

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA - Béjaïa

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des sciences biologiques de l'environnement
Spécialité Toxicologie Industrielle et Environnementale



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Réf :

Mémoire de Fin de Cycle
En vue de l'obtention du diplôme

MASTER

Thème

Evaluation de la capacité d'adsorption
du Bleu de Méthylène par les sous-
produits de *Moringa Oleifera*

Présenté par :

Madi Nesrine & Larbi Fatma

Soutenu le : 02 Juillet 2024

Devant le jury composé de :

M. SIDI Hachemi	MCA	Président
Mme MANKOU-HADDADI Nadia	MCB	Examinatrice
Mr. BEN HAMICHE Nadir	MCA	Encadreur
Mme. KRIBECHE Amina	Docteur	Co-encadreur

Année universitaire : 2023 / 2024

Remerciements

La réalisation de ce mémoire n'a été possible que grâce à la participation de plusieurs personnes à qui nous voudrions témoigner de toute notre gratitude.

*Nous voudrions tout d'abord exprimer notre profonde gratitude au superviseur de ce mémoire **Mr BEN HAMICHE Nadir** et nous le remercions pour toute l'importance qu'il a accordé et tous les efforts qu'il a fournis qui ont permis de bien mener ce travail.*

*Nos remerciements également sont adressés à **Mme KRIBECHE Amina**, notre source de connaissances pour son aide précieuse durant la réalisation de ce mémoire, pour sa disponibilité et ses valeureux conseils.*

*Nous tenons à remercier **Mme MAHDI Taous**, responsable du laboratoire Écologie de l'Environnement de l'Université de Bejaïa, pour nous avoir accordé une totale confiance et un accueil chaleureux.*

*Nous exprimons nos vifs remerciements à **Mme MANKOU-HADDADI Nadia** et à **Mr SIDI HACHEMI** d'avoir accepté de présider ce jury et de nous honorer par leur présence durant la présentation de ce modeste travail.*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

*À ma très chère Mère qui m'a soutenue et encouragée sans relâche durant toutes ces années
d'études.*

*Elle m'a entourée d'amour, d'affection et a tant contribué à ma réussite
Que Dieu le Tout Puissant la garde.*

*À mes chers frères et sœurs et à tous ceux qui ont partagé avec moi des moments d'émotion
durant la réalisation de ce travail et qui m'ont chaleureusement soutenu et encouragé tout au
long de mon parcours.*

*À mon soutien moral et source de joie et de bonheur, ma très chère sœur **Ferroudja** pour
l'encouragement, l'aide et l'intérêt qu'elle m'a toujours accordé. Je te souhaite une vie pleine
de succès et de réussite.*

*À **Mr Salah AMMOUR** pour sa contribution à la rédaction et la réalisation de ce mémoire.*

*Mes profondes gratitudee à mes encadreurs **Mr BEN HAMICHE Nadir** et **Mme
KRIBECHE Amina** pour leur disponibilité, encouragements et leurs directives qui nous ont
permis de mener à bien notre modeste travail.*

*À ma chère binôme **MADI Nesrine** pour sa rigueur, son dévouement et à toute sa famille.*

A tous mes amis

Au nom de l'amitié qui nous réunit, et au nom de nos souvenirs inoubliables

À tous ceux qui me sont chers.

Que Dieu vous bénisse toujours

NORA



Dédicace

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU le tout puissant de m'avoir accordé la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je tiens à dédier cet humble travail à :

À ma tendre mère et mon très cher père

À ma précieuse sœur

À mes frères

À mes meilleurs amis :

*Fairoze, Kenza, Meriem, Chahinez, Lydia, Amina, Melissa, Hanan, Halima, Katia et Lydia
ainsi qu' ma très chère binôme LARBI Fatma*

*À Tous mes amis d'enfance et tous ceux que j'ai connu tous le long du parcours
scolaire et universitaire.*

À Toute ma famille Tout ceux qui m'aiment et que j'aime également.

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail

Madi Nesrine



LISTE DES ABREVIATIONS

BM : Bleu de Méthylène

EQ : Equation

FTIR : la Spectroscopie Infrarouge a Transformé de Fourier

M1 : Masse de Matériau

M2 : Masse de Méthanol

MO : *Moringa Oleifera*

NPS : les Nanoparticules

PM : masse volumique de méthanol

PR : masse volumique réel

V1 : volume du matériau

VM : volume du méthanol

VR : volume réel du matériau

VT : volume total du pycnomètre

PH_{pzc} : Point de charge zéro

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Les différentes parties de <i>MO</i>	15
Figure 2	Structure du méthylène bleu	24
Figure 3	Etapes de synthèse du matériau	25
Figure 4	Analyse FTIR	28
Figure 5	Processus d'adsorption en discontinu pour l'élimination des colorants	29
Figure 6	Courbe d'étalonnage d'adsorption du BM	32
Figure 7	Point isoélectrique des NPs	33
Figure 8	Analyse FTIR de matériel synthétisée	34
Figure 9	la concentration résiduelle en BM observée en fonction de la concentration résiduelle prévue	35
Figure 10	Effet du pH de la solution et la concentration initiale de la solution du BM sur l'élimination du BM	38
Figure 11	Cinétique d'adsorption du BM dans les conditions optimales	39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Quelques espèces de Moringa et leur origine	17
Tableau 2	La phytochimie des différentes parties de <i>MO</i>	19
Tableau 3	Composition chimique des graines de <i>MO</i> (g/100 g de poids sec)	20
Tableau 4	Caractéristiques physico-chimiques du bleu de méthylène	24
Tableau 5	Différentes combinaisons de facteurs et niveaux pour les essais optimaux fixés	30
Tableau 6	Données de la masse volumique des matières synthétisées	33
Tableau 7	Facteurs et interactions de facteurs influençant le processus d'adsorption	36
Tableau 8	Les facteurs optimaux pour l'adsorption du BM	38

SOMMAIRE

Liste des abreviations.....	v
Liste des figures	iv
Liste des tableaux.....	ii
Introduction Générale.....	1
Chapitre I	4
Généralités sur la pollution.....	4
1.1 Introduction.....	4
1.2 La pollution.....	4
1.2.1 La pollution sonore.....	4
1.2.2 La pollution lumineuse.....	4
1.2.3 La pollution visuelle	4
1.2.4 La pollution atmosphérique.....	5
1.2.5 La pollution du sol.....	5
1.2.6 La pollution de l'eau.....	5
1.3 Polluants chimiques.....	5
1.4 Polluants nutritifs	5
1.5 Polluants biologiques.....	5
1.6 Sédiments	5
1.7 Pollution thermique.....	6
Chapitre II.....	8
Généralités sur l'adsorption	8
2.1 Définition de l'adsorption	8
2.2 Types d'adsorption	8
2.2.1 Adsorption physique (ou physisorption) :.....	8
2.2.2 Adsorption chimique (ou chimisorption) :.....	8
2.3 Les applications de l'adsorption dans l'industrie et la vie quotidienne	9
2.4 Les différents types d'adsorbants	9
2.5 Les matériaux adsorbants les plus efficaces pour différentes applications.....	11

2.5.1 Charbon actif.....	11
2.6 Facteurs influençant le processus d'adsorption.....	11
2.7. La cinétique d'adsorption et les isothermes d'adsorption.....	12
2.7.1. Cinétique d'adsorption :	12
Chapitre III	15
Généralités sur <i>Moringa oleifera</i>	15
3.1 Description botanique et répartition géographique	15
3.1.1 Classification botanique	16
3.2 Conditions de plantation.....	17
3.3 Composition physicochimique et l'importance nutritionnelle.....	18
3.4 application et utilisations de l'arbre de <i>MO</i>	19
3.4.1 Graines de <i>Moringa oleifera</i>	20
Chapitre IV.....	23
Matériel et méthodes	23
4.1 Introduction.....	23
4.2 Lieu de travail.....	23
4.3 Importance et caractéristiques du bleu de méthylène	24
4.4 Caractérisation du déchet de graines de <i>MO</i>	25
4.4.1 Nanotechnologies.....	25
4.4.2 Synthèse du matériau.....	25
4.5 Caractérisation du matériau.....	26
4.5.1 La Masse apparente (p_a).....	27
4.5.2 La Masse réelle de l'adsorbant (p_r).....	27
4.5.3 La porosité de l'adsorbant	27
4.5.4 Le point de charge zéro du pH (pH_{pzc})	27
4.5.5 Spectroscopie infrarouge à transformé de Fourier	28
4.6 Tests d'adsorption	28
4.7 Analyse statistique et logiciels.....	30
Chapitre V	32
Résultats et discussion.....	32
4.1 Etablissement de la courbe d'étalonnage	32

4.2 Caractérisation physicochimique	32
4.2.1 Caractéristiques de surface.....	32
4.2.2 Détermination du pH à charge nulle (pHPZC).....	33
4.3 Caractérisation structural du matériau synthétisé (Analyse FTIR)...	34
4.4 Tests d'adsorption	35
4.4.1 Paramètres influençant l'adsorption du BM	36
4.4.2 Représentation graphique du système d'adsorption (la surface de réponse)	37
4.4.3 Cinétique d'adsorption	38
Conclusion générale	41
Références Bibliographique.....	43
Résume :	50

Introduction

Introduction Générale

L'eau est un élément précieux indispensable à la vie. Cette ressource naturelle recouvre les trois quarts de notre planète, avec seulement 0,014% d'eau douce. Il s'agit des eaux superficielles (rivières, lacs et étangs). De plus, sa répartition étant non homogène à la surface du globe. Cette ressource représente à la fois un enjeu politique, économique et stratégique **(Benkaddour, 2018)**. Aujourd'hui, les ressources en eau douce sont exposées à diverses pollutions d'origine multiples : industrielle, urbaine et agricole, générant des dommages pour l'homme et pour son environnement (la faune et la flore). Cette menace a déclenché une prise de conscience dans le monde entier, et a poussé les chercheurs à s'intéresser à l'étude de l'état de contamination des milieux aquatiques. **(Benkaddour, 2018)**.

Les colorants constituent l'un des polluants majeurs ; une fois dilués dans l'eau, leur traitement peut s'avérer difficile en raison de leur origine synthétique et de leur structure moléculaire complexe, les rendant plus stables et moins biodégradables. **(Capon et Courilleu, 1999 ; Rangabhashiyam et al., 2013)**.

Les colorants organiques sont couramment utilisés dans de nombreuses activités industrielles tels que les teintures du cuir, du papier, du textile, du bois, de la soie, des plastiques, ainsi que dans les industries cosmétiques, alimentaires et pharmaceutiques. Le bleu de méthylène est l'un des colorants le plus utilisé dans la teinture de plusieurs supports, notamment la soie, le coton et le bois et pour la coloration temporaire du papier. Il est utilisé comme indicateur coloré redox, colorant histologique, antiseptique en traitement des plaies superficielles

Par contact, le BM est susceptible de provoquer des brûlures oculaires chez l'homme ou l'animal. L'inhalation induit des difficultés respiratoires et l'ingestion buccale provoque des nausées, des vomissements, transpiration et sueurs froides abondantes **(Kifuani et al., 2018)**.

L'élimination des colorants organiques ainsi que celles d'autres polluants organiques ou inorganiques des eaux usées s'avèrent donc nécessaire. Plusieurs techniques d'élimination des colorants organiques des eaux usées sont utilisées et incluent des méthodes biologiques chimiques et physiques. La plupart de ces méthodes sont coûteuses, exigent beaucoup d'énergie et produisent d'énormes quantités de boues ou génèrent des dérivés parfois plus toxiques que les produits initiaux eux-mêmes. Parmi les procédés de traitement des eaux polluées par les colorants organiques, l'adsorption s'avère être le plus efficace. **(Kifuani et al., 2018)**.

Dans cette optique, nos travaux de recherche se concentrent sur l'emploi de matériaux appropriés afin d'assurer le succès de cette méthode, en mettant particulièrement l'accent sur ceux

qui sont économiques, localement disponibles, hautement biodégradables et fabriqués de manière organique (**Bennani et al., 2010**).

La *Moringa Oleifera* (*MO*), communément appelé l'arbre à pilon, a fait l'objet d'une attention particulière en raison de son rôle dans le traitement de l'eau. Les graines de *MO* sont des adsorbants et des coagulants naturels efficaces, capables d'éliminer de l'eau des contaminants tels que les métaux lourds, les colorants et les agents pathogènes. Cette solution végétale est rentable, biodégradable et non toxique, ce qui en fait une alternative écologique aux coagulants chimiques. Son utilisation dans les pays en développement est particulièrement bénéfique, car elle constitue une méthode durable pour améliorer la qualité de l'eau et soutenir la santé publique (**Sané et al., 2022**).

Nous nous sommes ainsi intéressés dans le présent travail à développer un bioadsorbant potentiel à l'adsorption des colorants organiques en utilisant comme matériaux précurseurs les déchets des téguments de *MO*. La conversion de ces téguments en bioadsorbant potentiel constitue ainsi un moyen de valorisation de déchets et d'assainissement de l'environnement. L'évaluation du potentiel adsorbant du bioadsorbant a été faite en utilisant le bleu de méthylène (BM) comme adsorbant, et tester son efficacité dans la réduction de l'un des polluants difficilement biodégradables et persistants. Il consiste à synthétiser des nanoparticules de nature cellulosique à partir de déchets des graines de *MO* afin d'obtenir des produits biodégradables et facilement applicables dans le traitement des eaux, notamment pour la décoloration des rejets liquides issues des industries textiles. La nouveauté de ce travail est d'apporter une contribution dans ce domaine, en proposant un nouveau procédé de traitement des eaux colorées basé sur l'usage des nanoparticules organiques.

Ce travail est présenté sous forme de deux parties :

- La première partie est une revue bibliographique comprenant 3 chapitres :
 - Le chapitre 1 est focalisé sur quelques notions générales sur *la pollution* ;
 - Le chapitre 2 vise à étudier le processus d'adsorption et les différents adsorbants ;
 - Le chapitre 3 présente une description de la plante de *MO*.
- La deuxième partie comprend l'étude expérimentale composée de deux chapitres :
 - Le chapitre 4 décrit les matériaux et les différentes techniques d'analyse utilisés dans la synthèse de biomatériaux étudiées ainsi que les essais appliqués pour tester leur pouvoir adsorbants.
 - Le chapitre 5 présente les résultats obtenus et la discussion de ces derniers.

Enfin, une conclusion générale rassemble les principaux résultats de cette étude et les perspectives attendues.

Chapitre I

Généralités sur la pollution

Chapitre I

Généralités sur la pollution

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons quelques généralités sur les différents concepts de la pollution que nous jugeons nécessaires pour la réalisation du travail.

1.2 La pollution

La pollution désigne l'introduction de substances nocives ou d'éléments indésirables dans l'environnement, entraînant une altération de sa qualité et des effets néfastes sur les êtres vivants, les écosystèmes et les ressources naturelles. Ces substances polluantes peuvent avoir diverses origines telles que les activités industrielles, le transport, l'agriculture et les déchets. La pollution se manifeste sous différentes formes, notamment la pollution de l'air, de l'eau, du sol, sonore, lumineuse, etc. (**Chaffai et Mourdi, 2011**).

Nous avons plusieurs types de pollution dont chacun a des impacts spécifiques sur l'environnement et la santé humaine. Ces différents types de pollution interagissent souvent entre eux, amplifiant les effets néfastes sur l'environnement et la santé. Il est essentiel de mettre en œuvre des mesures de prévention et de lutte contre la pollution pour protéger notre planète et notre bien-être (**Chaffai et Mourdi, 2011**).

Dans ce qui suit, nous citerons les principaux types de pollution :

1.2.1 La pollution sonore

Prouvée par les bruits excessifs provenant des transports, des industries, des activités humaines, etc. une exposition prolongée au bruit peut avoir des effets néfastes sur la santé mentale et physique (**Chaffai et Mourdi, 2011**).

1.2.2 La pollution lumineuse

Elle est due à l'éclairage excessif et mal conçu qui perturbe les cycles naturels du jour et de la nuit, affectant la faune, la flore et la santé humaine (**Chaffai et Mourdi, 2011**).

1.2.3 La pollution visuelle

Elle est liée à la présence d'éléments visuels indésirables tels que les déchets, les infrastructures inesthétiques, les publicités excessives etc. (**Chaffai et Mourdi, 2011**).

1.2.4 La pollution atmosphérique

La pollution de l'air fait référence à la présence de quantités nocives ou excessives de substances dans l'air pouvant avoir des effets néfastes sur la santé humaine, l'environnement et les écosystèmes.

Les polluants atmosphériques courants comprennent le monoxyde de carbone, le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote, l'ozone, les composés organiques volatils et les particules en suspension. La pollution de l'air peut entraîner des maladies respiratoires, des problèmes cardiovasculaires, la dégradation de l'environnement et d'autres impacts négatifs tant sur la santé humaine que sur la planète (Aguilar Gomez et al., 2022).

1.2.5 La pollution du sol

Elle est causée par la décharge de déchets solides, les pesticides, les produits chimiques industriels, les hydrocarbures, etc. Cette pollution peut affecter la fertilité du sol, la croissance des plantes et contaminer les nappes phréatiques (Chaffai et Mourdi, 2011).

1.2.6 La pollution de l'eau

Elle est définie comme la contamination des cours d'eau, tels que les rivières, les lacs, les océans et les eaux souterraines, par des substances nocives ou des polluants. Ces polluants peuvent provenir de diverses sources, notamment des activités industrielles, des pratiques agricoles, des ruissellements urbains et une élimination inappropriée des déchets. La pollution de l'eau peut avoir des effets néfastes sur les écosystèmes aquatiques, la santé humaine et la qualité environnementale globale (Zahoor et al., 2023). Les polluants qui peuvent contaminer les sources d'eau comprennent :

1.3 Polluants chimiques

Tels que les pesticides, les engrais, les métaux lourds (comme le plomb, le mercure et le cadmium), les produits chimiques industriels et les médicaments (Zahoor et al., 2023).

1.4 Polluants nutritifs

Comme l'azote et le phosphore provenant des engrais et des eaux usées, qui peuvent entraîner l'eutrophisation et des proliférations algales nocives (Zahoor et al., 2023).

1.5 Polluants biologiques

Tels que les bactéries, les virus et les parasites provenant des eaux usées et des déjections animales, qui peuvent présenter des risques pour la santé humaine et la faune (Zahoor et al., 2023).

1.6 Sédiments

L'érosion du sol est due aux activités agricoles et aux chantiers de construction. Elle peut introduire des sédiments dans les cours d'eau, entraînant une turbidité et une dégradation de l'habitat (Zahoor et al., 2023).

1.7 Pollution thermique

Rejet d'eau chauffée provenant des processus industriels peut perturber les écosystèmes aquatiques en modifiant la température de l'eau et en réduisant les niveaux d'oxygène (**Zahoor et al., 2023**).

Il existe des approches disponibles pour éliminer les polluants de l'eau, chacune ayant ses mécanismes uniques et ses applications dans les processus de traitement de l'eau tels que : les méthodes physiques (Osmose inversée, Adsorption, Filtration...), les méthodes chimiques (Précipitation chimique, Échange d'ions, Oxydation...) et les méthodes biologiques (Biorémediation, Zones humides construites, Filtration biologique...) (**Kordbacheh et al., 2023**).

Chapitre II

Généralités sur l'adsorption

Chapitre II

Généralités sur l'adsorption

2.1 Définition de l'adsorption

L'adsorption est un phénomène de surface dans lequel des molécules ou des particules d'une substance sont retenues à la surface d'un matériau solide, Cette interaction se produit sans que les molécules ne pénètrent à l'intérieur du matériau adsorbant, mais plutôt en adhérant à sa surface. L'adsorption peut être utilisée dans divers domaines tels que le traitement de l'eau, la purification des gaz, la catalyse, et d'autres applications industrielles (Sakr et al., 2015).

D'un autre côté, l'absorption est le processus par lequel une substance est intégralement incorporée à l'intérieur d'un matériau. Dans ce cas, les molécules de la substance absorbée pénètrent à l'intérieur du matériau absorbant et sont dispersées à travers sa structure interne (Sakr et al., 2015).

La principale différence entre l'adsorption et l'absorption réside dans le fait que l'adsorption implique une fixation des molécules à la surface du matériau, tandis que l'absorption implique une pénétration des molécules à l'intérieur du matériau (Sakr et al., 2015).

2.2 Types d'adsorption

Il existe deux types d'adsorption selon le type de réaction établie au cours du processus :

2.2.1 Adsorption physique (ou physisorption) :

Ce type d'adsorption est principalement basé sur des interactions physiques telles que les forces de Van der Waals, les liaisons hydrogènes et les interactions électrostatiques faibles. La physisorption est réversible et dépend généralement de facteurs tels que la température et la pression. Elle est souvent observée avec des molécules non polaires (Sakr et al., 2015).

2.2.2 Adsorption chimique (ou chimisorption) :

Contrairement à la physisorption, l'adsorption chimique implique des réactions chimiques entre les molécules adsorbées et la surface du matériau adsorbant. Ces réactions peuvent entraîner la formation de liaisons chimiques entre les molécules adsorbées et le matériau adsorbant. La chimisorption est généralement plus spécifique et moins réversible que la physisorption. Ces deux types d'adsorption jouent un rôle crucial dans de nombreux processus industriels, environnementaux et biologiques (Sakr et al., 2015).

2.3 Les applications de l'adsorption dans l'industrie et la vie quotidienne

L'adsorption est largement utilisée dans divers domaines de l'industrie et de la vie quotidienne en raison de ses capacités de purification, de séparation et de traitement. Voici quelques principales applications de l'adsorption (**Sakr et al., 2015**):

- **Purification de l'eau** : L'adsorption est utilisée pour éliminer les polluants de l'eau potable et des eaux usées. Des matériaux adsorbants tels que les charbons actifs qui sont couramment utilisés pour piéger les polluants organiques, les métaux lourds et d'autres substances indésirables.
- **Purification des gaz** : Dans l'industrie chimique et pétrochimique, l'adsorption est utilisée pour purifier les gaz en éliminant les impuretés telles que le dioxyde de carbone, le soufre et d'autres composés indésirables.
- **Catalyse hétérogène** : Certains catalyseurs fonctionnent par adsorption des réactifs sur leur surface, favorisant ainsi les réactions chimiques. Cette application est courante dans l'industrie chimique pour la production de divers produits chimiques.
- **Stockage d'énergie** : Certains matériaux adsorbants sont utilisés pour stocker de l'énergie, notamment dans les batteries et les super-condensateurs.
- **Séparation des gaz** : L'adsorption est utilisée dans les processus de séparation des gaz pour isoler et purifier des gaz spécifiques à partir de mélanges gazeux.
- **Applications médicales** : L'adsorption est utilisée dans la purification des médicaments, la filtration du sang et d'autres applications médicales.
- **Dépollution des sols** : L'adsorption est utilisée pour éliminer les contaminants des sols et des eaux souterraines, contribuant ainsi à la dépollution de l'environnement.

Ces applications démontrent l'importance de l'adsorption dans de nombreux secteurs de l'industrie et de la vie quotidienne pour des processus de purification, de séparation et de traitement efficaces.

2.4 Les différents types d'adsorbants

La nature des matériaux adsorbants peut déterminer la nature et l'efficacité du processus d'adsorption. Il existe plusieurs types de matériaux adsorbants selon leur nature. Nous pouvons distinguer :

☞ **Les matériaux adsorbants inorganiques** : Ils jouent un rôle crucial dans l'élimination des polluants gazeux de l'environnement. Les matériaux inorganiques sont des matériaux qui ne contiennent pas de composés organiques et qui sont généralement d'origine minérale. Ces matériaux sont souvent caractérisés par des liaisons ioniques ou covalentes entre les atomes, et ils peuvent avoir une large gamme d'applications dans divers domaines tels que la chimie, la physique,

l'ingénierie des matériaux, et l'environnement. Les matériaux inorganiques comprennent des substances telles que les métaux, les céramiques, les verres, les minéraux, les oxydes, les sulfures, les nitrures, les carbures, les silicates, les zeolites, les MOFs, etc. Ces matériaux sont souvent utilisés pour leurs propriétés spécifiques telles que la conductivité électrique, la résistance mécanique, la résistance à la chaleur, la porosité, la catalyse, et bien d'autres (Asim et al., 2022).

Ceci est le cas du Zéolite, des argiles, des cadres métallo-organiques et des matériaux siliceux poreux. Ces matériaux sont utilisés dans diverses applications pour réduire le bruit et améliorer le confort acoustique des environnements. Voici quelques exemples de matériaux silencieux poreux couramment utilisés (Asim et al., 2022).

- **Laine minérale** : La laine minérale, telle que la laine de roche ou la laine de verre, est un matériau isolant poreux utilisé pour l'isolation acoustique des bâtiments.
- **Mousse acoustique** : Les mousses acoustiques, telles que la mousse de polyuréthane ou la mousse de mélamine, sont des matériaux légers et poreux utilisés dans les studios d'enregistrement, les salles de cinéma et les salles de concert pour absorber les sons.
- **Panneaux de fibres** : Les panneaux de fibres acoustiques, tels que les panneaux de fibres de bois, sont des matériaux poreux utilisés pour absorber les sons et réduire l'écho dans les espaces intérieurs.
- **Matériaux poreux composites** : Certains matériaux composites poreux, tels que les composites à base de polymères et de particules poreuses, sont conçus pour combiner des propriétés d'absorption acoustique avec d'autres caractéristiques mécaniques.

☞ **Les matériaux organiques** : Les matériaux organiques sont des substances qui contiennent des atomes de carbone liés à des atomes d'hydrogène, ainsi qu'à d'autres éléments tels que l'oxygène, l'azote, le soufre et les halogènes. Ces matériaux sont dérivés d'organismes vivants ou de leurs sous-produits et se caractérisent par leurs structures moléculaires complexes. Les matériaux organiques jouent un rôle crucial dans divers domaines tels que la chimie, la biologie, la science des matériaux et la science de l'environnement en raison de leurs propriétés et applications diverses (Sabzehmeidani et al., 2021).

Ceci est le cas du charbon activé (AC), du graphène, des nanotubes de carbone (CNTs), des nanofibres de carbone (CNFs,), des Biochars (BC) et des aérogels de carbone (CAs).

☞ **Les adsorbants biologiques végétaux** : Les gommages végétales naturelles ont été mises en avant comme des matériaux potentiellement efficaces pour la préparation de matériaux d'adsorption respectueux de l'environnement, destinés à l'élimination de divers contaminants. Ceci est le cas de la gomme de guar, de la gomme de xanthane, de la pectine, du carraghénane, de la gomme de tragacathe, et de la gomme de karaya (Ge et al., 2022).

2.5 Les matériaux adsorbants les plus efficaces pour différentes applications

Les matériaux adsorbants les plus performants varient selon l'application précise et les contaminants à éliminer. Toutefois, certains matériaux sont généralement reconnus pour leur efficacité dans divers contextes d'adsorption (**Mecabih et al., 2006**).

2.5.1 Charbon actif

Il est couramment utilisé pour capturer une variété de polluants organiques, produits chimiques, métaux lourds et composés organiques volatils présents dans l'eau et l'air (**Mecabih et al., 2006**).

- **Bentonite modifiée** : La bentonite, modifiée par des métaux tels que le fer (Fe), l'aluminium (Al) et le cuivre (Cu), s'avère hautement efficace pour extraire les matières organiques des eaux usées urbaines, grâce à ses capacités d'adsorption élevées.
- **Oxydes métalliques** : Les oxydes métalliques, comme l'oxyde de fer (Fe), se révèlent efficaces dans l'adsorption de divers polluants organiques et inorganiques présents dans l'eau.
- **Nanomatériaux** : tels que les nanotubes de carbone, les nanoparticules d'oxydes métalliques et les nanomatériaux polymériques, sont de plus en plus étudiés pour leur grande surface spécifique et leurs propriétés d'adsorption améliorées.
- **Résines échangeuses d'ions** : Ces dernières sont utiles pour l'adsorption sélective d'ions spécifiques dans l'eau, notamment les métaux lourds et les ions inorganiques.

En somme, le choix du matériau adsorbant le plus approprié dépend de la nature des contaminants à éliminer, des conditions de l'application et des objectifs de traitement particuliers (**Mecabih et al., 2006**).

2.6 Facteurs influençant le processus d'adsorption

De nombreux éléments peuvent impacter le déroulement du processus d'adsorption, comprenant :

- **Caractéristiques du matériau adsorbant** : La surface spécifique, la charge, la porosité et la composition chimique du matériau adsorbant sont des paramètres déterminants son efficacité (**Mecabih et al., 2006**).
- **Propriétés des adsorbats** : La taille, la polarité, la charge et la concentration des substances à adsorber influent sur leur interaction avec le matériau adsorbant (**Mecabih et al., 2006**).
- **pH de la solution** : Le pH modifie la charge de surface du matériau adsorbant et la spéciation des adsorbats, impactant ainsi le processus d'adsorption (**Mecabih et al., 2006**).

- **Température** : Les variations de température influencent la cinétique de l'adsorption et les interactions moléculaires entre le matériau adsorbant et les adsorbats (**Mecabih et al., 2006**).
- **Concentration des adsorbats** : Une augmentation de la concentration des adsorbats peut accroître la capacité d'adsorption jusqu'à saturation (**Mecabih et al., 2006**).
- **Durée de contact** : Le temps d'interaction entre les adsorbats et le matériau adsorbant affecte le taux d'adsorption et l'atteinte de l'équilibre (**Mecabih et al., 2006**).
- **Interactions chimiques** : Les liaisons ioniques, les forces de van der Waals et les interactions hydrophobes entre le matériau adsorbant et les adsorbats jouent un rôle crucial dans l'efficacité de l'adsorption (**Mecabih et al., 2006**).

En tenant compte de ces variables, il est possible d'optimiser les conditions d'adsorption pour maximiser son efficacité (**Mecabih et al., 2006**).

2.7. La cinétique d'adsorption et les isothermes d'adsorption

La cinétique d'adsorption et les isothermes d'adsorption sont des aspects importants de l'étude de l'adsorption des gaz, tels que le CO₂, et d'autres polluants sur des matériaux adsorbants comme le charbon activé (**Jedli et al., 2023**).

2.7.1. Cinétique d'adsorption :

La cinétique d'adsorption étudie la vitesse à laquelle un polluant (adsorbat) est adsorbé sur la surface d'un matériau adsorbant (**Jedli et al., 2023**). Différents modèles cinétiques, tels que le modèle pseudo-premier ordre, de pseudo-second ordre, le modèle LDF (Linear Driving Force), etc... sont utilisés pour décrire la cinétique d'adsorption des polluants (**Jedli et al., 2023**).

☞ **Isothermes d'adsorption** : Les isothermes d'adsorption décrivent la relation entre la quantité de gaz adsorbée à l'équilibre et la pression du gaz à une température donnée. Il existe plusieurs isothermes d'adsorption (**Jedli et al., 2023**).

☞ **Isotherme de Langmuir** : Le modèle de Langmuir est souvent utilisé pour ajuster les données expérimentales des isothermes d'adsorption, montrant une bonne concordance avec les résultats expérimentaux dans l'étude mentionnée (**Jedli et al., 2023**).

$$Q_e = \frac{Q_{\text{ax}} \cdot KL \cdot C_e}{1 + KL \cdot C_e} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$RL = \frac{Q_{\text{ax}}}{1 + KL \cdot C_0} \quad (\text{Eq. 2})$$

Q_{ax} : quantité maximale adsorbée en mg.g⁻¹

C_0 : concentration initiale (en mg.L⁻¹),

KL : constante de Langmuir.

☞ **Modèle de Freundlich** : L'équation de Freundlich est généralement bien adaptée pour décrire l'équilibre en phase aqueuse. Sa formule linéaire est donnée par :

$$\log(Q_e) = \log(KF) + 1 \times n \times \log(C_e) \quad (\text{Eq. 3})$$

Q_e : représente la quantité d'adsorbant fixé à l'équilibre par l'adsorbant, (mg/g),

C_e : est la concentration résiduelle à l'équilibre (mg/L),

KF : et n sont les constantes de Freundlich liées à l'adsorption et à l'affinité respectivement.

Chapitre III
Généralités sur
Moringa oleifera

Chapitre III

Généralités sur *Moringa oleifera*

3.1 Description botanique et répartition géographique

Moringa oleifera (MO) est communément appelée « l'arbre de vie » ou « arbre merveilleux », connue en botanique sous l'appellation de « *Moringa oleifera* Lam ». Elle est considérée comme une plante médicinale importante en raison de ses nombreux avantages thérapeutiques (**Yadav and Mathur, 2023**).

Le Moringa est un arbre ou un arbuste (**Fig. 1(a)**) originaire des régions subhimalayennes du Nord de l'Inde et du Pakistan. Il a été introduit dans toutes les régions tropicales et subtropicales et s'est naturalisé dans de nombreux pays africains. Il est largement cultivé en Éthiopie, dans les îles du Pacifique, en Floride, au Soudan, dans les Caraïbes, aux Philippines, en Afrique de l'Ouest, en Afrique du Sud, en Asie et en Amérique latine. Il est donc très populaire et porte plusieurs noms à travers le monde. Le nom générique vient du nom tamoul morunga (**Outani et al., 2023**). Mais comme chaque endroit possède un type de sol distinct, la quantité de nutriments diffère d'un endroit à l'autre (**Yadav and Mathur, 2023**).



Figure 1 : Les différentes parties de MO ;

(a) : L'arbre, (b) : Les feuilles, (c) : Les fleurs, (d) : Les fruits, (e) : Les graines

L'arbre lui-même est plutôt élancé avec des branches tombantes qui atteignent environ 10 m de hauteur. Cependant, il est normalement coupé chaque année à un mètre ou moins, et laissé

repousser afin que les gousses et les feuilles (**Fig. 1 (b)**) restent à portée (**Bichi., 2013**). Les vieilles feuilles jaunissent et tombent au pied de l'arbre. Chaque feuille mesure jusqu'à 50 cm de longueur, souvent jusqu'à environ 90 cm de longueur (**Outani et al., 2023**).

En saison de floraison (Les périodes exactes de floraison peuvent varier en fonction des conditions climatiques locales) l'arbre est enveloppé de fleurs blanc crèmes parfumées au miel (**Fig. 1(c)**), disposées en panicules tombantes de 10 à 30 cm de longueur. Les fleurs sont pollinisées par les insectes et nécessitent un grand nombre de visites d'insectes. Les abeilles charpentières étant les hôtes les plus courants. Les fleurs (**Fig. 1(c)**) et les fruits (**Fig. 1(d)**) (gousses) peuvent être produits deux fois par an, bien que dans de nombreux endroits, la floraison et la fructification se produisent toute l'année. A partir du sixième au huitième mois, l'arbre de *MO* commence à produire des fruits (**Yadav and Mathur, 2023**). Ces fruits sont initialement vert clair, minces et tendres, pour finalement devenir vert foncé et fermes. Selon le génotype, ils mesurent jusqu'à 120 cm de longueur. Bien que la plupart soient droites, quelques-unes sont ondulées et certaines bouclées. En coupe transversale, la plupart sont rectangulaires, mais un certain nombre sont triangulaires et certains sont ronds. À pleine maturité, les graines séchées sont entourées d'une coquille légèrement lignifiée (boisée) avec trois ailettes (**Bichi, 2013**).

3.1.1 Classification botanique

L'arbre de *Moringa* fait partie de la famille des *Moringaceae* qui comprend 13 espèces dont *MO* est la plus importante (**Bichi, 2013**). Voici la classification botanique de l'arbre de *MO* (**Yadav et Mathur, 2023**).

Royaume	Plantes
Sous-royaume	Trachéobionte
Super division	Spermatophytes
Division	Magnoliophyta
Classe	Magnoliopsida
Sous-classe	Dilleniidae
Commande	Capparales
Famille	Moringaceae
Genre	<i>Moringa</i>

Sous cette appellation, il existe plusieurs espèces apparentées à *MO*. Elles sont présentées sur le **Tableau 1**.

Tableau I : Quelques espèces de *Moringa* et leur origine (Outani et al., 2023).

Espèces	Région d'origine
<i>Moringa arborea</i> Verdc.	Kenya
<i>Moringa Rivae</i> Chiov.	Kenya et Ethiopie
<i>Moringa stenopetala</i> Cufod.	Kenya et Ethiopie
<i>Moringa borziana</i> Mettei.	Kenya et Somalie
<i>Moringa longituba</i> Engl.	Kenya et Somalie
<i>Moringa pigmeae</i> Verdc.	Somalie
<i>Moringa ruspoliana</i> Engl.	Kenya, Ethiopie et
<i>Moringa ovalifolia</i> Dinter and A. Berger	Namibie et Angola
<i>Moringa drouhardii</i> Jum.,	Madagascar
<i>Moringa hildebrandtii</i> Engl.	Madagascar
<i>Moringa perigrina</i> Forssk.	Saudi Arabia, Red
<i>Moringa concanesis</i> Dalzel et A. Gibson	Sub-Himalayan
<i>Moringa oleifera</i> Lam.	Sub-Himalayan

Le Conseil national de la recherche (2006) a observé que, parmi les 14 espèces de *Moringa*, seule *MO* a été étudiée en profondeur, tandis que les autres espèces restent largement inconnues. Ces autres espèces pourraient potentiellement offrir des bénéfices alimentaires, des actions floculantes, des antibiotiques, des huiles ou du bois de qualité supérieure (**Bichi, 2013**).

3.2 Conditions de plantation

L'arbre pousse bien dans des climats allant du tropical chaud au niveau de la mer au subtropical jusqu'à une altitude de 3 000 pieds. La température maximale pour la croissance et le développement de l'arbre varie de 38 à 48°C et au moins de -1 à 3°C. La texture du sol, plutôt sablonneuse, favorise la culture du *Moringa*. L'arbre *Moringa* a été trouvé sous une forme sauvage et cultivée dans toutes les plaines, en particulier dans les haies et les cours intérieures, il prospère mieux sous le climat tropical et est abondant près des lits sablonneux des rivières et des ruisseaux. Il pousse bien dans les sols au pH légèrement acide ou alcalin, avec des précipitations annuelles de 250 à 3 000 mm (**Devkota et Bhusal, 2020**), et possède une racine pivotante tubéreuse, dont la présence aide à expliquer la tolérance de l'espèce aux conditions de sécheresse (**Bichi, 2013**). Dans ce contexte, il a été prouvé que la composition physicochimique et la richesse en métabolites dans les différentes parties de l'arbre et spécialement les graines et les feuilles de *MO* varie selon la situation géographique, le sol, l'exposition au soleil et les conditions climatiques (**Brilhante et al., 2017**).

3.3 Composition physicochimique et l'importance nutritionnelle

L'arbre de *MO* est reconnu pour ses multiples usages nutritionnels, médicaux et industriels. C'est une option alimentaire abordable et fiable, avec presque toutes ses parties utilisées pour leurs nutriments essentiels. Les feuilles de *MO* sont particulièrement riches en bêta-carotène, minéraux, calcium et potassium (**Yadav and Mathur, 2023**).

Les racines de l'arbre, bien que consommables, sont toxiques en raison de leurs composants alcaloïdes et de la spirochine, et sont donc évitées. Les feuilles, considérées comme la partie la plus sûre à consommer, sont riches en minéraux et vitamines. Toutefois, le calcium présent dans les feuilles est sous forme de cristaux d'oxalate de calcium, non assimilables par l'organisme. Contrairement à de nombreux légumes, les feuilles de l'arbre conservent leurs nutriments lorsqu'elles sont cuites, avec une teneur en fer qui triple après cuisson ou réduction en poudre. Elles contiennent également dix-sept types d'acides gras et tous les acides aminés essentiels. Il est recommandé aux femmes enceintes de consommer ces feuilles en raison de leur haute teneur en folates et en oméga-3 et oméga-6, importants pour la santé (**Camelleri et Blundell., 2024**).

Les constituants chimiques des tiges, feuilles, fleurs, gousses et graines de *MO* ont été analysés pour détecter la présence de composés bioactifs, démontrant la prédominance de métabolites secondaires, tels que les acides phénoliques, l'acide gallique, l'acide ellagique, l'acide chlorogénique, l'acide férulique, les glucosinolates, les flavonoïdes, la quercétine, la vanilline et le kaempférol, qui possèdent des propriétés nutritionnelles, pharmaceutiques et/ou antimicrobiennes (**Brilhante et al., 2017**).

Des études ont révélé la présence d'environ 110 substances chimiques bioactives dans *MO*, chacune d'entre elles ayant un effet protecteur ou thérapeutique (**Camelleri et Blundell., 2024**). La composition phytochimique des différentes parties est représentée sur le **Tableau 2**.

Tableau II. La phytochimie des différentes parties de *MO*

La partie de <i>MO</i>	Critères phytochimiques
Feuilles	Acide n-hexadécanoïque, acide tétradécanoïque, acide cis-vaccénique, acide octadécanoïque, chlorure de palmitoyle, bêta-l-rhamnofuranoside, 5- <i>O</i> -acétyl-thio-octyle, gamma-sitostérol et pré-gna-7-diène-3-ol-20-one.
Radicule	4-(α -L-rhamnopyranosyloxy)- benzylglucosinolate et benzylglucosinolate.
Racines	Spirochine et anthonine.
Pédoncule	Bêta-sitostérone, vanilline, 4-hydroxyméline, β -sitostérol et acide octacosanoïque.

Tige	Moringine, moringinine, 4-hydroxymelleine, acide octacosanoïque et β -sitostérol.
Gomme	<i>Leucodelphinidine-3-O-B-D-galactopuranosy (1- >4)-O-B-D-glucopyranoside</i> , L- arabinose, D-mannose, D-xylose, et D-galactose, L-rhamnose et acide D-glucuronique.
Fleurs	Rhamnétine, isoquercitrine et kaempféritrine.
Cosse	Isothiocyanate, thiocarbamates, nitrile, O-[2-hydroxy-3-(2-heptenyloxy)]-propyl undecanoate, méthyl-p-hydroxybenzoate et O-éthyl-4-[(α -l-rhamnosyloxy)-benzyl] carbamate.
Semences	benzylglucosinolate, 4-(α -l-rhamnopyranosyloxy)-benzylglucosinolate, 4-(α -l-rhamnosyloxy) benzylisothiocyanate, 4-(α -lrhamnosyloxy) phénylacétonitrile, et O-éthyl-4-(α -lrhamnosyloxy) benzyl carbamate.

3.4 application et utilisations de l'arbre de *MO*

La *MO* est considérée comme écologiquement viable pour ses nombreuses applications comme alternative aux produits chimiques, réduisant les risques associés à l'accumulation de composés chimiques non biodégradables nocifs pour la santé humaine, animale et environnementale. Parmi les applications potentielles de la plante, les propriétés coagulantes, floculantes et absorbantes sont remarquables par leur capacité à nettoyer l'eau contaminée, en réduisant sa turbidité, sa toxicité et sa charge microbienne (**Brilhante et al., 2017**).

Les peuples du monde entier utilisent *MO* depuis l'Antiquité pour ses propriétés thérapeutiques. Presque toutes les parties de la plante (feuilles, gousses, écorce, gomme, fleurs, graines, huile de graines et racines) sont utilisées pour traiter diverses maladies par exemple les inflammations, les maux de tête et la bronchite, les calculs rénaux, les maladies du foie et les douleurs auriculaires et dentaires, les blessures et infections cutanées, la fièvre les tumeurs, les problèmes de prostate et de vessie, les nourrissons malnutris...etc (**Pareek et al., 2023**).

Les graines de *MO* sont prometteuses comme supplément alimentaire. La farine de graines de *MO* enrichit la farine de blé pour produire du pain, des biscuits et des cookies, tandis que l'extrait de graines sert d'agent épaississant pour le yaourt (**Gautier et al., 2022**).

L'huile de *MO* peut remplacer l'huile d'olive dans l'alimentation et a des applications non alimentaires, comme le biodiesel, les cosmétiques et les lubrifiants pour machines fines (**Leone et al., 2016**).

Les boues produites par la coagulation avec *MO* sont non seulement inoffensives mais aussi quatre à cinq fois moins que les boues chimiques produites par coagulation à l'alun. Un avantage supplémentaire de l'utilisation de coagulants dérivés de *MO*. Les solides résiduels de la graine de

MO peuvent être utilisés comme aliments pour animaux et engrais, tandis que l'enveloppe de la graine peut être activée et utilisée comme adsorbant. La graine peut être activée et utilisée comme adsorbant. Le coagulant est ainsi obtenu à un coût net extrêmement faible, voire nul. En termes d'applications de traitement d'eau, les graines de *MO* sous diverses formes extraites et purifiées se sont avérées efficaces pour éliminer les matières en suspension (**Vieira et al., 2009**).

3.4.1 Graines de *Moringa oleifera*

Les graines de *MO* (**Fig. 1(e)**) sont globuleuses, d'environ 1 cm de diamètre. Elles sont à trois angles, avec un poids moyen d'environ 0.3 g, à 3 ailes produites à la base de la graine jusqu'à l'apex de 2 à 2.5 cm de longueur et de 0.4 à 0.7 cm de largeur, l'amande représente 70 à 75 % du poids (**Leone et al., 2016**).

L'huile est la principale composante de la graine et représente 36.7 % du poids de la graine. L'huile peut être extraite presque entièrement par extraction au solvant, généralement au n-hexane, alors qu'un rendement moindre est obtenu par extraction par pression à froid. En fait, seulement 69 % (en moyenne) de l'huile totale contenue dans les graines peut être extraite par pression à froid. Cependant cette méthode est plus écologique. À côté de l'huile, la graine a une teneur élevée en protéines, en moyenne 31.4 %, tandis que les teneurs en glucides, fibres et cendres sont respectivement de 18.4 %, 7.3 % et 6.2 %. De plus, comme la fraction protéique, les graines de *MO* ont une teneur élevée en méthionine et en cystéine, proche de celle rapportée dans le lait et les œufs. Par conséquent, ils peuvent être consommés avec des légumineuses déficientes en acides aminés soufrés. De plus, les graines de *MO* semblent exemptes d'activité d'inhibitrice de trypsine et d'uréase, confirmant la haute digestibilité des protéines (93 %) des graines de *MO* (**Leone et al., 2016**). Le tableau ci-dessous montre la composition chimique de la graine de *MO*.

Tableau III. Composition chimique des graines de *MO* (g/100 g de poids sec) (**Leone et al., 2016**).

« <i>Moringa oleifera</i> Graines			
Nutriments			
	Moyenne	SD	Range
Graisse	36.7	2.8	(34.7–40.4)
Protéines	31.4	1.3	(29.4–33.3)
Glucides	18.4	1.4	(16.5–19.8)
Fibre	7.3	0.5	(6.8–8.0)
Cendre	6.2	0.9	(4.4–6.9)
Humidité	7.0	1.2	(5.7–8.9)

Les études sur les graines sont très accentuées sur la purification de l'eau et l'extraction de l'huile (**Saa et al., 2019**). Le traitement des eaux usées avec des graines de *MO* est une alternative économique et efficace au sulfate d'aluminium, particulièrement bénéfique dans les zones rurales.

Cette méthode évite l'accumulation de résidus chimiques, maintient un pH optimal de l'eau après la réduction de la turbidité, et ne nécessite pas d'équipements sophistiqués. Les boues et les graines utilisées peuvent également servir de biofertilisants, offrant un avantage supplémentaire pour les zones rurales (**Brilhante et al., 2017**).

Chapitre IV

Matériel et méthodes

Chapitre IV

Matériel et méthodes

4.1 Introduction

L'être humain a toujours utilisé des colorants pour ses vêtements, sa nourriture et la décoration de son habitat en utilisant des teintures extraites des plantes et des animaux ainsi que des teintures synthétiques. L'utilisation de ces colorants a engendré la présence des résidus de colorants dans les effluents urbain et industriel. En raison du poids moléculaire élevé des colorants et de leurs structures complexes, leur biodégradabilité est très limitée (**Pala et Tokat, 2002 ; Kim et al., 2004 ; Gao et al., 2007**). Les processus d'élimination de ces colorants deviennent très difficiles. Ces effluents provoquent, dans les réacteurs biologiques, la création de grandes quantités de sels inorganiques, d'acides et de bases, ce qui augmente les coûts de traitement (**Gholami et al., 2001 ; Babu et al., 2007**). Le bleu de méthylène est l'un des colorants à utilisation abondante et à traitement difficile.

La technique d'adsorption est la plus favorable et la plus utilisée pour éliminer les colorants textiles (**Ahmed et Dhedan, 2012**). Ainsi, beaucoup de travaux de recherches se sont basés sur l'utilisation de matériaux appropriés pour améliorer l'élimination des colorants, principalement ceux qui sont peu coûteux, disponibles localement, hautement biodégradables et, surtout, issus de l'agriculture (**Karim et al., 2010**).

L'objectif de ce travail est de valoriser les épiluchures des graines de *MO* qui sont également utilisées dans le processus de traitement des eaux par coagulation-floculation. Un nouveau matériau à base des épiluchures des graines de *MO* a été synthétisé puis testé sur l'élimination du bleu de méthylène par adsorption.

4.2 Lieu de travail

Le travail expérimental a été réalisé au niveau du laboratoire d'écologie au bloc n°12 au sein de l'université de Bejaia. Le travail de caractérisation de la matière première ainsi que le matériau obtenu a été réalisée au niveau du laboratoire de génie des procédés au bloc n°11 de l'université de Bejaia. La synthèse du matériau a été réalisée au niveau du Laboratoire de Biomathématique Biophysique Biochimie et Scientométrie (LBBBS) à l'université de Bejaia.

4.3 Importance et caractéristiques du bleu de méthylène

Le bleu de Méthylène (BM) est un colorant organique, cationique. Il est caractérisé par une taille moyenne connue de 15 Å, avec une structure aromatique compliquée (**Rafatullah et al., 2010 ; Hamed et al., 2014**). La formule chimique du BM (ou chlorure de méthylthioninium) est le chlorure de bis-(diméthylamino)-3,7 phénazathionium, dont la formule empirique est $C_{16}H_{18}ClN_3S$. **La Figure 2** montre la structure chimique du BM. Toutes les propriétés et les caractéristiques physicochimiques du colorant sont résumées dans le **Tableau 4**.

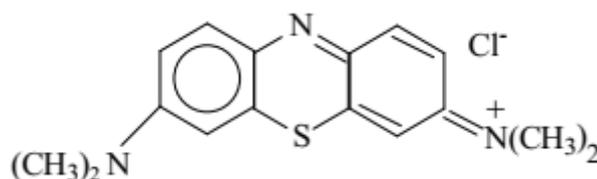


Figure 2. Structure du bleu méthylène

Le choix du BM pour cette étude répond également à :

- La grande solubilité dans l'eau ;
- La faible pression de vapeur ;
- L'analyse au spectrophotomètre UV/visible ;
- La structure cationique.

Tableau IV. Caractéristiques physico-chimiques du bleu de méthylène

Nom commun	Bleu de Méthylène
Poids molaire	319.85 g/mol
Solubilité dans l'eau	Haute
Utilité	Désinfectant et colorant en bactériologie
Pression de vaporisation	Faible

a. Préparation de la solution de méthylène bleu

Le BM, pris comme polluant modèle, est utilisé sans aucune purification préalable. Les solutions sont préparées en dissolvant des quantités de colorant dans de l'eau distillée. La solution est préparée en dissolvant 100g de BM dans 1000ml d'eau distillée. La courbe d'étalonnage a été établie par dilutions successives en allant d'une solution mère de 0.01mg/L. Les mesures d'absorbance ont été effectuées à l'aide d'un spectrophotomètre UV/visible de type UV-3100PC avec une longueur d'onde maximale de 664 nm.

4.4 Caractérisation du déchet de graines de *MO*

Les déchets de graines de *MO* (pelures) ont été caractérisés par FTIR dans le laboratoire de chimie de la faculté de technologie afin de confirmer leur nature cellulosique. Cela constitue la base du choix du type de matériaux synthétisés par la suite.

4.4.1 Nanotechnologies

Parmi les diverses procédures de traitement physique et chimique, l'adsorption est une méthode efficace pour éliminer les colorants des eaux usées (McRobb et Holt., 2008). En raison de leur rapport surface/volume élevé, les nanoparticules sont apparues comme ayant le plus grand potentiel pour l'adsorption des produits chimiques organiques, en particulier les colorants, dans les eaux usées (Hernandez *et al.*, 2015 ; Ahmadi *et al.*, 2017). C'est pourquoi l'intérêt pour la recherche et le développement dans le domaine des nanotechnologies s'est considérablement accru (Igwebe *et al.*, 2018). Les nanoparticules sont connues pour leurs qualités exceptionnelles, notamment leur surface spécifique, leur petite taille, leur grande stabilité, leur grande réactivité et leur chimie diversifiée pour une fonctionnalisation ultérieure (Ihsanullah, 2020).

4.4.2 Synthèse du matériau

Les Nanoparticules (NPs) synthétisées dans cette étude sont de nature cellulosique. La synthèse des NPs implique plusieurs étapes telles que l'extraction de la matière cellulosique, les processus de prétraitement et la préparation finale des NPs (Fig. 7).

Les enveloppes des graines de *MO* ont été broyées à l'aide d'un broyeur électrique. La poudre obtenue a ensuite été tamisée avec un tamis de 500µm pour obtenir une poudre homogène.

Afin d'extraire la cellulose des enveloppes de graines de *MO* en utilisant des techniques alcalines et de blanchiment, les hémicelluloses et la lignine ont été extraites séquentiellement de la matière première (Moriani *et al.*, 2016 ; Vallejos *et al.*, 2016 ; Shaheen & Emam, 2018). Pour ceci :

- La poudre d'enveloppes de graines de *MO* a été bouillie dans de l'eau à 100°C.
- Le traitement alcalin a été effectué en utilisant 100g/L de la poudre de *MO* bouillie avec une solution de NaOH 2,0 M pendant 2h à 80°C sous agitation mécanique.
- L'échantillon alcalin restant a ensuite été blanchi pendant 1 heure à un pH de 4,5 et à 100 °C en utilisant du chlorure de sodium (2,5% w/v).
- Lavage et séchage à l'étuve.
- 10 g de cellulose pure ont été mis en suspension dans 10 ml d'acide sulfurique.
- Afin de faciliter l'hydrolyse, cette suspension a été maintenue à 60 °C sous ultrasons pendant 60 min ;

- Lavage à l'eau froide
- Centrifugation à 5000 rpm pendant 20min.
- Dialyse de la solution obtenue en utilisant des tubes (MWCO 10 000).

Lyophilisation sous forme de poudre à $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ et 0,1 BMar, une pression qui n'endommage pas la nanostructure de la cellulose.



Figure 3. *Étapes de synthèse du matériau : (a) : broyage de la coque de MO, (b) : Tamisage de la poudre de MO, (c) : ébullition du mélange eau-poudre, (d) : séchage du mélange, (e) : traitement avec NaOH et NaCl, (f) : filtration ; (g) : broyage après séchage de la poudre blanchie, (h) : traitement ultra-sons, (i) : dialyse, (j) : stockage après lyophilisation.*

4.5 Caractérisation du matériau

La caractérisation physicochimique du matériau obtenu a été effectuée par la détermination de la masse apparente (ρ_a), de la masse réelle des adsorbants (ρ_r), de la porosité des adsorbants et du point de charge zéro (pH_{PZC}). Du point de vue structural, les groupements fonctionnels du matériau ont été déterminés par analyse spectroscopique infrarouge à transformé de Fourier (FTIR).

4.5.1 La Masse apparente (ρ_a)

0,5 g de NPs a été versé séparément dans un cylindre gradué. Le volume couvert par chaque matrice a été noté. Après avoir été pesée, la masse apparente est calculée à l'aide de l'équation 4 (Chaouche, 2014).

$$\rho_a = \frac{m_1}{V_t} \quad (\text{Eq. 4})$$

Où m_1 : Masse du matériau (g)

V_t Volume apparent (cm^3)

4.5.2 La Masse réelle de l'adsorbant (ρ_r)

0,2 g de l'adsorbant étudié (NPs) est placé dans un pycnomètre taré. Il est ensuite rempli de méthanol (V_m) jusqu'à ce qu'un volume total (V_t) soit atteint. V_t correspond à la masse totale. La masse réelle est calculée selon l'équation 5 :

$$\rho_r = \frac{m_1}{V_t} \quad (\text{Eq. 5})$$

Le volume de méthanol est calculé comme suit selon l'équation 6 :

$$V_m = \frac{m_2}{\rho_M} \quad (\text{Eq. 6})$$

Le volume du matériau est calculé selon l'équation 7 :

$$V_1 = V_t - V_m \quad (\text{Eq. 7})$$

m_1 : Masse du matériau (g)

m_2 : Masse du méthanol (g/mol)

V_r : Volume réel du matériau (cm^3)

V_t : Volume total du pycnomètre (cm^3)³

ρ_M : Masse volumique du méthanol (g/cm^3)

V_m : Volume de méthanol (cm^3)

V_1 : Volume du matériau (cm^3)

4.5.3 La porosité de l'adsorbant

La porosité de l'adsorbant est calculée à partir des masses apparente et réelle selon l'équation 8 :

$$\varepsilon = 1 - (\rho_{app} - \rho_{réelle}) \quad (\text{Eq. 8})$$

4.5.4 Le point de charge zéro du pH (pHpzc)

Le pHpzc est un paramètre important pour caractériser les adsorbants. Il est utilisé pour déterminer la charge de surface. Il a été examiné selon la méthode standard. Pour ce faire, 250 ml

de solution de NaCl 0,01 M comme électrolyte ont été placés dans un récipient. Ensuite, dans 6 fioles Erlenmeyer de 25 mL de l'électrolyte ont été introduits et le pH a été ajusté aux valeurs requises 2,00, 4,00, 6,00, 8,00, 10,00, et 12,00 en ajoutant 0,1 M NaOH ou 0,01 M HCl. La suspension est ensuite agitée pendant 24 heures, et son pH final (pH_f) est mesuré. Le point de charge zéro (pH_{PZC}) a été trouvé au point d'intersection en traçant le pH initial en fonction du pH final (Nandi *et al.*, 2009).

4.5.5 Spectroscopie infrarouge à transformé de Fourier

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) est une technique d'analyse qui permet de mesurer les vibrations moléculaires d'un échantillon. Environ 2 mg de poudre de graines de MO ont été homogénéisés avec 80 mg de KBr à l'aide d'un mortier et d'un pilon en agate, la poudre a été pressée en pastilles à l'aide d'une presse à KBr (ICL international, USA). Les spectres d'absorption FT-IR ont été enregistrés dans la gamme 4000-400 cm⁻¹. Les spectres FT-IR ont été enregistrés sur le système FTIR Nicolet 6700 de Thermo-scientific avec un détecteur DTGS-KBr (Deuterated Triglycine Sulphate with potassium bromide).

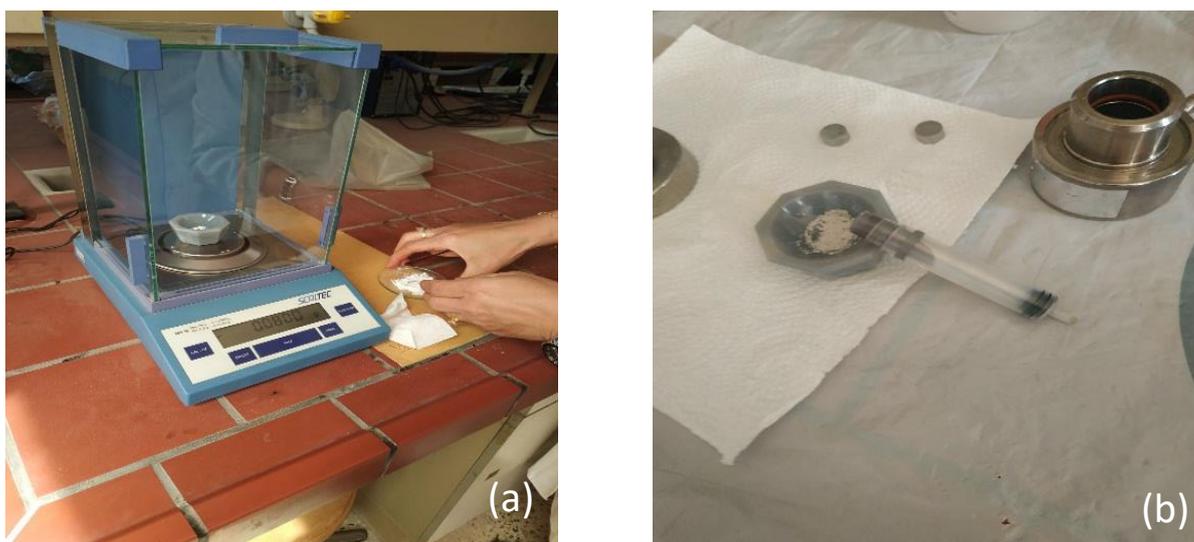


Figure 4 : Analyse FTIR ;(a) : pesée de l'échantillon et du KBr, (b) : broyage du mélange poudre-KBr avant l'analyse FTIR.

4.6 Tests d'adsorption

Le processus d'adsorption par lots a été réalisé pour étudier l'élimination du BM par adsorption avec le matériau obtenu. Plusieurs paramètres ont été pris en considération comme la concentration de la solution de BM, la concentration du matériau et le pH de la solution étudiée. Le concept est basé sur la mise en contact d'une dose du matériau adsorbant avec un volume de solution de 500 ml sous agitation à 500 rpm. Ensuite, plusieurs échantillons ont été récupérés à un

temps d'agitation donné (allant de 0 min à 120 min). Les échantillons sont filtrés avec des filtres à seringue

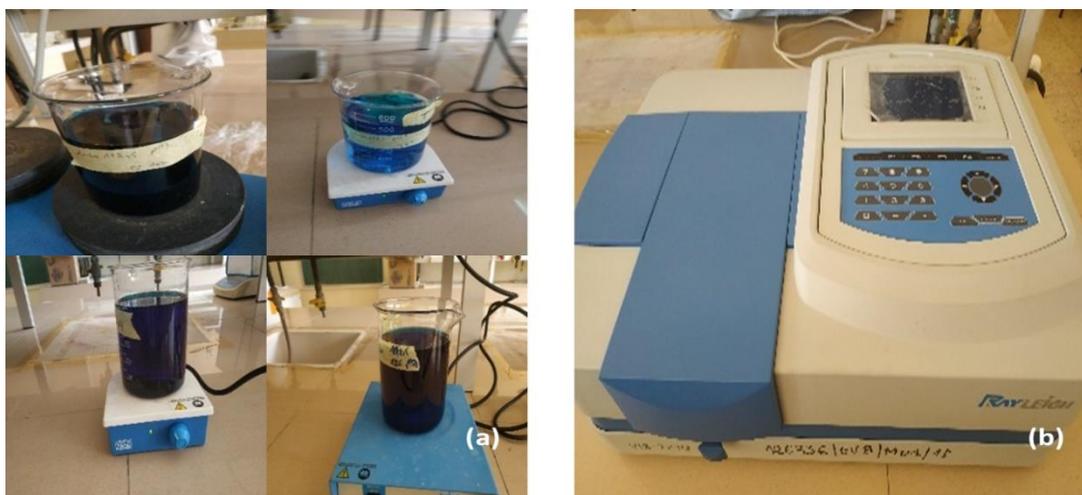


Figure 5 : *Processus d'adsorption (a) : Tests d'adsorption pour l'élimination du BM , (b) : Lecture au spectrophotomètre.*

Les tests d'adsorption classiques avaient tendance à étudier chaque paramètre de façon séparée en variant les autres paramètres. Ceci est d'une part contraignant et d'autre part prend beaucoup de temps. Pour cette raison, nous avons choisi de travailler avec la méthode de surface de réponse (RSM) qui est une technique statistique utilisée pour explorer les relations entre les variables dépendantes et indépendantes dans une expérience. Ils permettent d'identifier les effets des paramètres sur la réponse d'un produit ou d'un processus avec le minimum d'essais nécessaires. Ces plans sont basés sur des règles mathématiques et nécessitent une démarche rigoureuse pour obtenir le maximum de renseignements (Myers *et al.*, 2009). Un plan composite central (CCD) a été sélectionné pour évaluer l'efficacité de l'absorbance du BM. Le plan obtenu contient 26 essais avec 3 répétitions au centre du domaine. Le tableau suivant montre le nombre des essais pendant l'étude expérimentale.

Tableau V. *Différentes combinaisons de facteurs et niveaux pour les essais optimaux fixés.*

Configuration	Dose	pH	temps	Ci
000a	112,5	7	60	25
+++	200	12	0	100
00A0	112,5	7	120	62,5
000A	112,5	7	60	100
+---	200	2	0	25
-+-	25	12	0	25
a000	25	7	60	62,5
++-	200	2	0	100
+-+	200	12	0	25
---+	25	12	120	100

0000	112,5	7	60	62,5
---+	25	2	0	100
++-	200	2	120	25
00a0	112,5	7	0	62,5
---++	25	2	120	100
+++-	200	12	120	25
---++	25	12	0	100
++++	200	12	120	100
A000	200	7	60	62,5
0000	112,5	7	60	62,5
0a00	112,5	2	60	62,5
---+	25	2	120	25
---++	25	12	120	25
+++	200	2	120	100
----	25	2	0	25
0A00	112,5	12	60	62,5

- : niveau bas, 0 : niveau moyen, + : haut niveau, Ci : concentration initiale

4.7 Analyse statistique et logiciels

Le plan RSM a été construit à l'aide du programme JMP (Trial Version 10, SAS, USA). Les données obtenues ont été analysées statistiquement à l'aide d'un test ANOVA. Les spectres FT-IR ont été analysés par le logiciel OMNIC. Le traitement et la superposition des spectres ont été effectués avec OriginPro 8.5.

Chapitre V

Résultats e-t discussion

Chapitre V

Résultats et discussion

Les résultats obtenus durant le travail expérimental seront présentés dans le présent chapitre avec une discussion détaillée au fur et à mesure de la présentation des résultats.

4.1 Etablissement de la courbe d'étalonnage

L'évolution spectrale et les mesures de la densité optique des solutions de BM, à différents temps de réaction ont été suivies par spectrophotométrie. La courbe d'étalonnage obtenue est présentée dans la **Figure 6**. La courbe d'étalonnage du colorant étudié est linéaire et obéit à la loi de Beer-Lambert. La courbe est caractérisée par un coefficient de détermination R^2 de 0.9988. Le calcul de régression donne la droite optimale représentée par l'équation 9 :

$$y = 0,0063x - 0,0001 \quad (\text{Eq.9})$$

Les mesures des concentrations résiduelles de BM dans le reste du travail ont été obtenus par interpolation à l'aide de la courbes d'étalonnage obtenue.

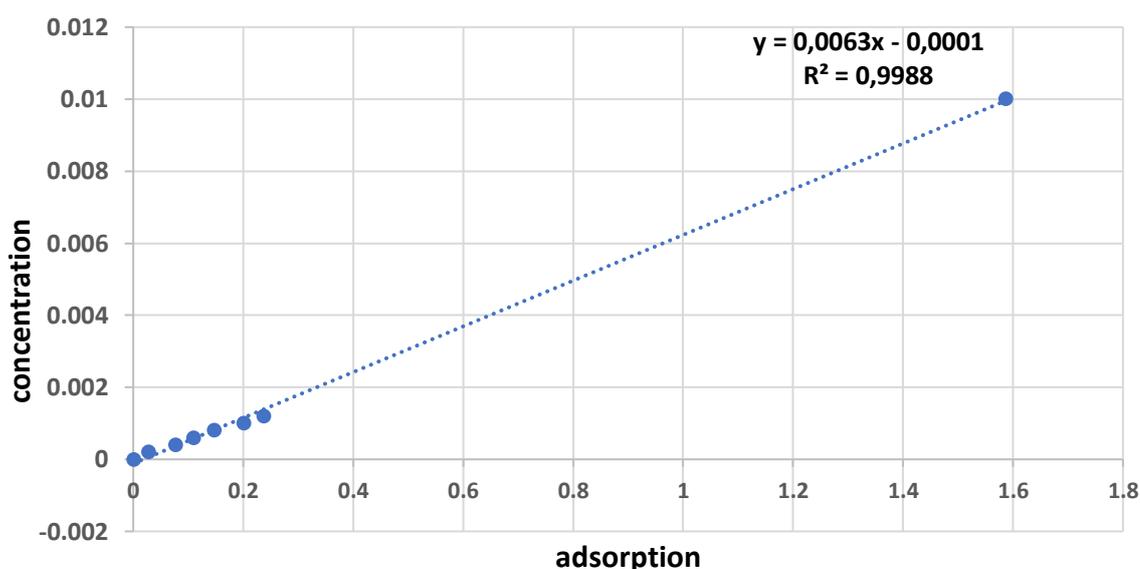


Figure 6 : Courbe d'étalonnage d'adsorption du BM

4.2 Caractérisation physicochimique

4.2.1 Caractéristiques de surface

La caractérisation physicochimique consiste à analyser les propriétés physiques et chimiques d'un matériau ou d'une substance pour en déterminer la composition, la structure, et le comportement. Ce processus est essentiel pour comprendre les interactions et les performances des matériaux. Le **tableau 6** présente les données de la masse volumique des matières synthétisées.

Tableau VI. Données de la masse volumique des matières synthétisées

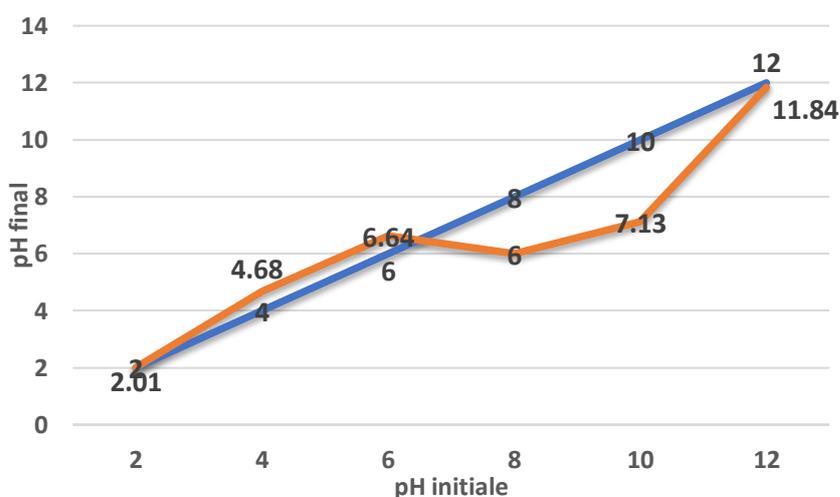
Caractère	NPs
Masse apparente (ρ_a)	0,05 g/cm ³
Masse réelle (ρ_r)	0,0066 g/cm ³
Porosité ($\epsilon\%$)	95,66

Les résultats montrent que le matériau synthétisé a une masse apparente (ρ_a) de 0,05 g/cm³ qui indique une densité relativement faible. Ce qui est typique pour des matériaux nanoporeux ou des nanoparticules ayant une structure ouverte par rapport une masse réelle (ρ_r) de 0,0066 g/cm³ qui est encore plus faible que la masse apparente. Ceci suggère que le matériau obtenu est extrêmement léger et pourraient contenir beaucoup d'espaces vides ou de pores à l'échelle nanométrique. La porosité ($\epsilon\%$) calculée du matériau est très élevée de 95,66%. Ce qui confirme que le matériau est hautement poreux. Cela signifie que près de 96% du volume du matériau est constitué de vides ou de pores (Maleki et al., 2014).

4.2.2 Détermination du pH à charge nulle (pHPZC)

Le point de charge zéro (PZC) est un paramètre crucial pour comprendre les caractéristiques de surface d'un adsorbant. Il représente le pH auquel la surface de l'adsorbant a une charge neutre, c'est-à-dire que le nombre de charges positives et négatives est égal. Nous avons opté pour la détermination du pH_{pzc}. Les résultats sont illustrés sur la **Figure 7**. La valeur du pH_{pzc} correspond au point d'intersection des deux lignes représentant les valeurs de pH initial et final.

Le graphe étudié montre que le pH_{pzc} du matériau étudié est de 6,5. Cela signifie que, à un pH inférieur à 6,5, la surface des nanoparticules obtenues est globalement chargée positivement, favorisant l'adsorption des anions. À un pH supérieur à 6,5, la surface devient globalement chargée négativement, ce qui favorise l'adsorption des cations. Cette propriété est cruciale pour optimiser les conditions de traitement dans les processus d'adsorption, permettant d'ajuster le pH du milieu pour maximiser l'efficacité de l'adsorption des ions cibles (Meng et al., 2014).

**Figure 7 :** Point isoélectrique des NPs.

4.3 Caractérisation structural du matériau synthétisé (Analyse FTIR)

Les spectres infrarouges de la matrice brute de synthèse ainsi que des matériaux synthétisés sont présentés dans la **figure 8**.

A partir des spectres infrarouges correspondants au matériau obtenu et celui de la pelure de la coque de *MO* (PCMO), nous avons constaté une grande similarité dans la longueur d'onde d'apparition des groupements fonctionnels des eaux échantillons analysés, avec un changement dans l'intensité des pics correspondants à ces groupements fonctionnels (**Fig. 8**). Ceci revient généralement aux traitements de blanchiment réalisés au moment de la préparation du matériau adsorbant. L'examen de tous ces spectres fait apparaître les bandes d'absorption suivantes :

- Une large bande d'absorption observée entre $3600-3300\text{ cm}^{-1}$ avec un maximum vers 3400 cm^{-1} . Cette bande est caractéristique de la vibration d'élongation de l'hydrogène des groupements hydroxyles (de carboxyles, phénols ou alcools) et de l'eau absorbée par les matériaux analysés.
- Les bandes observées à 2900 cm^{-1} dans le cas du spectre de la poudre brute sont des bandes d'absorption attribuées à la vibration de valence asymétrique et symétrique du groupement $-\text{CH}_3$.
- Les bandes observées à 1700 cm^{-1} et à 1600 cm^{-1} sont causé par la vibration d'élongation de $\text{C}=\text{O}$ dans les groupes de cétones, d'aldéhydes, de lactones, et de carbonyle et du cycle aromatique, respectivement. Ceci indique la formation de groupements contenant un carbonyle. Ceux-ci sont très nombreux dans le spectre de la matière brute. Cependant, ils sont très restreints dans le cas des spectres NPs.

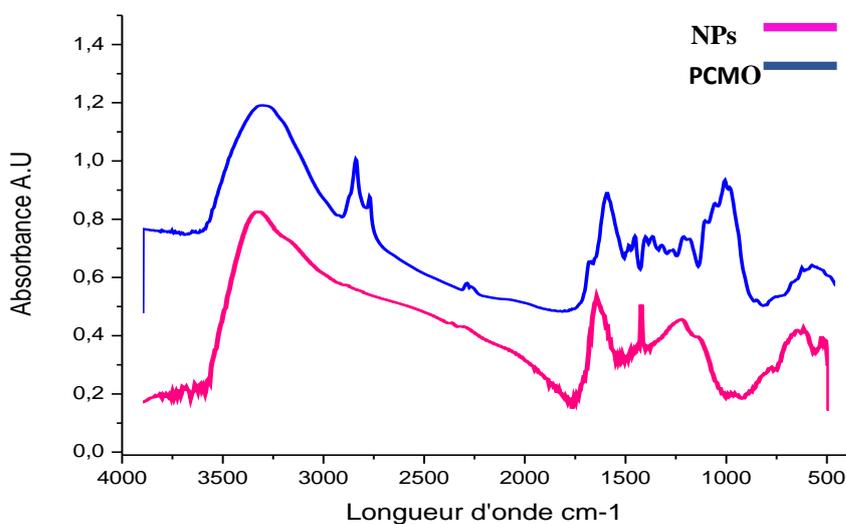


Figure 8: Analyse FTIR de matériel synthétisée.

- Les bandes de 1470 à 1370 cm^{-1} est un domaine qui est formé par un chevauchement de bandes d'absorption imputables aux groupements de type hydroxyles des surfaces et aux vibrations dans le plan de la liaison C—H dans plusieurs structures de type C=C-H. La structure de la matière première utilisée est très riche de ce type de groupement. Par contre, nous constatant un seul groupement de ce genre dans le cas des NPs.
- Les bandes entre 1000-500 cm^{-1} sont dues au mode de déformation hors du plan de C-H dans des cycles aromatiques différemment substitués.
- La présence de groupement hydroxyle de la fonction phénolique et la fonction carboxylique offrent à la surface du matériau synthétisé un caractère acide, tandis que la fonction carbonyle donne un caractère basique à sa surface.

4.4 Tests d'adsorption

Les tests d'adsorption ont été réalisés selon le plan central composite (CCD), les résultats des 26 essais réalisés sont présentés sur la **Figure 9**. La **Figure 9** représente la concentration résiduelle en BM observée expérimentalement en fonction de la concentration résiduelle prévue de BM. La répartition des données du plan suit une linéarité caractérisée par un coefficient de régression R^2 de 0,93 et une erreur quadratique moyenne (RMSE) de 0,0102. La valeur de probabilité p-value est de 0,0002.

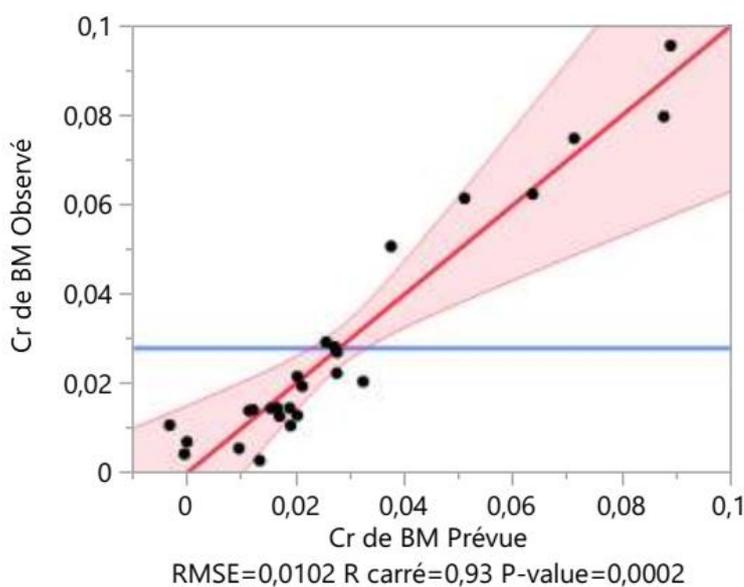


Figure 9 : La concentration résiduelle en BM observée en fonction de la concentration résiduelle prévue

Des résultats obtenus nous constatons qu'un R^2 de 0,93 est considéré comme représentatif d'une bonne répartition des données et indique une très bonne adéquation du modèle aux données expérimentales. Ceci signifie que 93% de la variabilité des données expérimentales est expliquée par le modèle. Cela suggère que le modèle utilisé est fiable et qu'il prédit avec précision les

concentrations résiduelles observées en fonction des concentrations prévues. Une erreur quadratique moyenne (RMSE) faible, comme c'est le cas ici, reflète une petite différence entre les valeurs observées et prévues, signifiant que les prédictions du modèle sont proches des valeurs réelles observées. Enfin la valeur de probabilité (p-value) de 0,0002 indique que les résultats sont statistiquement significatifs. En supplément, Une valeur de p-value très faible, comme celle obtenue dans notre travail, montre qu'il y a une forte probabilité que la relation observée entre les variables ne soit pas due au hasard, confirmant la validité du modèle (**Bayuo et al., 2020**).

4.4.1 Paramètres influençant l'adsorption du BM

Dans le but d'évaluer les paramètres influençant le processus d'adsorption et déterminer leur effet sur le système, les p-values de chaque paramètre ont été déterminé. Le **Tableau 7** présente les valeurs p de chaque paramètre et interaction possible.

Tableau VII. Facteurs et interactions de facteurs influençant le processus d'adsorption

Facteur influençant	p-value
pH de la solution	0.00000
pH de la solution*Concentration initiale	0.00052
Concentration initiale (25, 100)	0.00207
Temps d'agitation (0, 120)	0.02440
Concentration initiale* Concentration initiale	0.04236
pH de la solution* Temps d'agitation	0.28339
Dose NP* Concentration initiale	0.29796
pH de la solution* pH de la solution	0.39532
Dose NP* Temps d'agitation	0.40582
Dose NP* pH de la solution	0.40787
Dose NP* Dose NP	0.64097
Temps d'agitation* Concentration initiale	0.83760
Temps d'agitation* Temps d'agitation	0.90213
Dose NP (25, 200)	0.91643

Les facteurs ayant une p-value<0.05 sont considéré comme ayant une influence significative sur le phénomène, notamment le pH de la solution, la concentration initiale et le temps d'agitation qui avaient des p-values de 0.00000, 0.00207 et 0.02440, respectivement. A côté de ces trois facteurs, l'interaction entre le pH de la solution et la concentration initiale a été également significative avec un p-value de 0.00052. La dose des NPS seule ou en interaction avec d'autres facteurs n'avait pas d'effet important sur l'élimination du BM. Le pH de la solution est le paramètre le plus influençant car un pH adapté peut modifier la charge de surface de l'adsorbant par rapport à celle du BM, facilitant ainsi leur interaction. Les résultats indiquent qu'un ajustement précis du pH peut maximiser l'efficacité de l'adsorption du BM par le matériau élaboré. La concentration initiale de la solution du colorant est le deuxième facteur ayant un effet sur le processus d'adsorption du BM. Une concentration plus élevée peut augmenter le gradient de

concentration de la solution, favorisant ainsi une adsorption plus rapide et plus efficace jusqu'à ce que les sites d'adsorption soient saturés (**Abdallah et al., 2016**).

De plus, Le temps d'agitation joue un rôle important en assurant un contact suffisant entre les molécules de BM et les sites d'adsorption disponibles. Une agitation adéquate permet une meilleure dispersion des particules, améliorant ainsi le processus d'adsorption (**Abdallah et al., 2016**).

L'interaction entre le pH de la solution et la concentration initiale est désormais significative, suggérant que l'effet combiné de ces deux facteurs est crucial pour optimiser l'adsorption. Cela signifie que l'ajustement conjoint du pH et de la concentration initiale peut entraîner une synergie, augmentant l'efficacité de l'adsorption du BM (**Abdallah et al., 2016**).

A côté de ces résultats, la dose du matériau n'a pas d'effet significatif sur l'adsorption du BM. Ceci veut dire que l'efficacité du matériau dépend de l'environnement dans lequel il va être introduit. Ceci revient au fait que le processus d'adsorption est un système d'équilibre aléatoire d'où la nécessité de contrôler les paramètres du milieu d'action (**Abdallah et al., 2016**).

4.4.2 Représentation graphique du système d'adsorption (la surface de réponse)

Le plan composite central (CCD) est un plan de surface de réponse et plus particulièrement un plan d'optimisation par excellence. Il permet de quantifier les effets de différents facteurs sur une réponse et de les optimiser dans un domaine expérimental bien défini. Ce plan se prête bien au déroulement séquentiel d'une étude, offrant la possibilité de commencer avec un nombre minimal d'expériences, puis d'ajouter des essais supplémentaires si nécessaire pour établir un modèle du second degré. Cette approche permet de quantifier les effets des différents facteurs et d'optimiser les conditions opératoires pour atteindre la réponse souhaitée (**Fadil et al., 2015**). La **figure 10** représente la présentation graphique de l'interaction significative des deux facteurs influençant qui sont le pH de la solution et la Concentration initiale de la solution du BM.

La surface de réponse montre l'effet du pH de la solution et de la concentration initiale de la solution de bleu de méthylène (BM) sur l'élimination du BM. L'axe X représente le pH de la solution, une variable cruciale influençant la charge de surface de l'adsorbant et du BM, ce qui affecte directement l'efficacité de l'adsorption. L'axe Y indique la concentration initiale du BM dans la solution, où une concentration plus élevée peut augmenter le gradient de concentration, favorisant une adsorption plus rapide jusqu'à saturation des sites d'adsorption. L'axe Z montre le pourcentage d'élimination du BM, avec une surface élevée sur cet axe indiquant une élimination plus efficace du BM sous les conditions données de pH et de concentration initiale. En analysant

les tendances, on observe que l'effet du pH sur l'élimination du BM varie significativement, avec une valeur optimale de pH où l'adsorption est maximale, au-delà de laquelle l'efficacité diminue.

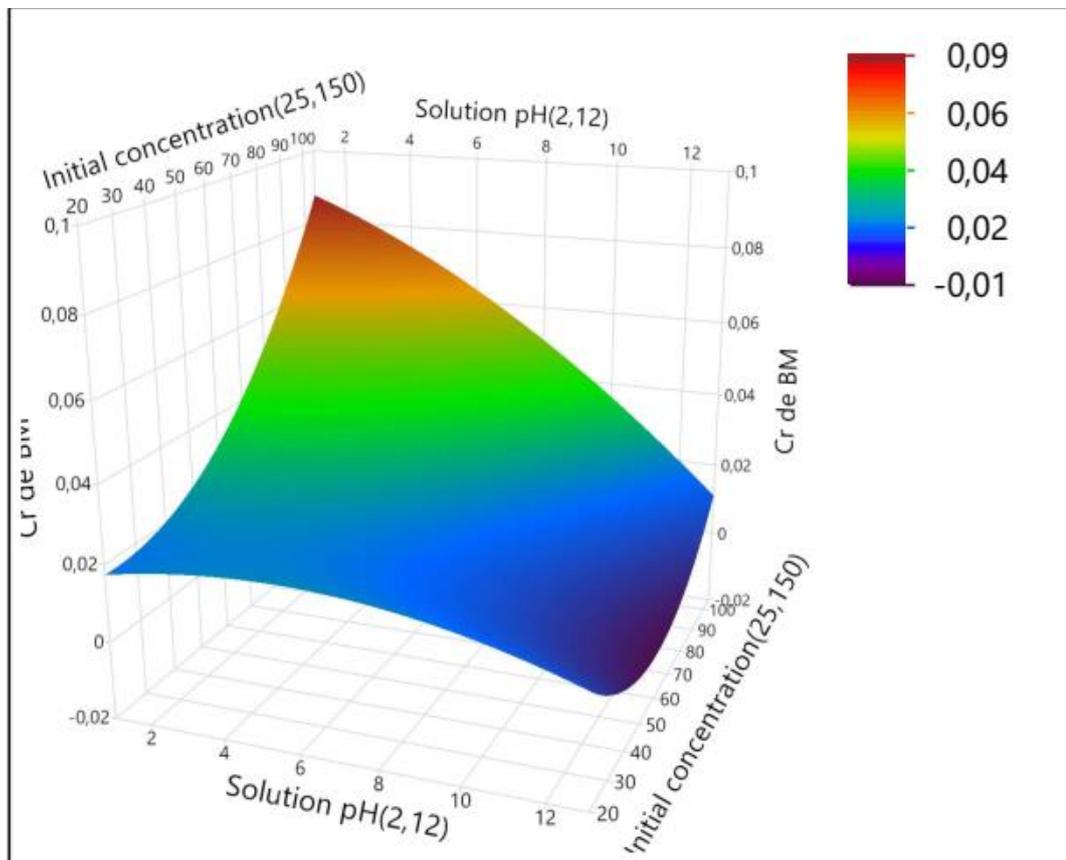


Figure 10 : Effet du pH de la solution et la concentration initiale de la solution du BM sur l'élimination du BM

Concernant la concentration initiale, une augmentation semble améliorer l'élimination jusqu'à un certain point, après quoi une saturation se produit, et l'efficacité n'augmente plus proportionnellement. L'interaction entre le pH et la concentration initiale est également visible sur la surface de réponse, indiquant qu'une combinaison optimale de ces deux facteurs peut maximiser l'élimination du BM, ce qui est crucial pour déterminer les conditions opérationnelles idéales (Kifuani *et al.*, 2018).

4.4.3 Cinétique d'adsorption

A partir des résultats précédents l'essai optimal pour assurer une meilleure adsorption du BM est caractérisé par les facteurs présentés dans le **Tableau 8** :

Tableau VIII. Les facteurs optimaux pour l'adsorption du BM

Facteur	pH de la solution	Concentration initiale	Temps d'agitation	Dose de NPs
	12	62.5	120	200

Ces valeurs optimales ont été utilisé pour tracer la cinétique d'adsorption du colorant étudié, et comprendre le comportement du matériau durant 120 min de contact avec le colorant. La **figure 11** représente la cinétique d'adsorption du BM dans les conditions optimales obtenues. La connaissance de la cinétique d'adsorption dans des opérations fondées sur les phénomènes d'adsorption présente un intérêt pratique considérable pour la mise en œuvre optimale d'un adsorbat ainsi que pour les facteurs qu'il faut optimiser pour fabriquer ou améliorer un adsorbat conduisant à la cinétique la plus rapide possible (Meziti, 2009).

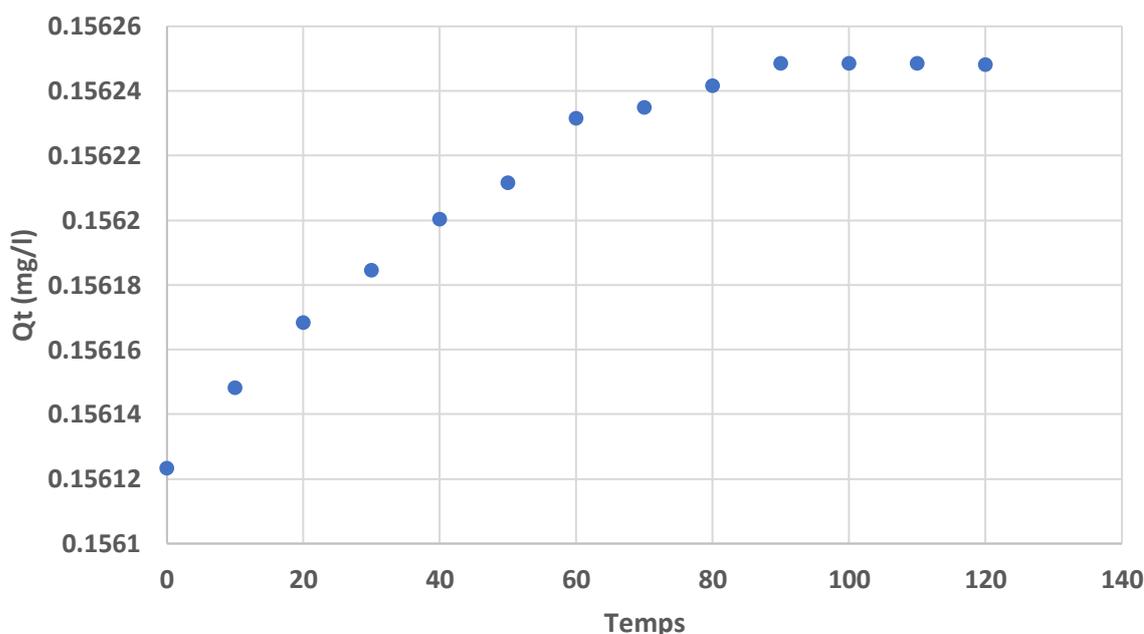


Figure 11 : Cinétique d'adsorption du BM dans les conditions optimales.

L'axe horizontal représente le temps en minutes, et l'axe vertical représente la quantité adsorbée. Pendant la phase initiale (0-60 minutes), la quantité adsorbée augmente rapidement. Cette cinétique initiale rapide est souvent due à la grande disponibilité des sites d'adsorption sur le matériau adsorbant. Cette observation est soutenue par la littérature sur la cinétique d'adsorption (Al-Degs *et al.*, 2000). Au cours de la phase intermédiaire (60-90 minutes), la vitesse d'adsorption commence à diminuer, ce qui est un signe de saturation progressive des sites actifs. La diminution de la vitesse d'adsorption indique que les sites faciles d'accès sont de moins en moins disponibles (Ho *et al.*, 1999). Enfin, pendant la phase finale (90-120 minutes), la courbe tend vers un plateau, indiquant l'atteinte de l'équilibre où la quantité adsorbée ne change plus de manière significative.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Dans le but d'apporter une contribution à la protection de l'environnement en général et en particulier au traitement des eaux, nous avons orienté ce travail vers la valorisation d'un coproduit de l'agriculture. La coque des graines de *MO* a été utilisée pour la synthèse d'un matériau adsorbant testé dans l'élimination d'un des colorants cationiques les plus importants et difficile à éliminer, qui est le BM.

- Les nanoparticules synthétisées présentent des caractéristiques physicochimiques et structurales favorables pour être appliqué dans le système d'adsorption, notamment leur structure hautement poreuse. Ce qui est favorable pour des applications nécessitant des surfaces spécifiques élevées et des interactions efficaces avec les adsorbats.
- A côté de sa structure poreuse, le matériau obtenu est caractérisé par un pHPZC acide favorisant ainsi l'adsorption des cations. Ce qui a rendu le traitement d'élimination du BM hautement efficace. Cette propriété permet d'optimiser les conditions de traitement en ajustant le pH du milieu pour maximiser l'efficacité de l'adsorption.
- La charge négative du matériau a été confirmée par l'abondance des groupements acides dans les spectres FTIR, lui conférant des caractéristiques spécifiques pour des interactions chimiques variées.
- Les tests d'adsorption réalisés selon le CCD ont révélé que le système d'adsorption étudié dépend d'un modèle mathématique linéaire avec un coefficient de régression R^2 de 0.93, un RMSE de 0.0102 et une p-value de 0.0002, indiquant une forte corrélation entre les données observées et prévues. Ceci nous a permis de déterminer les paramètres influençant l'adsorption du BM notamment le pH de la solution, la concentration initiale et le temps d'agitation. Cette optimisation a permis d'identifier les conditions idéales pour maximiser l'efficacité de l'adsorption, ouvrant ainsi la voie à des applications potentielles dans le traitement des eaux et d'autres domaines nécessitant des matériaux adsorbants performants.
- La meilleure élimination du BM a été obtenue avec un pH de 12, une concentration initiale de 62.5 mg/L, un temps d'agitation de 120 minutes et une dose de NPs de 200 mg.
- La cinétique d'adsorption du colorant dans les conditions optimales commence par une adsorption rapide jusqu'à 60 min, suivie d'une saturation progressive des sites actifs, atteignant un équilibre par la suite à partir de 120 minutes.

Nous pouvons conclure alors que la coque des graines de *MO* a une capacité significativement élevée pour l'adsorption du BM en solution synthétique aqueuse.

Ces conclusions montrent que le travail réalisé est prometteur. Il pose les bases pour des recherches futures visant à améliorer les performances des matériaux et à explorer de nouvelles applications dans divers secteurs industriels et environnementaux.

Pour ce, nous émettons ces quelques perspectives :

- Une caractérisation plus poussée du matériau obtenu (analyse ATG, analyse MEB, analyse MET, etc.), donnant plus d'informations sur sa structure est nécessaire. Ceci permet de mieux comprendre le mécanisme d'adsorption avec cet adsorbant ;
- Optimisation de l'adsorption d'autres colorants textiles (autres que le BM) pour le traitement des eaux usées et la préservation de l'environnement ;
- Exploration des applications de la nanotechnologie dans la purification de l'eau, en testant son efficacité contre d'autres polluants tels que les éléments traces métalliques ;
- Etude des isothermes d'adsorption adaptés pour le matériau obtenu. Ces isothermes sont des outils essentiels pour décrire l'interaction entre l'adsorbant et d'adsorbant, et pour mieux comprendre le système d'adsorption du polluant étudié.

Références Bibliographique

A

Abdallah, M., Hijazi, A., Hamieh, M., Alameh, M., Toufaily, J., & Rammal, H. (2016). Étude de l'adsorption du Bleu de Méthylène sur un biomatériau à base de l'eucalyptus selon la taille des particules Treatment of industrial wastewater using a natural and biodegradable adsorbent based on Eucalyptus. *Journal of Materials and Environmental Science*, 7, 4036-4048.

Aguilar-Gomez, S., Dwyer, H., Graff Zivin, J., & Neidell, M. (2022). This is air: The “nonhealth” effects of air pollution. *Annual Review of Resource Economics*, 14, 403-425. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-111820-021816>

Ahmed, M. J., & Dhedan, S. K. (2012). Equilibrium isotherms and kinetics modeling of methylene blue adsorption on agricultural wastes-based activated carbons. *Fluid phase equilibria*, 317, 9-14. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2011.12.026>

Al-Degs, Y., Khraisheh, M. A., Allen, S. J., & Ahmad, M. N. (2000). Effect of carbon surface chemistry on the removal of reactive dyes from textile effluent. *Water research*, 34(3), 927-935.

Asim, N., Badiei, M., Torkashvand, M., Alghoul, M. A., Samsudin, N. A., Amin, N., & Sopian, K. (2022). Inorganic-based adsorbent materials for the removal of gaseous pollutants. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(6), 5731-5752. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03489-7>

B

Babu, B. R., Parande, A. K., Raghu, S., & Kumar, T. P. (2007). Cotton textile processing: waste generation and effluent treatment. *Journal of cotton science*.

Bayuo, J., Abukari, M. A., & Pelig-Ba, K. B. (2020). Optimization using central composite design (CCD) of response surface methodology (RSM) for biosorption of hexavalent chromium from aqueous media. *Applied Water Science*, 10(6), 1-12 <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01213-3>

Benkaddour, B. (2018). *Contribution à l'étude de la contamination des eaux et des sédiments de l'Oued Chélif (Algérie)* (Doctoral dissertation, Université de Perpignan ; Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem (Mostaganem, Algérie)).

Bichi, M. H. (2013). A review of the applications of *Moringa oleifera* seeds extract in water treatment. *Civil and Environmental Research*, 3(8), 1-10.

Brilhante, R. S. N., Sales, J. A., Pereira, V. S., Castelo, D. D. S. C. M., de Aguiar Cordeiro, R., de Souza Sampaio, C. M., ... & Rocha, M. F. G. (2017). Research advances on the multiple uses of *Moringa oleifera*: A sustainable alternative for socially neglected population. *Asian Pacific journal of tropical medicine*, 10(7), 621-630.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.apjtm.2017.07.002>

C

C. MEZITI, « Régénération et réutilisation d'un déchet provenant de la raffinerie d'huile », mémoire de magister, Université, Abderrahmane mira de bejaia (2009), p 38

Camilleri, E., & Blundell, R. (2024). A comprehensive review of the phytochemicals, health benefits, pharmacological safety and medicinal prospects of *Moringa oleifera*. *Heliyon*.

CAPoN, M., CoURILLEU, V., & VALTTE, C. (1999). Chimie des couleurs et des odeurs, culture et technique. *Nantes ISBN*, 2-9502444.

CHAFFAI, H., & MOURDI, W. (2011). Etat de la pollution atmosphérique dans la région d'Annaba et son impact sur l'eau et l'environnement. *ScienceLib Editions Mersenne*, 3(11080).

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27807>

D

Devkota, S., & Bhusal, K. K. (2020). *Moringa oleifera*: A miracle multipurpose tree for agroforestry and climate change mitigation from the Himalayas—A review. *Cogent Food & Agriculture*, 6(1), 1805951. <https://doi.org/10.1080/23311932.2020.1805951>

F

Fadil, M., Farah, A., Ihssane, B., Haloui, T., & Rachiq, S. (2015). Optimisation des paramètres influençant l'hydrodistillation de *Rosmarinus officinalis* L. par la méthodologie de surface de réponse Optimization of parameters influencing the hydrodistillation of *Rosmarinus officinalis* L. by response surface methodology. *J. Mater. Environ. Sci*, 6(8), 2346-2357.

G

Gao, B. Y., Wang, Y., Yue, Q. Y., Wei, J. C., & Li, Q. (2007). Color removal from simulated dye water and actual textile wastewater using a composite coagulant prepared by ployferric

chloride and polydimethyldiallylammonium chloride. *Separation and Purification Technology*, 54(2), 157-163. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.08.026>

Gautier, A., Duarte, C. M., & Sousa, I. (2022). Moringa oleifera seeds characterization and potential uses as food. *Foods*, 11(11), 1629. <https://doi.org/10.3390/foods11111629>

Ge, H., Ding, K., Guo, F., Wu, X., Zhai, N., & Wang, W. (2022). Green and superior adsorbents derived from natural plant gums for removal of contaminants: a review. *Materials*, 16(1), 179. <https://doi.org/10.3390/ma16010179>

Gholami, M., NASERI, S., ALIZADEH, F. M., Mesdaghinia, A. R., Vaezi, F., MAHVI, A., & NADAFI, K. (2001). Dye removal from effluents of textile industries by ISO9888 method and membrane technology

H

Hamed, M. M., Ahmed, I. M., & Metwally, S. S. (2014). Adsorptive removal of methylene blue as organic pollutant by marble dust as eco-friendly sorbent. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(4), 2370-2377. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.10.015>

Hernandez, J. T., Muriel, A. A., Tabares, J. A., Alcázar, G. P., & Bolaños, A. (2015). Preparation of Fe₃O₄ nanoparticles and removal of methylene blue through adsorption. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 614, No. 1, p. 012007). IOP Publishing. DOI 10.1088/1742-6596/614/1/012007

Ho, Y. S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process biochemistry*, 34(5), 451-465.

I

Igwegbe, C. A., Banach, A., & Ahmadi, S. (2018). Adsorption of reactive blue 19 from aqueous environment on magnesium oxide nanoparticles: kinetic, isotherm and thermodynamic studies. *Pharm Chem J*, 5, 111-121.

Ihsanullah, I. (2020). MXenes (two-dimensional metal carbides) as emerging nanomaterials for water purification: Progress, challenges and prospects. *Chemical Engineering Journal*, 388, 124340. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124340>

J

Jedli, H., Almonnef, M., Rabhi, R., Mbarek, M., Abdessalem, J., & Slimi, K. (2023). Activated carbon as an adsorbent for CO₂ capture: adsorption, kinetics, and RSM modeling. *ACS omega*, 9(2), 2080-2087. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c02476>

K

Karim, A. B., Mounir, B., Hachkar, M., Bakasse, M., & Yaacoubi, A. (2010). Removal of basic dye " methylene blue " in aqueous solution by Safi clay. *Revue des Sciences de l'Eau*, 23, 375-388. <https://doi.org/10.7202/045099ar>

Kifuani, K. M., Mayeko, A. K. K., Vesituluta, P. N., Lopaka, B. I., Bakambo, G. E., Mavinga, B. M., & Lunguya, J. M. (2018). Adsorption d'un colorant basique, Bleu de Méthylène, en solution aqueuse, sur un bioadsorbant issu de déchets agricoles de *Cucumeropsis manni* Naudin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 12(1), 558-575. <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v12i1.43>

Kim, T. H., Lee, Y., Yang, J., Lee, B., Park, C., & Kim, S. (2004). Decolorization of dye solutions by a membrane bioreactor (MBR) using white-rot fungi. *Desalination*, 168, 287-293. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.07.011>

Kordbacheh, F., & Heidari, G. (2023). Water pollutants and approaches for their removal. *Materials Chemistry Horizons*, 2(2), 139-153. [10.22128/MCH.2023.684.1039](https://doi.org/10.22128/MCH.2023.684.1039)

L

Leone, A., Spada, A., Battezzati, A., Schiraldi, A., Aristil, J., & Bertoli, S. (2016). Moringa oleifera seeds and oil: Characteristics and uses for human health. *International journal of molecular sciences*, 17(12), 2141.

M

Maleki, H., Durães, L., & Portugal, A. (2014). An overview on silica aerogels synthesis and different mechanical reinforcing strategies. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 385, 55-74. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2013.10.017>

McRobb, C. M., & Holt, D. W. (2008). Methylene blue-induced methemoglobinemia during cardiopulmonary bypass? A case report and literature review. *The Journal of extra-corporeal technology*, 40(3), 206.

Meçabih, Z., Kacimi, S., & Bouchikhi, B. (2006). Adsorption des matières organiques des eaux usées urbaines sur la bentonite modifiée par Fe (III), Al (III) et Cu (II). *Revue des sciences de l'eau*, 19(1), 23-31. <https://doi.org/10.7202/012261ar>

Meng, J., Feng, X., Dai, Z., Liu, X., Wu, J., & Xu, J. (2014). Adsorption characteristics of Cu (II) from aqueous solution onto biochar derived from swine manure. *Environmental Science and Pollution Research*, 21, 7035-7046. DOI 10.1007/s11356-014-2627-z

Moriana, R., Vilaplana, F., & Ek, M. (2016). Cellulose nanocrystals from forest residues as reinforcing agents for composites: A study from macro-to nano-dimensions. *Carbohydrate polymers*, 139, 139-149. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.12.020>

Myers, R.H., Montgomery, D.C., & Anderson-Cook, C.M. (2009). **Response Surface Methodology and Product Optimization Using Designed Experiments.** Third edition. *Wiley Series In Probability and Statistics*

N

Nandi, B. K., Goswami, A., & Purkait, M. K. (2009). Adsorption characteristics of brilliant green dye on kaolin. *Journal of hazardous materials*, 161(1), 387-395. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.110>

O

Outani, B. A., Adamou, H., Mahamadou, A., & Delmas, P. (2023). Moringa (*Moringa oleifera* Lam): A Review on its Importance Worldwide. DOI:10.36349/easjals.2023.v06i07.01

P

Pala, A., & Tokat, E. (2002). Color removal from cotton textile industry wastewater in an activated sludge system with various additives. *Water research*, 36(11), 2920-2925. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00529-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00529-2)

Pareek, A., Pant, M., Gupta, M. M., Kashania, P., Ratan, Y., Jain, V., ... & Chuturgoon, A. A. (2023). *Moringa oleifera*: An updated comprehensive review of its pharmacological activities, ethnomedicinal, phytopharmaceutical formulation, clinical, phytochemical, and toxicological aspects. *International journal of molecular sciences*, 24(3), 2098.

R

Rafatullah, M., Sulaiman, O., Hashim, R., & Ahmad, A. (2010). Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: a review. *Journal of hazardous materials*, 177(1-3), 70-80. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.047>

Rangabhashiyam, S., Anu, N., & Selvaraju, N. (2013). Sequestration of dye from textile industry wastewater using agricultural waste products as adsorbents. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(4), 629-641.

S

Saa, R. W., Fombang, E. N., Ndjantou, E. B., & Njintang, N. Y. (2019). Treatments and uses of Moringa oleifera seeds in human nutrition: A review. *Food science & nutrition*, 7(6), 1911-1919. DOI: 10.1002/fsn3.1057

Sabzehmeidani, M. M., Mahnaee, S., Ghaedi, M., Heidari, H., & Roy, V. A. (2021). Carbon based materials: A review of adsorbents for inorganic and organic compounds. *Materials Advances*, 2(2), 598-627. DOI : 10.1039/d0ma00087f

Sakr, F., Sennaoui, A., Elouardi, M., Tamimi, M., & Assabbane, A. (2015). Étude de l'adsorption du Bleu de Méthylène sur un biomatériau à base de Cactus (Adsorption study of Methylene Blue on biomaterial using cactus). *Journal of materials and Environmental Science*, 6(2), 397-406.

Sané, N., Mbengue, M., Laffite, A., Stoll, S., Poté, J., & Le Coustumer, P. (2022). Development of a Process for Domestic Wastewater Treatment Using Moringa oleifera for Pathogens and Antibiotic-Resistant Bacteria Inhibition under Tropical Conditions. *Water*, 14(15), 2379. <https://doi.org/10.3390/w14152379>

Shaheen, T. I., & Emam, H. E. (2018). Sono-chemical synthesis of cellulose nanocrystals from wood sawdust using acid hydrolysis. *International journal of biological macromolecules*, 107, 1599-1606.

V

Vallejos, M. E., Felissia, F. E., Area, M. C., Ehman, N. V., Tarrés, Q., & Mutjé, P. (2016). Nanofibrillated cellulose (CNF) from eucalyptus sawdust as a dry strength agent of unrefined eucalyptus handsheets. *Carbohydrate polymers*, 139, 99-105. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.12.004>

Vieira, A. M. S., Vieira, M. F., Silva, G. F., Araújo, Á. A., Fagundes-Klen, M. R., Veit, M. T., & Bergamasco, R. (2010). Use of *Moringa oleifera* seed as a natural adsorbent for wastewater treatment. *Water, air, and soil pollution*, 206, 273-281.

DOI :10.1007/s11270-009-0104-y

Y

Yadav, S., & Mathur, J. (2023). An updated review on Phytochemical constituent and pharmacological properties of *Moringa oleifera* Lam. doi: 10.31254/phyto.2023.12606

Z

Zahoor, I., & Mushtaq, A. (2023). Water pollution from agricultural activities: A critical global review. *Int. J. Chem. Biochem. Sci*, 23(1), 164-176.

Résume :

L'objectif de ce travail est d'évaluer le mécanisme d'adsorption du bleu de méthylène par un adsorbant naturel. Nous avons utilisé des nanoparticules synthétisées par voie verte à partir des graines de *Moringa oleifera* comme adsorbant du bleu de méthylène dans un milieu aqueux. Les effets de divers paramètres physico-chimiques ont été étudiés afin d'optimiser l'adsorption, notamment la masse de l'adsorbant, le pH, et le temps d'adsorption. Les tests d'adsorption réalisés selon le CCD ont montré une forte corrélation entre les données observées et prévues, révélant l'influence du pH, de la concentration initiale et du temps d'agitation sur l'adsorption du BM. Cette optimisation a identifié les conditions idéales pour maximiser l'efficacité de l'adsorption, promettant des applications potentielles dans le traitement des eaux et d'autres domaines. De plus, une meilleure adsorption est obtenue. La meilleure élimination du BM a été obtenue avec un pH de 12, une concentration initiale de 62.5 mg/L, un temps d'agitation de 120 minutes et une dose de NPs de 200 mg. À la fin de l'étude, Nous pouvons donc conclure que la coque des graines de MO possède une capacité d'adsorption du BM en solution aqueuse synthétique particulièrement élevée.

Mots clé : adsorption , nanoparticules , *Moringa Oleifera* , Blue de méthylène, CCD.

Abstract

The aim of this work is to evaluate the mechanism of adsorption of methylene blue by a natural adsorbent. We used nanoparticles synthesized by the green route from *Moringa oleifera* seeds from *Moringa oleifera* seeds as adsorbents for methylene blue in an aqueous medium. The effects of various physico-chemical parameters were studied in order to optimize adsorption, including adsorbent mass, pH and adsorption time. Adsorption tests carried out using CCD showed a strong correlation between the observed and predicted data, revealing the influence of pH, initial concentration and agitation time on BM adsorption. This optimization identified the ideal conditions for maximizing adsorption efficiency, promising potential applications in water treatment and other fields. What's more, better adsorption is achieved. Methylene blue removal was achieved with a pH of 12, an initial concentration of 62.5 mg/L, a stirring time of 120 minutes and an NPs dose of 200 mg, at the end of the study, we can conclude that the shells of MO seed shells have a particularly high adsorption capacity for MB in synthetic aqueous solution.

Key words: adsorption, nanoparticles , *Moringa Oleifera* , Methylene Blue

المخلص

هدف هذا العمل هو تقييم آلية امتصاص الميثيلين الأزرق بواسطة مادة ممتصة طبيعية. استخدمنا جزيئات نانوية تم تصنيعها بطريقة خضراء من بذور المورينجا أوليفيرا كمادة ممتصة للميثيلين الأزرق في وسط مائي. تمت دراسة تأثيرات مختلف المعلمات الفيزيائية والكيميائية لتحسين الامتصاص، بما في ذلك كتلة المادة الممتصة، ودرجة الحموضة، ووقت الامتصاص. أظهرت اختبارات الامتصاص التي أجريت وفقاً لتصميم مركب وجود ارتباط قوي بين البيانات المرصودة والمتوقعة، مما يكشف تأثير درجة الحموضة، والتركيز الأولي، ووقت التحريك على امتصاص الميثيلين الأزرق. حدد هذا التحسين الظروف المثلى لتعظيم كفاءة الامتصاص، مما يبشر بتطبيقات محتملة في معالجة المياه ومجالات أخرى علاوة على ذلك، تم الحصول على أفضل امتصاص للميثيلين الأزرق عند درجة حموضة 12، وتركيز أولي 62.5 ملغ/ل، ووقت تحريك 120 دقيقة، وجرعة من الجزيئات النانوية 200 ملغ. في نهاية الدراسة، يمكننا أن نستنتج أن قشرة بذور المورينجا أوليفيرا تمتلك قدرة عالية على امتصاص الميثيلين الأزرق في محلول مائي صناعي.

الكلمات المفتاحية: الامتصاص، الجسيمات النانوية، المورينجا أوليفيرا، الميثيلين الأزرق