	Carma et sulfite	Brun	De synthèse	Allergène
E142	Vert brillant BS	Vert	De synthèse	Allergène, provoque l'hyperactivité
E133	Bleu brillant FCF	Bleu	De synthèse	Allergène
E132	indigotine	Bleu	Inconnu	Irritant,allergène
E131	Bleu patenté V	Bleu	De synthèse	Allergène
E129	Rouge allura AC	Rouge	De synthèse	Allergène, provoque l'hyperactivité
E122	Carmoisine	Rouge	De synthèse	Allergène, provoque l'hyperactivité
E120	Cochenille	Rouge	Insecte	Allergène
E107	J aune2G	J aune	De synthèse	Asthme,allergène,provoque l'hyperactivité
E102	Tartrazine	J aune	De synthèse	Asthme,allergène,provoque l'hyperactivité

I.9. Colorants étudiées

I.9.1 Rhodamine B

Introduction

La Rhodamine B est un colorant organique synthétique appartenant à la famille des composés xanthoniques. Elle est largement utilisée dans différentes industries telles que le textile, les encres, les papiers, les plastiques et certains domaines biologiques pour ses propriétés de coloration intense et sa grande stabilité chimique. [26,27]

I.9.1.1 Propriétés physico-chimiques

La rhodamine B se caractérise par une forte solubilité dans l'eau et une couleur rouge-violette très intense même à faible concentration. Sa structure aromatique complexe lui confère une grande stabilité face à la lumière et aux variations de pH, ce qui la rend difficile à se dégrader par des procédés biologiques classiques. [28,29]

Tableau I.3: Propriétés physico-chimiques de la Rhodamine B .

Famille	Azoïque
Formule Brute	$C_{28}H_{30}N_2O_3$
Appellation Chimique	Chlorure de [9-(2-carboxyphényle)-6-(diethylamino)xanthen-3-ylidene]-diethylazanium.
Masse molaire (g/L)	442,559
$\lambda_{\max}$ (nm)	540 – 555
PKa	3,1 – 3,7
Zone de virage en fonction du pH Provenance & Pureté	3,1 – 5,5 (rose → rouge)

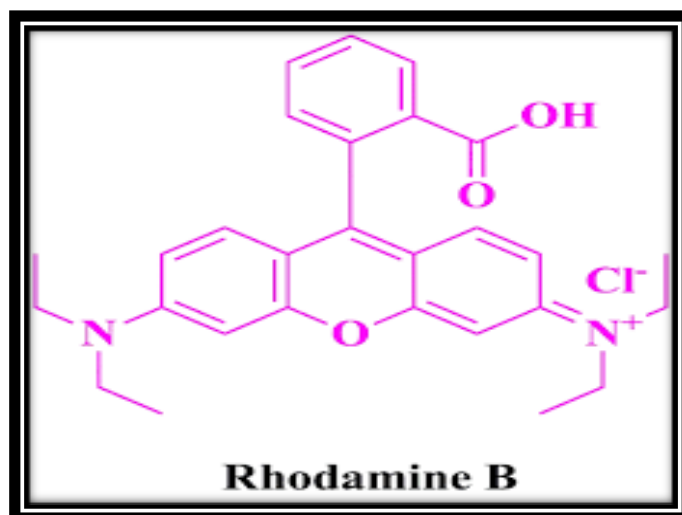


Figure I.6: Structure chimique de la Rhodamine B

I.10. Impact environnemental et toxicité

La présence de la Rhodamine B dans les milieux aquatiques constitue un risque environnemental important. Elle peut réduire la pénétration de la lumière dans l'eau, perturbant ainsi la photosynthèse des organismes aquatiques. De plus, plusieurs études ont montré qu'elle peut présenter des effets toxiques et potentiellement cancérigènes sur les organismes vivants en cas d'exposition prolongée. [29]

I.11. Traitement et élimination

En raison de sa stabilité chimique élevée, la Rhodamine B est difficile à éliminer par les traitements conventionnels. C'est pourquoi des techniques avancées telles que l'adsorption par le charbon actif, les procédés d'oxydation avancée et l'utilisation de matériaux naturels écologiques sont largement étudiées pour l'éliminer efficacement des eaux usées. [29]

Conclusion

La pollution des eaux par les colorants organiques représente aujourd'hui un problème environnemental majeur qui affecte directement la qualité des ressources hydriques et la stabilité des écosystèmes aquatiques. L'analyse des différentes sources de pollution montre que les activités humaines, notamment industrielles, agricoles et urbaines, sont les principales responsables de cette dégradation.

Les colorants, en particulier, constituent une catégorie de polluants préoccupante en raison de leur stabilité chimique, de leur résistance à la biodégradation et de leur toxicité potentielle. Leur présence dans les eaux usées entraîne des impacts multiples, allant de la perturbation de la photosynthèse aquatique jusqu'à des effets nocifs sur la santé humaine.

Face à cette situation, plusieurs procédés de traitement ont été développés. Cependant, les méthodes conventionnelles présentent encore des limites en termes de coût, d'efficacité et d'impact environnemental. C'est dans ce contexte que les techniques basées sur l'adsorption sur des matériaux naturels et écologiques apparaissent comme une alternative prometteuse.

L'utilisation de biomatériaux et de déchets naturels valorisés dans le traitement des eaux constitue une approche durable qui permet non seulement de réduire la pollution, mais aussi de promouvoir une gestion plus responsable des ressources naturelles. Cette approche s'inscrit pleinement dans une logique de développement durable.

Ainsi, ce travail met en évidence la nécessité de poursuivre les recherches dans le domaine du traitement des eaux usées, notamment par l'étude de nouveaux adsorbants naturels plus efficaces et moins coûteux. L'objectif final est de développer des solutions adaptées aux défis environnementaux actuels et futurs, tout en garantissant la protection des ressources hydriques et de la santé publique.

Références bibliographiques

- [1] Jean Rodier, L'analyse de l'eau, Dunod, Paris, 2016.
- [2] George Tchobanoglous, Franklin L. Burton, H. David Stensel, Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, McGraw-Hill, 2003.
- [3] Metcalf & Eddy, Introduction to Wastewater Treatment, McGraw-Hill, 2014.
- [4] René P. Schwarzenbach, Philip M. Gschwend, Dieter M. Imboden, Environmental Organic Chemistry, Wiley, 2016.
- [5] Heinrich Zollinger, Color Chemistry: Syntheses, Properties and Applications of Organic Dyes, Wiley-VCH, 2003.
- [6] Souheyla Chetioui, Structures et propriétés physico-chimiques de substances colorantes de synthèse, Mémoire de Magister, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [7] Tim Robinson et al., « Remediation of dyes in textile effluent: A critical review », Bioresource Technology, 2001, 77, pp. 247–255.
- [8] H. Mansour et al., « Les colorants textiles sources de contamination de l'eau : criblage de la toxicité et des méthodes de traitement », Revue des sciences de l'eau, 2011.
- [9] Grégorio Crini, Eric Lichtfouse, Advances in Dye Removal Technologies, Environmental Chemistry Letters, 2018.
- [10] N. Bensafia, Étude de l'adsorption de la Rhodamine B sur charbon actif préparé à partir de déchets agricoles, Mémoire de Master, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, 2021.
- [11] Khelifi A. Élimination des colorants organiques par adsorption sur charbon actif, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2022.
- [12] Benmoussa ST traitement des eaux usées textiles par adsorption sur matériaux naturels, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah de Ouargla, 2021.
- [13] El Haddad M Bouhamed F., Étude de l'adsorption des colorants par des matériaux naturels, Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar d'Annaba.
- [14] Khaldi S Djebbar R., Traitement des eaux usées par charbon actif, Mémoire de Master, Université Hadj Lakhdar de Batna, 2022.
- [15] Belhadi A Valorisation des déchets agricoles pour l'élimination des polluants organiques, Mémoire de Master, Université Saad Dahlab de Blida, 2021.

- [16] F Boudrahem, Étude comparative de l'adsorption de la Rhodamine B sur différents adsorbants, Mémoire de Master, Université de Jijel, 2021.
- [17] Y Hamdi, Traitement des eaux colorées par adsorption sur charbon actif, Mémoire de Master, Université de Skikda, 2022.
- [18] Sharma P Kaur H., Sharma M., « Adsorption of dyes using agricultural waste materials », Journal of Environmental Chemical Engineering, 2013.
- [19] Wang S Zhu Z.H., « Activated carbon from agricultural waste for dye removal », Microporous and Mesoporous Materials, 2007.
- [20] Ahmad A.L. et al., « Adsorption of dyes using palm kernel shell activated carbon », Journal of Hazardous Materials, 2007.
- [21] Foo K.Y., Hameed B.H., « Insights into the modeling of adsorption isotherm systems », Chemical Engineering Journal, 2010.
- [22] N Chaouch., Utilisation des sous-produits du palmier dattier dans le traitement physico-chimique des eaux polluées, 2014.
- [23] KI Bouaziz , Traitement de solutions organiques diluées par couplage adsorption-oxydation électrochimique, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2014.
- [24] Salmi DJ Slimani K., Application de l'électrocoagulation pour l'élimination d'un colorant textile : cas du Bleu d'indanthrène RS, Université A. Mira de Béjaïa, 2014.
- [25] Abdallah Medekhel, Adsorption du bleu de méthylène par charbon actif, Mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, 2018.
- [26] N Saidi, Élimination des micropolluants organiques par adsorption sur charbon actif, Mémoire de Master, Université de Mascara, 2021.
- [27] H Rezig., Préparation et caractérisation d'un charbon actif à partir de déchets végétaux, Mémoire de Master, Université de Chlef, 2020.
- [28] M Zerrouki., Étude cinétique et isotherme de l'adsorption de la Rhodamine B sur charbon actif, Mémoire de Master, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2022.
- [29] Nor El Houda Bourkaib, L'électrosorption de la Rhodamine B sur le charbon actif, Mémoire de Master/Ingénieur d'État, École Nationale Polytechnique d'Alger, 2017.

CHAPITRE II

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE PROCEDE D'ADSORPTION

II.1. INTRODUCTION

L'adsorption est un phénomène essentiel en sciences des matériaux et chimie, qui consiste en l'attachement sélectif de molécules ou d'espèces chimiques à la surface d'un matériau solide ou liquide. Cette interaction peut résulter de forces d'attraction physiques ou chimiques entre les molécules adsorbées et la surface de l'adsorbant. L'adsorption présente une grande importance dans divers domaines tel que la purification de l'eau, l'élimination des polluants, la séparation de composés chimiques [1].

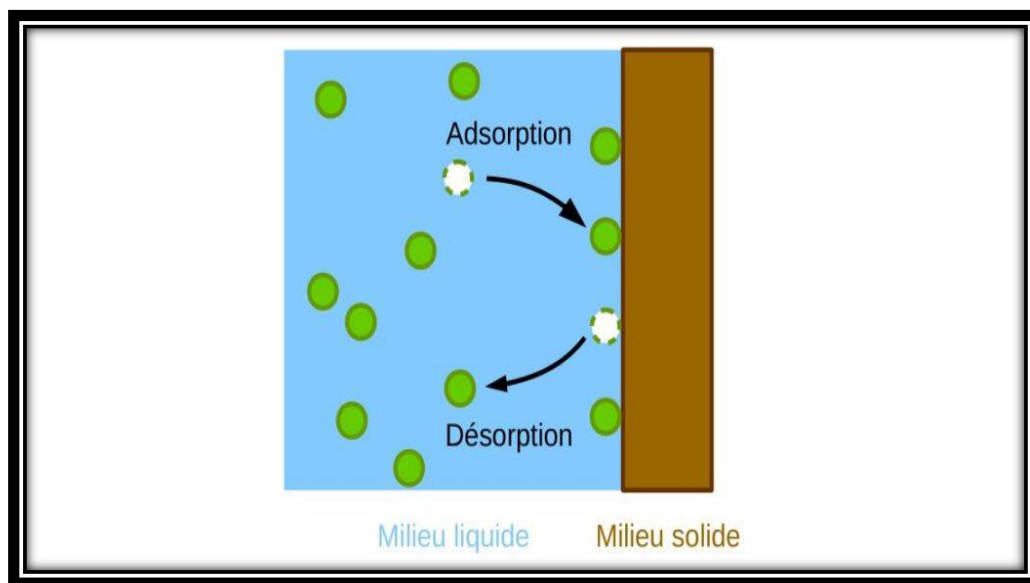


Figure II.1 : Schéma du phénomène d'adsorption.

II.2. Types d'adsorption

L'adsorption peut être de type physique (physisorption) ou chimique (chimisorption), cela dépend des énergies interagissant entre l'adsorbant et l'adsorbat, ainsi que de la nature des forces à l'origine du processus d'adsorption.

II.2.1. Adsorption chimique (chimisorption)

L'adsorption chimique est un phénomène irréversible engendré par la formation de liaisons chimiques covalentes ou ioniques entre les molécules de l'adsorbat et un site spécifique sur la surface de l'adsorbant. Les énergies mises en jeu lors de la chimisorption sont de plus en plus

élevées (80kJ/mol) conduisant à la libération des chaleurs (phénomène exothermique) [2].

II.2.2. Adsorption physique (physisorption)

La physisorption repose sur des interactions physiques, telles que les forces de Van der Waals et les forces électrostatiques, connues également sous le nom de forces de Coulomb. L'énergie des liaisons formées est faible, n'excédant généralement pas 40KJ/mol, ce qui en fait un phénomène réversible. Ce type d'adsorption se manifeste à basse température et ne modifie pas la structure des molécules adsorbées [3].

Tableau II.1: Tableau comparatif entre la chimisorption et la physisorption.

Caractéristiques	Physisorption	Chimisorption
Types de liaison	Van der Waals	Ionique ou covalente
Energie de liaisons	Faible	Forte
Réversibilité	Réversibles	Irréversibles
Type de couche	Poly-moléculaire	Mono-moléculaire
Chaleur d'adsorption (KJ/mol)	50	100 à 500
Désorption	Plus ou moins parfaite	Difficile

II.3. Facteurs influençant l'adsorption

Le phénomène d'adsorption est soumis à l'influence de plusieurs facteurs. Les plus déterminants sont présentés comme suit :

II.3.1 Influence du pH

Le pH joue un rôle fondamental dans le processus d'adsorption, car il influence à la fois la charge de la surface de l'adsorbant et la forme chimique de l'adsorbat [4]. À pH acide, la surface de l'adsorbant est généralement chargée positivement, ce qui favorise l'adsorption des anions. À l'inverse, à pH basique, la surface devient négative et favorise l'adsorption des cations [5].

II.3.2. Influence de la température

La température affecte la cinétique et la capacité d'adsorption. Dans le cas de la physisorption, une augmentation de la température entraîne généralement une diminution de l'adsorption en raison de la désorption des molécules [6]. En revanche, la chimisorption peut être favorisée par une augmentation de la température, car elle nécessite une énergie d'activation [7].

II.3.3. Influence de la nature de l'adsorbant

La nature de l'adsorbant joue un rôle déterminant dans le phénomène d'adsorption. Elle dépend à la fois de ses propriétés chimiques (polarité, groupements fonctionnels...) et physiques (surface spécifique, porosité...). Ces caractéristiques influencent directement les interactions entre l'adsorbant et les molécules adsorbées, telles que les forces de Van der Waals, les liaisons hydrogène ou les interactions électrostatiques [8].

II.3.4. Influence de la concentration

L'augmentation de la concentration d'un soluté influence fortement le phénomène d'adsorption sur un adsorbant comme le charbon actif [9].

- Lorsque la concentration initiale du soluté augmente, la quantité adsorbée augmente généralement aussi.

- Une concentration plus élevée crée un gradient de concentration plus important entre la solution et la surface de l'adsorbant, ce qui favorise le transfert du soluté vers les sites actifs.

À faible concentration

- Peu de molécules sont présentes dans la solution.
- Les sites actifs de l'adsorbant sont largement disponibles.
- L'adsorption est rapide mais la quantité adsorbée reste faible.

À forte concentration

- Davantage de molécules entrent en contact avec la surface adsorbante.
- Le taux d'adsorption augmente.
- Les sites actifs commencent progressivement à se saturer.

À saturation

- Tous les sites actifs sont occupés.
- L'adsorbant atteint sa capacité maximale d'adsorption.
- Une augmentation supplémentaire de la concentration n'augmente presque plus l'adsorption

II.3.5. Influence de la surface spécifique

La surface spécifique représente la surface disponible pour l'adsorption. Plus elle est grande, plus la capacité d'adsorption est élevée [9].

II.3.6. Influence de la porosité

La porosité influence la diffusion des molécules vers les sites actifs. Les matériaux microporeux présentent généralement une meilleure capacité d'adsorption [10].

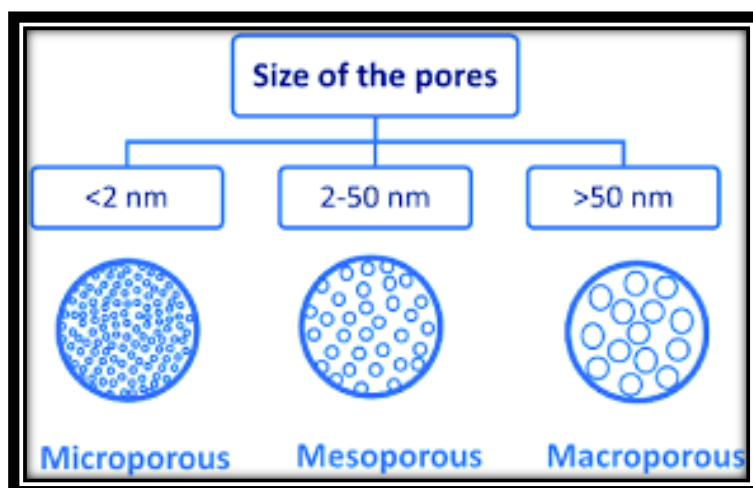


Figure II.2 : Structure poreuse d'un matériau adsorbant.

II.3.7. Influence de la polarité

La polarité est un facteur important qui influence les interactions entre l'adsorbant et l'adsorbat. Elle correspond à la répartition des charges dans une molécule ou à la surface d'un solide. Une correspondance de polarité entre les deux favorise l'adsorption, car les interactions deviennent plus fortes (liaisons hydrogène, interactions dipolaires) [11] Ainsi:

- Les substances polaires sont mieux adsorbées par des adsorbants polaires,
- Les substances apolaires sont préférentiellement adsorbées par des adsorbants apolaires.

II.3.8. Influence du temps de contact

Le temps de contact est un paramètre qui permet au système d'atteindre l'équilibre d'adsorption. Il correspond à la durée pendant laquelle l'adsorbant est en contact avec l'adsorbat. Au début, l'adsorption est rapide en raison de la disponibilité des sites actifs à la surface. Ensuite, la vitesse diminue progressivement à mesure que ces sites se remplissent, jusqu'à atteindre un état d'équilibre caractérisé par un plateau. [12]

II.4. Classification des adsorbants selon la polarité

On distingue deux grandes catégories d'adsorbants :

- **Adsorbants polaires**

Ils possèdent des groupements fonctionnels ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{NH}_2\ldots$) qui favorisent les interactions avec des molécules polaires tel que le gel de silice, l'alumine et les argiles qui adsorbent préférentiellement l'eau, les alcools et autres composés polaires.

- **Adsorbants apolaires**

Leurs surface est essentiellement hydrophobe, pauvre en groupements polaires tel que le charbon actif et les polymères organiques qui adsorbent surtout les composés non polaires comme les hydrocarbures et les huiles.

II.5. Mécanisme d'adsorption

L'adsorption se déroule principalement en trois étapes, chacune contribuant à la vitesse totale du processus comme est mentionné dans la Figure II.3 [13].

1. Diffusion extra-granulaire de la matière : il s'agit du transfert du soluté (adsorbat) vers la surface des grains (adsorbant).

2. Diffusion intra-granulaire de la matière : cela implique le transfert de la matière à l'intérieur de la structure poreuse, depuis la surface externe des grains vers les sites actifs.

3. Réaction d'adsorption au niveau des sites actifs : une fois adsorbée, la molécule est considérée comme immobile

Ces étapes peuvent être contrôlées par différentes résistances, notamment la diffusion intra particulaire [14].

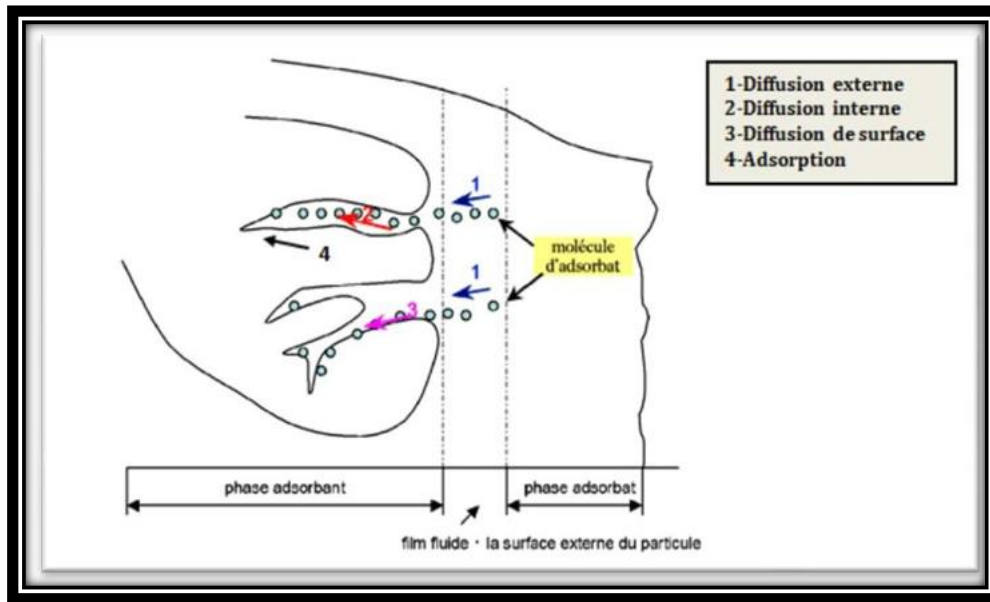


Figure II.3: Schéma du mécanisme de transport de l'adsorbat au sein d'un grain

II.6. Modélisation des cinétiques d'adsorption

II.6.1. Cinétique du pseudo premier ordre

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t$$

- q_e : Quantité adsorbée à l'équilibre (mg/g)
- q_t : Quantité adsorbée à l'instant t (mg/g)
- k_1 : Constante de vitesse du premier ordre (min^{-1})
- t : Temps de contact (min)
- $\ln$: Logarithme népérien

Ce modèle suppose que la vitesse d'adsorption dépend de la différence entre la capacité à l'équilibre et la quantité adsorbée à un instant donné. [15]

II.6.2. Cinétique du pseudo second ordre

$$dq_t/dt = k_2 (q_e - q_t)^2$$

$$t/q_t = 1/(k_2 q_e^2) + t/q_e$$

- dq_t/dt : Vitesse d'adsorption
- q_e : Quantité adsorbée à l'équilibre (mg/g)
- q_t : Quantité adsorbée à l'instant t (mg/g)
- k_2 : Constante de vitesse du second ordre ($g \cdot mg^{-1} \cdot min^{-1}$)
- t : Temps (min)

Ce modèle décrit généralement des phénomènes d'adsorption impliquant des interactions chimiques entre l'adsorbant et l'adsorbat. [16]

II.7. Modèles d'isothermes d'adsorption

II.7.1. Modèle de Langmuir

$$q_e = (q_m K_L C_e) / (1 + K_L C_e)$$

- q_e : Quantité adsorbée à l'équilibre (mg/g).
- q_{max} : Capacité maximale d'adsorption (mg/g).
- K_L : Constante de Langmuir (L/mg).
- C_e : Concentration à l'équilibre (mg/L).

Ce modèle suppose une adsorption en monocouche sur une surface homogène où tous les sites sont identiques. [17]

II.7.2. Modèle de Freundlich

$$q_e = K^f C_e^{1/n}$$

- q_e : Quantité adsorbée à l'équilibre (mg/g)
- C_e : Concentration à l'équilibre (mg/L)
- K_F : Constante de Freundlich
- n : Facteur d'intensité de l'adsorption

Ce modèle décrit une adsorption sur des surfaces hétérogènes avec des énergies d'adsorption différentes.

II.7.3. Modèle de Temkin

$$q_e = B \ln(A_t C_e)$$

- q_e : Quantité adsorbée à l'équilibre (mg/g)
- C_e : Concentration à l'équilibre (mg/L)
- A_t : Constante de liaison de Temkin
- B : Constante liée à la chaleur d'adsorption
- $\ln$: Logarithme népérien

Ce modèle prend en compte les interactions entre les molécules adsorbées et suppose une diminution linéaire de la chaleur d'adsorption avec le recouvrement de la surface. [18]

II.9. Les dattes et les noyaux des dattes

II.9.1. Définition

Les dattes sont les fruits du palmier dattier (*Phoenix dactylifera L.*), une plante emblématique des régions arides et semi-arides, notamment dans les zones sahariennes [19].

Elles constituent un aliment de base dans plusieurs pays, en particulier en Afrique du Nord et au Moyen-Orient. Ce fruit est une baie charnue, généralement de forme allongée, dont la couleur varie selon le degré de maturité (jaune, rouge, puis brun foncé à maturité complète). La datte est composée de trois parties principales :

- la pulpe (partie comestible riche en sucres),
- le noyau (ou graine),
- une fine peau protectrice.

Les dattes sont reconnues pour leur forte valeur nutritive, car elles sont riches en glucides (principalement glucose et fructose), en fibres alimentaires, ainsi qu'en vitamines et sels minéraux (potassium, magnésium, fer). En plus de leur importance alimentaire, les dattes possèdent également un intérêt économique et écologique majeur, notamment en Algérie où le palmier dattier joue un rôle essentiel dans l'équilibre des écosystèmes oasiens.

Par ailleurs, les noyaux de dattes, souvent considérés comme des sous-produits, présentent aujourd'hui un intérêt croissant dans plusieurs domaines, notamment comme matière première pour la production d'adsorbants, en raison de leur richesse en carbone et de leur structure favorable [20].



Figure II.5 : Palmier dattier *Phoenix dactylifera*

II.9.2. Biogéographie

La biogéographie du palmier dattier est étroitement liée aux conditions climatiques arides et semi-arides. Cette espèce s'adapte particulièrement aux environnements caractérisés par des températures élevées, une forte intensité lumineuse et une faible pluviométrie. En Algérie, la culture du palmier dattier est principalement concentrée dans les régions sahariennes telles que Biskra, Ouargla et Ghardaïa [21]. Ces régions offrent des conditions favorables au développement du palmier grâce à :

- Un climat chaud et sec,
- Un ensoleillement important,
- Des ressources hydriques souterraines (nappes phréatiques).

Le palmier dattier joue également un rôle écologique essentiel dans les systèmes oasiens, en créant un microclimat qui protège les cultures sous-jacentes contre les fortes chaleurs et les vents.

II.9.3. Variétés de dattes

L'Algérie possède une grande diversité de variétés de dattes, qui se distinguent par leurs caractéristiques physiques, leur texture et leur valeur commerciale. Parmi les variétés les plus connues :

- **Deglet Nour** : variété de haute qualité, caractérisée par sa couleur dorée, sa texture semi-molle et sa grande valeur commerciale. Elle est largement exportée.
- **Ghars** : datte molle, de couleur brune, riche en sucres et principalement destinée à la consommation locale et à la transformation.
- **Mech-Degla** : variété plus sèche, moins valorisée commercialement, mais largement consommée dans les régions sahariennes [22].

II.9.4. Structure d'un noyau de datte

Le noyau de datte constitue la partie interne dure du fruit. Il présente une structure relativement simple mais importante dans plusieurs applications industrielles. Il est composé de:

- Une enveloppe externe : couche protectrice dure, assurant la protection des constituants internes,
- Un endosperme riche en fibres : partie interne contenant une forte proportion de matières organiques et de fibres, ce qui le rend intéressant pour la production d'adsorbants.

Le noyau de datte est également riche en carbone, ce qui explique son utilisation croissante dans la fabrication de charbon actif pour des applications environnementales.

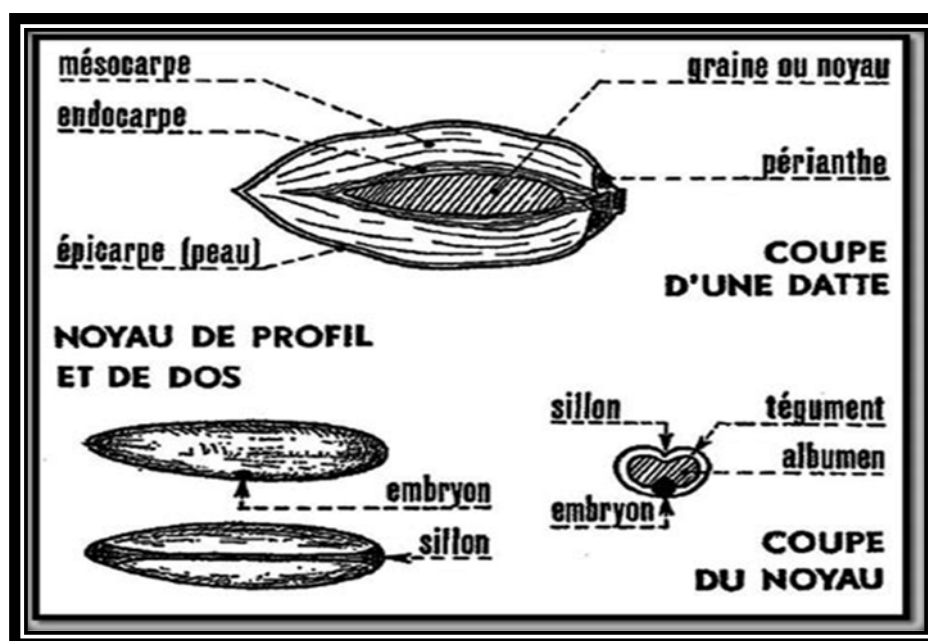


Figure II.6 : Composition chimique du noyau de dattes.

Les noyaux de dattes présentent une composition chimique riche et variée, dominée par des composés organiques structuraux. Ils contiennent principalement:

- La cellulose : constituant majeur, assurant la rigidité de la structure.
- L'hémicellulose : polymère associé à la cellulose, contribuant à la cohésion des fibres.
- La lignine : composé complexe responsable de la dureté et de la résistance mécanique.
- Des minéraux : présents en faible quantité, mais importants pour certaines applications.

Cette composition confère aux noyaux de dattes des propriétés intéressantes, notamment pour leur transformation en matériaux adsorbants [23].

II.9.5. Incorporation dans l'alimentation humaine ou animale

Après transformation (broyage, torréfaction ou extraction), les noyaux de dattes peuvent être valorisés comme complément alimentaire. Ils sont parfois utilisés:

- Dans l'alimentation animale comme source de fibres,
- Ou transformés en farine pour certaines applications alimentaires spécifiques[24].
-

II.9.6. Valorisation des noyaux de dattes

Les noyaux de dattes constituent un sous-produit à fort potentiel de valorisation. Les polysaccharides qu'ils contiennent peuvent être extraits et utilisés dans plusieurs domaines industriels. Ils sont notamment employés dans la production d'adsorbants naturels, grâce à leur richesse en carbone et à leur structure poreuse après activation. Cette valorisation s'inscrit dans une démarche de développement durable et de gestion des déchets agricoles [25].

II.9.6.1. Les adsorbants low-cost

Les noyaux de dattes font partie des adsorbants naturels dits **low-cost**, qui suscitent un intérêt croissant dans les procédés de traitement. Ils présentent plusieurs avantages:

- **Faible coût** : matière première abondante et peu chère,
- **Disponibilité** : largement disponible dans les régions productrices de dattes,
- **Respect de l'environnement** : matériau biodégradable et valorisation d'un déchet agricole [26].

Ces caractéristiques en font une alternative intéressante aux adsorbants conventionnels plus coûteux, notamment dans le traitement des eaux usées.

II.9.6.2. Charbon actif

Le charbon actif est considéré comme l'un des adsorbants les plus efficaces et les plus utilisés dans les procédés de traitement des eaux et de dépollution environnementale. Il joue un rôle essentiel dans l'élimination des polluants organiques et inorganiques grâce à sa grande capacité d'adsorption et à sa structure poreuse développée. [28]

L'utilisation du charbon actif ne date pas de l'époque moderne uniquement, mais remonte à l'Antiquité, où il était déjà employé dans certaines applications médicales pour purifier des substances et éliminer les toxines. Par la suite, son usage s'est développé dans

plusieurs domaines industriels, notamment la décoloration des solutions sucrées et la protection contre les gaz toxiques au cours du XX^e siècle. [29]

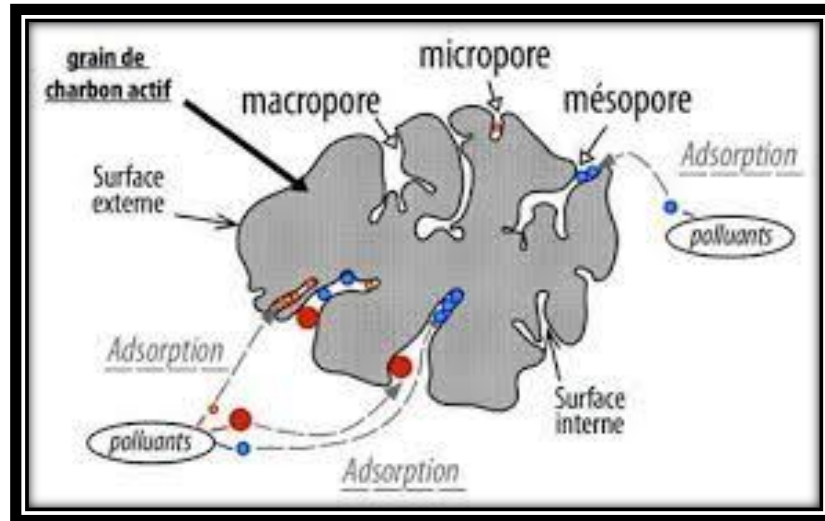


Figure II.7: Structure poreuse du charbon actif.

II.9.6.2.1 Définition

Le charbon actif est un matériau carboné, noir, inodore et fortement poreux, obtenu à partir de matières premières riches en carbone. Il se distingue par une très grande surface spécifique, pouvant atteindre des valeurs très élevées selon les conditions de fabrication. [30]. Cette structure poreuse lui confère une forte capacité d'adsorption, lui permettant de fixer une grande variété de polluants présents dans l'eau, tels que les colorants, les composés organiques et certains métaux lourds. [30]

II.9.6.2.2 Origine et fabrication

Le charbon actif est produit à partir de diverses matières premières comme le bois, les coques de noix de coco ou les noyaux de fruits et les écorces de divers fruits et légumes. Sa fabrication repose principalement sur deux étapes essentielles : la carbonisation et l'activation.

La carbonisation consiste en un traitement thermique en absence d'oxygène permettant d'éliminer les composés volatils et d'obtenir une structure carbonée initiale poreuse. [27]. Son activation permet ensuite de développer la porosité du matériau. Elle peut être physique ou chimique. L'activation physique se fait à haute température à l'aide de gazs oxydants comme la vapeur d'eau ou le dioxyde de carbone, tandis que l'activation chimique repose sur

l'utilisation de produits chimiques telque H_2SO_4 , H_3PO_4 suivie d'un traitement thermique, améliorant ainsi la surface spécifique et les propriétés d'adsorption. [30]

II.9.6.2.3 Morphologie

Le charbon actif existe principalement sous trois formes : en poudre, en grains et extrudé. [11]. Le charbon actif en poudre possède une granulométrie très fine et une grande surface de contact, ce qui le rend très efficace pour le traitement des eaux usées. Le charbon actif en grains présente une structure plus compacte avec une cinétique d'adsorption plus lente mais adaptée aux systèmes continus. Le charbon actif extrudé est utilisé principalement en phase gazeuse en raison de sa grande résistance mécanique. [30]



Figure II.8: Différentes formes de charbon actif.

II.9.6.2.4 Structure et propriétés

La structure du charbon actif est constituée de microcristaux de carbone formant un réseau poreux complexe. Cette structure comprend différents types de pores : micropores, mésopores et macropores, chacun jouant un rôle spécifique dans le processus d'adsorption. [27]

Les micropores sont responsables de la fixation des molécules polluantes, les mésopores facilitent leur diffusion, tandis que les macropores assurent l'accès des fluides à l'intérieur du matériau. [28]

II.9.6.2.5 Propriétés et applications

Les performances du charbon actif dépendent principalement de sa surface spécifique, de sa porosité et de la nature des groupes fonctionnels présents à sa surface. Ces caractéristiques

déterminent directement son efficacité dans l'adsorption des polluants. [29]. Le charbon actif est largement utilisé dans le traitement des eaux usées, la purification de l'air ainsi que dans divers domaines industriels, médicaux et chimiques. Il est particulièrement efficace pour l'élimination des colorants et des composés organiques persistants. [30]

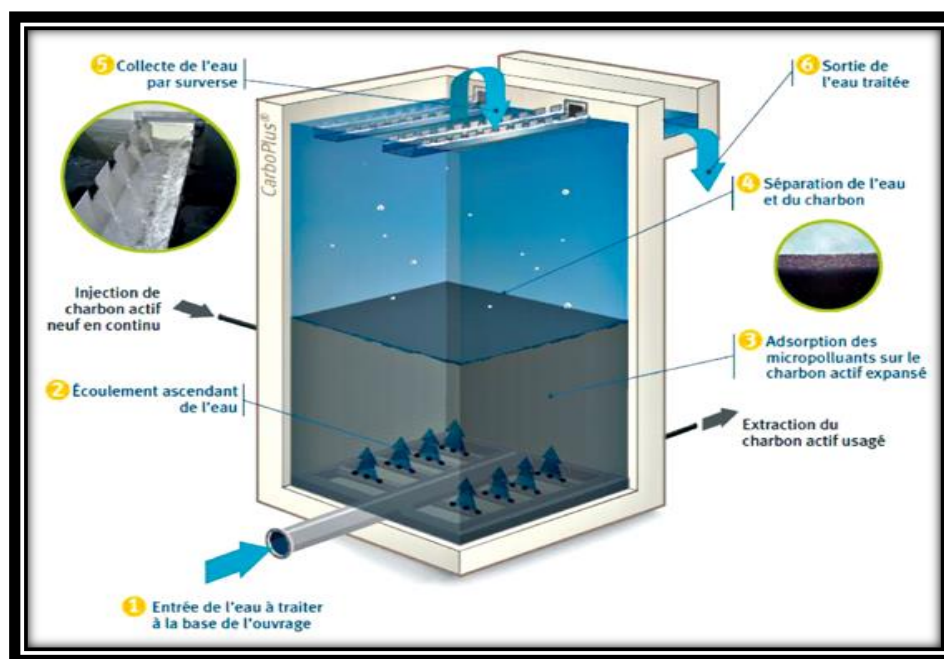


Figure II.9 Procédé de traitement des eaux usées par le charbon actif.

II.9.6.2.6 Activation du charbon actif

L'activation du charbon actif est une étape essentielle permettant d'augmenter sa surface spécifique et de développer sa porosité afin d'améliorer son pouvoir adsorbant. Cette opération transforme un matériau carboné ordinaire en un adsorbant très efficace capable de retenir les polluants organiques, les colorants et diverses substances chimiques présentes dans l'eau ou les gaz. Le charbon actif est généralement obtenu à partir de matières riches en carbone telles que le bois, les coques de noix de coco, le charbon minéral ou les résidus agricoles. La préparation du charbon actif se déroule en deux étapes principales : la carbonisation puis l'activation.

La carbonisation consiste à chauffer la matière première à une température comprise entre 400 et 800 °C en absence d'oxygène. Cette étape permet d'éliminer les composés volatils et de former une structure carbonée riche en carbone. Cependant, le matériau obtenu possède encore une faible porosité.

L'activation a pour objectif de créer et d'élargir les pores du charbon afin d'augmenter la surface de contact avec les molécules à adsorber. Il existe deux principales méthodes d'activation : l'activation physique et l'activation chimique. L'activation physique est réalisée en chauffant le charbon carbonisé à des températures élevées, généralement entre 800 et 1000 °C, en présence de gaz oxydants tels que la vapeur d'eau ou le dioxyde de carbone. Ces gaz provoquent une ouverture progressive des pores et augmentent la surface spécifique du charbon actif tandis que l'activation chimique consiste à imprégner la matière première avec des agents chimiques comme l'acide phosphorique (H_3PO_4), l'hydroxyde de potassium (KOH) ou le chlorure de zinc (ZnCl_2), puis à effectuer un traitement thermique à température modérée. Cette méthode permet d'obtenir une porosité plus développée et un rendement plus élevé.

Le charbon actif activé possède une très grande surface spécifique pouvant dépasser 1000 m²/g, ce qui lui confère une excellente capacité d'adsorption. Il est largement utilisé dans le traitement des eaux usées, la décoloration des solutions, la purification des gaz, l'industrie pharmaceutique ainsi que dans les études d'adsorption des colorants tels que la Rhodamine B, le colorant étudié dans notre présent travail.

L'efficacité du charbon actif dépend de plusieurs paramètres tels que la température d'activation, le temps de traitement, la nature de l'agent activateur et la structure de la matière première utilisée. [31]

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description détaillée du processus d'adsorption, en mettant en évidence ses principes fondamentaux ainsi que les principaux facteurs susceptibles d'influencer son efficacité. L'étude a montré que plusieurs paramètres physico-chimiques interviennent dans le déroulement de ce phénomène, notamment la concentration initiale de l'adsorbat, la nature de l'adsorbant, la polarité des espèces en présence, ainsi que le temps de contact nécessaire pour atteindre l'équilibre.

Par ailleurs, nous avons également exposé les principaux modèles cinétiques permettant de décrire l'évolution de l'adsorption dans le temps, à savoir les modèles du pseudo premier ordre et du pseudo second ordre, qui permettent de mieux comprendre la nature des interactions mises en jeu. De même, les modèles d'isothermes d'adsorption (Langmuir, Freundlich et Temkin) ont été abordés afin d'interpréter la relation entre la quantité adsorbée et la concentration à l'équilibre.

Une attention particulière a été accordée aux noyaux de dattes en tant qu'adsorbant naturel et matériau low-cost. Leur composition riche en cellulose, hémicellulose et lignine leur confère un potentiel intéressant pour leur valorisation dans le domaine du traitement des eaux. Cette approche représente une alternative prometteuse, à la fois économique et écologique, notamment dans le contexte algérien où les déchets agricoles sont abondants et sous-exploités.

Références bibliographies:

- [1] BENSID S., Étude de l'adsorption des polluants organiques sur charbon actif, Mémoire de Master, Université de Biskra, Algérie, 2021.
- [2] Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, Statistiques de production des dattes en Algérie, Algérie, 2022.
- [3] BENAMARA L., Application des isothermes d'adsorption dans le traitement des eaux, Mémoire de Master, Université de Ouargla, Algérie, 2020.
- [4] KHERFI A., Étude physico-chimique des phénomènes d'adsorption, Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, Algérie, 2019.
- [5] HADDAD D., Procédés physico-chimiques de traitement des eaux usées, Mémoire de Master, Université de Biskra, Algérie, 2021.

- [6] SAADI M., Adsorption et interactions de surface, Mémoire de Master, Université de Ouargla, Algérie, 2020.
- [7] BELKACEM R., Modélisation cinétique de l'adsorption des polluants, Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, Algérie, 2021.
- [8] Université Mohamed Khider Biskra, Cours de traitement des eaux par adsorption, Biskra, Algérie, 2020.
- [9] BOUCHELTA C., Étude de l'adsorption des polluants organiques, Mémoire de Master, Université de Ouargla, Algérie, 2017.
- [10] DJELLOULI B., Valorisation des déchets agricoles en Algérie, Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, Algérie, 2018.
- [11] KHEZAMI L., Préparation de charbon actif à partir de noyaux de dattes, Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2005.
- [12] ZERROUKI N., Étude des isothermes d'adsorption, Mémoire de Master, Université de Biskra, Algérie, 2021.
- [13] MECHERI H., Caractérisation des matériaux poreux et adsorption, Mémoire de Master, Université de Ouargla, Algérie, 2020.
- [14] BOUDJEMA F., Paramètres influençant l'adsorption en solution aqueuse, Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, Algérie, 2022.
- [15] RAHMANI S., Traitement des eaux par adsorption des colorants, Mémoire de Master, Université de Biskra, Algérie, 2021.
- [16] AMRANE A., Cinétique d'adsorption des polluants, Mémoire de Master, Université de Ouargla, Algérie, 2020.
- [17] KADDOUR M., Étude du transfert de masse en adsorption, Mémoire de Master, Université de Biskra, Algérie, 2019.
- [18] TOUMI K., Modélisation du pseudo-premier ordre en adsorption, Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, Algérie, 2021.
- [19] BENALI Y., Modèle du pseudo-second ordre appliqué aux adsorbants naturels, Mémoire de Master, Université de Ouargla, Algérie, 2022.
- [20] BOUSSAADA O., Étude des isothermes d'adsorption (Langmuir et Freundlich), Mémoire de Master, Université de Biskra, Algérie, 2021.
- [21] HAMDY F., Application des modèles d'isothermes d'adsorption, Mémoire de Master, Université de Ouargla, Algérie, 2020.
- [22] GHERBI A., Cinétique et thermodynamique de l'adsorption, Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, Algérie, 2021.

- [23] MERABET N., Classification des isothermes d'adsorption, Mémoire de Master, Université de Biskra, Algérie, 2022.
- [24] FAO, Date Palm Cultivation, Food and Agriculture Organization, Rome, 2020.
- [25] INRAA, Culture du palmier dattier en Algérie, Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie, 2019.
- [26] Ministère de l'Agriculture, Variétés de dattes en Algérie, Algérie, 2021.
- [27] EL HADDAD M., BOUHAMED F., Étude de l'adsorption des colorants par des matériaux naturels, Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar d'Annaba, Algérie.
- [28] AMRANE A., Adsorption des colorants textiles sur charbon actif issu de biomasse, Mémoire de Master, Université de Tlemcen, Algérie, 2020.
- [29] BOUDRAHEM F., Étude comparative de l'adsorption de la Rhodamine B sur différents adsorbants, Mémoire de Master, Université de Jijel, Algérie, 2021.
- [30] SEKIRIFA M., HADJ-MAHAMMED M., Étude comparative de la capacité adsorbante d'un charbon actif issu de noyaux de dattes et d'un charbon actif commercial, Sciences & Technologie, 2005.
- [31] SHARMA P., KAUR H., SHARMA M., Adsorption of dyes using agricultural waste materials, Journal of Environmental Chemical Engineering, 2013.

CHAPITRE III

ETUDE DE L'ADSORPTION DE LA RB PAR LES BIOMATERIAUX (NDB ET NDC)

INTRODUCTION

Ce chapitre aborde l'aspect expérimental relatif à la fabrication d'un biomatériau naturel et son application dans le domaine environnemental. Cette recherche utilise la méthode d'adsorption afin d'évaluer l'efficacité d'un matériau naturel, en particulier dans l'élimination du colorant « Rhodamine B » se fait grâce à l'utilisation de noyaux de dattes bruts et calcinés.

III.1. Matériels et verreries utilisés

a- Verreries utilisées

Verreries ordinaires : (Bêcher, erlenmeyer, cristalliseur, entonnoir ...).

Verreries de mesure : (Fiole jaugée, pipette, éprouvette, burette...).

b- Matériels utilisés

- Balance analytique
- Plaque chauffante et agitatrice
- pH mètre
- Spectrophotomètre UV-Visibles
- Spectrophotomètre FT-IR infra rouge à transformée de fourrier **Agilent Cary 630**
- Thermomètre

III.1.2. Réactifs chimiques utilisés

Tableau III.1 : Tableau des réactifs chimiques utilisés

Réactif	Formule chimique	Masse molaire
Rhodamine B	$C_{28}H_{30}N_2O_3$	442.559 g/mol
Hydroxyde de sodium	NaOH	40g/mol
Acide Chlorhydrique	HCl	36.47g/mol
Acide phosphorique	H_3PO_4	97.994g/mol

III.2. Préparation du biomatériau

III.2.1. Noyaux de dattes

Les noyaux de dattes utilisés dans la présente étude ont été prélevés manuellement à partir des dattes de la variété Hamira de la région (Berizina El bayadh), ces noyaux constituent un sous-produit agricole abondant, ce résidu solide de couleur brun foncé représente 10 à 15 % de la masse du fruit, possède une structure lignocellulosique (cellulose, hémicellulose et lignine). Cette composition riche en carbone lui confère un fort potentiel pour le traitement des eaux usées par adsorption. [1]

Dans le cadre de cette étude, les noyaux de dattes ont été utilisés sous leurs formes brute et calcinée, après des étapes de lavage, séchage et de broyage, afin d'être appliqué comme adsorbant naturel de taille uniforme inférieur à 500 μ m pour l'élimination de colorant "Rhodamine B" en milieu aqueux.



Figure III.1 : Lavage des noyaux de dattes.



Figure III.2 : Séchage des noyaux de dattes



Figure III.3 : Broyage et tamisage des noyaux de dattes.

III.2.1.1. Caractérisation physico-chimique du biomatériau noyaux de dattes

L'analyse FT-IR des noyaux de dattes, effectuée sur un spectromètre **Agilent Cary 630**, a permis d'obtenir le spectre présenté dans la **Figure III.5**. Celui-ci met en évidence les groupements fonctionnels typiques de notre biomatériau, illustrés par les bandes majeures suivantes :



Figure III.4 : Spectrophotomètre infra-rouge à transformée de Fourier Agilent Cary 630.

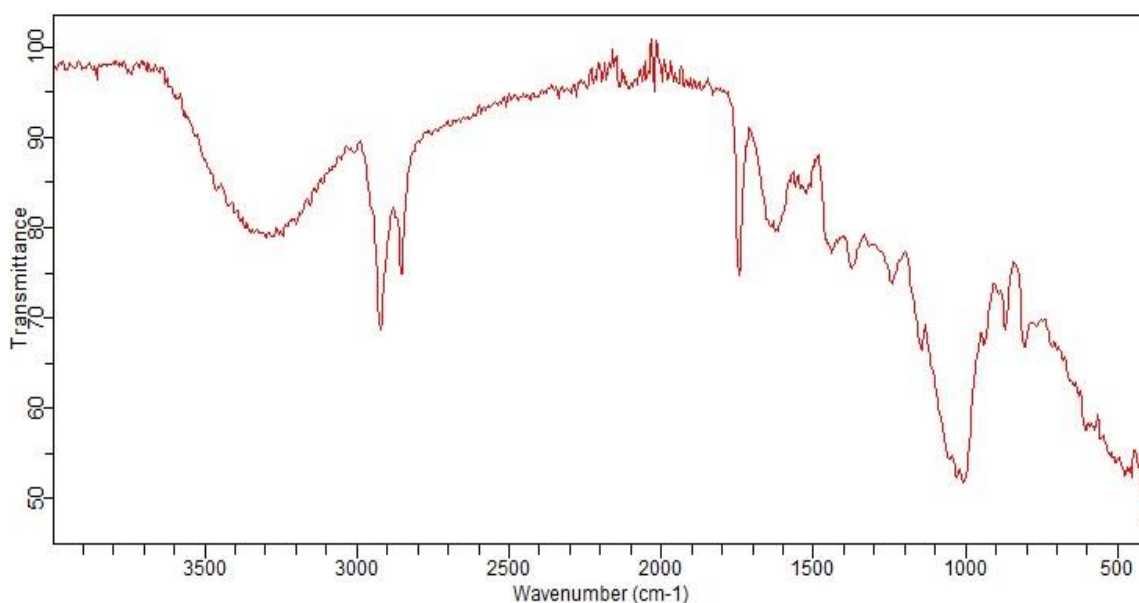


Figure III.5 : Spectre infrarouge à transformée de Fourier des noyaux de dattes brutes.

L'analyse de ce spectre infrarouge (IR) permet d'identifier plusieurs groupements fonctionnels caractéristiques des matériaux exprimés en nombre d'onde (cm^{-1}) [2]:

1. Région des liaisons simples à l'hydrogène ($4000 - 2500 \text{ cm}^{-1}$)

- **Bande large et intense ($3300 - 3400 \text{ cm}^{-1}$) :** Caractéristique de la vibration d'élongation du groupement hydroxyle O-H. Sa forme arrondie indique la présence de liaisons hydrogène (souvent associée à des alcools ou des polysaccharides).

- Pics fins (**2920 et 2850 cm^{-1}**) : Correspond aux vibrations d'élongation des liaisons **C-H aliphatiques** (CH_2 et CH_3). C'est une signature classique des chaînes carbonées.

2. Région de la double liaison C=O (2000 – 1500 cm^{-1})

- Pic intense (**1740 cm^{-1}**) : C'est la zone du groupement **carbonyle C=O**. Sa position précise suggère souvent une fonction ester ou un aldéhyde/cétone selon l'environnement chimique.

3. Région entre (1500 – 500 cm^{-1})

- **Pics vers 1450 – 1370 cm^{-1}** : Vibrations de déformation des liaisons **C-H** des (CH_2 et CH_3).
- **Bande très large et intense (1000 - 1100 cm^{-1})** : Très caractéristique de la vibration d'élongation de la liaison **C-O**. Dans le contexte de polymères naturels ou des sucres, c'est la zone "saccharide".

III.2. Charbon actif à partir des noyaux de datte

Le charbon actif a été préparé après une calcination à une température dépassant les 300°C, il a ensuite subi une étape cruciale : une activation chimique effectuée avec l'acide phosphorique concentré H_3PO_4 en raison de ses propriétés ignifuges.

III.2.1 Activation de charbon actif

Le protocole expérimental adopté pour la préparation du charbon actif est le suivant : 100 ml de H_3PO_4 concentré a été versée dans une quantité de 50g du biomatériau brut, le mélange a été soumis à une agitation moyenne constante pendant 4 heures puis filtré et lavé plusieurs fois à l'eau distillée, ensuite il a été séché dans une étuve à 100°C pendant 24 heures. Afin d'être appliqué comme adsorbant naturel de taille uniforme inférieur à 500 μm pour l'élimination de colorant "Rhodamine B" en milieu aqueux.



Figure III.6 : Charbon actif préparé à partir des noyaux de dattes.



Figure III.7 : Agitation du charbon
Avec H_3PO_4 (4heure).

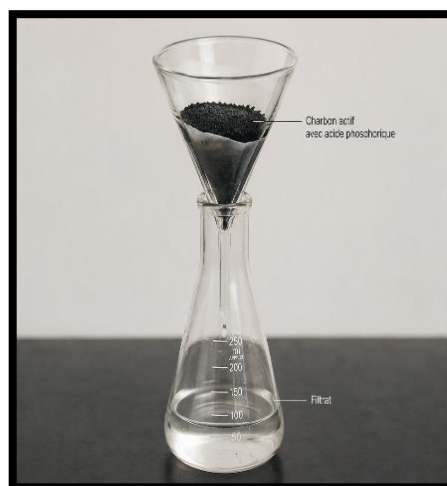


Figure III.8 : Filtration de charbon actif.



Figure III.9 : Séchage de charbon actif à 100°C.

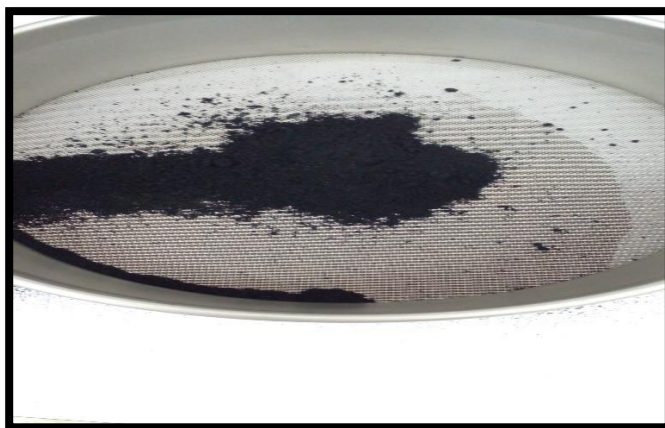


Figure III.10 : Tamisage de charbon actif.

III.2.2. Caractérisation physico-chimique du biomatériau charbon actif :

L'analyse FT-IR du charbon actif, effectuée sur un spectromètre **Agilent Cary 630**, a permis d'obtenir le spectre présenté dans la Figure **III.11**. Celui-ci met en évidence les groupements fonctionnels typiques du biomatériau, illustrés par les bandes majeures suivantes :

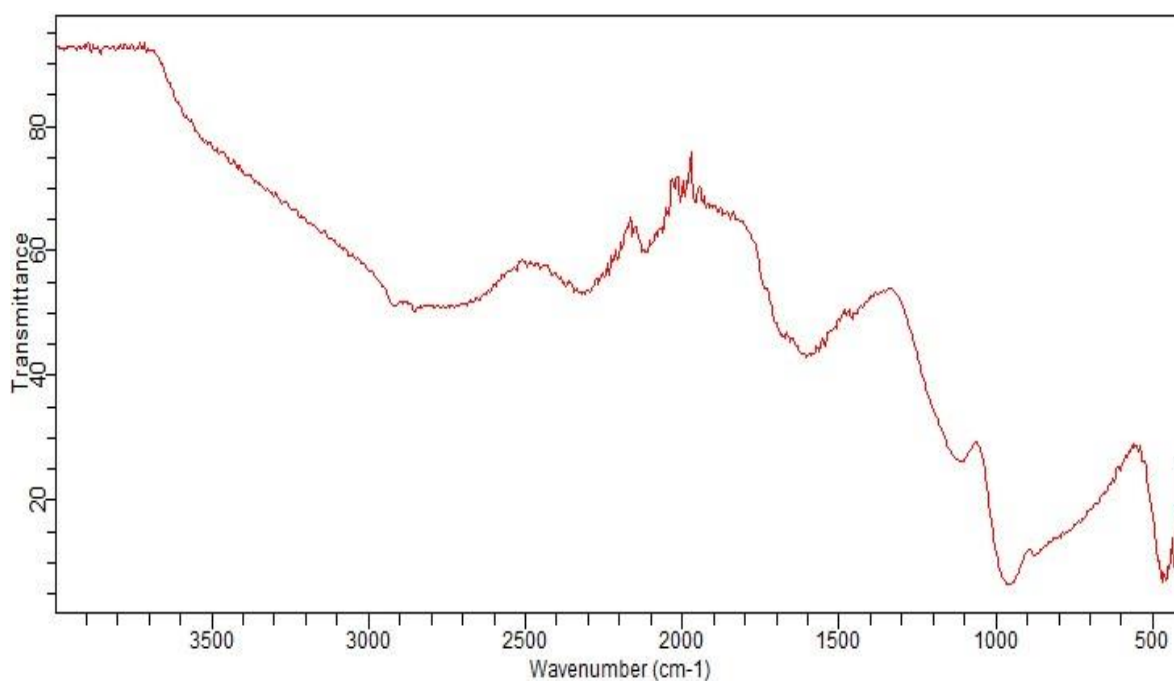


Figure III.11 : Spectre infrarouge à transformée de Fourier du charbon actif.

1. Zone des liaisons simples avec l'Hydrogène (3600 – 2800 cm⁻¹)

- **Large bande autour de 3400 cm⁻¹** : On observe une large bande d'absorption. Elle est caractéristique des **vibrations d'élongation des groupements hydroxyle (-OH)**. Sa largeur suggère la présence de liaisons hydrogène, typiques de l'eau résiduelle ou de fonctions alcools/phénols.
- **Épaulement autour de 2900 - 3000 cm⁻¹** : Ces pics correspondent aux vibrations d'élongation des liaisons **C-H** (aliphatiques).

2. Zone des doubles liaisons (1700 – 1500 cm⁻¹)

- **Pic vers 1630cm⁻¹** : Cette bande est assez intense. Elle peut correspondre à la vibration d'élongation des molécules d'**eau absorbée** (H-O-H) ou à des doubles liaisons **C=C** ou **C=O** (carbonyle) conjuguées.

3. Zone entre (1500 – 500cm⁻¹)

C'est la partie la plus complexe et la plus riche du spectre, spécifique à la structure exacte de la molécule :

- **Bande large et intense autour de 1000 – 1100cm⁻¹** : C'est le signal majeur du spectre. Il est très caractéristique des liaisons **Si-O-Si** (silicates/silice) ou éventuellement **C-O** (alcools).
- **Pics sous 800 cm⁻¹** : On observe des bandes vers 790 cm⁻¹ et 460 cm⁻¹ qui confirment souvent la présence de réseaux silicatés (vibrations de torsion et de flexion Si-O).

III.4. Etude paramétriques

Dans la présente étude nous utilisons les noyaux des dattes issues des dattes Hamira sous leurs formes brute et calcinée dans tous les essais d'adsorption du colorant "Rhodamine B". L'étude porte sur l'adsorption de la "Rhodamine B" en solution aqueuse par deux biomatériaux : les noyaux de dattes brutes et calcinés. Le protocole consiste à mettre en contact, sous agitation, une masse précise d'adsorbant avec un volume de colorant de concentration connue afin d'optimiser les paramètres opératoires (masse, temps de contact, concentration initiale, température et pH). Les concentrations résiduelles après adsorption

ont été déterminées par spectrophotométrie UV-Visible, en s'appuyant sur des courbes d'étalonnage préalablement établies. [2]

III.4.1. Préparation des solutions diluées et courbes d'étalonnages



Figure III.12 : Préparation des solutions diluées de la Rhodamine B.

A partir d'une solution mère déjà préparée à une concentration de 10^{-4} mol/l, nous avons pris les volumes suivants (5×10^{-5} , 3.75×10^{-5} , 2.5×10^{-5} , 1.25×10^{-5} , 5×10^{-6} , 3.75×10^{-6} , 2.5×10^{-6} , 1.25×10^{-5}) ml de Rhodamine B. Chaque volume de solution est dilué jusqu'à (10ml). Pour obtenir les concentrations des solutions préparées, nous avons utilisé l'équation de dilution suivante:

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

Avec :

C_1 : Concentration de la solution mère mol/l.

V_1 : Volume de la solution mère prélevé.

C_2 : Concentration de la solution fille.

V_2 : Volume de la solution fille.

III.4.2. Etablissement de la courbe d'étalonnage

Afin de confirmer la validité de la loi de Beer-Lambert, une courbe d'étalonnage a été établie en traçant les valeurs d'absorbance du colorant examiné (Rhodamine B) en fonction de différentes concentrations (voir figure III.13). L'obtention d'une droite avec une équation de type ($A = b C$), passant par l'origine (0,0), confirme que la loi de Beer-Lambert est vérifiée pour les concentrations du colorant étudié [3].

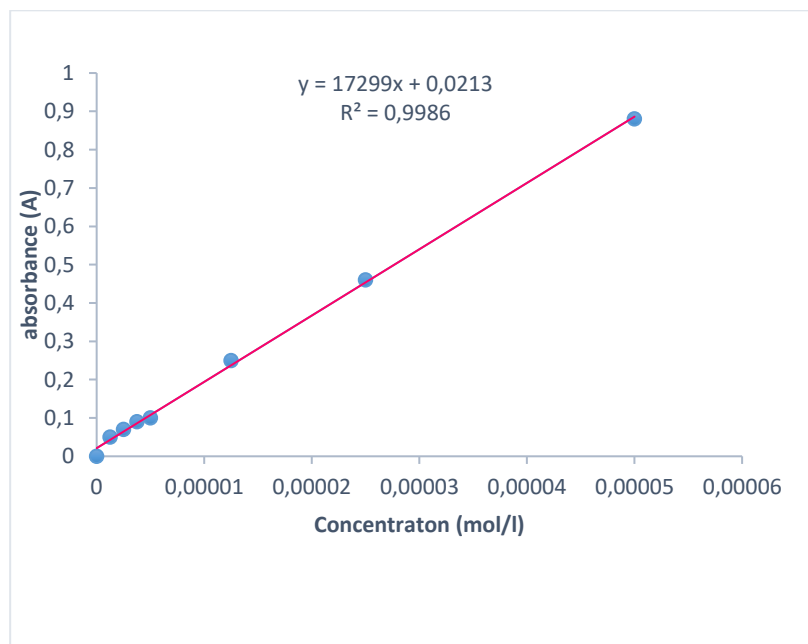


Figure III.13 : Courbe d'étalonnage de la Rhodamine B.

III.4.3. Effet de la masse de l'adsorbant

L'effet de la masse de l'adsorbant (**NDB** et **NDC**) a été examiné dans une fourchette de **0,05g à 0,45g**, pour une concentration initiale de colorant (**RB**) de (**5×10^{-5} mol/l**) avec une agitation moyenne constante pendant **2heures**.

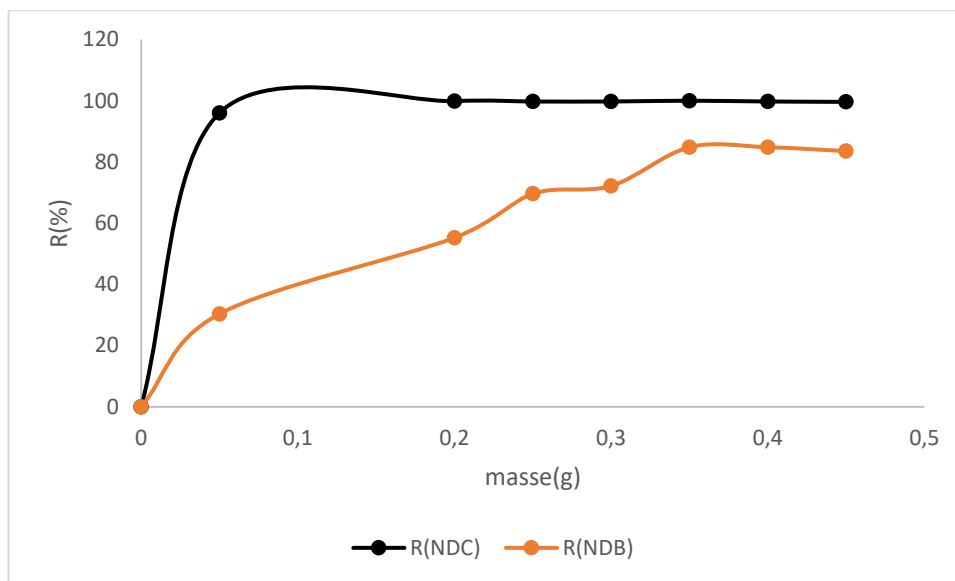


Figure III.14 : Influence de la masse de l'adsorbant sur le rendement de l'élimination de la (RB) [t=2heure, T=20°C, C : [RB]= 5×10^{-5} mol/l].

Le rendement de l'adsorption R% a été calculé par la relation :

$$R(\%) = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100$$

D'où

R% : Rendement de l'adsorption.

A₀ : absorbance initiale du colorant.

A_t : absorbance à l'instant "t".

L'augmentation de la masse de l'adsorbant s'accompagne d'une amélioration du rendement d'élimination du colorant pour les deux matériaux étudiés. Le matériau **NDC** se distingue par une efficacité adsorbant plus élevée, atteignant un rendement proche de 100 % à une masse de 0,2 g, puis se stabilisant sous forme de plateau, signe de la saturation des sites d'adsorption disponibles. À l'inverse, le matériau **NDB** présente une augmentation progressive

du rendement avec la masse, jusqu'à atteindre une valeur maximale d'environ 84,81 % à 0,35 g. Ces observations mettent en évidence la performance supérieure du **NDC**, qui possède une capacité d'adsorption et une affinité plus importantes vis-à-vis du colorant par rapport aux **NDB**.

III.4.4. Etude cinétique

Le paramètre du temps de contact joue un rôle crucial dans les processus d'adsorption. La **figure III.15** illustre les taux d'élimination de la Rhodamine B par les biomatériaux (**NDB** et **NDC**) en fonction du temps. On a examiné l'influence de la durée de contact en agitant **25ml** de solution colorante (**RB**) à une concentration de (5×10^{-5} mol/l), avec une quantité de [**m=0.35g /NDB, m=0.2g /NDC**], sous agitation constante moyenne sur une période allant de 5 à 60 minutes à température ambiante (**20°C**).

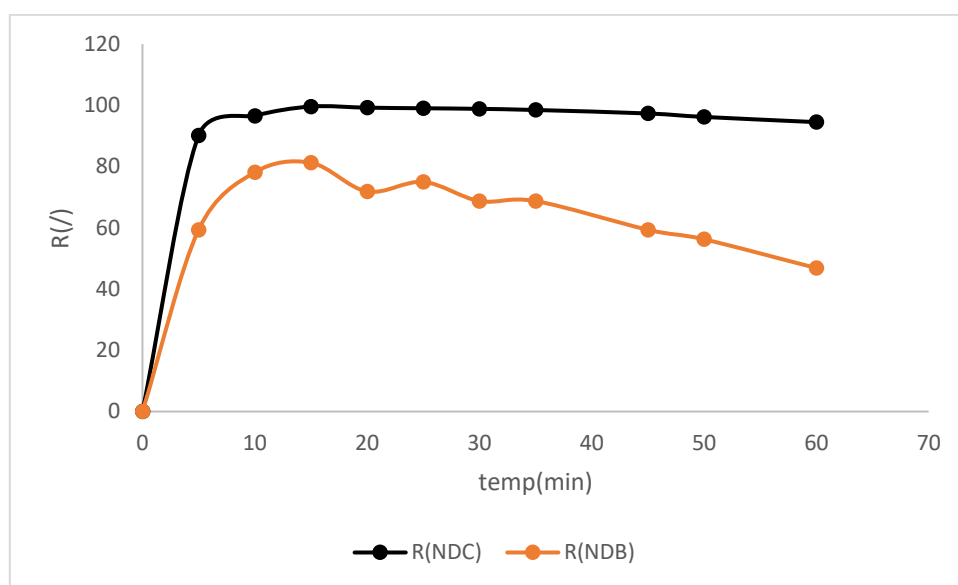


Figure III.15 : Effet du temps de contact sur le rendement d'élimination de la (RB)

[**m=0.35g /NDB, m=0.2g /NDC**], [5×10^{-5} mol/l], **T=20°C** (ambiante).

L'augmentation du temps de contact améliore l'efficacité d'élimination du colorant par les deux adsorbants (**NDB, NDC**), en particulier au cours des premières minutes, où l'adsorption est la plus rapide. Le matériau **NDC** atteint rapidement un rendement de **99,62 %** (avoisinant les 100%) au bout de 15 min et conserve cette performance jusqu'à l'établissement de l'équilibre, ce qui témoigne de sa forte affinité pour le colorant et de la rapidité du processus d'adsorption. Tandis que le matériau **NDB** présente un rendement maximal d'environ **81,25 %**,

après 15 min de contact, suivi d'une diminution aux temps de contact les plus élevés. Ces observations confirment la capacité adsorbant et l'efficacité et importante du **NDC** en termes d'élimination du colorant.

III.4. 5. Effet de la concentration

Cette étude a été effectuée en gardant constante la quantité de deux biomatériaux [$m=0.35\text{g}$ /NDB, $m=0.2\text{g}$ /NDC], la durée de contact a été fixée à $t=15$ minutes, tout en modulant les concentrations de **Rhodamine B** de $5 \times 10^{-5} \text{mol/l}$ à $2 \times 10^{-5} \text{mol/l}$.

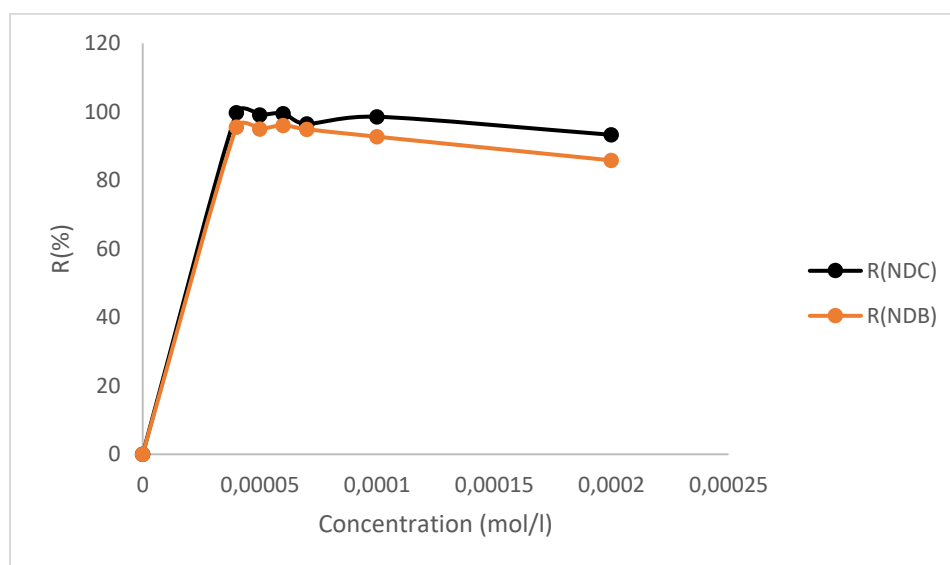


Figure III.16 : Effet de la concentration du colorant sur le rendement de l'élimination de la (RB) [$m=0.35\text{g}$ /NDB, $m=0.2\text{g}$ /NDC], $t=15$ min, $T=20^{\circ}\text{C}$ (ambiante).

Bien que les deux courbes présentent une évolution similaire, une différence de performance est observée entre les deux adsorbants. Le matériau **NDC** se distingue par une affinité plus élevée envers le colorant ainsi qu'une capacité d'adsorption supérieure sur l'ensemble de la gamme de concentrations étudiée. Même à des concentrations élevées, où les sites actifs tendent à se saturer, il maintient un rendement d'élimination proche de **100 %**, témoignant de sa grande efficacité et de sa structure probablement plus poreuse. Le matériau **NDB** affiche également des performances remarquables, avec des rendements d'élimination supérieurs à **90 %** dans la plupart des conditions expérimentales. Toutefois, malgré une tendance comparable à celle observée pour **NDC**, son rendement reste systématiquement

inférieur de quelques points de pourcentage, particulièrement aux concentrations les plus élevées. Cette différence peut être attribuée à une capacité d'adsorption plus faible et à une saturation plus rapide des sites actifs disponibles.

III.4.5. Effet de la température

L'influence de la température sur l'adsorption des deux biomatériaux a été examinée dans une plage de températures allant de 10 à 45 °C. Dans le cadre de cette recherche, nous réalisons un mélange phase aqueuse-solide à l'aide d'une agitation magnétique dans un bain-marie, ce qui nous permet de réguler la température. La figure ci-après illustre les résultats obtenus.

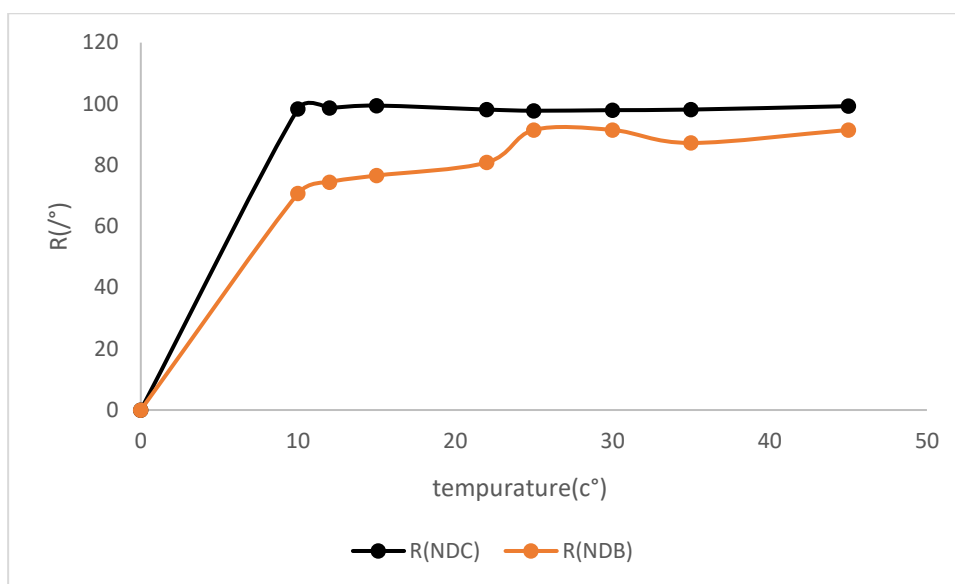


Figure III.17 : Influence de la température sur le rendement d'élimination de la (RB).

$t=15$ min, $[m=0.35\text{g /NDB}, m=0.2\text{g /NDC}]$, $[5 \times 10^{-5} \text{ mol/l}]$. $T=20^\circ$ (ambiante).

Ce graphique illustre l'effet de la température sur le rendement d'élimination de la **RB**, noté **R(%)**, en utilisant deux types d'adsorbants : les noyaux de dattes bruts (**NDB**) et calcinés (**NDC**) :

Les noyaux de dattes calcinés (**NDC**) présentent une efficacité supérieure (99.44%) et une excellente stabilité à basses comme à hautes températures (à partir de 10 °C). En revanche, les noyaux de dattes bruts (**NDB**) affichent une très bonne efficacité, bien que légèrement inférieure à celle du charbon actif (91.4), et leur performance optimale est atteinte aux alentours de la température ambiante (25 °C).

III.4.6. Effet du pH

Afin d'observer l'influence du pH sur l'adsorption du (RB) par les **NDB** et **NDC**, plusieurs tests ont été effectués avec des valeurs de pH différentes, allant de 2 à 10. Ces expériences comportaient l'introduction de HCl 0,1N ou de NaOH 0,1N selon la valeur du pH désirées. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure ci-dessous.

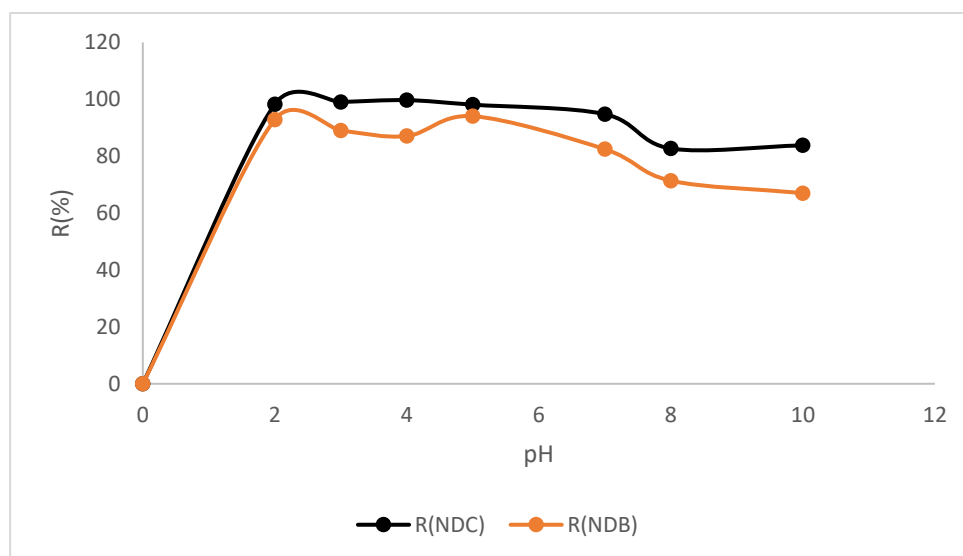


Figure III.18 : Influence du pH sur le rendement d'élimination de la RB.

$t=15$ min, $[m=0.35\text{g /NDB}, m=0.2\text{g /NDC}]$, $T^{\circ}=25^{\circ}$, $C [4 \times 10^{-5}\text{mol/l}]$ (RB).

Cette courbe étudie l'effet du pH sur le pourcentage d'élimination (R%) de la rhodamine B en utilisant les deux adsorbants : le noyau de dattes bruts (**NDB**) en marron et celles calcinées (**NDC**) en noir.

- **Plage optimale d'adsorption (pH entre 2 et 5) :** Ce domaine acide correspond aux performances maximales du procédé. Le taux de rétention atteint sa valeur maximale puis se stabilise entre **98% et 100%** pour le charbon actif (**NDC**), tandis qu'il atteint un rendement autour de **90% à 95%** pour les noyaux de dattes bruts (**NDB**). Cette zone constitue ainsi le **pH optimal** de l'adsorption.
- **Fléchissement en milieux neutre et alcalin (pH de 7 à 10) :** On assiste à une baisse graduelle de la capacité de fixation des deux matériaux. À $\text{pH}=10$, l'efficacité chute notablement pour atteindre environ 80% pour le **NDC** et 65% pour le **NDB**.

III.5.1. Modélisation de la cinétique d'adsorption

Pour modéliser la cinétique d'adsorption, nous avons appliqué les équations de pseudo-premier et pseudo-second ordre. Le choix du modèle le plus approprié est basé sur la valeur du coefficient de corrélation (R^2), validant ainsi la meilleure description des données[4].

A. Le modèle du pseudo premier ordre

Suivant la procédure suggérée par Lagergren, la constante de vitesse d'adsorption K_v et le coefficient de corrélation R^2 ont été déterminés après avoir élargi le diagramme de $\ln (q_e - q_t)$ en rapport au temps (t) (min), conformément à l'équation :

$$\ln (q_e - q_t) = f(t)$$

$$q_t = (C_0 - C_e) * V / m$$

Avec :

q_e : quantité adsorbée à l'équilibre (mg/g).

q_t : quantité adsorbée à l'instant t (mg/g).

t : temps de contact (min).

V : Volume de la solution du colorant

m : Masse de l'adsorbant

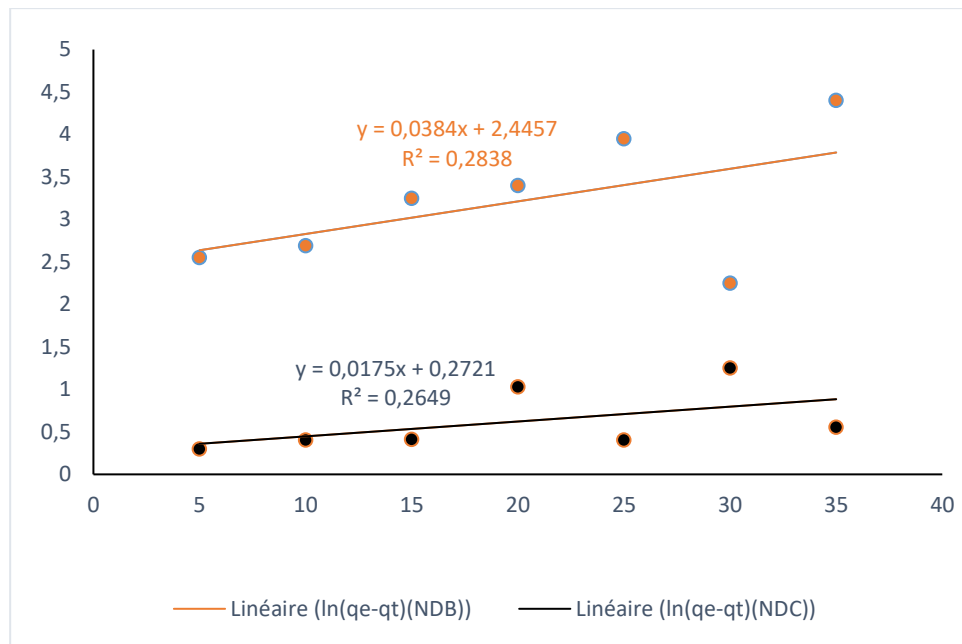


Figure III.19 : Détermination des constantes des vitesses du pseudo 1er ordre de l'adsorption du (RB) par NDB et NDC.

B. Le modèle du pseudo second ordre

Le graphique ci-dessous représente la dynamique du modèle de pseudo-second ordre, décrit par la formule $(t/q_t = f(t))$ en se basant sur l'équation suivante :

$$dq_t/dt = k_2 (q_e - q_t)^2$$

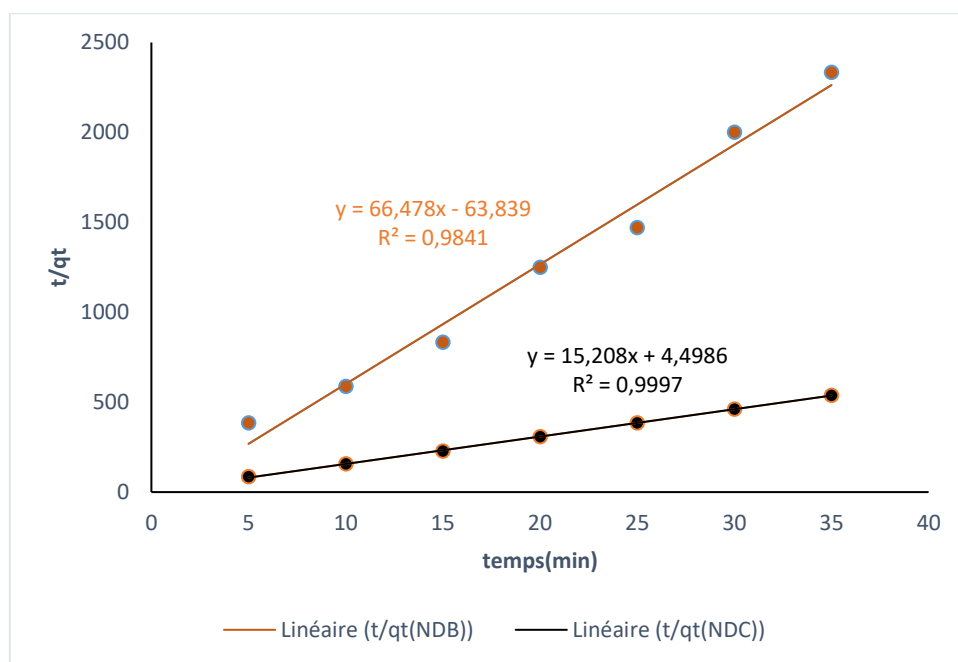


Figure III.20 : Détermination des constantes des vitesses de pseudo second ordre de l'adsorption de la (RB) par NDB et NDC.

Selon les figures, l'adsorption de la RB par les noyaux de dattes bruts et calcinés sont mieux décrite par le model cinétique pseudo second ordre suite aux valeurs du coefficient de corrélation (R^2) qui est égal à **0.999 (NDC)** et **0.984(NDB)**, comme est montré dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.1 : Tableau récapitulatif des deux études cinétiques de l'adsorption de la RB par NDB et NDC.

		Ordre1			Ordre2		
Adsorbant	Adsorbat	K ₁ (g/mg.min)	q _e (mg/g)	R ²	K ₂ (g/mg.min)	q _e (mg/g)	R ²
NDB	RB	-0.0384	11.53	0.283	-71.42	0.015	0.984
NDC	RB	-0.0175	1.30	0.264	76.92	0.037	0.999

Ce modèle décrit généralement des phénomènes d'adsorption impliquant des interactions chimiques entre l'adsorbant et l'adsorbat.

III.5.2. Isothermes d'adsorption

Les résultats de l'application des modèles d'adsorption de Freundlich et de Langmuir sont présentés dans les graphiques ci-dessous.

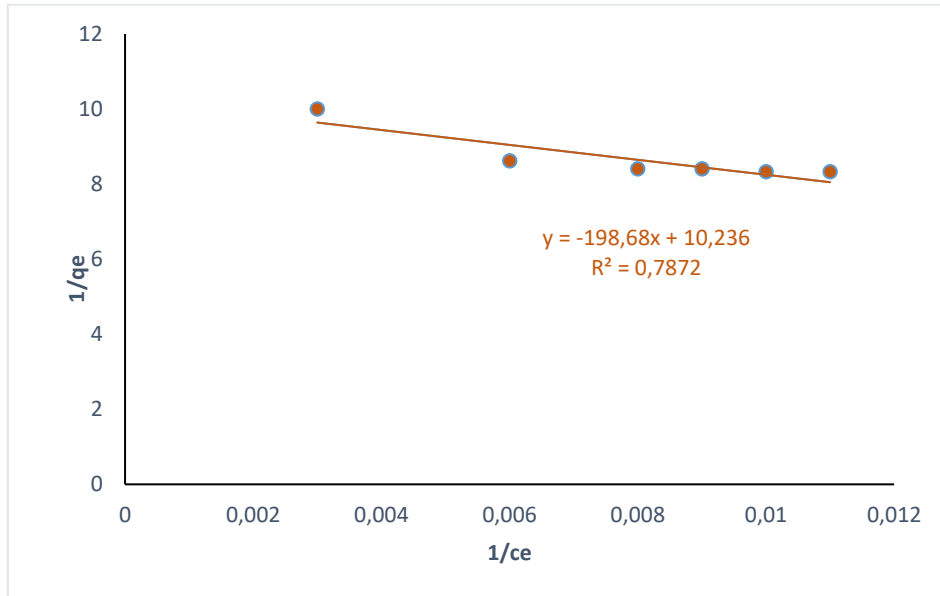


Figure III.21: Linéarisation de Langmuir de la RB par (NDB).

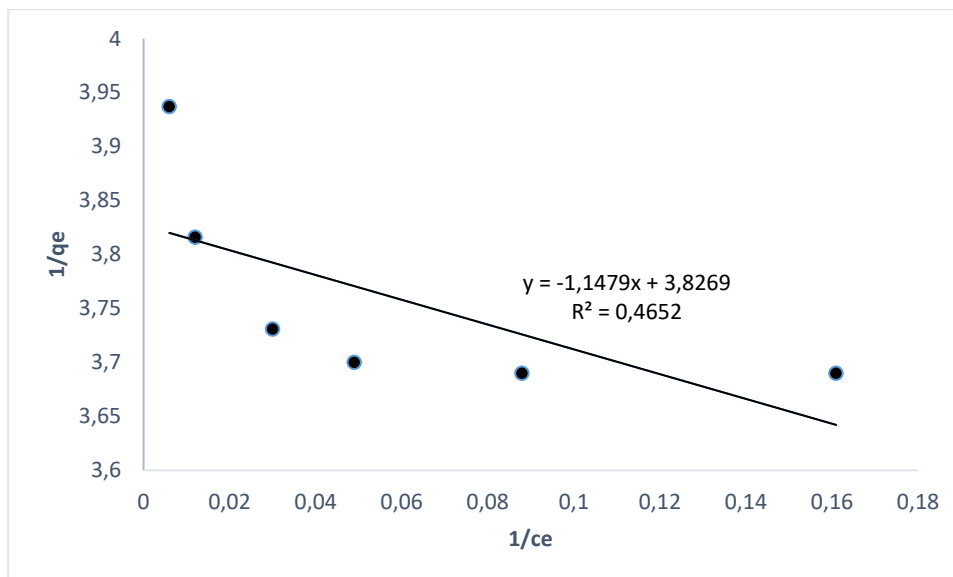


Figure III.22 : Linéarisation de Langmuir de la RB par (NDC).

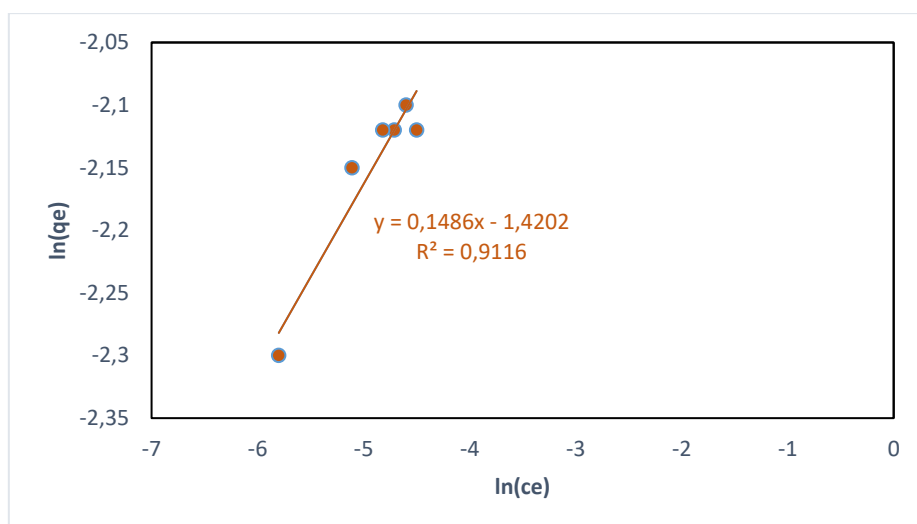


Figure III.23 : Linéarisation de l'isotherme de Freundlich de la RB par (NDB).

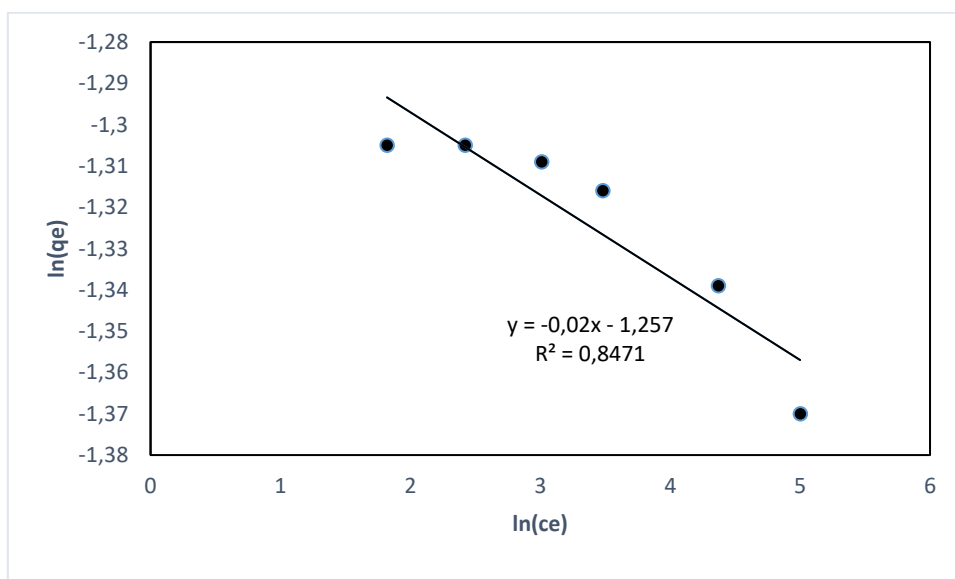


Figure III.24 : Linéarisation de l'isotherme de Freundlich de la RB par (NDC).

Les résultats obtenus montrent que l'adsorption du colorant (RB) sur les matériaux (NDB) et (NDC) est mieux décrite par le modèle de **Freundlich** que par celui de **Langmuir**, comme l'attestent les valeurs plus élevées de R^2 . Cela suggère que l'adsorption se produit sur une surface hétérogène comportant des sites actifs de différentes énergies et qu'elle peut conduire à la formation de multicouches. Le matériau (NDC) présente une capacité d'adsorption légèrement supérieure à celle de NDB, comme le montrent sa valeur plus élevée de K_f et les résultats expérimentaux d'élimination.

Tableau III.2 : Constantes des deux isothermes d'adsorption de la RB par NDB et NDC.

Matériau(NDB)et(NDC) / modèle d'isothermes	Freundlich			Langmuir		
	$\ln q_e = \ln K_f + 1/n \ln C_e$			$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{\max} \cdot K_L \cdot C_e} + \frac{1}{q_{\max}}$		
Constantes	n	K(1/g)	R ²	q(mg/g)	K _L (1/g)	R ²
NDB	6.72	0.24	0.911	0.097	-0.0049	0.787
NDC	5	0.28	0.847	0.26	-3.35	0.465

III.5.3. Etude thermodynamique de l'adsorption du RB sur les noyaux de dattes et le charbon actif.

Le calcul de l'énergie libre ΔH est indispensable pour déterminer la nature du processus de rétention. Cette grandeur thermodynamique est obtenue par l'équation suivante (5) :

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

ΔG : L'enthalpie libre (joule/mole)

ΔH : L'enthalpie (joule/mole)

ΔS : L'entropie (joule/mole. K)

T : Température absolue (K)

D'une manière générale, le phénomène de l'adsorption s'accompagne d'un effet thermique, le plus souvent de nature exothermique ($\Delta H > 0$). La détermination de cette chaleur d'adsorption, ou enthalpie standard ΔH , s'avère essentielle pour distinguer la physisorption de la chimisorption. Ce paramètre peut être accessible à partir de la constante d'équilibre K_C calculée selon la relation suivante :

$$K_C = \frac{C_0 - C_e}{C_e}$$

$$\Delta G = - R T \cdot \ln K_c$$

Avec

K_c : Constante d'équilibre.

ΔG : L'enthalpie libre (joule/mole).

T° : Température absolue (K).

Co : Concentration initiale de l'adsorbat.

Ce : Concentration à l'équilibre de l'adsorbat.

R : Constante des gaz parfaits (8,314 Joule/mole K).

En traçant graphiquement **Ln k_c** en fonction de l'inverse de la température (**1/T**), on obtient une droite dont la pente est égale à **-ΔH°/R** et dont l'ordonnée à l'origine est **ΔS°/R**

$$\ln k_c = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{R} \cdot \frac{1}{T}$$

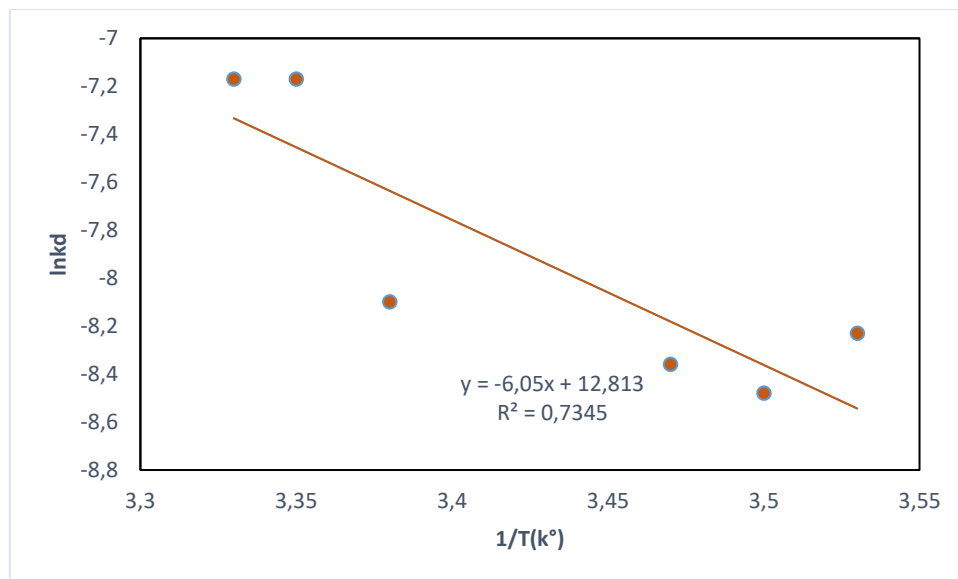


Figure III.25 : Paramètres thermodynamiques d'adsorption du RB par NDB.

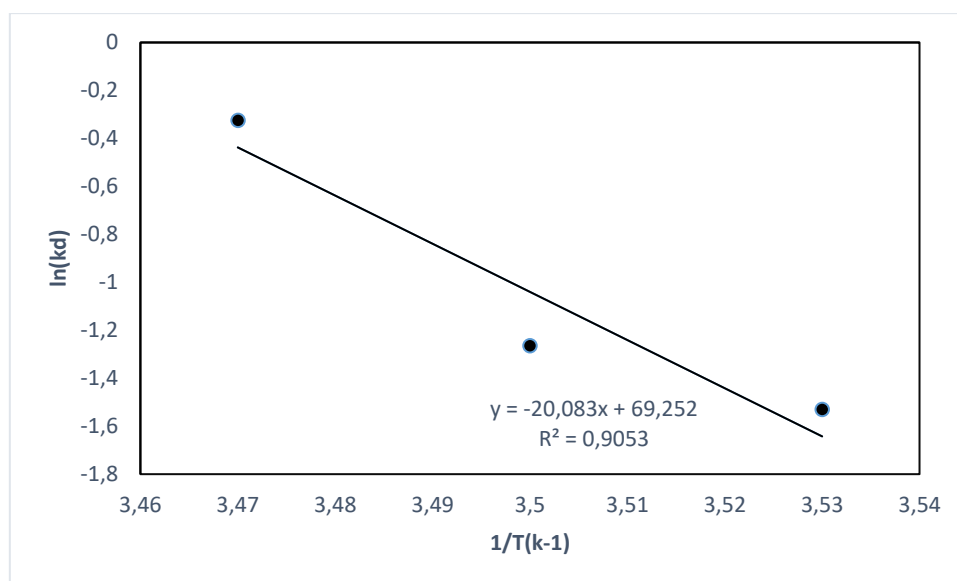


Figure III.26 : Paramètres thermodynamiques d'adsorption du RB par NDC.

Tableau III.3 : Paramètres thermodynamiques du RB par NDB et NDC.

Adsorbant	ΔH° (J. mole ⁻¹ .K ⁻¹)	ΔS° (J. mole ⁻¹ .K ⁻¹)	ΔG° (J. mole ⁻¹ .K ⁻¹)
NDB	50.29	106.52	17.76
NDC	166.97	575.76	-169.83

L'étude thermodynamique révèle que l'adsorption du colorant sur les deux adsorbants est un processus **endothermique** accompagné d'une augmentation du désordre à l'interface solide-solution. Cependant, une différence importante apparaît au niveau de la spontanéité du phénomène : l'adsorption sur **NDC** est spontanée et favorable ($\Delta G^\circ < 0$), tandis que celle sur **NDB** est moins favorable dans les conditions étudiées ($\Delta G^\circ > 0$). Ces résultats confirment la meilleure performance adsorbant du matériau **NDC** par rapport au matériau **NDB**.

Références bibliographique

- [1] Lantri F., Application de matrice naturelle « Noyaux de dattes » dans l'élimination de colorants organiques des eaux usées, Mémoire de Master, Université Dr Moulay Tahar de Saïda, Algérie, 2024/2025.
- [2] Boucif F., Étude de l'adsorption des polluants par un biomatériau issu des déchets de dattes, Mémoire de Master, Université Dr Moulay Tahar de Saïda, Algérie, 2024.
- [3] Laouar A., Caractérisation physicochimique et microbiologique de deux variétés de dattes « Hmira » et « Feggous » et production de bioéthanol à partir de rebuts de dattes « Hmira », Mémoire de Master, Université Tahri Mohamed de Béchar, Algérie, 2019/2020.
- [4] Acourene S., Buelguedj M., Tama M. et Taleb B., Caractérisation, évaluation de la qualité de la datte et identification des cultivars rares de palmier dattier de la région des Zibans, 2001.
- [5] Zenasni B.M., Adsorption des polluants organiques et inorganiques sur des substances naturelles : Kaolin, racines de *Calotropis procera* et noyaux de dattes, Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, France, 2015.

CONCLUSION

GÉNÉRALE



CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce travail vise à évaluer l'efficacité d'adsorption d'un colorant organique « Rhodamine B » (RB) à l'aide d'un adsorbant naturel et écologique dérivé de noyaux de dattes (Hamira) provenant des régions sahariennes, ainsi que de sa version calcinée sous forme de charbon actif. Une étude documentaire approfondie a été menée afin de cerner les propriétés des polluants organiques, leurs impacts environnementaux et les différentes techniques d'élimination appliquées par d'adsorption. Par ailleurs, une série d'expériences a été réalisée pour évaluer l'influence des paramètres clés sur la performance du procédé, notamment le temps de contact, la concentration initiale en colorant, la masse d'adsorbant, la température et le pH du milieu réactionnel.

L'étude de l'effet de la masse montre que l'augmentation de la masse de l'adsorbant améliore le rendement d'élimination du colorant pour les deux matériaux. Le NDC atteint rapidement un rendement proche de 100 % dès 0,2 g puis se stabilise, traduisant la saturation des sites d'adsorption. En revanche, le NDB présente une augmentation progressive du rendement jusqu'à environ 84,81 % à 0,35 g. Ces résultats confirment la meilleure capacité d'adsorption et l'affinité supérieure du NDC envers le colorant.

L'étude de l'effet de la concentration du polluant montre que les deux adsorbants présentent une évolution similaire, le matériau NDC affiche des performances supérieures grâce à une affinité et une capacité d'adsorption plus élevées. Il maintient un rendement d'élimination proche de 100 % sur toute la gamme de concentrations étudiée. Le NDB montre également une bonne efficacité (> 90 %), mais son rendement reste légèrement inférieur, notamment à fortes concentrations, en raison d'une saturation plus rapide de ses sites actifs.

Les noyaux de dattes calcinés (NDC) présentent une efficacité supérieure (99.44%) et une excellente stabilité à basses comme à hautes températures (à partir de 10 °C). En revanche, les noyaux de dattes bruts (NDB) affichent une très bonne efficacité, bien que légèrement inférieure à celle du charbon actif (91.4), et leur performance optimale est atteinte aux alentours de la température ambiante (25 °C).

CONCLUSION GENERALE

L'étude de l'influence du pH montre que les meilleurs taux d'élimination du colorant (RB) sont obtenus à $\text{pH} \leq 5$ acide au-delà de cette valeur le rendement R% diminue considérablement, pour les deux biomatériaux (**NDB** et **NDC**).

L'étude de la cinétique a révélé que le processus d'adsorption suit le modèle du pseudo-second ordre pour la Rhodamine B avec les **NDC** et **NDB**.

Concernant la modélisation des isothermes d'adsorption, les résultats ont montré que l'adsorption est mieux décrite par le modèle de Freundlich que par celui de Langmuir, comme l'attestent les valeurs plus élevées du facteur de corrélation R^2 . Cela suggère que l'adsorption se produit sur une surface hétérogène comportant des sites actifs de différentes énergies et qu'elle peut conduire à la formation de multicouches.

Sur le plan thermodynamique les résultats montrent que l'adsorption du colorant sur les deux matériaux est un processus endothermique, provoquant une élévation du désordre à l'interface solide-solution. Toutefois, une différence significative se manifeste en termes de spontanéité du processus : l'adsorption sur **NDC** est favorable et spontanée ($\Delta G^\circ < 0$), alors que celle sur **NDB** est moins propice dans les conditions examinées ($\Delta G^\circ > 0$). Ces résultats valident l'efficacité adsorbante supérieure du matériau **NDC** par rapport au matériau brut **NDB**.

En conclusion, les noyaux de dattes « Hamira », sous leurs formes brute et calcinée, s'imposent comme un bio-adsorbant naturel, performant et rentable pour extraire les colorants organiques des solutions aqueuses. Il convient désormais de mener des études complémentaires sur des effluents industriels réels pour valider leur efficacité à grande échelle.

ملخص

يهدف هذا البحث الى تقييم كفاءة مسحوق نواة التمر الخام والمفحم كمادة حيوية طبيعية في إزالة صبغة الرودامين ب من المحاليل المائية. ولتحقيق ذلك تم اختيار فعالية عملية الادمصاص بناء على عدة متغيرات تشغيلية شملت : كتلة المادة الماصة , زمن التلامس , التركيز الاولي لصبغة , درجة الحرارة , والرقم الهيدروجيني. واطهر التحليل الحركي ان امتزاز الصبغة يتبع نموذج من الدرجة الثانية الزائفة مما يشير الى احتمالية حدوث تفاعل كيميائي بين المواقع النشطة الماصة وجزيئات الصبغة اما من الناحية الديناميكية الحرارية , فقد اكدت النتائج ان عملية الامتزاز تلقائية وناشرة للحرارة ختاماً فان هذه النتائج تسلط الضوء على القدرة العالية لهذه المادة الحيوية وتأكد إمكانية الاعتماد عليها كبديل طبيعي , منخفض التكلفة وصديق للبيئة وغير ضارة لإزالة الاصباغ والملوثات بفعالية.

الكلمات المفتاحية: مسحوق نواة التمر ، الامتزاز الحيوي، صبغة الرودامين ب، معالجة المياه الملوثة، الحركية الامتزازية، الديناميكا الحرارية للامتزاز

Abstract

This study aims to evaluate the efficiency of raw and carbonized date pit powder as a natural biosorbent for the removal of Rhodamine B dye from aqueous solutions. To achieve this objective, the adsorption performance was investigated under various operating parameters, including adsorbent mass, contact time, initial dye concentration, temperature, and pH. The kinetic analysis revealed that dye adsorption follows the pseudo-second-order model, suggesting a probable chemical interaction between the active adsorption sites and the dye molecules. From a thermodynamic perspective, the results confirmed that the adsorption process is spontaneous and exothermic. In conclusion, these findings highlight the high potential of this biosorbent and confirm its suitability as a natural, low-cost, environmentally friendly, and non-toxic alternative for the effective removal of dyes and pollutants.

Keywords: Date pit powder, Biosorption, Rhodamine B dye, Contaminated water treatment, Adsorption kinetics, Adsorption thermodynamics.

Résumé

Ce travail vise à évaluer l'efficacité de la poudre de noyaux de dattes brute et carbonisée en tant que biosorbant naturel pour l'élimination du colorant Rhodamine B à partir de solutions aqueuses. Pour atteindre cet objectif, l'efficacité du procédé d'adsorption a été étudiée en fonction de plusieurs paramètres opératoires, notamment la masse de l'adsorbant, le temps de contact, la concentration initiale du colorant, la température et le pH. L'analyse cinétique a montré que l'adsorption du colorant suit le modèle cinétique du pseudo-second ordre, ce qui suggère une interaction chimique probable entre les sites actifs de l'adsorbant et les molécules du colorant. D'un point de vue thermodynamique, les résultats ont confirmé que le processus d'adsorption est spontané et exothermique. En conclusion, ces résultats mettent en évidence le fort potentiel de ce matériau biosourcé et confirment sa capacité à constituer une alternative naturelle, économique, écologique et non toxique pour l'élimination efficace des colorants et des polluants.

Mots-clés : Poudre de noyaux de dattes, Biosorption, Colorant Rhodamine B, Traitement des eaux contaminées, Cinétique d'adsorption, Thermodynamique de l'adsorption.