

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE DE BLIDA 1
Faculté de technologie Département de Génie des Procédés



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER EN GENIE DES PROCEDES
Spécialité : Génie de L'environnement

Thème

**ETUDE PARAMETRIQUE ET
COMPARATIVE DE LA RETENTION
D'UN COLORANT SUR LES ÉCORCES
ET LES GRAINES DE MORINGA
OLEIFERA**

Présenté par :

Melle SEFFAH Dounia

Mme MEHENNI Soumia

Mr DRARENI Abdelhamid Mohamed

Encadré par :

Dr. TAOUALIT Nadjat

2024/2025

Remerciement

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de ce travail.

Tout d'abord, nous remercions Dieu pour nous avoir donné la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce projet.

Nous remercions sincèrement notre encadreur, Dr. Taoualit Nadjat, pour son soutien constant, ses conseils précieux et sa confiance en nous. Ses orientations ont été déterminantes pour la qualité de ce travail.

Nous remercions également Monsieur Mourad l'ingénieur de laboratoire pour ses conseils et sa disponibilité

Nous sommes reconnaissants aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail et pour leurs remarques constructives.

Nous remercions tous les enseignants du département de Génie des Procédés de l'Université Saad Dahleb de Blida pour leur enseignement et leur soutien.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude à nos familles pour leur soutien inconditionnel et leur amour. Nous remercions également tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes parents pour leur patience et leur réconfort dans les moments de doutes et de découragement. Eux qui ont supporté mon stress et mes coups de colère tout au long de ce périple

A mes belles sœurs Nada et Sarah A mon frère Ibrahim Je vous dis Mille fois merci

Mes amis Youssra, Chaima, Marwa, Chiraz, Rania, Sirine et Imene à ma binôme Mhenni Soumia, tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, j'exprime ma gratitude...

Dounia

Dédicace

Je tiens tout d'abord à remercier
Dieu tout-puissant pour m'avoir donné la force et la persévérance nécessaires pour mener à
bien ce travail.

Je dédie ensuite ce travail à ma famille qui a été une source de soutien et de motivation pour
moi,

À la famille de mon époux qui m'a accueillie avec amour et respect,
À mon époux qui a été mon partenaire à chaque étape de mon parcours académique, Et à
mes amis qui ont été mes compagnons de route tout au long de mes études.

Je tiens également à exprimer ma gratitude particulière à ma binôme Dounia Seffah qui a été
une source d'inspiration et de soutien pour moi tout au long de ce travail.

Enfin, je remercie mes professeurs qui ont contribué à ma formation et m'ont transmis leurs
connaissances et expériences.

Merci à vous tous pour votre soutien et vos encouragements constants.

Soumia

Résumé

Les eaux usées représentent un risque majeur pour l'environnement et la santé humaine en raison de leur teneur en substances toxiques et en micro-organismes pathogènes. Dans ce contexte, cette étude explore l'utilisation d'un matériau naturel (les écorces et graines de *Moringa Oleifera* (EGMO)(GMO)) pour l'adsorption du colorant Rouge de Congo en solution aqueuse.

Préparées sans traitement chimique, les EGMO ont été caractérisées par spectroscopie FTIR et détermination du pH_{Hzc}. Plusieurs paramètres expérimentaux ont été optimisés afin d'évaluer leur efficacité. Les résultats montrent une bonne capacité d'adsorption, avec un comportement conforme au modèle de Freundlich et une cinétique suivant le modèle de pseudo-second ordre.

Ce travail confirme l'intérêt des matériaux naturels comme solution économique et durable pour le traitement des eaux polluées par des colorants industriels.

Mots-clés : *Moringa Oleifera*, adsorption, colorant, Rouge de Congo, traitement des eaux

Abstract

Wastewater poses a major risk to the environment and human health due to its content of toxic substances and pathogenic microorganisms. In this context, this study explores the use of a natural material (*Moringa Oleifera* bark and seeds (EGMO)(GMO)) for the adsorption of Congo Red dye in aqueous solution.

Prepared without chemical treatment, the EGMOs were characterized by FTIR spectroscopy and pH_{Hzc} determination. Several experimental parameters were optimized to evaluate their effectiveness. The results show good adsorption capacity, with behavior consistent with the Freundlich model and kinetics following the pseudo-second-order model.

This work confirms the value of natural materials as an economical and sustainable solution for the treatment of water polluted by industrial dyes.

Keywords: *Moringa Oleifera*, adsorption, dye, Congo Red, water treatment

ملخص

تشكل مياه الصرف الصحي خطرًا كبيرًا على البيئة وصحة الإنسان نظرًا لاحتوائها على مواد سامة وكائنات دقيقة مُمرضة. في هذا السياق، تستكشف هذه الدراسة استخدام مادة طبيعية (قشر وبذور المورينجا أوليفيرا (EGMO)) لامتصاص صبغة الكونغو الحمراء في محلول مائي.

تم تحضير EGMOs دون معالجة كيميائية، وتم توصيفها باستخدام مطيافية الأشعة تحت الحمراء بتقنية تحويل فورييه للأشعة تحت الحمراء (FTIR) وتحديد pH_{Hzc}. تم تحسين العديد من المعاملات التجريبية لتقييم فعاليتها. تُظهر

النتائج قدرة امتصاص جيدة، مع سلوك يتوافق مع نموذج فروندليش وحركية تتبع نموذج شبه الدرجة الثانية .
يؤكد هذا العمل قيمة المواد الطبيعية كحل اقتصادي ومستدام لمعالجة المياه الملوثة بالأصبغ الصناعية
الكلمات المفتاحية: المورينجا أوليفيرا، الامتزاز، الصبغة، الكونغو الأحمر، معالجة المياه.

Liste abréviation :

C₀ : concentration initiale de la solution.

C_e : concentration en soluté dans la phase liquide à l'équilibre. RC: Rouge Congo

FTIR : Spectroscopie infrarouge a transformée de Fourier. IR : Infrarouge.

GMO : Grain Moringa Olifera

EGMO : écorces graine Moringa Oleifera pH : Potentiel hydrogène.

pHPZC : Potentiel hydrogène au point zéro charge. PZC : Point zéro charge.

UV : Ultraviolet.

Q_e : Quantité adsorbée a l'équilibre. Q_m : Capacité maximale d'adsorption.

Q_t : Quantité de polluant adsorbée à l'instant t. Constantes

K₁ : Constante de vitesse du modèle de pseudo premier ordre. K₂ : Constante de vitesse du modèle de pseudo second ordre. K_L : Constante de Langmuir.

K_f : Constante de Freundlich.

Liste des tableaux

Table 1 : Les principales différences entre les deux types d'adsorption. [3]	20
Table 2 : Classification systématique de Moringa Oleifera [19]	29
Table 3 : Conditions environnementales de Moringa Oleifera. [21]	31
Table 4 : Les différentes utilisations de Moringa Oléifera dans différents domaines. [22]..	32
Table 5 : Composition chimique des graines de Moringa Oleifera [24].....	35
Table 6 : Propriétés chimiques du rouge de Congo	45
Table 7 : Les propriétés physiques du colorant rouge de Congo	46
Table 8 : La solubilité du colorant rouge de Congo	46
Table 9 : Réactifs utilisées	54

Liste des figures

Figure 1 : Schéma simplifié du principe d'adsorption en phase liquide sur une particule de charbon actif. [5]	19
Figure 2 : Les deux types d'adsorption.	20
Figure 3 : Déplacement du soluté lors de son adsorption. [8]	22
Figure 4 : Classification des isothermes d'adsorption physique selon l'IUPAC [12].	24
Figure 5 : L'arbre de moringa Oleifera	30
Figure 6 : Feuilles de moringa Oleifera.....	30
Figure 7 : Fleurs de moringa Oleifera	30
Figure 8 : Fleurs de moringa Oleifera	30
Figure 9 : Couleurs de rouge de Congo	44
Figure 10 : La structure du colorant rouge de Congo	45
Figure 12 : Graines de Moringa Oleifera	55
Figure 11 : Ecorces des graines de Moringa	55
Figure 13 : Montre les spectres IR spécifiques des graines de Moringa Oleifera.	61
Figure 14 : Montre les spectres IR spécifiques des écorces des graines de Moringa oleifer	62
Figure 15 : pH _{pZ} de GMO	63
Figure 16 : pH _{pZ} de EGMO	63
Figure 17 : Courbe d'étalonnage du RC à 489,5 nm.....	64
Figure 18 : Effet de temps de contact sur GMO.....	65
Figure 19 : effet de masse sur GMO	66
Figure 20 : effet de masse sur EGMO	67
Figure 22 : effet de concentration du rouge de congo sur EGMO.....	67

Figure 21 : effet de concentration sur GMO.....	67
Figure 23 : effet de PH sur GMO.....	68
Figure 24 : effet de PH sur EGMO.....	69
Figure 25 : Modèle de pseudo-premier ordre de l'adsorption de RC sur EGMO	69
Figure 26 : Modèle de pseudo-second ordre de l'adsorption de RC sur EGMO	70
Figure 27 : Modèle de pseudo-premier ordre de l'adsorption de RC sur GMO	71
Figure 28 : Modèle de pseudo-second ordre de l'adsorption de RC sur GMO	71
Figure 29 : Modélisation par le modèle Freundlich EGMO.....	72
Figure 30 : Modélisation par le modèle langmuir EGMO	73

Table des matières

Remerciement	3
Dédicace.....	4
Dédicace.....	5
Résumé.....	6
Liste abréviation :	8
Liste des tableaux.....	9
Table des matières.....	11
Introduction générale :	15
CHAPITRE 1.....	17
Généralités sur l'absorption	17
1.1. Introduction.....	18
1.2. Définitions et principes de l'adsorption.....	18
1.2.1. Définition de l'adsorption.....	18
1.2.2. Différence entre adsorption et absorption.....	19
1.3. Types d'adsorption	19
1.3.1. Adsorption physique (La physisorption).....	20
1.3.2. Adsorption chimique (Chimisorption).....	20
1.3.3. Différence entre adsorption physique et chimique.....	20
1.4. Cinétique d'absorption.....	21
1.4.2. Equation cinétique de pseudo 2 ^{er} ordre	21
1.5. Mécanisme d'absorption	21
1.6. Facteurs influençant l'adsorption.....	22
1.6.1. Nature de la surface (matériau, texture, charge, le temps de contact).....	22
1.6.2. Nature du gaz ou de la solution (polarité, taille moléculaire, solubilité)	23
1.6.3. Température	23
1.6.4. Concentration	23
1.6.5. pH.....	24
1.7. Les isothermes d'adsorption.....	24
1.8. Modélisation des équilibres d'absorptions.....	25
1.8.1. Modèle de Langmuir.....	25
1.8.2. Modèle de Freundlich	26
1.8.3. Modèles Temki	27
1.9. Application de l'adsorption.....	27
1.10. Types d'absorbants	28
1.10.1. Adsorbant synthétique	28
1.10.2. Adsorbant naturel.....	28
1.11. Présentation de Moringa	29
1.11.3. Description botanique	29
1.12. Aspect écologique	31

1.12. Interaction entre les molécules d'absorbant et les polluants	35
1.13. Graines de Moringa pour l'adsorption	35
1.13.1. Composition chimique.....	35
1.13.2. Utilisation des graines de Moringa Oleifera dans la purification des eaux.....	35
1.14. Les avantages et les inconvénients de l'utilisation de Moringa pour l'absorption	35
1.14.1. Les avantages.....	35
Conclusion :	36
CHAPITRE 2	37
2.1. Introduction	38
2.2. Définition du colorant	38
2.3. Généralités sur les colorants	38
2.4 Classification des colorants	39
2.4.1 Classification chimique	39
2.4.2 Classification tinctoriale	39
2.5. La solubilité du colorant dans l'eau	40
2.6. Utilisations et applications des colorants	41
2.7. Les colorants et leurs impacts environnementaux	42
2.8. Toxicité des colorants	42
2.8.1. Toxicité sur la santé humaine	43
2.8.1. Toxicité sur les milieux aquatiques.....	43
2.9. Procédé d'élimination des colorants	43
2.9.1. Procédé physique	43
2.9.2. Procédé chimique.....	44
2.10.1. Définition	44
2.10.2. Structure	44
2.11. Propriétés chimiques et physiques du rouge de Congo	45
2.11.1. Propriétés chimiques	45
2.11.2. Propriétés physiques	45
2.12. La solubilité du rouge de Congo.....	46
2.13. Utilisation du rouge de Congo.....	46
2.14. Toxicité	47
2.15. La toxicité du rouge du phénol	47
2.15.1. Sur la santé humaine	47
2.15.2. Sur l'environnement	47
CHAPITRE 3	48
Differentes Etudes Sur L'utilisation De Moringa Dans Le Traitement Des Eaux.....	48
3.1. Introduction	49
3.2. Le travail de Hamdad B, Raham A en 2015	49
3.3. Le travail de Boudarn S., Boukedroun A. (2017)	50
3.5. Le travail de Belkacem S., Bensaifi H. (2021)	50
3.6. Le travail de Arhab T., Chebli T. (2021)	51

3.7. Étude de l'efficacité d'épuration des eaux usées domestiques de l'oued de Béchar par l'utilisation du sable et des graines de <i>Moringa oleifera</i> Lam	51
3.8. Conclusion	52
CHAPITRE 4.....	53
Matériels Et Methodes.....	53
4.1 Introduction.....	54
4.2 Produits utilisés	54
4.3 Préparation des biosorbants.....	54
4.4. Caractérisation de GMO et EGMO	55
4.5. Mode opératoire.....	56
4.6. Préparation des solutions de rouge Congo et établissement de la courbe d'étalonnage	56
4.7. Étude du temps de contact	57
4.8. Étude de masse	58
4.10. Étude de pH :	59
5.1. Introduction.....	61
5.2. Caractérisations de la poudre des graines de <i>Moringa Oleifera</i>	61
5.3. Détermination du pH _{pzc}	62
5.5. Etude paramétrique de la rétention de RC sur GMO et EGMO.....	64
5.5.1. Effet de temps de contact	64
5.6. Effet de concentration sur GMO et EGMO	67
5.7 Effet de PH	68
5.7.1 GMO	68
5.8. Modélisation de la cinétique d'adsorption.....	69
5.9. Modèle cinétique de pseudo-premier ordre (EGMO)	69
5.11. Modèle cinétique de pseudo-premier ordre GMO.....	71
5.12. Modèle de pseudo-second ordre de l'adsorption de RC sur GMO.....	71
5.13. Modélisation des isothermes d'adsorption	72
5.13.1. Modèle de Langmuir (EGMO).....	73
5.13.2. Modèle de Freundlich GMO	73
5.13.3. Modèle de Langmuir GMO.....	74
Références	77
bibliographiques.....	77

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale :

L'eau constitue une ressource essentielle à la vie, indispensable à l'ensemble des êtres vivants (humains, animaux et végétaux) et joue un rôle central dans de nombreuses activités humaines telles que la consommation domestique, l'agriculture, l'industrie ou encore la production d'énergie.

Cependant, cette ressource vitale est fortement menacée par diverses formes de pollution, notamment celle issue de l'industrie textile. À titre d'exemple, les teintures synthétiques, utilisées massivement dans ce secteur, sont souvent rejetées directement dans les milieux aquatiques sans traitement préalable, entraînant de graves conséquences environnementales. [1]

Face à ce constat préoccupant, de nombreuses recherches ont été entreprises au cours des dernières années pour développer des procédés efficaces de dépollution des eaux. Parmi les techniques disponibles, l'adsorption s'impose comme l'une des plus utilisées et des plus performantes, notamment pour l'élimination des colorants. Simple à mettre en œuvre et particulièrement efficace, cette méthode repose sur la capacité de matériaux solides, appelés adsorbants, à piéger les substances colorantes présentes dans l'eau. [2]

De nombreux matériaux adsorbants ont été étudiés et référencés dans la littérature, tels que les argiles, les zéolites, les alumines activées, les boues, les biomasses, les résidus agricoles, les sous-produits industriels et le charbon actif. [3]

Parmi les colorants les plus utilisés, le rouge de Congo occupe une place importante, notamment dans la teinture du coton, du bois et de la soie. Néanmoins, ce colorant présente une toxicité non négligeable : il peut provoquer des brûlures oculaires irréversibles, des troubles respiratoires en cas d'inhalation, et des effets digestifs sévères en cas d'ingestion (nausées, vomissements, sueurs froides, etc.).

Le traitement des effluents industriels contenant ce type de colorant représente donc un enjeu environnemental majeur. Une grande diversité de méthodes physiques, chimiques et biologiques ont été explorées pour traiter ces effluents. Parmi les approches récentes, l'utilisation de matériaux naturels ou synthétiques à fort potentiel adsorbant, à grande surface spécifique et facilement disponibles dans la nature, s'avère particulièrement prometteuse. [4]

Depuis une dizaine d'années, les efforts de recherche se sont intensifiés autour de procédés d'épuration basés sur des mécanismes naturels et des matériaux d'origine végétale. Parmi ceux-ci, le *Moringa Oleifera* suscite un vif intérêt au sein de la communauté scientifique internationale, en raison de ses nombreuses propriétés, notamment son potentiel adsorbant.

Introduction générale

Dans cette optique, notre travail s'inscrit dans une démarche de valorisation de biomasses végétales. Nous avons étudié l'utilisation des écorces de graines de *Moringa Oleifera* (EGMO et GMO) et les graines comme matériau adsorbant pour l'élimination du rouge de Congo en solution. L'objectif est de proposer une solution efficace, économique et respectueuse de l'environnement.

L'étude s'est attachée à évaluer l'influence de plusieurs paramètres expérimentaux tels que le temps de contact, la masse d'adsorbant, la concentration initiale en colorant et le pH de la solution.

Ce travail est structuré en cinq chapitres :

Le premier chapitre intitulé "généralités sur l'adsorption", il contient un rappel général sur le phénomène d'adsorption et les principaux modèles mathématiques utilisés pour interpréter les résultats expérimentaux ;

Le deuxième chapitre intitulé "Les colorants", généralités sur les colorants et plus particulièrement sur le rouge de Congo ;

Pour le troisième chapitre nous l'avons consacré à l'état de la recherche et revue bibliographique en lien avec notre thématique ;

Le quatrième chapitre présentation des matériaux, produits et méthodes expérimentales employés, ainsi que les techniques de caractérisation mises en œuvre ;

Enfin le dernier chapitre sera consacré à la présentation, analyse et interprétation des résultats obtenus.

À partir de l'interprétation générale des résultats expérimentaux, nous présentons une conclusion générale avec quelques perspectives à envisager pour la suite de ce travail.

CHAPITRE 1

Généralités sur l'absorption

1.1. Introduction

L'adsorption est un processus de transfert de matière où des composés organiques ou inorganiques présents dans une phase liquide ou gazeuse se fixent à la surface d'un matériau solide, appelé adsorbant. Ce procédé présente de nombreux atouts, notamment sa capacité à éliminer une grande variété de polluants, tels que les colorants, les phénols, les ions métalliques, les pesticides, les substances humiques, les détergents, ainsi que les molécules responsables des altérations du goût et de l'odeur.

Dans ce premier chapitre, nous allons définir et expliquer en détail le principe de l'adsorption, en mettant en évidence son importance et ses applications dans divers domaines scientifiques et industriels. Nous aborderons également les différents types d'adsorption, en distinguant notamment l'adsorption physique (physisorption) et l'adsorption chimique (chimisorption), ainsi que leurs mécanismes. Par ailleurs, nous analyserons les principaux facteurs influençant ce phénomène, notamment la nature de l'adsorbant, les propriétés de l'adsorbat (telles que la taille moléculaire, la polarité et la solubilité des substances adsorbées), le pH du milieu, la température ainsi que la concentration de l'adsorbat.

1.2. Définitions et principes de l'adsorption

1.2.1. Définition de l'adsorption

L'adsorption est un phénomène au cours duquel des molécules d'un fluide se fixent à la surface d'un solide, entraînant une augmentation de leur concentration sur cette surface sans altérer le volume du milieu poreux. [1]

Ce processus peut être de nature physique et/ou chimique et implique l'accumulation d'une substance à l'interface entre deux phases, qu'il s'agisse de solide-liquide, liquide-liquide, gaz-liquide ou gaz-solide. Dans ce contexte, l'adsorbat désigne la substance extraite de la phase fluide, tandis que l'adsorbant correspond au solide sur lequel cette accumulation se produit. [2]

1.2.1. Principes de l'adsorption

Le processus de transfert de masse des molécules s'effectue depuis la phase fluide vers le cœur de l'adsorbant, se déroulant au sein même de ses grains. Les matériaux adsorbants possèdent une surface spécifique importante, souvent optimisée grâce à des structures poreuses développées industriellement. Ce phénomène intervient notamment lors de l'adsorption de substances chimiques, telles que des polluants présents en solution aqueuse. [3]

Le passage d'une espèce chimique de la phase liquide à la phase solide suit plusieurs étapes distinctes :

1.2.1.1. Diffusion externe : Le soluté (présent dans la phase liquide ou gazeuse) migre à travers la solution jusqu'à atteindre la surface externe de l'adsorbant. Ce transfert est influencé par l'écoulement du fluide au contact de la surface adsorbante.

Chapitre 1 : Généralités sur l'absorption

1.2.1.2. **Diffusion interne** : Une fois en surface, les molécules pénètrent dans les pores du matériau adsorbant, leur déplacement étant par le gradient de concentration du soluté.

1.2.1.3. **Diffusion de surface** : Les particules diffusées se fixent progressivement sur les parois internes des pores de l'adsorbant. [4]

À l'issue de ces étapes, l'élément adsorbé atteint le site d'adsorption où il est maintenu selon le type d'interaction en jeu, qu'il s'agisse de physisorption (forces de Van der Waals) ou de chimisorption (liaisons chimiques).

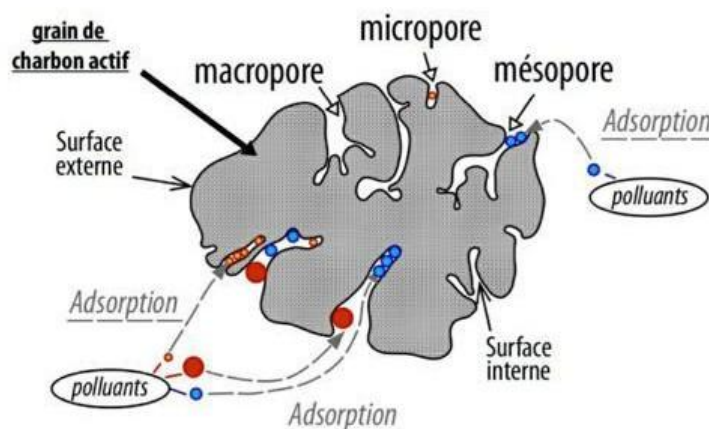


Figure 1 Schéma simplifié du principe d'adsorption en phase liquide sur une particule de charbon actif. [5]

L'adsorption étant un processus exothermique, elle s'accompagne d'un dégagement de chaleur. Cette libération thermique peut entraîner une élévation de la température du solide, ce qui risque de limiter la quantité de substance adsorbée. [6]

1.2.2. Différence entre adsorption et absorption

L'adsorption et l'absorption sont deux phénomènes distincts impliquant l'interaction d'une substance avec un matériau, mais ils diffèrent par leur mode de rétention et leur mécanisme.

1.2.2.1. **Adsorption** : Il s'agit d'un processus de surface où les molécules d'un fluide (gaz ou liquide) se fixent à la surface d'un solide ou d'un liquide sans pénétrer en profondeur. Ce phénomène est influencé par des forces physiques (physisorption) ou chimiques (chimisorption).

1.2.2.2. **Absorption** : Contrairement à l'adsorption, l'absorption est un processus volumique dans lequel une substance est intégrée et répartie uniformément à l'intérieur d'un matériau. Par exemple, lorsqu'un gaz est dissous dans un liquide ou lorsqu'un liquide est absorbé par un solide poreux, comme une éponge imbibant de l'eau.

1.3. Types d'adsorption

Toute molécule qui s'approche d'une surface subit une attraction qui peut conduire à la formation d'une liaison par deux possibilités physique ou chimique.

On distingue principalement deux types d'adsorption suivant la nature des liaisons entre le

substrat adsorbé et le solide et les énergies mises en jeu :

- La physisorption (adsorption physique)
- Chimisorption (adsorption chimique).

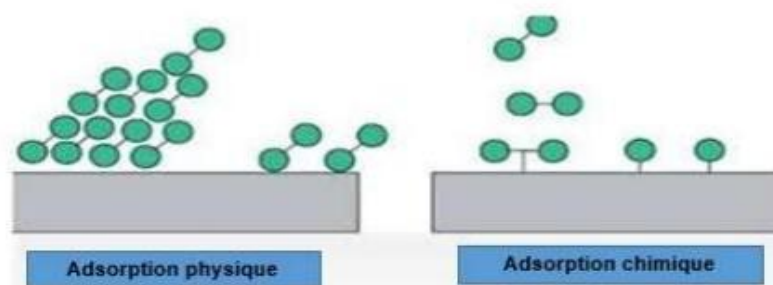


Figure 2 Les deux types d'adsorption.

1.3.1. Adsorption physique (La physisorption)

Dans l'adsorption physique, l'interaction entre les espèces dissoutes et le substrat solide repose sur des forces intermoléculaires faibles, appelées forces de Van der Waals. Ce phénomène se produit de manière quasi instantanée en raison de la grande rapidité du processus d'adsorption. De plus, il est favorisé par une baisse de la température, car il présente une réversibilité rapide, permettant un détachement aisé des molécules adsorbées. [7]

1.3.2. Adsorption chimique (Chimisorption)

À l'inverse, l'adsorption chimique repose sur la formation de liaisons chimiques, généralement covalentes ou ioniques, comme dans le cas des échanges d'ions entre charges opposées. Ce type d'adsorption peut être irréversible, entraînant une transformation chimique de la substance adsorbée lors de sa fixation sur le substrat. [8]

1.3.3. Différence entre adsorption physique et chimique

Le tableau suivant résume les principales différences entre les deux types d'adsorption.

Table 1 : Les principales différences entre les deux types d'adsorption. [3]

Propriétés	Adsorption physique	Adsorption chimique
Type de liaison	Physique	Chimique
Chaleur d'adsorption	Inférieur à 10 kcal/mole	Supérieur à 10 kcal/mole
Température du processus	Favorisée par un abaissement de Température	Favorisée par un accroissement de Température
Cinétique	Rapide, indépendante de la Température	Très lente
Désorption	Facile	Difficile

Spécificité	Non spécifique	Spécifique (dépend de la nature des liens)
Énergie mise en jeu	Faible	Élevée
Type de formation	Formation en multicouches	Formation en monocouche

1.4. Cinétique d'absorption

La connaissance de la cinétique des opérations fondées sur le phénomène d'adsorption présente un intérêt pratique considérable pour la mise œuvre optimal d'un adsorbant ainsi que pour connaître les facteurs qu'il faut optimiser pour fabriquer ou améliorer un adsorbant conduisant à la cinétique la plus rapide possible. Le processus d'adsorption se produit selon une succession des étapes qui détermine la vitesse globale de processus :

- **Transfert de masse externe** : implique le transfert et la diffusion de l'adsorbat à travers un film liquide vers la surface de l'adsorbant.
- **Transfert de masse interne** : qui implique la pénétration de l'adsorbat dans le système poreux de l'adsorbat.

Si l'adsorbant n'est pas poreux, c'est l'étape de transfert de masse externe qui contrôle la vitesse de l'adsorption, cependant, si l'adsorbant est poreux, ce qui est le cas le plus souvent. C'est l'étape de transfert de masse interne qui limite la vitesse d'adsorption plusieurs modèles ont été développés afin d'examiner le mécanisme de processus d'adsorption d'un liquide sur la surface d'un solide, parmi ces modèles, on retient :

1.4.1. Equation cinétique de pseudo 1^{er} ordre

L'équation du modèle cinétique du premier ordre est de la forme :

Q_e et Q_t : capacités d'adsorption à l'équilibre et au temps t [mg g⁻¹]. k_1 : constante d'adsorption du pseudo 1^{er} ordre [min⁻¹].

En intégrant et en linéarisant l'équation 1, on retombe sur l'équation 2 qui permet d'obtenir k_1 et Q_e . Pour la linéarisation, il faut prendre $\ln (Q_e - Q_t)$ en fonction du temps.

$$\ln (Q_e - Q_t) = \ln Q_e - K_1/2.303 t \dots\dots\dots(2)$$

1.4.2. Equation cinétique de pseudo 2^{er} ordre

L'équation du modèle cinétique du deuxième ordre est de la forme :

Avec k_2 (mg/g. min) la constante cinétique du deuxième ordre de la réaction d'adsorption.

Dont la forme linéaire s'écrit :

1.5. Mécanisme d'absorption

Le mécanisme d'absorption se déroule en plusieurs étapes impliquant le transfert et l'intégration d'une adsorbât (molécule qui s'adsorbe) vers une phase solide (l'adsorbant) avec rétention de soluté à la surface de l'adsorbant peut être décomposé en quatre étapes qui sont les suivantes :

Chapitre 1 : Généralités sur l'absorption

• **Diffusion vers la surface** : Le gaz ou la solution se déplace et atteint la surface du matériau absorbant. Ce mouvement est souvent influencé par des gradients de concentration ou de dépression.

• **Adsorption sur la surface** : Une première interaction a lieu entre les molécules du fluide et la surface du matériau. À ce stade, les forces physiques (Van der Waals) ou chimiques peuvent intervenir.

• **Formation de liaisons et échange d'électrons** : Dans certains cas, des interactions chimiques se produisent, impliquant des échanges d'électrons ou la formation de nouvelles liaisons chimiques avec le matériau absorbant.

• **Fixation et diffusion interne** : La substance pénètre progressivement dans la structure.

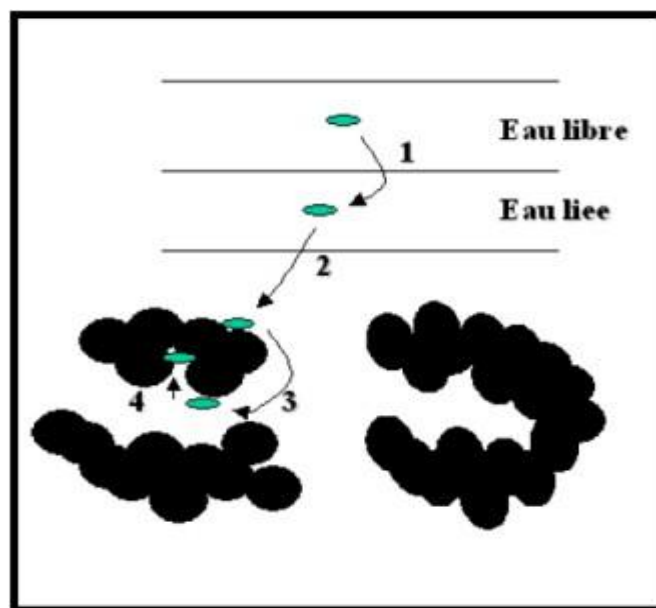


Figure 3 Déplacement du soluté lors de son adsorption. [8]

Les étapes de déplacement sont :

Etape 1 : transfert de la particule (très rapide).

Etape 2 : déplacement de l'eau liée jusqu'à être en contact de l'adsorbant (rapide).

Etape 3 : diffusion à l'intérieur de l'adsorbant sous l'influence du gradient de concentration (lente).

Etape 4 : adsorption dans un micropore (très rapide). [8]

1.6. Facteurs influençant l'adsorption

1.6.1. Nature de la surface (matériau, texture, charge, le temps de contact)

La surface spécifique d'un solide est définie comme étant sa surface par unité de masse. Elle est exprimée en (m^2/g). L'adsorption est directement proportionnelle à la surface spécifique d'adsorption. Cette surface dépend de la surface spécifique géométrique, de la surface des

Chapitre 1 : Généralités sur l'absorption

crevasses, des marches, des pores et autres imperfections de surface. Elle dépend aussi de la taille des solides (adsorbant). Chaque fois qu'un solide est divisé en particules plus petites, il y a augmentation de la surface exposée.

1.4.2.1. **Matériau** : La composition chimique de l'adsorbant joue un rôle clé. Par exemple, le charbon actif, la silice ou les zéolithes ont des capacités d'adsorption différentes en fonction de leur structure.

1.4.2.2. **Texture et porosité** : Une surface poreuse et une grande surface spécifique permettent une meilleure adsorption en offrant davantage de sites actifs pour la fixation des molécules.

1.4.2.3. **Charge de surface** : La présence de charges positives ou négatives sur l'adsorbant influence l'interaction avec les molécules adsorbées, notamment dans le cas d'espèces ioniques.

1.4.2.4. **Temps de contact** : Le temps pendant lequel l'adsorbant est en contact avec l'adsorbat influence directement l'efficacité de l'adsorption. Un temps de contact plus long permet d'atteindre l'équilibre d'adsorption, augmentant ainsi la quantité de substance adsorbée. Cependant, au-delà d'un certain seuil, l'adsorption tend à se stabiliser, indiquant que la saturation des sites actifs est atteinte. [9]

1.6.2. Nature du gaz ou de la solution (polarité, taille moléculaire, solubilité)

La capacité d'adsorption dépend fortement des propriétés des molécules impliquées. Plusieurs facteurs liés à la nature du gaz ou de la solution influençant ce processus :

- **Polarité** : Les molécules polaires, comme l'eau (H_2O) ou l'ammoniac (NH_3), interagissent plus fortement avec des adsorbants présentant des sites polaires ou chargés. À l'inverse, les molécules apolaires, comme les hydrocarbures, sont mieux adsorbées par des surfaces hydrophobes.

- **Taille moléculaire** : Des molécules de petite taille diffusent plus facilement dans les pores de l'adsorbant, ainsi leur adsorption. En revanche, des molécules volumineuses peuvent être limitées par la taille des pores du matériau adsorbant.

- **Solubilité** : Dans le cas d'une adsorption en phase liquide, une faible solubilité du soluté favorise son adsorption sur la surface de l'adsorbant, car il a tendance à quitter la solution pour se fixer sur le solide. [9]

1.6.3. Température

L'adsorption physique se produit à basse température, car il s'agit d'un phénomène exothermique, tandis que l'adsorption chimique requiert des températures plus élevées, étant un processus endothermique. Il est donc essentiel de définir la température optimale dès le début du processus pour garantir une adsorption efficace. [10]

1.6.4. Concentration

La concentration initiale de polluant est un paramètre qui influe sur la capacité d'adsorption.

1.6.5. pH

L'adsorption est maximale au point isoélectrique de l'adsorbant, lorsque sa charge de surface est neutre, car les interactions électrostatiques avec l'eau sont minimisées. Les molécules neutres sont mieux adsorbées que les molécules chargées, qui peuvent subir des forces de répulsion ou d'attraction selon la charge de l'adsorbant et le pH du milieu. [11]

1.7. Les isothermes d'adsorption

Les isothermes d'adsorption sont généralement utilisées pour décrire la relation mathématique entre la concentration d'adsorbât présente dans la phase liquide et celle présente dans la phase solide, à l'équilibre et à une température constante. Il existe différents profils d'isothermes. L'allure de la courbe d'isotherme d'adsorption varie selon le couple adsorbât-adsorbant.

Une isotherme d'adsorption est la courbe reliant la quantité d'adsorbat adsorbée par un matériau en fonction de la pression d'équilibre (ou la concentration) de l'adsorbat à température constante.

Micropores (c) et enfin la formation de multicouches (d) et éventuellement d'une condensation capillaire.

La classification d'isothermes d'adsorption-désorption théoriques, (Figure 4) a été établie par Brunauer [12].

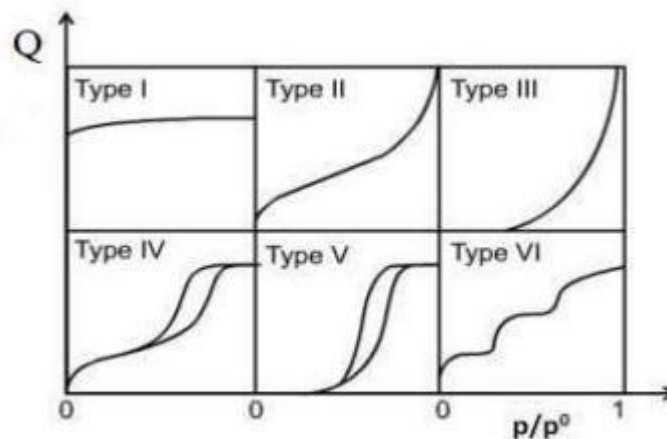


Figure 4 Classification des isothermes d'adsorption physique selon l'IUPAC [12].

• **Isotherme d'adsorption de type 1** : est caractérisée par l'existence d'une horizontale traduisant une saturation de l'adsorbant, malgré l'augmentation de la pression : cette isotherme est obtenue avec des adsorbants ayant uniquement des micropores qui se remplissent à des pressions d'autant plus basses que leur largeur est plus faible.

• **L'isotherme d'adsorption de type 2** : est caractérisée par une augmentation progressive de la quantité adsorbée en fonction de la pression relative d'équilibre : cette isotherme est obtenue pour des adsorbants non poreux ou macroporeux à la surface des quels la couche adsorbée s'épaissit

Chapitre 1 : Généralités sur l'absorption

progressivement. Cette isotherme d'adsorption est caractéristique d'une adsorption multimoléculaire.

- **L'isotherme d'adsorption de type 4 :** à la même allure que l'isotherme d'adsorption de type II pour les pressions relatives les plus basses ($< 0,42$ dans le cas de l'adsorption de diazote à 77K). Mais pour les pressions relatives les plus élevées l'isotherme de type IV est caractérisée par un palier de saturation de longueur variable pouvant être parfois réduit à un point d'inflexion. Cette isotherme d'adsorption est obtenue avec des adsorbants mésoporeux dans lesquels se produit une condensation capillaire. La désorption de l'azote condensé par capillarité dans les mésoporeuse n'est pas réversible et une hystérèse est généralement observée.

- **Les isothermes de type 3 et 5 :** sont rares et diffèrent des isothermes d'adsorption du type II et IV aux pressions les plus faibles. Ce changement de courbure du début de l'isotherme est interprété comme la faiblesse des interactions adsorbant/adsorbable. Ce type d'isotherme est observé dans le cas d'adsorption de vapeur d'eau par une surface hydrophobe.

- **L'isotherme d'adsorption de type 6 :** présente des "marches". Cette isotherme est observée dans le cas de formation de couches adsorbées successives sur des surfaces énergétiquement homogènes.

- Les isothermes réelles obtenues expérimentalement ne correspondent que rarement à l'un des types précités. Une interprétation d'isotherme expérimentale est faite donc par portions en fonction de ces isothermes types.

1.8. Modélisation des équilibres d'absorptions

De nombreux modèles mathématiques permettant de représenter les isothermes ont été développés. Ceux dont l'utilisation est la plus répandue sont les modèles de Langmuir, Freundlich et de Temki car leur expression mathématique est simple et ils permettent de représenter correctement les isothermes d'équilibre d'adsorption en phase aqueuse dans la majorité des cas. Les valeurs du paramètre d'intensité, $1/n$, indiquent la déviation de l'isotherme d'adsorption de la linéarité :

- Lorsque $n=1$, l'adsorption est linéaire, c'est à dire que les sites sont homogènes et qu'il n'y a pas d'interaction entre les espèces adsorbées.

- Lorsque $1/n < 1$, l'adsorption est favorable, la capacité d'adsorption augmente et de nouveaux sites d'adsorption apparaissent.

- Lorsque $1/n > 1$, l'adsorption n'est pas favorable, les liaisons d'adsorption de viennent faibles et la capacité d'adsorption diminue.

1.8.1. Modèle de Langmuir

L'équation de Langmuir suppose que l'adsorption a lieu sur des sites de même énergie et

Chapitre 1 : Généralités sur l'absorption

qu'il n'y a pas d'interaction entre les molécules adsorbées. Elle est applicable à l'adsorption mono moléculaire et s'exprime par :

$$Q_e = \frac{Q_{max} K_L C_e}{(1 + K_L C_e)} \dots\dots\dots (4)$$

Ou sous sa forme linéaire :

$$\frac{1}{Q_e} = \frac{1}{Q_{max}} + \frac{1}{C_e Q_{max} K_L} \dots\dots\dots (5)$$

Avec,

Q_{max} (mg.g⁻¹) : le taux maximum d'adsorbat par unité de masse de l'adsorbant en vue de forme une monocouche complète sur la surface.

K_L (L.mg⁻¹) : la constante d'équilibre d'adsorption de Langmuir liée à l'affinité des sites de surface pour l'adsorbat et à l'énergie d'adsorption et est égale au rapport des constantes de vitesses d'adsorption et de désorption.

1.8.2. Modèle de Freundlich

L'isotherme d'adsorption de Freundlich, présentée en 1926, repose sur l'équation empirique suivante :

$$Q_e = K_f C_e^n \dots\dots\dots (6)$$

L'équation peut être linéarisée comme suit :

$$\ln Q_e = \ln K_f + \left(\frac{1}{n}\right) \ln C_e \dots\dots\dots (7)$$

K_f (mg g⁻¹) et n sont respectivement la constante d'adsorption de Freundlich et n une constante dépendant de la nature de l'adsorbat et de la température.

Les valeurs du paramètre d'intensité, $1/n$, indiquent la déviation de l'isotherme d'adsorption de la linéarité :

- Lorsque $n=1$, l'adsorption est linéaire, c'est à dire que les sites sont homogènes et qu'il n'y a pas d'interaction entre les espèces adsorbées.
- Lorsque $1/n < 1$, l'adsorption est favorable, la capacité d'adsorption augmente et de nouveaux sites d'adsorption apparaissent.
- Lorsque $1/n > 1$, l'adsorption n'est pas favorable, les liaisons d'adsorption deviennent faibles et la capacité d'adsorption diminue.

1.8.3. Modèles Temkin

Temkin et Pyzhev considèrent l'effet des interactions entre adsorbant/adsorbat sur l'isotherme d'adsorption, et suggèrent que, à cause de ces interactions, la chaleur d'adsorption décroît linéairement avec la croissance du taux de recouvrement de la surface de l'adsorbant selon cette formule :

$$Q_e = B \ln (A \cdot C_e) \dots \dots \dots (7)$$

Linéarisée sous la forme :

$$Q_e = B \ln A + B \ln C_e \dots \dots \dots (8)$$

Où :

$$B = \frac{RT}{bT} \dots \dots \dots (9)$$

B : constante de Temkin liée à la chaleur d'adsorption (J/mol), A : constante de l'isotherme de Temkin (L/g),

R : constante des gaz parfaits (J/mol K), T : température (K),

C_e : concentration à l'équilibre (mg/L), bT : fonction de la chaleur d'adsorption.

1.9. Application de l'adsorption

Les applications de l'adsorption sont multiples. Nous citons ci-dessous quelques-unes :

- **Traitement des gaz** : l'adsorption permet de purifier le gaz jusqu'à des niveaux inférieurs à la partie par million (ppm). L'adsorption et les conditions de sa mise en œuvre dépendent des gaz et des impuretés à traiter.

- **Catalyse et réaction chimique** : les adsorptions solides sont largement utilisées dans l'industrie électronique ou la catalyse qui permet d'améliorer le rendement ou la productivité des procédés chimiques ou pétrochimiques et certaines préparations pharmaceutiques.

- **La purification des liquides** : il existe plusieurs applications, parmi eux on trouve les suivants :

- Le traitement des eaux potables sur lit du charbon actif granulaire pour enlever les goûts et les odeurs résiduels.

- La décoloration des liquides de sucrerie pour obtenir du sucre blanc.
- L'élimination des polluants dans les eaux industrielles ou alimentaires.

1.10. Types d'adsorbants

Les adsorbants sont des matériaux capables de capter et de retenir des substances, généralement sous forme liquide ou gazeuse. Ils sont classés en deux grandes catégories :

1.10.1. Adsorbant synthétique

Les adsorbants industriels les plus courants sont les suivants :

Zéolithes : Les zéolithes sont des adsorbants de squelette cristallin aluminosilicate tridimensionnel constitué de tétraèdres SiO_4 et AlO_4 , de formule globale $(\text{AlO}_2\text{M}_n\text{SiO}_2)$ où M représente le plus souvent un métal alcalin ou alcalino-terreux et non terreux. Il existe plus de 100 espèces de zéolithes, différant par la valeur de n et la structure cristallographique. Ils ont une structure microporeuse faite de cavités et de canaux qui leur confèrent des propriétés adsorbantes. Ils sont sous forme de poudre, granulés ou extrudés. La surface spécifique ne dépasse pas $900 \text{ m}^2/\text{g}$, mais ils présentent une bonne sélectivité. [12]

Alumines activées : Les alumines activées sont obtenues par thermolyse flash du trihydroxyde d'aluminium $\text{Al}(\text{OH})_3$ qui conduit à un produit de composition approximative à $\text{Al}_2\text{O}_3, 0.5\text{H}_2\text{O}$, possédant une structure poreuse résultant du départ de molécules d'eau. La surface des pores est couverte de groupements Al-OH , et l'adsorption se fait préférentiellement par liaison hydrogène. Les alumines activées sont des adsorbants amorphes, moyennement polaires et hydrophiles. Ils ont une surface spécifique de $300 \text{ m}^2/\text{g}$. [13]

Gels de silice : Les gels de silice sont préparés à partir de $\text{Si}(\text{OH})_4$ en phase aqueuse, obtenu par acidification d'un silicate de sodium, ou bien à partir d'un sol de silice. Les groupements Si-OH conduisent à des liaisons hydrogène. Il existe deux types de gels de silice : les microporeux, assez hydrophiles, et les macroporeux, versatiles, qui diffèrent par la taille des pores comme le nom l'indique. Leur surface spécifique peut être de 300 à $800 \text{ m}^2/\text{g}$. [14]

Adsorbants à base de polymère : ces adsorbants, encore en développement, ont des applications limitées et spécifiques. Le plus courant est un copolymère de styrène et de divinylbenzène, dont la structure poreuse et hydrophobe favorise l'adsorption. Ils peuvent être utilisés directement ou carbonisés pour obtenir des matériaux proches du charbon actif. Lorsqu'ils sont transformés en fibres tissées, ils forment des tissus de charbon actif avec une surface spécifique pouvant atteindre $2000 \text{ m}^2/\text{g}$, assurant un transfert plus rapide que les autres adsorbants. [15]

1.10.2. Adsorbant naturel

Les adsorbants naturels, comme le charbon actif, les argiles, les fibres végétales et les zéolithes, sont utilisés pour filtrer les polluants, absorber les hydrocarbures et réguler l'humidité, offrant une solution efficace et écologique.

Les adsorbants naturels proviennent majoritairement de déchets agricoles et industriels, dont les propriétés intrinsèques leur confèrent une capacité d'adsorption intéressante. Plusieurs sous-produits peuvent être exploités, tels que les déchets de fruits (noyaux d'olives, coquilles d'amandes, peaux de grenade et d'orange), les résidus agricoles comme les feuilles de lotus, ou encore les déchets industriels (charbon issu du caoutchouc de pneu, boues de traitement, moelle de bagasse). Les déchets d'algues et de fruits de mer, comme les algues vertes et la chitine, sont également utilisés pour l'adsorption de polluants. [16]

Dans cette étude, l'adsorbant naturel choisi est constitué des écorces et des graines de *Moringa Oleifera*.

1.11. Présentation de Moringa

Moringa oleifera est une plante originaire d'Inde, où elle est déjà largement connue par la population indienne. Elle pousse dans les zones tropicales et subtropicales. *M. oleifera*, arbre tropical, est passé, en une décennie, du statut de plante inconnue à celui de nouvelle ressource alimentaire et économique pour les pays du Sud. Très largement répandu à travers le monde, cette espèce suscite plus d'intérêts auprès des organisations non gouvernementales (ONG), des scientifiques et même des entrepreneurs. [17]

1.11.2. Dénomination et taxonomie

La *Moringa Oleifera* appartient à la classification suivante présentée dans le tableau I.2

Table 2 Classification systématique de Moringa Oleifera [19]

Règne	Végétale
Embranchement	Spermaphytes
Sous embranchement	Angiosperme
Classe	Dicotylédones
Sous Classe	Dillenidae
Ordre	Capparidales
Famille	Moringa-ceae
Genre	Moringa
Espèce	Oleifera Lamarck

1.11.3. Description botanique

- **Les fleurs** : Fleurs bisexuées, zygomorphes, 5 -mères ; sépales libres, de 7–14 mm de long, souvent inégaux ; pétales libres, oblongs-spatulés, de 1–2 cm de long, inégaux, le plus grand dressé, à pubescence veloutée, blancs ou crème ; étamines 5, filets de 7–8 mm de long, anthères d'un jaune cireux ou orange, alternant avec 3–5 staminodes ; ovaire supère, pédonculé, cylindrique, de 3–5 mm de long, rose à la base, densément poilu, 1- loculaire, style mince, glabre,

sans lobes stigmatiques.

- **Les feuilles** : se développent principalement dans la partie terminale des branches. Elles mesurent 20 à 70 cm de long avec un long pétiole et 8 à 10 paires de pennes composées chacune de deux paires de folioles opposées, plus une terminale ; les folioles sont ovales et longues de 1 à 2 cm. [21]

- **Les graines** : sont rondes, avec une coque marron semi-perméable. La coque présente trois ailes blanches qui s'étendent de la base au sommet à 120 degrés d'intervalle. Un arbre peut produire 15000 à 25000 graines par an.

- **Arbre** : *Moringa oleifera* est un arbuste ou arbre de 12 mètres de hauteur et son diamètre peut atteindre jusqu'à 40 centimètres. Son tronc effilé porte parfois des ramifications dès la base, mais en général, le tronc atteint 1,5 à 2 mètres de haut avant de se ramifier ; plusieurs branches partent de celles-ci formant une couronne dense en forme de parasol. Le diamètre d'un fût de 1,30 m de longueur mesure entre 9 à 20 cm. L'écorce est de couleur brun-pâle et lisse parfois tachetée de marron. Son bois tendre et mou ne supporte pas les vents agressifs. [20]

La figure ci-dessous présente *Moringa Oleifera*.



Figure 7 Fleurs de moringa Oleifera



Figure 6 Feuilles de moringa Oleifera



Figure 8 Fleurs de moringa Oleifera



Figure 5 L'arbre de moringa Oleifera

1.12. Aspect écologique

Moringa Oleifera est une plante qui s'adapte à des milieux différents. Cependant, certaines conditions du milieu favorisent son épanouissement. Voir tableau I.3 ci-dessous.

Table 3 Conditions environnementales de Moringa Oleifera. [21]

Paramètre	Valeur / Fourchette
Climat	Tropical ou subtropical
Attitude	0-2000m
Température	25-35°C
Pluviométrie	250mm-2000mm Irrigation nécessaire pour la production des feuilles si pluviométrie <500mm
Type de sol	Limoneux, sableux ou sablo- limoneux
pH de sol	5-9

1.11.5 Utilisation de Moringa Oléifera dans différents domaines

Table 4 Les différentes utilisations de Moringa Oléifera dans différents domaines. [22]

Domaine d'utilisation	Utilité
Médicale	- Utilisé dans le traitement de nombreuses maladies - Utilisé dans la médecine ayurvédique et par beaucoup d'autres médecines traditionnelles. - La richesse de ces feuilles en flavonoïdes, leur confère une forte activité antimicrobienne. - M.oleifera contient des composés antioxydants luttant contre le stress oxydant tels que les polyphénols (la quercétine, l'acide gallique, la catéchine...) et des vitamines : A, C et E - La poudre des racines peut aider à lutter contre épilepsie, hystérie, hoquet, arthrite, calculs rénaux, rhumatisme, fibrome, kystes, mal des dents, œdèmes des pieds et inflammations, troubles et infections du foie et de la rate - Le jus des feuilles fraîches lutte contre certaines maladies de semences liées à l'humidité - Médicinal utilisé comme sinapisme antinévralgique
Alimentation	- Les feuilles peuvent se consommer fraîches ou en poudre - Elles peuvent également être préparées en soupe ou en salade - Les feuilles constituent un super aliment exceptionnel et un complément nutritionnel idéal grâce à la grande teneur en fer, protéines, cuivre, diverses vitamines et acides aminés essentiels.

Cosmétique	- La poudre de feuilles de Moringa Oleifera sont efficace que le savon pour l'hygiène des mains quand elle est humectée à l'avance pour permettre la réactivation de ses propriétés antiseptiques et détergentes, liées aux composés phytochimiques de ses feuilles. L'huile extraite des graines est une matière première intéressante dans l'industrie cosmétique et de parfums. - Elle est utilisée pour les coiffures, la peau et aussi pour la préparation du savon de toilette et des cosmétiques
Vertus thérapeutiques	-Les feuilles de Moringa sont maintenant utilisées dans certains programmes de lutte contre la malnutrition en particulier au Sénégal, - en Inde, au Bénin et au Zimbabwe, de ce fait, les populations incluent
	- les feuilles de Moringa Oleifera dans la formulation de la poudre infantile à base de ces feuilles comme complément alimentaire des nourrissons - Au Sénégal a confirmé une amélioration nette de la santé des enfants atteints d'infections respiratoires aiguës (IRA), de rougeole, - de paludisme ou de diarrhée et mis sous régime de Moringa Oleifera

Industrie	-Les graines contiennent 40% d'huile et 73% d'acide oléique, l'huile de Moringa Oleifera est utilisée comme lubrifiant dans la machinerie fine, comme l'horlogerie (pour sa faible tendance à se détériorer et devenir rance et collante). Elle est également intéressante dans l'industrie cosmétique et de parfums - Le bois de Moringa Oleifera constitue aussi une excellente pâte à papier - L'huile de Moringa se rapproche donc d'une huile de qualité supérieure telle que l'huile d'olive. - Est utilisée pour la fabrication de la corde, de la teinture et de la gomme pour tannage - L'huile de Moringa peut être utilisée comme huile végétale comestible et huile de cuisson (elle rancie très lentement) ; comme huile industrielle ; ou comme huile de qualité dans l'industrie cosmétique et de parfums ou encore comme huile d'éclairage dans les lampes à huile car elle produit une lumière claire presque sans fumée ou enfin, comme base pour les peintures fines.
Pharmacologiques	Les métabolites secondaires sont reconnus par leurs activités biologiques nombreuses qui comprennent des activités antibactériennes, anticancéreuses, antifongiques, analgésiques, anti-inflammatoires, diurétiques gastrointestinales et antioxydantes
Nutrition animale	Apporte des protéines, des vitamines et minéraux et des hormones de croissance végétale aux animaux (bétail, poissons) et améliore aussi la digestion d'autres aliments

Médecine traditionnelle

- Favorise la santé des animaux de ferme et de compagnie
- Feuille séchée Aide à lutter contre les ulcères gastriques, les diarrhées, l'hypertension et l'hypotension, les affections broncho-pulmonaires, l'asthme, fièvre grippale, etc.
- La fleur décoctée est utilisée contre la grippe

1.11.6 Application de Moringa dans la purification de l'eau

Les graines de Moringa Oléifera peuvent être utilisées comme un adoucisseur d'eau dure, un désinfectant et pour éliminer les métaux lourds dans le traitement de l'eau potable [23].

Il est également signalé comme un agent coagulant / flocculant pour la clarification de l'eau potable en raison de leur forte teneur en protéine cationique hydrosoluble

Après les processus de coagulation, le résidu des graines peut être utilisé comme fertilisant ou fourrage animal. De la même manière, les gousses et les coques séchées peuvent être pyrolysées en carbone activé.

1.12. Interaction entre les molécules d'absorbant et les polluants

1.13. Graines de Moringa pour l'adsorption

Les graines sont rondes (Figure 8), avec une coque marron semi-perméable. La coque présente trois ailes blanches qui s'étendent de la base au sommet à 120 degrés d'intervalle. Un arbre peut produire 15000 à 25000 graines par an. Une graine pèse en moyenne 0,3 g et la coque représente 25% du poids de la graine.

1.13.1. Composition chimique

Table 5 Composition chimique des graines de Moringa Oleifera [24].

Composés	g/100g	%
Protéines	29,4 - 33,3	34,51-36,5
Huiles	34,7 - 40,4	38,62 - 40,06
Fibres	6,8 - 8,0	10,92 - 12,16
Carbohydrates	16,5 - 19,8	19,00 - 20,29

1.13.2. Utilisation des graines de Moringa Oleifera dans la purification des eaux

Moringa Oleifera a été utilisé pour le traitement domestique de l'eau par des femmes au Soudan, qui ont placé des graines de poudre dans un petit sac en tissu qui a ensuite été tourbillonné dans l'eau trouble.

Les graines sèches de M. Oleifera contiennent un polyélectrolyte cationique qui a prouvé son efficacité dans le traitement des eaux. C'est un coagulant primaire qui provoque la formation des ponts entre les colloïdes [25], en neutralisant les matières colloïdales dans les eaux boueuses ou sales, puisque la majorité de ces matières ont une charge électrique négative. Cette protéine peut donc être utilisée comme polypeptide naturel non toxique pour provoquer la sédimentation des particules minérales et organiques dans les processus de purification de l'eau potable. [26]

1.14. Les avantages et les inconvénients de l'utilisation de Moringa pour l'absorption

1.14.1. Les avantages

C'est un produit d'origine tropicale, intéressant pour les pays du sud car ne faisant pas l'objet de taxes d'importation et ne nécessitant pas de paiement en devises.

Chapitre 1 : Généralités sur l'absorption

- Le Moringa Oleifera a une bonne capacité d'adaptation aux différentes conditions environnementales ce qui lui confère une grande distribution spatiale dans le monde. Les graines de M. Oleifera qui sont bien conservées gardent de bonnes propriétés (jusqu'à 5 ans) mais de réelles études sur le stockage n'ont jamais été réalisées.

- Contrairement au sulfate d'aluminium, les graines de Moringa sont totalement biodégradables, ce qui peut être intéressant dans la conservation de la biodiversité.

- Les plantes utilisées pour la floculation doivent remplir certaines conditions. En effet, elles ne doivent pas présenter de toxicité, être faciles à produire et le coagulant facile doser. Les graines de Moringa répondent très bien à ces critères.

- Les plantes utilisées doivent aussi être cultivables dans de nombreux pays et ne pas nécessiter trop d'espace.

- Une filtration lente après la décantation semble très efficace.

- Les coagulants métalliques induisent une pollution qu'il faut contrôler, le Moringa ne contient pas de produits chimiques nocifs laissant des traces dans les eaux traitées. [27]

1.14.2. Les inconvénients

- La décantation de floccs est lente par rapport à celle du sulfate d'alumine.

- Les coûts de graine de Moringa Oleifera si onéreux.

- Les concentrations en coagulant sont supérieures par rapport au sulfate d'alumine.

- Difficile à stocker (en termes de volume et de conservation).

Conclusion :

Ce chapitre nous a permis d'avoir une compréhension approfondie de l'adsorption, de ses mécanismes et des paramètres influençant son efficacité, afin d'optimiser son utilisation dans diverses applications industrielles et environnementales.

CHAPITRE 2

Les colorants

2.1. Introduction

Dans notre quotidien, tout est imprégné de couleurs : nos vêtements, nos aliments, ainsi que les produits cosmétiques et pharmaceutiques. Aujourd'hui, la majorité des colorants utilisés sont synthétiques, en raison de la facilité de leur synthèse, de la rapidité de leur production et de la large palette de teintes qu'ils offrent, surpassant ainsi les colorants naturels.

Dans ce chapitre, nous aborderons la définition des colorants, leurs différentes catégories, leurs applications, ainsi que leur impact sur la santé humaine et l'environnement.

2.2. Définition du colorant

Les colorants sont des substances chimiques, naturelles ou synthétiques, généralement d'origine organique, capables d'apporter une teinte durable aux matériaux sur lesquels ils sont appliqués, sous certaines conditions. Ils sont employés dans divers domaines tels que les textiles, les encres, les peintures, les vernis et l'industrie alimentaire. Dans le contexte industriel, un colorant définit un produit composé d'un pigment organique pur, accompagné d'additifs et d'agents de couplage visant à en optimiser l'application et l'efficacité. [28]

2.3. Généralités sur les colorants

Un colorant, en plus de sa teinte caractéristique, doit avoir la capacité de teindre. Cette capacité découle d'une affinité spécifique entre le colorant et la fibre, ce qui constitue l'un des principaux défis lors des traitements. En fonction de l'application et de l'utilisation, les colorants synthétiques doivent répondre à divers critères pour prolonger la durabilité des textiles : résistance à l'usure, stabilité des couleurs face à la lumière, résistance aux agents chimiques tels que les détergents, et protection contre les attaques microbiennes.

L'affinité du colorant pour la fibre est particulièrement marquée chez les colorants à caractère acide ou basique prononcé. Ces propriétés, spécifiques aux colorants organiques, augmentent leur persistance dans l'environnement et réduisent leur biodégradabilité.

Les substances colorantes se distinguent par leur capacité à absorber les rayonnements lumineux du spectre visible (entre 380 et 750 nm). La perception de la couleur résulte de l'absorption sélective de l'énergie lumineuse par certains groupes d'atomes, appelés chromophores, qui transforment la lumière blanche en lumière colorée par réflexion, transmission ou diffusion. [29]

La molécule responsable de la couleur est appelée chromogène. Plus la capacité du groupe chromophore à céder un électron est élevée, plus l'intensité de la couleur sera forte (les groupes chromophores sont classés par intensité décroissante dans le Tableau II.2). Certains groupes d'atomes présents dans le chromogène, appelés auxochromes, peuvent renforcer ou modifier la couleur produite par le chromophore. [29]

Les colorants sont largement utilisés dans divers secteurs industriels, tels que la teinture des textiles, du papier et du cuir, ainsi que dans les industries alimentaires et cosmétiques. Cependant,

ils sont réputés pour être des substances toxiques et persistantes dans l'environnement, nécessitant l'utilisation de techniques physico-chimiques pour leur dégradation. [30]

2.4 Classification des colorants

2.4.1 Classification chimique

Le classement des colorants selon leur structure chimique repose sur la nature du groupe chromophore.

- *Les colorants anthraquinoniques* sont d'un point de vue commercial, ces colorants sont les plus importants après les colorants azoïques. Leur formule générale dérivée de l'anthracène montre que le chromophore est un noyau quinonique sur lequel peuvent s'attacher des groupes hydroxyles ou amines.

- *Les colorants indigoïdes* tirent leur appellation de l'Indigo dont ils dérivent. Ainsi, les homologues sélénié, soufré et oxygéné du Bleu Indigo provoquent d'importants effets hypsochromes avec des coloris pouvant aller de l'orange au turquoise.

- *Les colorants xanthène* dont le composé le plus connu et la fluorescéine sont dotés d'une intense fluorescence. Peu utilisé en tant que teinture, leur faculté de marqueurs lors d'accident maritime ou de traceurs d'écoulement pour des rivières souterraines est malgré tout bien établie.

- *Les phtalocyanines* ont une structure complexe basée sur l'atome central de cuivre. Les colorants de ce groupe sont obtenus par réaction du dicyanobenzène en présence d'un halogénure métallique (Cu, Ni, Co, Pt, etc.).

- *Les colorants nitrés et nitrosés* forment une classe très limitée en nombre et relativement ancienne. Ils sont actuellement encore utilisés, du fait de leur prix très modéré lié à la simplicité de leur structure moléculaire caractérisée par la présence d'un groupe nitro (- NO₂) en position ortho d'un groupement électrodonneur (hydroxyle ou groupes aminés). [4]

2.4.2 Classification tinctoriale

Si la classification chimique présente un intérêt pour le fabricant de matières colorantes, l'ennoblisseur (le teinturier) préfère le classement par domaines d'application. Ainsi, il est renseigné sur la solubilité du colorant dans le bain de teinture, son affinité pour les diverses fibres et sur la nature de la fixation. Celle-ci est de force variable selon que la liaison colorant- substrat est du type ionique, hydrogène, de Van der Waals ou covalente. On distingue différentes catégories tinctoriales définies cette fois par les auxochromes. [31]

- *Les colorants acides ou anioniques* ils sont soluble dans l'eau grâce à leur groupes sulfonates ou carboxylates. Ils sont ainsi dénommés car ils permettent de teindre les fibres animales (laine, soie) et quelques fibres acryliques modifiées (nylon, polyamide) en bain légèrement acide. L'affinité colorant-fibre est le résultat de liaisons ioniques entre la partie acide

sulfonique du colorant et les groupes amino des fibres textiles.

- *Les colorants basiques ou cationiques* sont des sels d'amines organiques, ce qui leur confère une bonne solubilité dans l'eau. Les fibres se font entre les sites cationiques des colorants et les sites anioniques des fibres. En passe de disparaître dans la teinture de la laine et de la soie, ces colorants ont bénéficié des fibres acryliques, sur lesquelles ils permettent des nuances très vives et résistantes.

- *Les colorants de cuve* sont insolubles et doivent être transformés en leucodérivés par la réduction alcaline. La teinture se termine par la réoxydation in situ du colorant sous sa forme insoluble initiale. Réputés pour leur bonne résistance aux agents de dégradation, les colorants de cuve sont encore utilisés, à l'image de l'indigo pour la teinture des articles jean.

- *Les colorants directs* contiennent ou sont capable de former des charges positives ou négatives électrostatiquement attirées par les charges des fibres. Ils se distinguent par leur affinité pour les fibres sans application de mordant, liée à la structure plane de leur molécule.

- *Les colorants à mordants* contiennent généralement un ligand fonctionnel capable de réagir fortement avec un sel d'aluminium, de chrome, de cobalt, de cuivre, de nickel, ou de fer pour donner différents complexes colorés avec le textile.

- *Les colorants réactifs* contiennent des groupes chromophores issus essentiellement des familles azoïques, anthraquinonique et phthalocyanine. Leur appellation est liée à la présence d'une fonction chimique réactive, de type triazinique ou vinylsulfone assurant la formation d'une liaison covalente forte avec les fibres. Solubles dans l'eau, ils entrent de plus en plus fréquemment dans la teinture du coton et éventuellement dans celle de la laine et des polyamides. [32]

- *Les colorants développés ou azoïques insolubles* sont formés directement sur la fibre. Au cours d'une première étape, le support textile est imprégné d'une solution de naphthol ou copulente. Les précurseurs de la molécule suffisamment petits pour diffuser dans les pores et les fibres sont ensuite traités avec une solution de sel de diazonium qui, par réaction de copulation entraîne le développement immédiat du colorant azoïque.

- *Les colorants dispersés* sont très peu solubles dans l'eau et sont appliqués sous forme d'une fine poudre dispersée dans le bain de teinture. Ils sont en mesure, lors d'une teinture à haute température, de diffuser dans les fibres synthétiques puis de s'y fixer. [32]

2.5. La solubilité du colorant dans l'eau

La solubilité d'un colorant dans l'eau est un critère essentiel pour déterminer son utilisation et son impact environnemental. Les colorants peuvent être classés en deux grandes catégories :

2.5.1. Colorant soluble

Ces colorants se dissolvent facilement dans l'eau, formant une solution homogène. Ils sont couramment utilisés dans l'industrie textile, alimentaire et cosmétique en raison de leur capacité à

pénétrer uniformément les fibres et à offrir des couleurs vives et durables. Cependant, leur forte solubilité facilite également leur dispersion dans l'environnement, ce qui peut entraîner une contamination des eaux usées et des écosystèmes aquatiques.

A. Colorant acides ou anionique : Ce sont colorants qui comportent une ou plusieurs fonctions acides comme : - COOH, -SO₃H, -SO₃Na,...,etc., il sont soluble dans l'eau grâce a leurs groupement sulfonates carboxylates . Ils sont ainsi dénommés parce qu'il permettent de teindre les fibres animales (laine et soie) et quelques fibres acryliques modifiées (nylon , polyamide)en bain légèrement acide [32].

B. Colorants basiques ou cationique : Les colorants basiques ou cationique sont des sels d'amines organique, ce qui leur confère une bonne solubilité dans l'eau. Les liaison ce font entre les sites cationique des colorants et les sites anioniques des fibres. En passe de disparaître dans la teinture de la laine et de la soie, ces colorants ont bénéficié d'un regain d'intérêt avec l'apparition des fibres acryliques sur lesquelles ils permettent des nuances très vives et résistantes.

C. Colorants directs : Ils contiennent ou sont capables de former des charges positives ou négatives électro – statiquement attirées par les charges des fibres. Ils se distinguent par leur affinité pour les fibres cellulosiques sans application de mordant, liée à la structure plane de leur molécule.

D. Colorants à mordants : Les colorants a mordants contiennent généralement un ligand fonctionnel capable de réagir fortement avec un sel d'aluminium [33], de chrome de cobalt, de cuivre de nickel ou de fer pour donner différents complexes colores avec le textile. Cette classe de colorants est généralement employée pour teindre la laine la soie le coton le papier [34].

2.5.2. Colorant insoluble

Ces colorants ne se dissolvent pas dans l'eau, mais se dispersent sous forme de particules solides. Ils sont souvent utilisés dans les peintures, les encres et les plastiques. Leur faible solubilité limite leur diffusion dans l'eau, mais ils peuvent s'accumuler dans les sédiments et avoir des effets à long terme sur les environnements aquatiques.

2.6. Utilisations et applications des colorants

Les colorants trouvent de nombreuses applications dans divers secteurs. Nous présentons ci-dessous quelques exemples majeurs :

- Pigments pour l'industrie des matières plastiques.
- Encres et papier pour l'imprimerie.
- Colorants alimentaires pour l'industrie agroalimentaire.
- Pigments pour les peintures, les matériaux de construction et la céramique dans le secteur du bâtiment.
- Colorants capillaires pour l'industrie cosmétique.
- Colorants et conservateurs pour l'industrie pharmaceutique.

- Colorants pour les carburants et les huiles dans l'industrie automobile.
- Colorants textiles pour l'habillement, la décoration, la construction, le transport et les usages médicaux. [33]

2.7. Les colorants et leurs impacts environnementaux

• **Eutrophisation** : Sous l'effet de l'activité microbienne, les colorants libèrent des nitrates et des phosphates dans l'environnement naturel. L'accumulation excessive de ces ions minéraux peut s'avérer toxique pour la faune aquatique et nuire à la qualité de l'eau potable. De plus, leur absorption par les plantes aquatiques favorise une prolifération incontrôlée, entraînant une diminution de l'oxygène due à l'inhibition de la photosynthèse dans les couches profondes des rivières et des eaux stagnantes.

• **Sous-oxygénation** : Lorsque des charges importantes de matière organique sont apportées au milieu via des rejets ponctuels, les processus naturels de régulation ne peuvent plus compenser la consommation bactérienne d'oxygène. Manahan estime que la dégradation de 7 à 8 mg de matière organique par des micro-organismes suffit pour consommer l'oxygène contenu dans un litre d'eau.

• **Couleur, turbidité et odeur** : L'accumulation de matières organiques dans le cours d'eau entraîne l'apparition de mauvais goûts, une prolifération bactérienne, des odeurs nauséabondes et des colorations inhabituelles. Selon Willmott et al. [51], une teinte peut être détectée par l'œil humain à une concentration aussi faible que 5×10^{-6} g/L. Au-delà de l'aspect visuel désagréable, les colorants présents dans l'eau peuvent perturber la transmission de la lumière, notamment la photosynthèse des plantes aquatiques.

• **La persistance** : les colorants organiques synthétiques sont des composés difficiles à éliminer par les processus de dégradation biologique naturelle. Leur persistance est étroitement liée à leur réactivité chimique. En effet, les composés insaturés se dégradent plus facilement que les composés saturés, tandis que les alcanes sont moins persistants que les composés aromatiques. De plus, la persistance des composés aromatiques augmente avec le nombre de substituants, et les substituants halogénés renforcent davantage la stabilité des colorants que les groupements alkyles.

• **Bio-accumulation** : si un organisme ne dispose pas de mécanismes spécifiques, soit pour empêcher la résorption d'une substance, soit pour l'éliminer une fois qu'elle est absorbée, cette substance s'accumule. Les espèces qui se trouvent à l'extrémité supérieure de la chaîne alimentaire, y compris l'homme, se retrouvent exposées à des teneurs en substances toxiques pouvant être jusqu'à mille fois plus élevées que les concentrations initiales dans l'eau. [34]

2.8. Toxicité des colorants

Le rejet des effluents industriels textiles, riches en colorants, dans les rivières représente une menace majeure pour la faune, la flore et les micro-organismes aquatiques. Cette est

principalement liée à la diminution de l'oxygène dissous dans l'eau. De plus, la faible biodégradabilité des colorants, en raison de leur poids moléculaire élevé et de leurs structures chimiques complexes, leur confère un caractère toxique pouvant varier d'intensité.

2.8.1. Toxicité sur la santé humaine

Les colorants sont dangereux pour la santé humaine, ils peuvent être :

- Mutagènes.
- Génotoxiques.
- Entraîner des cancers de la thyroïde.
- Entraîner des tumeurs des glandes surrénales.
- Contenir des substances cancérigènes.
- Avoir des actions sur le système nerveux central.
- Inhibition ou déficit de certaines enzymes.
- Augmentation de la perméabilité intestinale. [35]

2.8.1. Toxicité sur les milieux aquatiques

Les composés des colorants peuvent persister longtemps dans l'environnement aquatique, perturbant les mécanismes naturels tels que l'auto-épuration des cours d'eau et la croissance des plantes aquatiques, tout en provoquant la destruction de certaines espèces de poissons et de micro-organismes.

Les études bibliographiques révèlent, par exemple :

- Le colorant « noir de l'uxanthol G » est extrêmement nocif pour les jeunes guppies à une concentration de 5 mg/L.
- Le bleu de méthylène devient toxique pour les algues dès 0,1 mg/L et pour les petits crustacés à partir de 2 mg/L.
- Le bleu de Victoria, le violet de méthyle, le noir anthracite BT et le vert diamant sont très toxiques pour la flore aquatique à partir de concentrations de 1 mg/L.

Par ailleurs, les colorants cationiques (ou basiques) sont particulièrement toxiques et résistent aux processus d'oxydation. Des études ont démontré que le colorant cationique "Sandocryl orange" est toxique pour les micro-organismes. [36]

2.9. Procédé d'élimination des colorants

L'élimination des colorants présents dans les eaux usées industrielles est un défi environnemental majeur en raison de leur stabilité chimique et de leur résistance à la dégradation. Plusieurs procédés physiques, chimiques et biologiques sont utilisés pour réduire leur impact sur l'environnement.

2.9.1. Procédé physique

- **Adsorption sur charbon actif** : Le charbon actif possède une grande surface poreuse qui

permet de piéger les molécules de colorants. Ce procédé est efficace pour éliminer les colorants solubles dans l'eau, mais son coût élevé et la régénération du charbon limitent son application à grande échelle.

- **Filtration membranaire (osmose inverse, ultrafiltration)** : Ces techniques utilisent des membranes semi-perméables pour séparer les colorants des eaux usées. Elles sont efficaces, mais coûteuses et nécessitent un entretien régulier.

- **Coagulation-floculation** : L'ajout de coagulants (comme le sulfate d'aluminium ou le chlorure de fer) permet d'agglomérer les particules de colorants en flocons, qui sont ensuite séparés par sédimentation ou filtration.

2.9.2. Procédé chimique

- **Oxydation avancée (Ozonation, peroxyde d'hydrogène, Fenton)** : Ces procédés utilisent des agents oxydants puissants pour décomposer les molécules de colorants en composés plus simples et moins toxiques. Par exemple, l'ozonation est très efficace pour dégrader les colorants azoïques.

- **Photocatalyse** : L'utilisation de catalyseurs comme le dioxyde de titane (TiO_2) sous l'effet de la lumière UV permet de dégrader les colorants par oxydation radicalaire.

- **Chloration** : L'ajout de chlore peut détruire certaines structures chimiques des colorants, mais ce procédé peut générer des sous-produits toxiques. [37]

2.10. Présentation du rouge de congo

2.10.1. Définition

Le rouge de Congo est une molécule diazoïque, c'est-à-dire qui possède deux fois la structure de l'azobenzène. Le rouge Congo est à la fois un colorant organique, qui n'est plus beaucoup utilisé, en raison de sa toxicité un indicateur de pH. Il est aussi utilisé comme colorant histologique pour le diagnostic de certitude de l'amyloïdose hépatique. Il est utilisé couramment en microscopie mycologique La figure 10 présente la structure chimique du colorant



Figure 9 Couleurs de rouge de Congo

2.10.2. Structure

Le Rouge de Congo est un colorant azoïque de formule chimique $\text{C}_{32}\text{H}_{22}\text{N}_6\text{Na}_2\text{O}_6\text{S}_2$,

appartenant à la famille des colorants diazoïques bis. Sa structure repose sur un noyau central de benzidine (1,1'-biphényl-4,4'-diamine) auquel sont liés deux groupes naphthalène sulfonique par l'intermédiaire de deux liaisons azo (-N=N-), caractéristiques de ce type de colorant. Chaque extrémité de la molécule porte un groupement sulfonate ($-\text{SO}_3\text{Na}$), ce qui lui confère une bonne solubilité dans l'eau. Cette structure étendue et plane permet au Rouge de Congo de se fixer facilement sur certaines macromolécules, notamment les protéines, par des interactions hydrogènes et hydrophobes.[38]

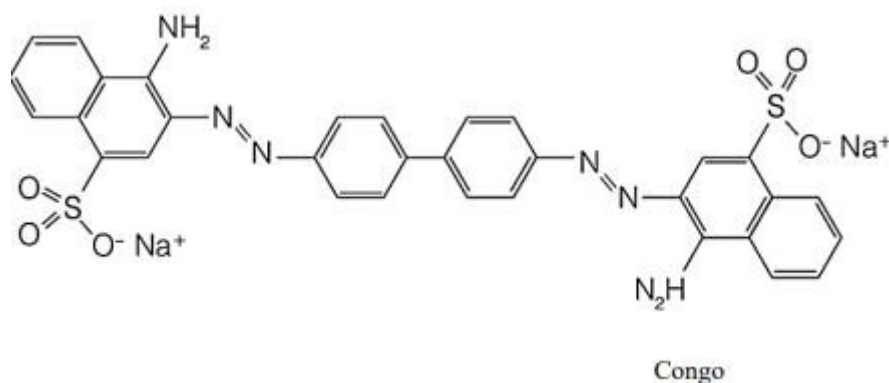


Figure 10 La structure du colorant rouge de Congo

2.11. Propriétés chimiques et physiques du rouge de Congo

2.11.1. Propriétés chimiques

Le tableau (II.3) représente les propriétés chimiques du colorant rouge de Congo [39]

Table 6 Propriétés chimiques du rouge de Congo

Formule brute	$\text{C}_{32}\text{H}_{22}\text{N}_6\text{Na}_2\text{O}_6\text{S}_2$
Masse molaire	696,66 g/mol
Masse molaire	696,66 g/mol
	696,66 g/mol
Solubilité dans l'eau (g/l) à 20°C	25 g·L ⁻¹ dans l'eau à 20 °C très soluble dans l'alcool
Point de fusion (°C)	>360 °C

2.11.2. Propriétés physiques

Le tableau (2.4) représente les propriétés physiques du colorant rouge de Congo. [38]

Table 7 Les propriétés physiques du colorant rouge de Congo

État physique	Solide
Couleur	Rouge foncé en solution basique, bleu-violet en milieu acide
Solubilité dans l'eau	Très soluble
pKa	≈ 3,0 – 4,0
Moment dipolaire	≈ 7–9 Debye (selon le solvant et la conformation)
Type de colorant	Colorant azoïque bis

2.12. La solubilité du rouge de Congo

Le rouge de Congo est un colorant très soluble dans l'eau et modérément soluble dans les solvants organiques tels que l'éthanol, l'éther et l'acétone. Il se dissocie sous forme ionique, améliorant sa dispersion dans l'eau.

Table 8 La solubilité du colorant rouge de Congo

Le milieu	Solubilité
Dans l'eau	Très soluble
Dans l'éthanol	Peu à modérément soluble

2.13. Utilisation du rouge de Congo

Utilisé pour teindre les textiles, le papier, les plastiques, l'impression, etc. Utilisé aussi très rapidement en histologie, c'est-à-dire pour étude de tissus biologiques, cellules éosinophiles, dépôts protéiques pathologiques, cellules de la muqueuse gastrique, kératine, os embryonnaire, ciment de dent jeune, parois cellulaires, champignons filamenteux, il connut un grand succès dans la teinture des polysaccharides. ... et en histologie, ou science fongique, c'est un colorant universel qui convient particulièrement aux murs. [38]

2.14. Toxicité

A l'état pur, le rouge Congo est :

- Toxique par contact avec la peau.
- Provoque des brûlures.
- En cas d'ingestion, les métabolites s'accumulent dans l'organisme et peuvent avoir des effets mutagènes et cancérigènes.
- Pour le traitement des eaux contaminées, le rouge Congo est difficilement biodégradable et photodégradable. La fonction azoïque présente dans la structure du colorant est à l'origine de sa toxicité. Elle se libère par réduction des amines aromatiques, provoquant l'apparition des tumeurs chez l'homme. [38]

2.15. La toxicité du rouge du phénol

2.15.1. Sur la santé humaine

- Peut provoquer une irritation des voies respiratoires.
- Peut causer des irritations cutanées et des réactions allergiques.
- Risque d'irritation oculaire en cas de contact direct.
- Peut entraîner des troubles gastro-intestinaux tels que des nausées, des vomissements ou des douleurs abdominales.

2.15.2. Sur l'environnement

- Peut persister dans les sols et les eaux usées.
- Peut avoir un impact négatif sur la faune aquatique en modifiant le pH des environnements aquatiques et en perturbant les organismes sensibles.

CHAPITRE 3

Differentes Etudes Sur L'utilisation De
Moringa Dans Le Traitement Des Eaux

3.1. Introduction

Dans ce troisième chapitre, nous nous consacrerons à une présentation détaillée de plusieurs travaux de recherche portant sur l'utilisation du *Moringa* dans le domaine du traitement des eaux. Nous examinerons différentes études scientifiques et projets de terrain qui mettent en évidence les propriétés de cette plante, notamment ses capacités à filtrer les impuretés et à purifier l'eau, ainsi que les avantages de son usage dans les contextes à faibles ressources.

L'objectif de cette section est de montrer l'efficacité du *Moringa* en tant que solution durable et économique pour améliorer l'accès à de l'eau potable dans les régions où les technologies de purification traditionnelle sont souvent inaccessibles.

3.2. Le travail de Hamdad B, Raham A en 2015

L'objectif de ce travail est d'étudier le pouvoir adsorbant de *Moringa oleifera* dans l'élimination des ions Nickel, ainsi que ses propriétés floculantes dans le traitement d'une eau synthétique contenant de la bentonite.

Les résultats obtenus lors des expériences en laboratoire ont permis de tirer plusieurs conclusions importantes concernant l'intérêt de l'application de ce biofloculant à l'échelle pilote, puis industrielle, pour la clarification des eaux :

Lorsque le *Moringa oleifera* est utilisé comme adsorbant pour éliminer le Nickel, une réduction de la concentration en Nickel de 0,98 mg/l a été observée après 24 heures, avec un pH optimal de 5,5. L'adsorption est rapide (50 minutes) et présente un taux d'élimination élevé de 90,2 %.

Concernant l'eau synthétique, lorsque le *Moringa oleifera* est utilisé sans sel, le taux de réduction de la turbidité pour différentes concentrations de bentonite est compris entre 96,76 % et 97,83 %, avec une dose de biofloculant variant entre 0,4 et 1 mg/l, un pH de 8, et un temps de décantation de 30 minutes. Lorsqu'il est solubilisé dans du sel, le taux de réduction de la turbidité augmente de 2 % par rapport aux résultats précédents.

Une déstabilisation complète de la solution (bentonite + acide humique) a été obtenue avec une dose de biofloculant comprise entre 0,1 et 2 mg/l, entraînant une réduction quasi totale de la turbidité. Cependant, lorsque la dose dépasse 2,5 mg/l, la solution commence à se re-stabiliser, avec une augmentation progressive de la turbidité.

Il est également important de noter que le pH, la turbidité initiale et la dose de *Moringa oleifera* jouent un rôle crucial dans le processus de coagulation-floculation. Ce biomatériau est efficace sur une large gamme de pH. Par exemple, pour une dose de 3 mg/l, une réduction de 99,43 % de la turbidité est obtenue dans une solution acide (pH = 5,5). Toutefois, la turbidité commence à augmenter à nouveau dans une solution alcaline.

Cette étude démontre l'efficacité du *Moringa oleifera* comme floculant et adsorbant, et met

Chapitre 3 : Les différents études sur l'utilisation de Moringa dans le traitement des eaux

en lumière ses applications potentielles dans le traitement des eaux, notamment dans des conditions variées de pH et de turbidité.

3.3. Le travail de Boudarn S., Boukedroun A. (2017)

Cette étude a porté sur l'évaluation de diverses activités biologiques des extraits de *Moringa oleifera* Lam, une espèce médicinale de la famille des Moringaceae, introduite dans les zones arides du Sahara algérien, et plus particulièrement dans la région d'Adrar.

Le screening phytochimique des feuilles et des racines a révélé la présence de plusieurs classes de métabolites secondaires, dont les flavonoïdes, les anthocyanes, les alcaloïdes, les tanins (catéchiques et galliques), les mucilages et les glucosides. En revanche, les saponines étaient absentes. Ces composants sont essentiels dans les réponses des plantes face aux stress environnementaux et dans la mise en place de mécanismes de défense contre les agressions susceptibles de provoquer des maladies chez les végétaux.

Les résultats suggèrent que *M. oleifera* Lam pourrait constituer une source naturelle et prometteuse de molécules chimiques possédant des activités biologiques significatives.

3.4. Le travail de Gettafi M., Sadouk R. (2021)

Cette étude a porté sur l'élimination des polluants émergents de type pharmaceutique par adsorption. Bien que présents en faibles concentrations dans l'environnement, ces contaminants peuvent, à long terme, représenter un risque important pour la santé humaine ainsi que pour les écosystèmes (faune et flore).

Le travail a été centré sur l'utilisation des écorces de *Moringa oleifera* comme matériau adsorbant pour piéger ces polluants. Plusieurs essais d'adsorption ont été menés en laboratoire afin d'évaluer l'influence de différents paramètres opératoires, tels que le temps de contact, la concentration initiale du polluant, la masse d'adsorbant utilisée, la taille des particules, ainsi que le pH de la solution.

Les résultats obtenus ont révélé une efficacité remarquable de l'adsorbant à base d'écorces de *Moringa oleifera*, avec un taux d'élimination atteignant 99 %. Ces performances indiquent que ce biomatériau possède d'excellentes propriétés d'adsorption et pourrait constituer une solution écologique et efficace pour le traitement des eaux contaminées par des résidus pharmaceutiques.

3.5. Le travail de Belkacem S., Bensaifi H. (2021)

Cette étude vise principalement à réduire la concentration des acides humiques (AH) présents dans les solutions aqueuses à l'aide du procédé de coagulation-floculation, en comparant l'efficacité de deux coagulants : le sulfate d'aluminium, coagulant chimique conventionnel, et les graines de *Moringa oleifera*, coagulant naturel.

Une analyse paramétrique du processus de coagulation-floculation a été menée, tenant compte de divers facteurs tels que le pH de la solution, la dose de coagulant appliquée et le temps

Chapitre 3 : Les différents études sur l'utilisation de *Moringa* dans le traitement des eaux

de décantation. Par ailleurs, les graines de *Moringa oleifera* ont été caractérisées à l'aide de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) et par la détermination de leur pH au point de charge zéro (pHpzc), afin de mieux comprendre leurs propriétés physico-chimiques.

Les résultats expérimentaux ont révélé que les graines de *Moringa oleifera* présentent une efficacité notable dans le traitement des eaux contenant des acides humiques. Ces performances suggèrent qu'elles pourraient constituer une alternative crédible et écologique aux coagulants chimiques classiques. Ainsi, cette étude confirme la possibilité de recourir à des coagulants naturels, tels que le *Moringa oleifera*, dans le traitement des eaux contaminées par des matières organiques humiques.

3.6. Le travail de Arhab T., Chebli T. (2021)

Dans cette étude, menée à la Station d'Épuration des Eaux Usées (STEP) Est de la ville de Tizi- Ouzou, les chercheuses ont évalué l'efficacité des graines de *Moringa oleifera* dans la décontamination de l'effluent secondaire liquide. L'objectif principal était de déterminer le potentiel désinfectant de ce coagulant naturel sur les indicateurs de contamination bactériologique, en vue d'une réutilisation agricole des eaux traitées.

Les essais ont été réalisés en utilisant différentes concentrations de poudre de graines de *Moringa oleifera*, avec un temps de décantation de deux heures. Une concentration optimale de 450 mg/L a permis d'obtenir des résultats significatifs : réduction de la flore mésophile totale de 86 % à 22 °C et de 96 % à 37 °C, élimination de 99 % des coliformes totaux et fécaux, ainsi qu'une élimination totale des entérocoques et des staphylocoques. Cependant, aucune diminution n'a été observée pour les salmonelles et les vibrions cholériques.

Ces résultats suggèrent que l'utilisation de *Moringa oleifera* comme agent désinfectant naturel peut améliorer la qualité microbiologique des effluents secondaires, les rendant aptes à une réutilisation en agriculture, tout en offrant une alternative écologique aux désinfectants chimiques traditionnels.

3.7. Étude de l'efficacité d'épuration des eaux usées domestiques de l'oued de Béchar par l'utilisation du sable et des graines de *Moringa oleifera* Lam

Cette recherche, menée dans le sud-ouest de l'Algérie, visait à évaluer l'efficacité des graines de *Moringa oleifera* dans le traitement des eaux usées domestiques de l'oued de Béchar. Les objectifs principaux étaient de caractériser les polluants chimiques et microbiologiques présents dans ces eaux et de proposer une méthode d'épuration efficace en incorporant les graines de *Moringa oleifera*.

Les échantillons d'eau usée et d'eau filtrée ont été analysés pour détecter la présence de la flore aérobie mésophile, des coliformes totaux et fécaux, des streptocoques fécaux, des staphylocoques, des salmonelles, ainsi que pour mesurer les concentrations en ions tels que le

Chapitre 3 : Les différents études sur l'utilisation de Moringa dans le traitement des eaux

calcium, le magnésium, le fer, le cuivre, le plomb et le zinc. Les résultats ont montré une réduction significative de la charge bactérienne et des concentrations en métaux lourds après traitement avec les graines de *Moringa oleifera*, indiquant leur potentiel en tant que coagulant naturel pour l'épuration des eaux usées domestiques.

Cette étude souligne l'efficacité des graines de *Moringa oleifera* comme solution naturelle et durable pour le traitement des eaux usées, particulièrement dans les régions où les ressources pour des traitements conventionnels sont limitées.

3.8. Conclusion

L'ensemble des recherches menées autour du *Moringa oleifera* met en lumière son potentiel remarquable en tant que solution naturelle, économique et durable pour le traitement des eaux usées et polluées. Utilisé sous différentes formes (graines, écorces, feuilles), ce végétal s'est révélé efficace dans plusieurs processus de dépollution, notamment l'adsorption, la coagulation-floculation et la désinfection.

D'après les différents travaux de recherche sur *Moringa oleifera*, nous pouvons noter que cette dernière constitue une alternative prometteuse aux traitements chimiques conventionnels. Son utilisation pourrait représenter un levier important pour améliorer l'accès à une eau propre, particulièrement dans les zones rurales ou les régions à faibles ressources technologiques.

CHAPITRE 4

Materiels Et Methodes

4.1 Introduction

Dans ce troisième chapitre, nous présenter en détails toutes les expériences menées, y compris les méthodes de préparation de diverses solutions, les procédures suivies et les techniques de caractérisation employées tout au long de ce travail.

4.2 Produits utilisés

Pour développer les matrices et préparer les solutions aqueuses dans les différentes conditions expérimentales, nous avons utilisé les produits chimiques rapportés avec leurs propriétés dans le tableau IV.1.

Table 9 Réactifs utilisées

Réactif	Formule chimique	Pureté (%)	Densité (g/cm ³)	Fournisseur
Acide chlorhydrique	HCL	37	1.18	Prolabo
Hydroxyde de sodium	NAOH	98	2.13	Origine CE
Rouge de Congo	C ₃₂ H ₂₂ N ₆ Na ₂ O ₆ S ₂	35%	0,6	SIGMA-ALDAICH

4.3 Préparation des biosorbants

Deux biosorbants ont été utilisés dans cette étude.

Le premier à partir des écorces de graines de Moringa Oleifera (EGMO) et le deuxième à partir des graines de Moringa Oleifera (GMO). Les deux biomasses ont été utilisées à l'état naturel, sans traitement thermique ni modification chimique au préalable.

Après un lavage minutieux des fruits de la plante à l'eau distillée, les graines ont été décortiquées manuellement afin d'obtenir séparément les écorces (EGMO) et les graines (GMO). Les deux matériaux ont ensuite été séchés à l'air libre pendant cinq jours, afin de préserver leurs propriétés physico-chimiques et d'éviter toute altération (Figure 12 et Figure 13).



Figure 12 Graines de Moringa Oleifera



Figure 11 Ecorces des graines de Moringa

4.4. Caractérisation de GMO et EGMO

Le solide EGMO et GMO préparé ont été caractérisés par la technique de spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) et par la détermination du pH du point zéro charge pH_{pzc}.

4.4.1 Caractérisation par FTIR

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) permet d'obtenir des informations sur la nature des liaisons chimiques et peut être employée pour l'identification de composés. En effet, cette technique, sensible aux vibrations des liaisons présentant un moment dipolaire, produit des spectres comportant des bandes d'absorption dont la position est caractéristique des liaisons mises en jeu car dépend de la masse des atomes et de la force de la liaison. Le spectre infrarouge d'un échantillon est établi en faisant exposer cet échantillon à un faisceau de lumière infrarouge. Lorsque la longueur d'onde du faisceau émis est proche de l'énergie de vibration de la molécule, cette dernière absorbe le rayonnement et on enregistre une diminution de l'intensité réfléchiée ou transmise. De ce fait, l'énergie du rayonnement IR se retrouve diminuée après l'interaction, conduisant à l'apparition d'une bande d'absorption à cette fréquence.

Cette absorption n'est pas systématique ; elle dépend de la géométrie de la molécule ainsi

que de sa symétrie. Les modes de vibration actifs en infrarouge peuvent être déterminés pour une géométrie donnée en utilisant les relations décrites par la théorie des groupes. La position de ces bandes d'absorption dépend de la différence d'électronégativité des atomes (force de la liaison) et de leur masse. Par conséquent, un matériau donné présentera un ensemble de bandes d'absorption caractéristiques permettant de l'identifier. [40]

4.4.2 Potentiel de charge nulle (PH_{pzc})

Le point de charge zéro est une caractéristique importante pour les surfaces des matériaux, car il représente une estimation de son caractère acide ou basique. Il est défini comme étant le pH pour lequel la charge de surface est nulle, c'est-à-dire la somme des charges positives est égale à la somme des charges négatives. Ce paramètre est très important dans les phénomènes d'adsorption, surtout quand des forces électrostatiques sont impliquées dans les mécanismes. [41]

4.5. Mode opératoire

- Prélever 100mL d'eau distillée dans un bécher puis ajouter une masse de 0,5g de solide (adsorbant). La solution obtenue est notée S1,

- Remplir la burette par la solution d'acide chlorhydrique HCl0, 1M,

- Déterminer le pH initial de la solution S1.

- Doser la solution S1 goutte à goutte par la solution d'acide chlorhydrique HCl jusqu'à la stabilisation totale de la valeur du pH. Noter la variation du pH.

N.B : Répéter les mêmes étapes pour la solution d'hydroxyde de sodium NaOH 0, 1M.

Le calcul de la charge de surface par a été réalisé en utilisant les formules des équations suivantes :

- Cas de HCl : $Q_a = (C_a + [OH^-] - [H^+]) / m$ (1)

- Cas de NaOH : $Q_b = (-C_b + [OH^-] - [H^+]) / m$ (2)

Avec :

Q : Charge de surface en mol.g⁻¹

C_a : Concentration d'acide en mol.l⁻¹ C_b : Concentration de base en mol.l⁻¹ m : prise d'essai en g

4.6. Préparation des solutions de rouge Congo et établissement de la courbe d'étalonnage

Une solution concentrée du RC de 1 g. L⁻¹

a été préparée dans l'eau distillée. Des solutions filles de RC ont été préparées par dilution, à partir de la solution mère de 1g. L⁻¹ La gamme de concentrations choisie est : 5, 10, 15, 20,30,50,70 et 100mg. L⁻¹

. Les absorbances des solutions préparées ont été mesurées par spectrométrie à 489,5 nm. Pour calculer la concentration du RC dans les échantillons, on utilise une courbe d'étalonnage.

Cette courbe est établie par tracer une droite d'absorbance en fonction de concentrations connues de RC, puis l'équation linéaire de cette droite est utilisée pour le calcul de la concentration inconnue d'une solution de RC donnée. La courbe d'étalonnage de RC a été préparé.

Etude paramétrique de l'adsorption du bleu de Rougedz Congo sur EGMO

Dans le présent travail, nous sommes intéressés à la rétention du Rouge de Congo en mettant l'accent sur l'étude paramétrique suivante :

1. Effet de temps de contact adsorbant-adsorbat.
2. Effet de la quantité de l'adsorbant.
3. Effet de pH de la solution aqueuse,
4. Effet de la concentration initiale de l'adsorbat.

L'influence de chacun de ces paramètres en terme de pourcentage de rétention, de capacité d'adsorption a été effectuée.

4.7. Étude du temps de contact

Étude du temps de contact :

Cette étude vise à déterminer le temps optimal d'adsorption du Rouge Congo (RC) par le matériau adsorbant, GMO , EGMO garantissant ainsi une rétention maximale de la substance.

Le temps de contact joue un rôle crucial dans la détermination du temps nécessaire pour que le système adsorbant-adsorbat atteigne l'équilibre.

Mode opératoire

1. Placer des flacons fermés contenant 2 g de matériau solide (adsorbant).
2. Ajouter 100 ml de solution de Rouge Congo à une concentration de 5 mg/L.
3. Placer les flacons sur une table oscillante avec agitation à température ambiante.
4. Fixer le temps de contact entre l'adsorbant et la solution à différentes périodes (5-300 minutes).
5. Séparer la solution de l'adsorbant après la fin du temps de contact.
6. Analyser la solution à une longueur d'onde de 489,5 nm pour déterminer la concentration résiduelle de la substance.

4.8.1. Expression de résultats

Les résultats obtenus ont été exprimés sous forme de courbes, le rendement d'élimination en fonction du temps afin de choisir le meilleur temps de contact

$$R(\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Ci : concentration initial Cf: concentration finale Calcul des quantités adsorbées

La quantité de produit adsorbée, exprimée en mg de soluté par gramme de solide adsorbant est donnée par la relation suivante :

$$Q_e = \frac{C_0 - C_e}{\frac{m}{V}}$$

Où les paramètres suivants représentent :

Q_e : Quantité de micropolluant à l'équilibre par unité de masse de solide (en mg.g⁻¹) C₀ : Concentration initiale (mg. L⁻¹)

C_e: Concentration résiduelle à l'équilibre (mg.l⁻¹) V : Volume de l'adsorbat (l)

m : Masse de l'adsorbant (g)

Les résultats obtenus sont interprétés dans le chapitre résultats et discussion.

4.8. Étude de masse

Cette étude vise à déterminer la masse optimale de l'adsorbant qui assure une élimination maximale du Rouge Congo à une concentration donnée dans un temps de contact supposé infini.

• Mode opératoire

- Mettre en contact des masses croissantes d'adsorbant (1, 1.5, 2, 3 et 5 g) avec 100 ml de solution de Rouge Congo à 5 mg/L.
- Placer le mélange obtenu sous agitation magnétique pendant 3 heures.
- À la fin de l'agitation, séparer la solution résiduelle du colorant de l'adsorbant.
- Récupérer la solution pour mesurer son absorbance puis l'analyser à 489,5 nm.
- Exprimer les résultats obtenus sous forme de courbe donnant le rendement d'élimination en fonction de la masse, afin de choisir la masse optimale.

4.9. Etude de concentration

Cette étude vise à déterminer l'effet de la concentration initiale de la solution de Rouge Congo (RC) sur la quantité adsorbée par les matériaux GMO et EGMO.

• Mode opératoire

- Préparation des solutions : Des solutions de RC à différentes concentrations (2, 5, 10, 15 et 20 mg/L) ont été préparées.
- Adsorption : 3g de GMO et 2g d'EGMO ont été ajoutés séparément à 100ml de chaque solution de RC.
- Agitation : Le mélange a été agité pendant 3 heures pour permettre l'adsorption.
- Mesure de l'absorbance : Après agitation, la solution a été récupérée et son absorbance a été mesurée à 489,5 nm.
- Analyse des résultats : Les résultats ont été exprimés sous forme de courbe représentant la

quantité adsorbée en fonction de la concentration initiale.

4.10. Étude de pH :

Le pH est un facteur crucial dans l'étude de l'adsorption, car il peut influencer à la fois la structure de l'adsorbant et son état d'ionisation, ainsi que la solubilité et la structure chimique de l'adsorbat. Dans ce travail, nous avons étudié l'efficacité de l'adsorption du Rouge Congo (RC) en variant le pH de 3 , 5 , 6 , 9 et 11:

• Mode opératoire

- Préparation des solutions : Le pH de la solution de RC a été ajusté à des valeurs allant de 3 à 11 par l'addition d'HCl ou de NaOH.

- Adsorption :

- 3g de GMO ont été introduits dans 100ml de RC à 5mg/L.

- 2g d'EGMO ont été introduits dans 100ml de RC à 20mg/L.

- Agitation : Le mélange a été agité pendant 3 heures pour permettre l'adsorption.

- Analyse : La solution a été récupérée et analysée à différentes longueurs d'onde en fonction du pH :

- 546nm pour pH=3

- 489,5 nm pour pH = 5, 6 , 9 , 11

Chapitre 5

Résultats et discussion

5.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de montrer et interpréter les résultats expérimentaux liés à la caractérisation des graines *Moringa Oleifera* et à l'étude cinétique de l'adsorption du colorant Rouge de Congo sur les GMO et EGMO

5.2. Caractérisations de la poudre des graines de *Moringa Oleifera*

Caractérisation par F T I R:

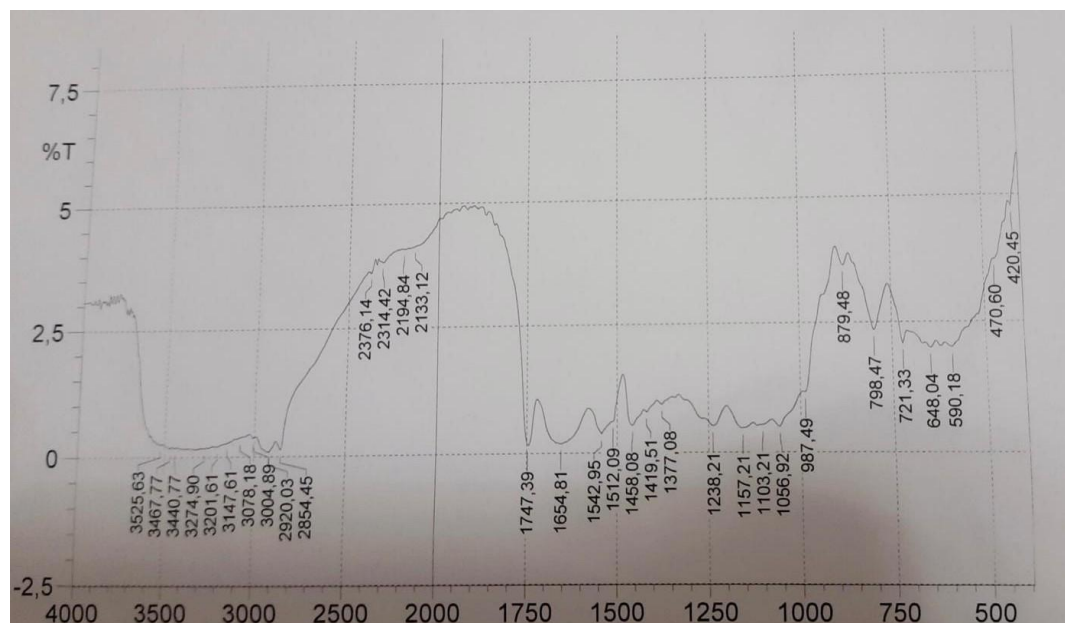


Figure 13 Montre les spectres IR spécifiques des graines de *Moringa Oleifera*.

Le spectre FTIR est un outil puissant pour identifier les groupes fonctionnels présents dans un échantillon. Les creux sur la courbe de transmittance (%T) indiquent les fréquences auxquelles le matériau absorbe l'infrarouge, correspondant aux vibrations de liaisons chimiques spécifiques.

- $\sim 3400\text{ cm}^{-1}$: Cette bande large peut indiquer la présence de groupes OH (alcool ou phénol) ou d'humidité résiduelle dans l'échantillon.
- $\sim 2920\text{ cm}^{-1}$ et 2850 cm^{-1} : Ces bandes sont caractéristiques des liaisons C–H (stretch d'alcane) et indiquent la présence de chaînes alkyles (groupes CH_2 et CH_3).
- $\sim 1740\text{ cm}^{-1}$: Cette bande est caractéristique du groupe carbonyle ($\text{C}=\text{O}$) et peut indiquer la présence d'esters, de cétones ou d'acides carboxyliques.
- $\sim 1600\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$: Cette région peut contenir des doublets liés aux cycles aromatiques ou aux amides.
- $\sim 1400\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$: Cette région est connue sous le nom de "empreintes digitales" (fingerprint) et contient des bandes complexes dues à des vibrations C–O, C–N ou déformations CH_2 .
- $\sim 1100\text{--}900\text{ cm}^{-1}$: Cette région peut indiquer la présence de liaisons C–O (alcools, éthers)

ou P–O (en cas de présence de phosphates).

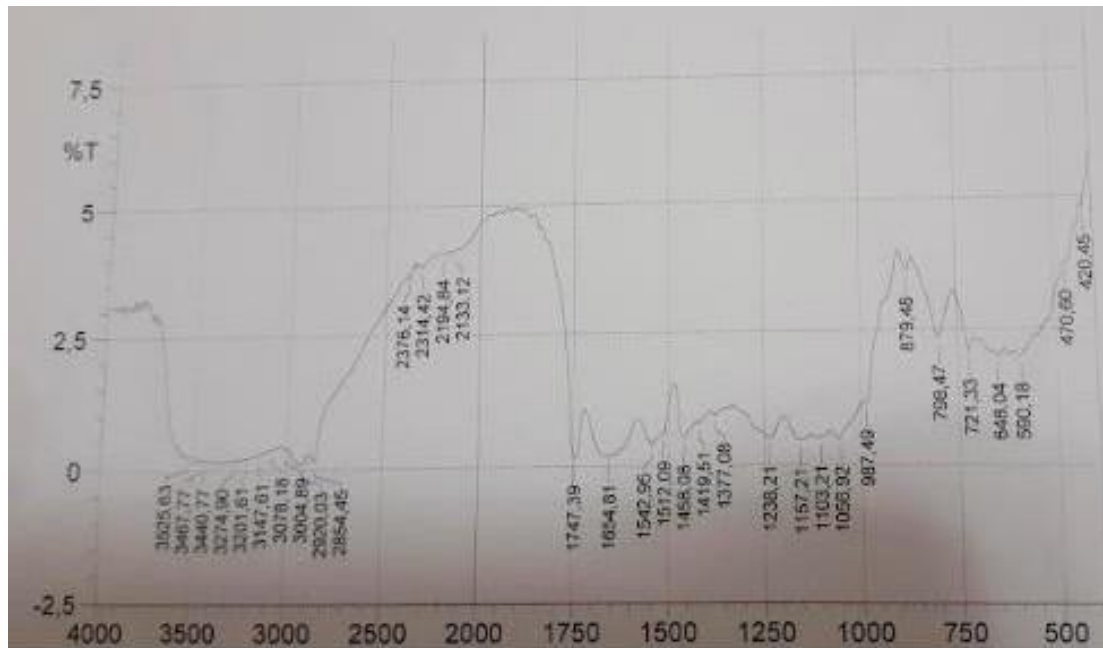


Figure 14 Montre les spectres IR spécifiques des écorces des graines de *Moringa oleifera*

Le graphique montre la transmittance (%T) en fonction du nombre d'ondes (cm⁻¹). Comme pour l'autre échantillon, chaque pic représente une vibration caractéristique de liaison chimique.

Analyse des bandes importantes :

Voici les bandes d'absorption principales avec leur interprétation probable :

- ~3420–3380 cm⁻¹ (p. ex. 3412.48, 3386.45) : Vibration de valence O–H (groupes hydroxyles des alcools ou phénols). Typique de composés phénoliques, flavonoïdes ou eau.
- ~2920–2850 cm⁻¹ : Bandes C–H d'élongation (groupes CH₂/CH₃). Suggère la présence de longues chaînes carbonées (lipides, cires).
- ~1743 cm⁻¹ : Liaison C=O d'ester ou d'acide carboxylique.
- ~1640 cm⁻¹ : Liaison C=C ou vibration d'eau (bande H–O–H de flexion si l'échantillon est hydraté).
- ~1500–1250 cm⁻¹ : Vibration C–C dans les cycles aromatiques ou C–N des amides (protéines). Possible présence de tanins, lignines ou alcaloïdes.
- ~1100–1000 cm⁻¹ : Vibration C–O ou C–O–C (alcool, ester, hémicellulose).

5.3. Détermination du pH_{pzc}

Le pH_{pzc} ou pH du point de charge zéro ou nulle, correspond à la valeur de pH pour laquelle, la charge nette de la surface des adsorbants est nulle. Ce paramètre est très important dans le phénomène d'adsorption, surtout quand des forces électrostatiques sont impliquées dans les mécanismes.

Les suspensions préparées ont été maintenues sous agitation, En traçant la courbe $Q = f(\text{pH})$ puis la détermination de point d'intersection entre cette courbe et l'axe des abscisses où la quantité $Q(\text{mg/g})$ est nulle

La figure représente l'évolution de la charge de surface Q en fonction du pH pour l'adsorbant (GMO / EGMO). Le pH_{pzc} a été trouvé de l'ordre de 6,20 pour les GMO et 6,70 pour les EGMO

Lorsque le pH de la solution est inférieur au pH_{pzc} , les groupements fonctionnels de surface de l'adsorbants seront protonés par un excès de protons H^+ de la solution, donc la surface est chargée positivement. Cependant, lorsque le pH de la solution est supérieur au pH_{pzc} les groupements fonctionnels de surface seront déprotonés par la présence des ions OH^- de la solution et par conséquent la surface est chargée négativement

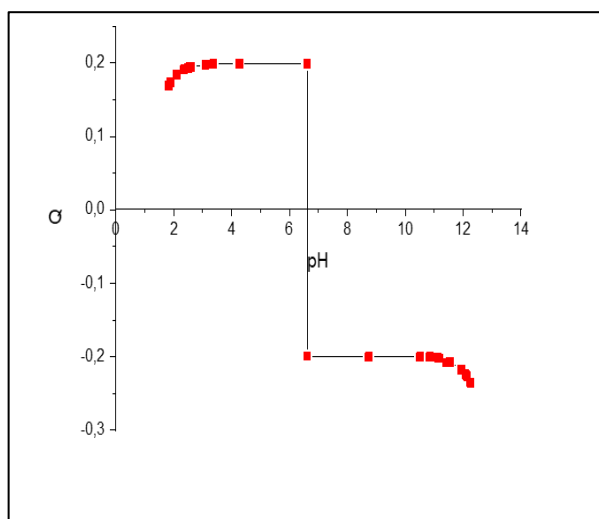


Figure 16 pH_{pzc} de EGMO

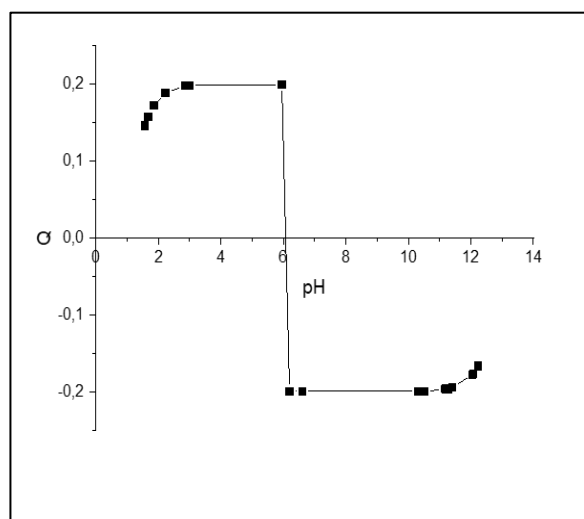


Figure 15 pH_{pzc} de GMO

5.4. La courbe d'étalonnage

Les résultats montrent une relation linéaire forte entre la concentration de la substance et son absorbance, comme indiqué dans l'équation linéaire :

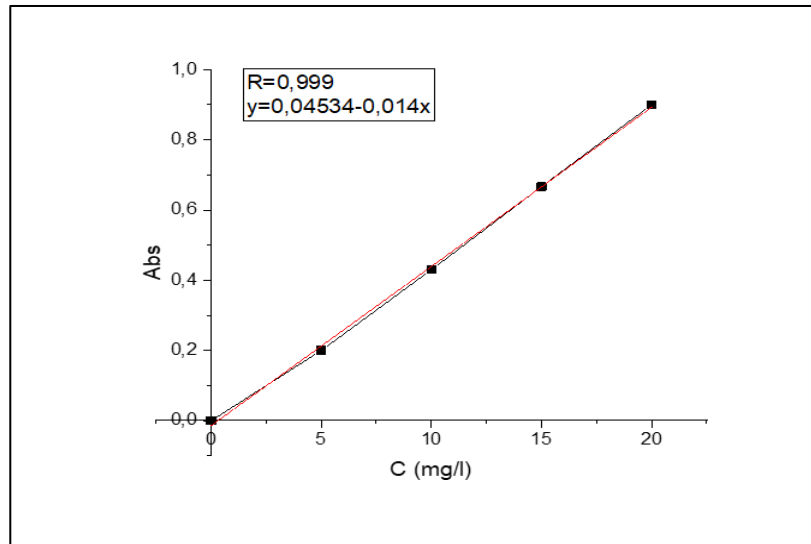


Figure 17 Courbe d'étalonnage du RC à 489,5 nm

$$y = 0,04534x - 0,02$$

où x représente la concentration et y l'absorbance. La pente (0,04534) représente la sensibilité, c'est-à-dire la variation de l'absorbance par rapport à une unité de variation de la concentration.

La valeur de R^2 (0,99639) indique qu'il existe une relation linéaire très forte entre la concentration et l'absorbance, où 99,64 % des variations de l'absorbance peuvent être expliquées par la variation de la concentration.

Signification du résultat

Les résultats indiquent que la relation entre la concentration et l'absorbance est linéaire et excellente, ce qui permet d'utiliser cette équation pour calibrer et mesurer des concentrations inconnues à partir de l'absorbance. Cette équation peut être utilisée pour déterminer la concentration de la substance dans des échantillons inconnus en mesurant leur absorbance.

5.5. Etude paramétrique de la rétention de RC sur GMO et EGMO

5.5.1. Effet de temps de contact

5.1.1.1 GMO

Les résultats montrent l'évolution de l'efficacité d'élimination des contaminants RC par GMO au fil du temps. Les résultats obtenus montrent que la capacité d'adsorption augmente avec le temps de contact jusqu'à atteindre la saturation. À 300 minutes, la quantité d'adsorbant (Q_t) atteint 115 mg/g.

Interprétation de la courbe

La courbe met en évidence deux phases distinctes :

- Phase 1 : Adsorption rapide

Dans cette phase, le contaminant est rapidement transféré de la phase liquide à la surface de

l'adsorbant. Ceci s'explique par la présence d'un grand nombre de sites actifs disponibles à la surface de l'adsorbant au début du processus d'adsorption.

- Phase 2 : Adsorption lente

Dans cette phase, un équilibre s'établit entre les vitesses d'adsorption et de dissociation. L'équilibre est atteint après 300 minutes avec une quantité d'adsorbant de 115 mg/g et une efficacité d'élimination de 46 %.

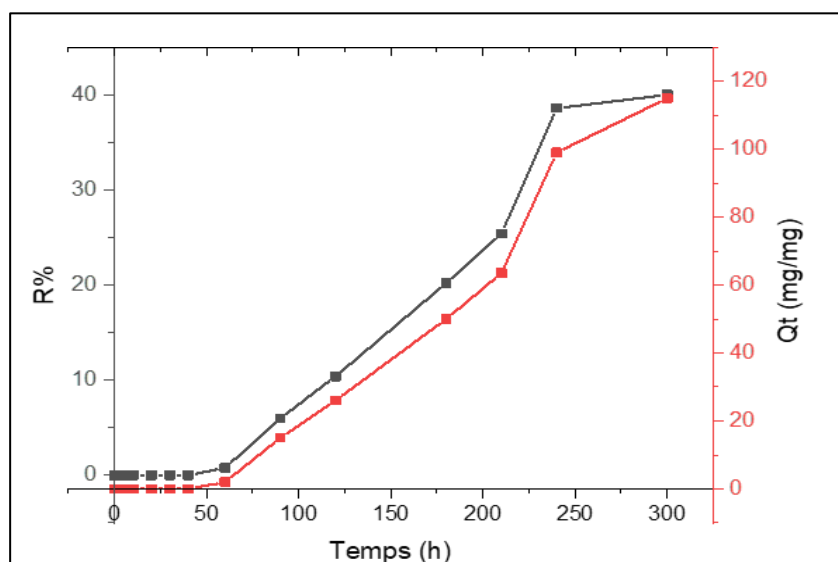


Figure 18 Effet de temps de contact sur GMO

5.1.1.2 EGMO

On observe que l'augmentation de la concentration initiale en adsorbat entraîne une augmentation significative de la quantité adsorbée. L'adsorption est plus rapide au début qu'à la fin. Cela s'explique par la disponibilité initiale des sites actifs sur l'adsorbant, qui se trouvent progressivement occupés par les molécules du colorant.

Avec le temps, un plateau est atteint, correspondant à une valeur constante au-delà de laquelle aucune élimination supplémentaire du colorant n'est observée. À ce stade, la quantité de colorant (RC) adsorbée par l'adsorbant atteint un état d'équilibre dynamique. La quantité adsorbée à l'équilibre, notée q_t , est de 98 mg/g, et le rendement d'adsorption R atteint 39,2 % après 300 minutes de contact.

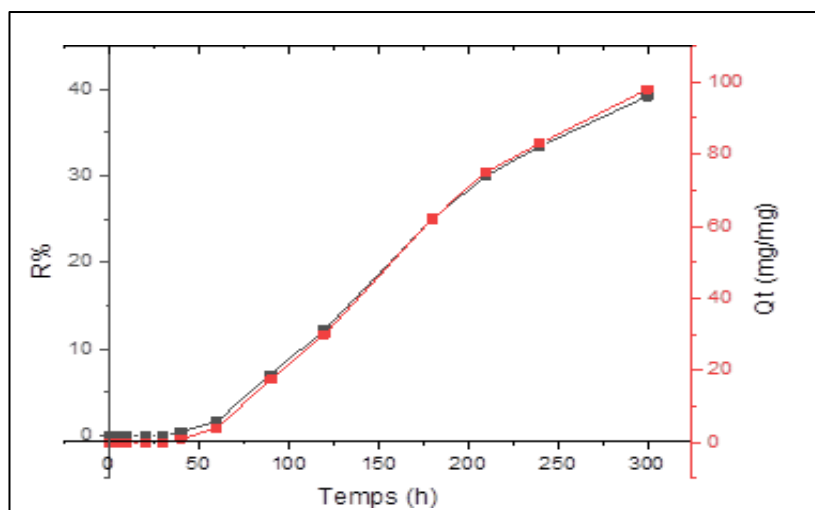


Figure 5.7: Effet de temps de contact sur EGMO

Effet de la masse d'adsorbant

5.1.1.3 GMO

L'étude de l'effet de la masse de GMO sur l'adsorption du Rouge de Congo montre une tendance croissante du rendement d'adsorption (R%) en fonction de l'augmentation de la masse. En effet, le rendement passe de 54,81 % à 2 g pour atteindre un maximum de 95,68 % à 3 g. Cette amélioration s'explique par la disponibilité croissante des sites actifs avec une plus grande masse d'adsorbant.

Cependant, la quantité adsorbée par unité de masse (Q_t) diminue lorsque la masse augmente, passant de 11 mg/g à 0,63 mg/g, ce qui est un comportement typique. Cette diminution est due à une saturation progressive des sites actifs et au chevauchement des particules, limitant la surface d'exposition effective.

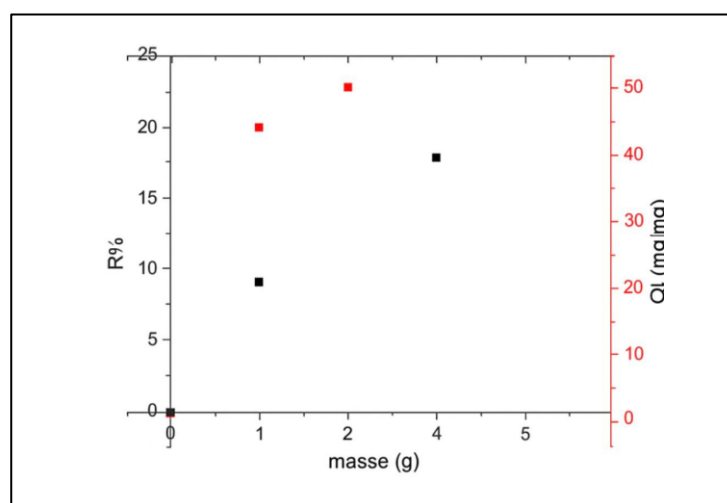


Figure 19 effet de masse sur GMO

5.1.1.4 EGMO

Concernant l'EGMO, on observe une évolution similaire. Le rendement d'adsorption augmente significativement avec la masse, atteignant une valeur maximale de 94,91 % à 3 g, tandis que Q_t diminue progressivement. Cette tendance confirme que l'augmentation de la masse permet de fixer davantage de colorant, mais réduit l'efficacité d'adsorption par gramme d'adsorbant.

La faible valeur de Q_t à forte masse suggère également un empilement des particules et donc une réduction de la surface accessible pour l'adsorption.

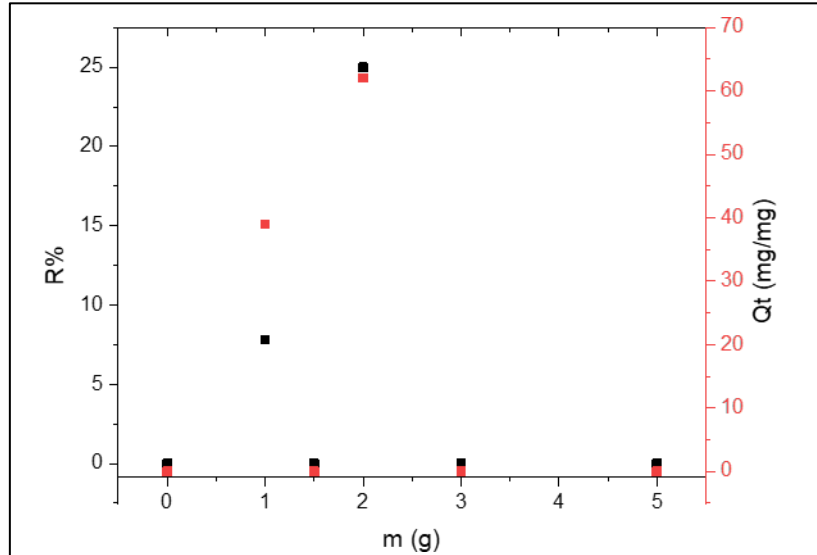


Figure 20 effet de masse sur EGMO

5.6. Effet de concentration du rouge de congo sur GMO et EGMO

D'après le graphique, nous remarquons que lorsque la concentration augmente, la quantité adsorbée augmente également, ce qui entraîne une hausse du rendement. Cette tendance se poursuit jusqu'à atteindre une valeur maximale pour une concentration de 20mg/l

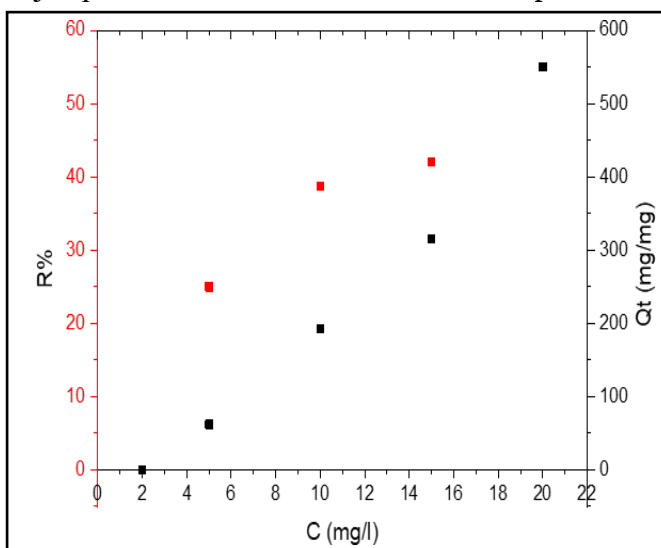


Figure 22 effet de concentration sur EGMO

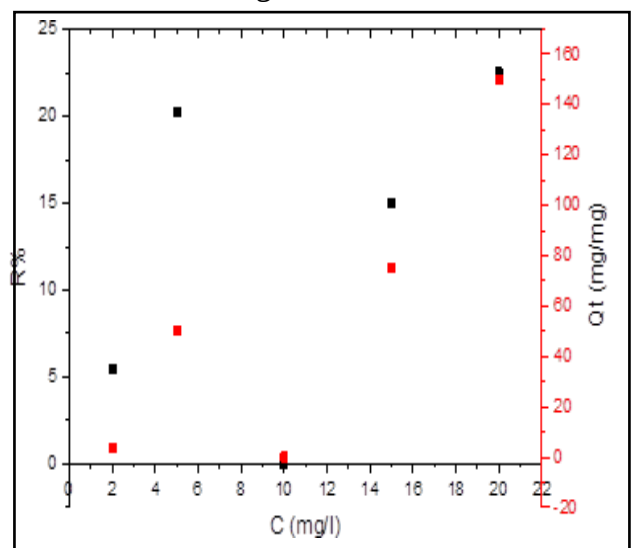


Figure 21 effet de concentration sur GMO

5.7 Effet de PH

5.7.1 GMO

Selon les résultats obtenus et qui sont représentés sur la Figure 23 . On remarque que la quantité adsorbée en milieu basique (ph=9 , =11) et mieux qu'on milieu acide (ph=3, =5) parce que l'ajout d'acide sulfurique entraine la diminution de ph donc l'augmentation de la concentration des ions H⁺ que entrent en compétition avec le RC sur les site actifs

La quantité adsorbée après trois heure est 3.10^{-3} mg/g à ph= 11 et 16.10^{-3} à ph = 5

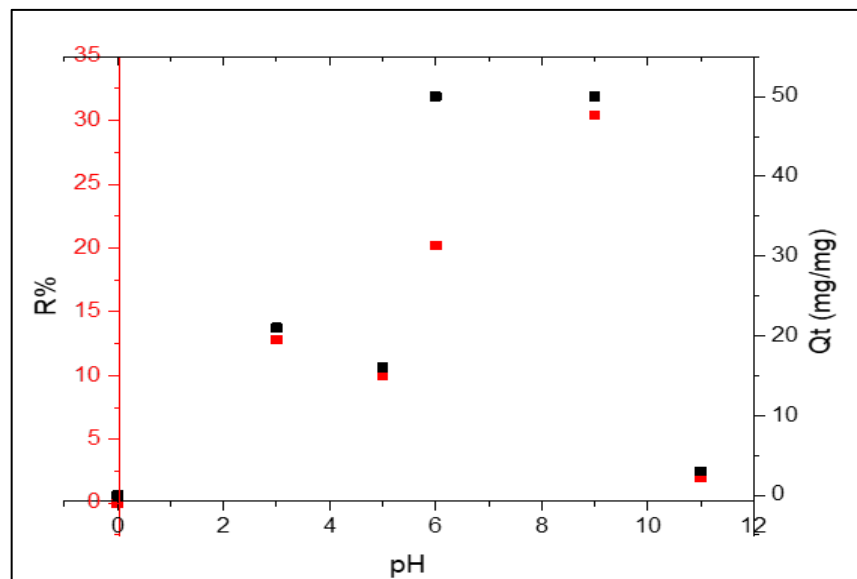


Figure 23 effet de PH sur GMO

5.7.2 EGMO

On peut observer que

À un pH faible (environ 1 à 3) : la quantité adsorbée (Qt) est très faible.

À un pH élevé (environ 6 à 8), la valeur Qt augmente significativement, indiquant une meilleure efficacité de l'adsorption.

À un pH supérieur à 8, la valeur Qt semble commencer à diminuer ou à se stabiliser.
Explication scientifique :

En milieu acide (pH faible), les surfaces et les espèces chimiques sont souvent chargées positivement, ce qui peut entraîner une répulsion entre les ions positifs de la solution et la surface de l'adsorbant, réduisant ainsi l'adsorption.

À un pH plus élevé, la charge de surface devient plus négative, ce qui accroît l'attraction des ions positifs de la solution (si l'adsorbant est chargé positivement), augmentant ainsi l'adsorption.

À un pH très élevé, une compétition entre les ions ou des modifications de la forme de l'adsorbant ou des ions peuvent se produire, réduisant ainsi l'adsorption.

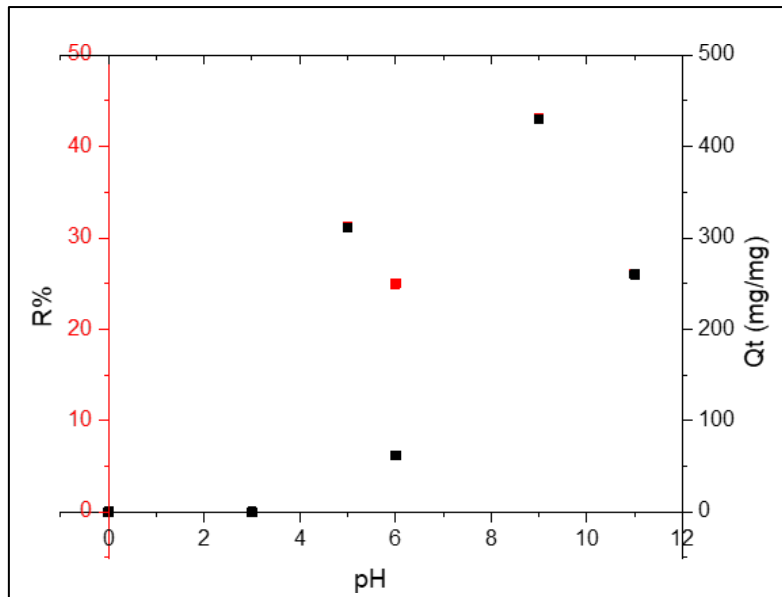


Figure 24 effet de PH sur EGMO

5.8. Modélisation de la cinétique d'adsorption

Pour comprendre la vitesse à laquelle le polluant est éliminé, il est essentiel de modéliser la cinétique d'adsorption. Deux modèles ont été utilisés pour quantifier les changements de l'adsorption avec le temps et évaluer les paramètres de la cinétique : le modèle de pseudo- premier-ordre et le modèle de pseudo-second-ordre.

5.9. Modèle cinétique de pseudo-premier ordre (EGMO)

Le modèle de pseudo-premier ordre permet de déterminer la constante de vitesse (k_r) et la quantité adsorbée à l'équilibre (Q_e) en traçant la courbe de $\ln(Q_e - Q)$ en fonction du temps (t). Les résultats sont présentés dans la figure 25

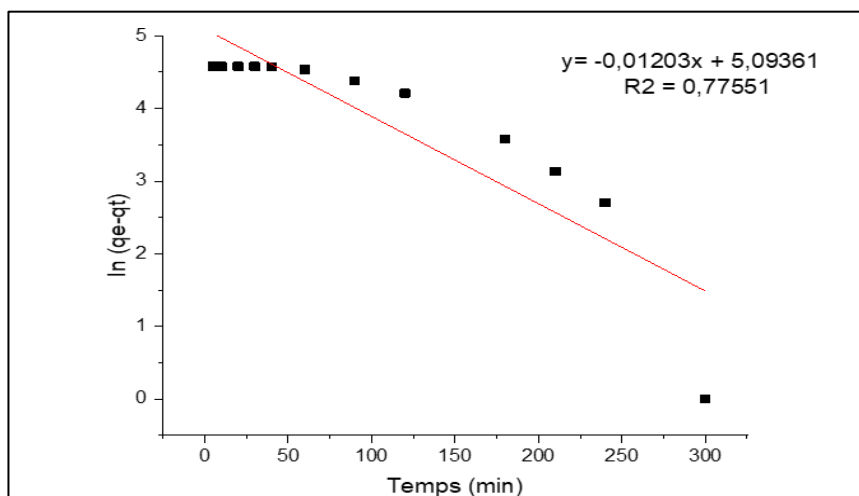


Figure 25 Modèle de pseudo-premier ordre de l'adsorption de RC sur EGMO

5.10 Modèle cinétique de pseudo-second ordre (EGMO)

La courbe t/Q_r en fonction du t détermine la constante K_2 . Les résultats sont représentés sur la figure 26

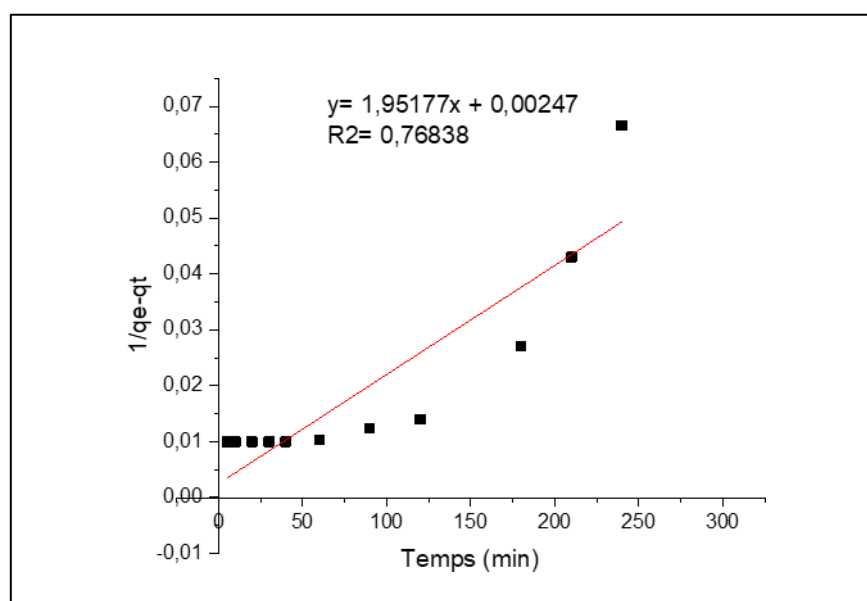


Figure 26 Modèle de pseudo-second ordre de l'adsorption de RC sur EGMO

Modèle pseudo 1 ^{er} ordre			Modèle pseudo 2 -ème ordre		
$Ln (Q_e - Q_t) = Ln Q_e - K_1 \frac{t}{2.303}$			$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_e} + \frac{1}{K_2 Q_e^2} t$		
Q _e (mg/l)	K ¹ (min ⁻¹)	R ²	Q _e (mg/l)	K ² (min ⁻¹)	R ²
98.10 ⁻³	0.01	0.77	98. 10 ⁻³	-1.95	0.76

5.11. Modèle cinétique de pseudo-premier ordre GMO

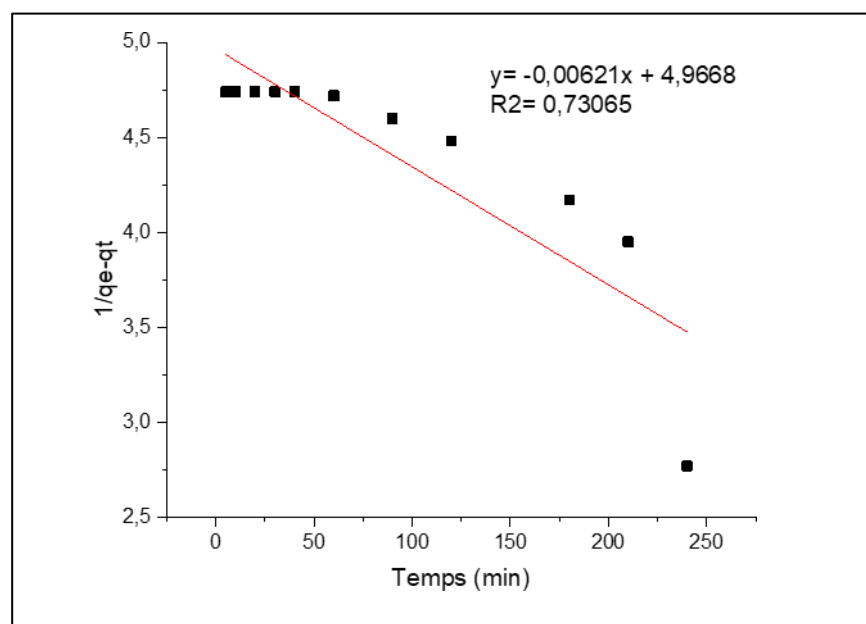


Figure 27 Modèle de pseudo-premier ordre de l'adsorption de RC sur GMO

5.12. Modèle de pseudo-second ordre de l'adsorption de RC sur GMO

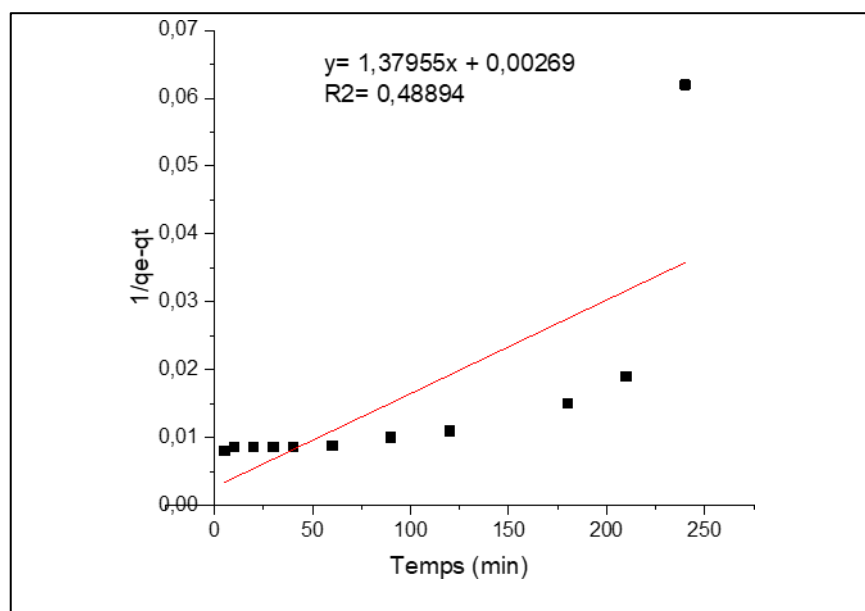


Figure 28 Modèle de pseudo-second ordre de l'adsorption de RC sur GMO

Modèle pseudo 1 ^{er} ordre			Modèle pseudo 2 -ème ordre		
$Ln (Q_e - Qt) = Ln Q_e - K_1 \frac{t}{2.303}$			$\frac{1}{Qt} = \frac{1}{Q_e} + \frac{1}{K_2 Q_e^2}$		
Q _e (mg/l)	K ¹ (min ⁻¹)	R ²	Q _e (mg/l)	K ² (min ⁻¹)	R ²
115.10 ⁻³	0.006	0.73	115.10 ⁻³	-1.37	0.48

5.13. Modélisation des isothermes d'adsorption

5.13.1. Modèle de Freundlich(EGMO)

En traçant $Ln (Q_0) = f (Ln C_0)$, les résultats obtenus sont représentés par la figure.....D'où

la pente de la droite est n et l'ordonnée à l'origine est log KF

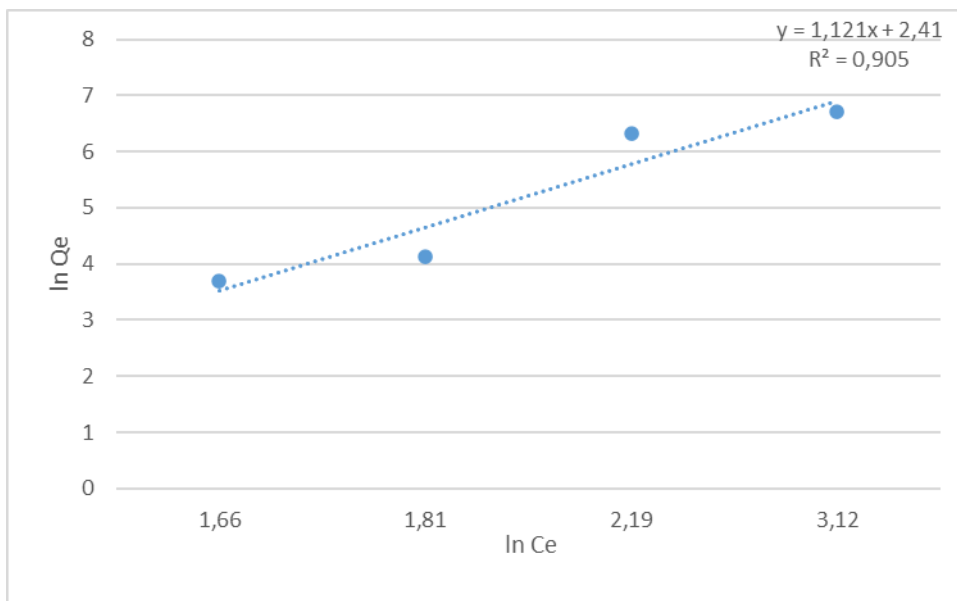


Figure 29 Modélisation par le modèle Freundlich EGMO

5.13.1. Modèle de Langmuir (EGMO)

En traçant $(C_e/Q_e) = f(C_e)$, les résultats obtenus sont représentés par la figure.....

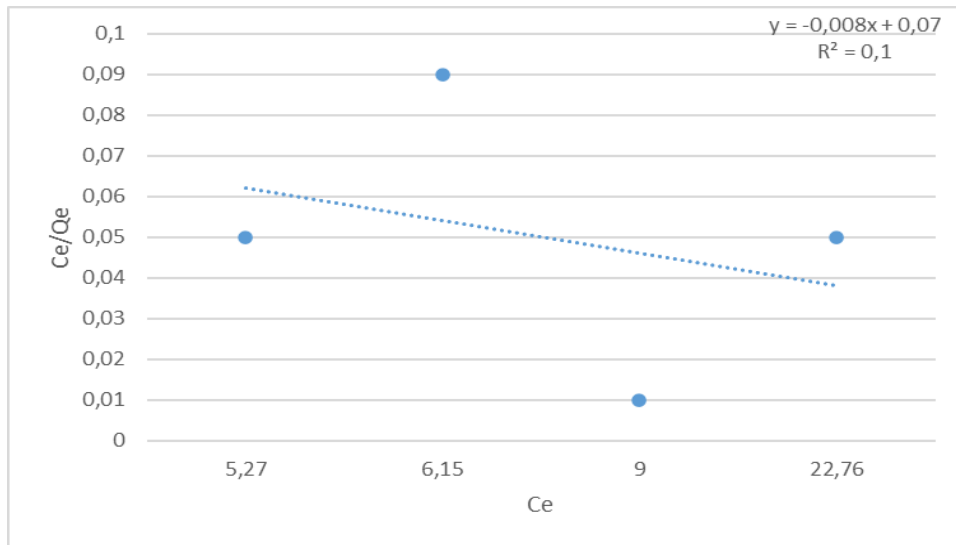


Figure 30 Modélisation par le modèle langmuir EGMO

Langmuir			Freundlich		
Qm(mg/g)	B	R ²	Kf(L/mg)	n	R ²
150.10 ⁻³	0.06	0.771	114.43	-7.19	0.099

5.13.2. Modèle de Freundlich GMO

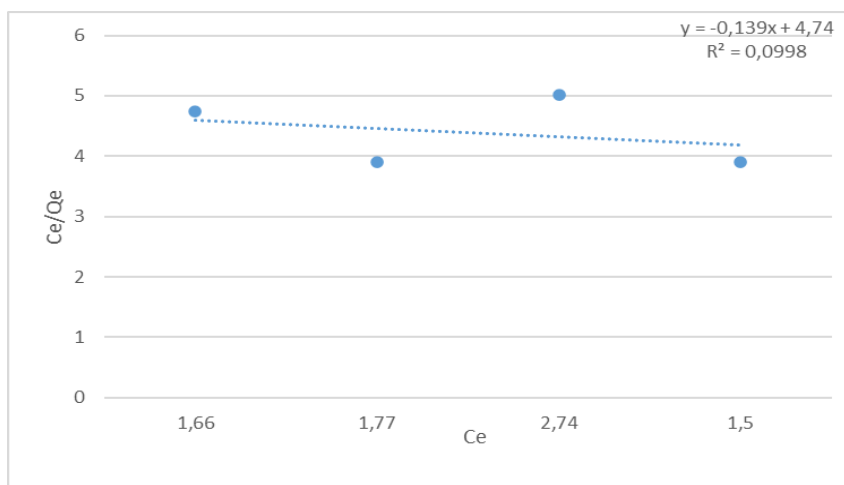


Figure 5.20: Modélisation par le modèle Frendlich GMO

5.13.3. Modèle de Langmuir GMO

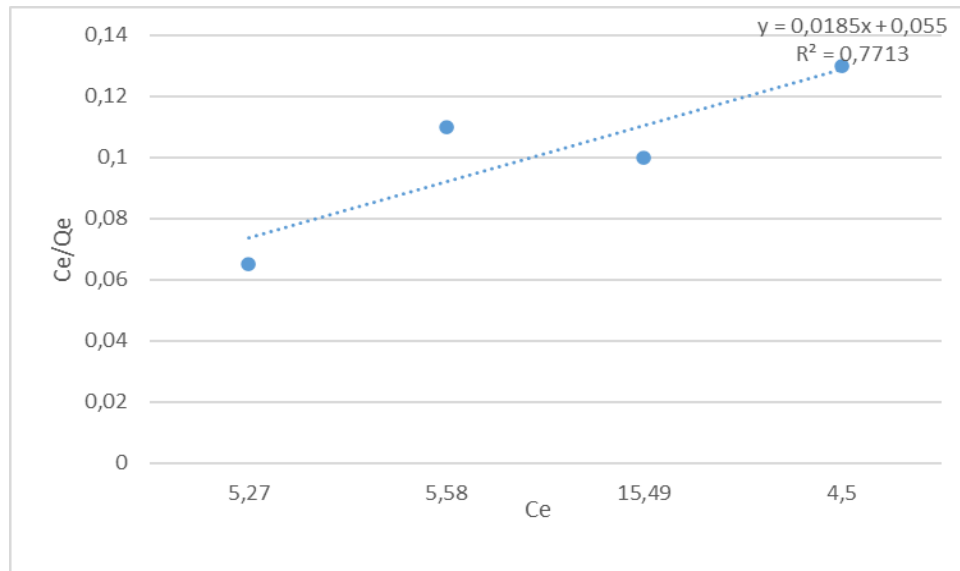


Figure 5.21 : Modélisation par le modèle Langmuir GMO

Langmuir			Freundlich		
Qm(mg/g)	B	R²	Kf(L/mg)	n	R²
550.10 ⁻³	3	0.1	11.13	0.69	0.905

Conclusion générale

Conclusion générale

Le présent travail est basé sur l'utilisation des Graines et écorces des *Moringa Oleifera* (GMO) (EGMO) pour la rétention du Rouge Congo (RC) en système batch à la température ambiante.

Plusieurs essais d'adsorption ont été réalisés en prenant en compte de l'influence de plusieurs paramètres opératoires à savoir : le temps de contact, la concentration initiale du polluant en solution, la masse d'adsorbant, et le pH. A travers les résultats obtenus, nous pouvons conclure que :

La cinétique d'adsorption du colorant Rouge Congo atteint son équilibre durant 3 heures.

Le rendement de la rétention de l'adsorbat peut atteindre son maximum pour une masse D'adsorbant de 3g pour (GMO) 2g pour (EGMO) .

La rétention de RC est bien influencée par la variation de pH. Un rendement de l'ordre de 30,4% a été atteint au pH égale à 9 pour GMO et de 43,05% pour EGMO.

La quantité adsorbée augmente lorsque la concentration initiale augmente.

Le modèle cinétique du pseudo premier ordre s'applique bien dans le cas du système adsorbant/adsorbat étudié avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,77$ pour GMO et 0,73 pour EGMO.

Le modèle de Freundlich est bien adapté pour décrire l'isotherme d'adsorption de La Rouge Congo.

Références bibliographiques

[1] Robinson T, G. McMullan, R. Marchant et P. Nigam (2001). Remediation of dyes in textile effluent: 388 Adsorption du bleu de méthylène à critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresour. Technol.*, 77, 247-255.

[2] M.J. Ahmed, S.K. Dhedan. Equilibrium isotherms and Kinetics modeling of methyleneblue adsorption on agricultural Wastes-based activated carbons. *Flui. Phas. Equil.* 317 (2012) 9-14.

[3] Juang R.S, F.C. Wu et R.L. Tseng (1997). The ability of activated clay for the adsorption of dyes from aqueous solutions. *Environ. Technol.*, 18, 525-531.

[4] H.Sadki, K.Zait ,M.Saidi, Adsorption d'un colorant cationique d'un milieu aqueux sur une argile locale activé, Rapport bibliographique, Université Abdelmalek Essaâdi - Maroc, 2014.

[1] : MEBARKI.B .Etude des transferts de chaleur et de masse dans une machine frigorifique à adsorption solaire. Thèse de doctorat : Génie Climatique. Université de Constantine, 2017 ,161p

[2] : SREEREMYA S. Adsorption-Review .International Journal of Advance Research and Development. 2017, Volume2, N°.2, p1-4 .

[3] : CHEKEM, C. Matériaux carbonés multifonctionnels à porosité contrôlée à partir des ressources végétales tropicales: application au traitement de l'eau par photocatalyse. Thèse de doctorat : sciences de l'ingénieur .Université de Perpignan, 2017,255p.

[4] : ADRAR, I. Utilisation des noyaux de dattes pour l'élimination des ions Fe^{2+} en solution aqueuse. Mémoire de magister : Chimie de l'Environnement. Université de Tizi-Ouzou, 2016, 102p

[5] : ARAR, S et HAZOURLI, A. Adsorption du colorant jaune d'alizarine sur différents biomatériaux. 2016.

Références bibliographiques

[6] : MEULLEMIESTRE, A. Valorisation des déchets de la filière «bois» en deux étapes: isolation des molécules extractibles puis fabrication de charbon actif: cas du pin maritime. 2014. Thèse de doctorat : génie des procédés Université de La Rochelle, 2014,244p.

[7] : OUSLIMANI N (2012). Adsorption des colorants acides des effluents manufacturiers par des montmorillonites. Thèse de doctorat en sciences et génie des matériaux, option chimie de la matière et de l'environnement, université de BOUMERDES, pp : 24-25

[8] : ANONYME. Etude sur les coûts de la réduction des rejets de substances toxiques. Fiches Traitements, adsorption, pp : 2.

[9] : F.BENAMROUI, Elimination des colorants cationiques par des charbons actifs synthétisés à partir des résidus de l'agriculture. Mémoire de Magister. université FERHAT ABBAS SETIF .P10 -12-13 (2014).

[10] : S. B. H. KARIMI, indian journal of science and technologie, 5 mars 2012.

[11] : AARFANE A, SALHI A, EL KRATI M, TAHIRI S, MONKADEM, LHADI EK,

BENSITELM (2014). Etude cinétique et thermodynamique de l'adsorption des colorants Red195 et bleu de méthylène en milieu aqueux sur les cendres volantes et les mâchefers.J. Mater. Environ. Sci. 5 (6) :1927-1939.

[12] : : Lauwerys, R., Toxicologie industrielle et intoxications professionnelles. Masson ed. Vol. 3.

1990, Paris

[13] : : J.Weber; B.M. Vanvliet; In: Activated carbon adsorption of organic from the aqueous Phase; Ed. I.H. Suffet; M.J. Mc Guire1.

[14] : C.Moreno-castilla; Adsorption of organic molecules from aqueous solution on carbon materials; carbon; 42; 83; 94;(2004).

Références bibliographiques

- [15] : L. Robert, . F.Dardel ; Adsorption J 2730 ; Traité Génie des procédés ;(1988)
- [16] : H.Xiuli, W. Wel, M. Xiaojian; Adsorption characteristics of methylene blue onto low cost biomass material lotus leaf. Chemical Engineering Journal.Vol171; p1- 8;(2011).
- [17] : Olson M.E. and Carlquist S. (2008). Stem and root anatomical correlations with life form diversity, ecology, and systematics in Moringa (Moringaceae). Bot. J. Linn. Soc. 135 (4) : 315-348.
- [18] : Abbas H..2021,Louni S., 2009 - Extraction et caractérisation physicochimique del'huile de graines de Moringa oleifera. Mémoire de Magister, Ecole Nationale Supérieure Agronomique El-Harrach, 90 p
- [19] : N.bensacia,N.taoualit adsorption des polluants émergents pharmaceutique sur les écorces de moringa oleifera 2021 [42] : Abbas H..2021,Louni
- [20] : Abbas H..2021,Louni S., 2009 - Extraction et caractérisation physicochimique del'huile de graines de Moringa oleifera. Mémoire de Magister, Ecole Nationale Supérieure Agronomique El-Harrach, 90 p
- [21] : https://www.peresblancs.org/le_moringa.h
- [22] : HAITI S , Analyse des Potentialités de l'Exploitation du Moringa en Haïti, 2016, 191
- [23] : N.Bouanimba ,Modélisation et optimisation de la cinétique de dégradation photo catalytique de polluants organiques en solution, Diplôme de Magister, Université Mentouri Constantine- Algérie,2009.
- [24] : M Ramananjanahary Valorisation scintifique de la graine du moringa oleifera en alimentation animale [Rapport]. - [s.l.] : thèse de doctorat université D'antananarivo Madagascar., 2016.

Références bibliographiques

- [25] : Aminata K Boubakar S, Alfred S. Dayéri D Optimization of the effectiveness of the Moringa oleifera seeds in the treatment of drinking water in sub-Saharan Africa, Case study of the waters of Burkina Faso, sciences de l'eau [Article]. - 2013.
- [26] : Foidl N Makkar H.p.S. et Becker k the Potentail of Moringe Oleifera for aricultural and industrial use (45-76) In :Fuglie L.J(editor).the miracle tree :the multiple attributes of Moringa .- Wageningen : CTA;Dakar :CWS. [Rapport]. - 2001.
- [27] : A Hadj syntheses d'argiles anioniques (Mg Fe CO₃) par coprecipitation et degradation thermique de l'ureé et application a l'élimination de colorants anioniques dans les effluentstzxtils [Rapport]. - Oran : these de doctorat Universite Oran Mohames Boudiaf, 2014.
- [28] : INRS, Dermatoses professionnelles aux colorants, Document pour le médecin de travail, (2004) N°100, 4ème trimestre.
- [29] : N.Bouanimba ,Modélisation et optimisation de la cinétique de dégradation photo catalytique de polluants organiques en solution, Diplôme de Magister, Université Mentouri Constantine- Algérie,2009.
- [30] : D.Chebli , Traitement des eaux usées industrielles: Dégradation des colorants azoïques par un procédé intégré couplant un procédé d'oxydation avancée et un traitement biologique, Thèse de Doctorat, Université Farhat Abbas-Sétif-Algérie,2012.
- [31] : HEMSAS SABRINA, "contribution à l'étude de la décoloration des eaux sur grignons d'olives valorises. Etude dynamique" mémoire de magister, Université M'hamed bougara boumerdes, 2008.
- [32] : O.Houhari ;C.Tifahi ; « etude systématique de l'oxydation à l'air du DRACO G60/Application aux polluants organiques » ; PFE ; Université de blida ; (2002).

[33] : ARAR SOUMIA, ADSORPTION DU COLORANT JAUNE D'ALIZARINE

SUR DIFFERENTS BIOMATERIAUX, Mémoire de master, Université Larbi Ben M'hidi Oum el bouaghi, 2015/2016, page 9,24,25,27

[34] : Nour BOUANIMBA, Etude comparative de la dégradation photochimique et photocatalytique de quatre colorants : Impact de la structure chimique et corrélation entre l'adsorption et l'activité photocatalytique de TiO₂, Thèse de doctorat, Université - Constantine 1, 2014, page 7, 9 ,12,13,17

[35] : GHEDABNA DJIHED, Elimination des colorants bleus de méthylène et jaune d'alizarine des eaux par adsorption sur un biomatériau, mémoire de master, Université Larbi Ben M'hidi (Oum el bouaghi), 2016, page 8,18,19

[36] : SEKRIFA Mohamed Lamine, Étude des propriétés adsorbantes des charbons activés issus des noyaux de dattes. Application au traitement d'effluent aqueux, thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2012/2013, page 3,4,6, 23,30

[37] : TRAICHI ZAKARIA, AMARA BILAL, Optimisation de l'élimination d'un polluant organique Par l'adsorption sur un adsorbant naturel (Noyaux des nêfles), Université Saad Dahlab Blida Faculté de Technologie, 2021/2022

[38] : W. Ouari, Oxydation des colorants par POAs sur catalyseurs à base d'argile commerciale K10 modifiée, Master, Tlemcen, 2017.

[39] : Guettafi M, Sadouk R, « adsorption des polluants émergents pharmaceutiques sur les écorces de moringa oleifera ».Université Saad Dahleb Blida 1, mémoire de master, 2021.

[40] : Gueham K, ctérisation des couches minces de l'oxyde de zinc (ZnO) déposées par la technique APCVD,(université blida 1 2020

[41] : hamida A ,boubekour S, contribution a l'étude de l'adsorption de bleu de méthylène sur deux adsorbants ;synthétique (hydroxydes doubles lamellaires Mg-Al- HDL) et naturel(graines de moringa oleifera),université blida 2021