

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ de BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN GENIE DES PROCEDES

Spécialité : GENIE de L'ENVIRONNEMENT

Intitulé du mémoire

**RETENTION DU BLEU DE METHYLENE SUR
UN ADSORBANT NATUREL LES ECORCES
DES GRAINES DE MORINGA OLEIFERA**

Réalisé par :

SIKHENE Omar

Encadré par :

Dr. TAOUALIT Nadjjet

Année universitaire **2021 /2022**

ملخص

تم دراسة امتصاص صبغة الميثيلين الأزرق (MB) من المحاليل المائية على مادة طبيعية، وهي قشور مورنغا أوليفيرا (EGMO)، باستخدام مثلج متداخل درجة حرارة الغرفة. وقد أعد المركز من بذور مورنغا أوليفيرا في حالته الطبيعية ودون تعديل أو تحضير كيميائي. وقد تم تحديد خصائص المواد بواسطة تقنية FCIR وتحديد PHpzc. لقد تم تحسين معاملات امتصاص BM، مثل وقت التلامس والرقم الهيدروجيني (pH) للمحلول وتركيز BM الأولي والكتلة المثنية. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن الاحتفاظ بالميجابايت يصل إلى توازنه على 0.5 غ EGMO لمدة 60 دقيقة في الرقم الهيدروجيني (pH) للمحلول المائي التركيبي (pH = 6-7). يمكن تمثيل توازن الامتصاص بواسطة نموذج Freundlich. يمكن وصف البيانات التجريبية الخاصة بعلم الامتصاص الخاص بـ BM بشكل جيد من قبل نموذج الطلب الثاني.

الكلمات المفتاحية: المورنغا اوليفيرا, احتجاز, صبغ, أزرق الميثيلين

Résumé

L'adsorption du colorant bleu de méthylène (MB) à partir de solutions aqueuses sur un matériau naturel, les écorces de graines de Moringa Oleifera (EGMO), a été étudiée à l'aide d'un adsorbent discontinu à température ambiante. EGMO ont été préparées à partir des graines de Moringa Oleifera à l'état naturel et sans modification ni préparation chimique. La caractérisation du matériau a été réalisée par la technique FTIR et la détermination du pH_{pzc}. Les paramètres d'adsorption du BM ont été optimisés, tels que le temps de contact, le pH de la solution, la concentration initiale du BM et la masse de l'adsorbant. Les résultats obtenus montrent que la rétention du MB atteint son équilibre sur 0.5 g de EGMO pendant 60 min au pH de la solution aqueuse synthétisée (pH = 6-7). L'équilibre d'adsorption peut être représenté par le modèle de Freundlich. Les données expérimentales de la cinétique d'adsorption du BM peuvent être bien décrites par le modèle de pseudo-second ordre.

Mots clés : Moringa Oleifera, Rétention, Colorant, Bleu de Méthylène

Abstract

The adsorption of the blue methylene (MB) dye from aqueous solutions to a natural material, Moringa Oleifera Seed Bark (EGMO), was studied using a room temperature discontinuous adsorber. EGMO were prepared from the seeds of Moringa Oleifera in its natural state and without modification or chemical preparation. The material characterization was carried out by the FTIR technique and the determination of pH_{pzc}. The BM adsorption parameters have been optimized, such as contact time, solution pH, initial BM concentration and adsorbent mass. The results obtained show that the MB's retention reaches its equilibrium on 0.5 g EGMO for 60 min at the pH of the synthesized aqueous solution (pH = 6-7). The adsorption equilibrium can be represented by the Freundlich model. The experimental data of the adsorption kinetics of the BM can be well described by the pseudo-second order model.

Keywords: Moringa Oleifera, Retention, Dye, Methylene Blue

REMERCIEMENTS

TOUT D'ABORD, JE TIENS À REMERCIER DIEU DE NOUS AVOIR DONNÉ LA FORCE, LE COURAGE ET LA PATIENCE POUR MENER À TERME CE TRAVAIL. JE REMERCIE SINCÈREMENT MON ENCADREUR DR. MADAME TAOUALIT NADJET POUR L'ENCADREMENT EXEMPLAIRE QUI A CONTRIBUÉ À MON TRAVAIL FORMATION ET LE RESPONSABLE DE MASTER, GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT MR BADIS ABD EL MALEK POUR SES ORIENTATIONS ET SA PATIENCE

JE VOUDRAIS ÉGALEMENT REMERCIER LES MEMBRES DU JURY POUR AVOIR ACCEPTÉ CE TRAVAIL ET AVOIR CONSACRÉ LEURS TEMPS POUR ÉVALUER MON TRAVAIL ET TOUTES LES REMARQUES INTÉRESSANTES SE RAPPORTANT À LA SOUTENANCE DE MON MÉMOIRE.

JE REMERCIE TOUS LES ENSEIGNANTS DU DÉPARTEMENT DE GÉNIE DES PROCÈDES DE L'UNIVERSITÉ SAAD DAHLAB BLIDA POUR L'AIDE

JE REMERCIE CHEF DE DÉPARTEMENT, MADAME BOUTEMAK POUR LA CONFIANCE QU'ELLE J'AI DONNÉ DURANT TOUT LA PÉRIODE DU PFE, POUR CES CONSEILS PRÉCIEUX, SES ENCOURAGEMENTS PRODIGES ET SA PRÉCIEUSE PARTICIPATION DANS L'ACCOMPLISSEMENT DE CE TRAVAIL.

UN GRAND MERCI À MON FAMILLE POUR LEUR SOUTIEN AUSSI BIEN POUR LEUR AMOUR ET LEUR SACRIFICE.

JE REMERCIE ÉGALEMENT À TOUS CEUX QUI ONT CONTRIBUÉ DE PRÈS OU DE LOIN À LA RÉALISATION DE CE TRAVAIL.

DEDICACE

Je rends grâce à dieu de m'avoir donné la force, le courage et la patience d'accomplir ce présent travail.

Je dédie ce travail aux deux êtres qui me sont très chers dans cette vie, à savoir mon père et ma mère pour leur éducation, leur sacrifice, leur assistance, leur patience, leur courage

Et en particulier à mes chers frères RIAD et YOUSRA

Je dédie ce travail à tous les membres de ma famille qui m'ont aidé sans oublier

Cher à mon cœur ma grand-mère

A mes cousines KARIM et YUCEF

Je dédie aussi à mes amis proches ADEL et MOHAMED

Je remercie tous mes collègues et amis de la promotion 2021/2022.

A Tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin même avec un mot l'encouragement

SIKHENE OMAR

Liste des abréviations

A_t: Absorbance à l'instant t

A₀: Absorbance à l'instant t = 0

C₀: Concentration initiale du polluant en mg/l

C_e: Concentration du polluant à l'équilibre en mg/l.

k₁: Constante de vitesse de modèle pseudo premier ordre (mn⁻¹).

k₂: Constante de vitesse de modèle pseudo-second ordre (g/mol.mn).

K_F: Constantes thermodynamiques de l'équilibre de l'adsorption du modèle de Freundlich.

PH_{pzc}: point de charge nulle.

Q_e: Capacité d'adsorption à l'équilibre en (mg/g).

Q_t: Quantité adsorbée à l'instant t.

Q_{max}: Capacité maximale de saturation de l'adsorbant (mg/g).

λ_{max}: longueur d'onde du polluant

BM: bleu de méthylène **EGMO**: les écorces des grains de Moringa oleifera

NaOH: hydroxyde de sodium

.IR: Infra rouge

Liste des tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau 1.1 Comparaison entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique..... | 05 |
| Tableau 1.2 : Classification systématique de Moringa Oleifera..... | 17 |
| Tableau1.3 : Conditions environnementales de MoringaOleifera..... | 19 |
| Tableaux 2.1 : Relation entre la fréquence absorbée et la couleur transmise..... | 20 |
| Tableau 2.2 : Principaux groupes chromophores et auxo-chromes, classés par intensité croissante..... | 21 |
| Tableau 2.3 : Caractéristiques physico-chimiques du bleu de méthylène..... | 24 |
| Tableaux 4.1 : Réactifs utilisés..... | 29. |
| Tableau 4.2 : Caractéristiques physico-chimiques du bleu de méthylène..... | 33 |
| Tableau.5.1: Paramètres cinétiques pour l'adsorption de BM sur les écorces des Graines de MORINGA..... | 46 |
| Tableau 5.2 : les paramètres des deux modèles étudiés pour EGMO..... | 48 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1.1 : Schéma de mécanisme de transport de l'adsorbat au sein d'un grain..... | 06 |
| Figure 1.2 Domaines d'existence d'un soluté lors de l'adsorption sur un matériau microporeux..... | 07 |
| Figure 1.3 : Classification des isothermes d'adsorption physique selon l'IUPAC..... | 11 |
| Figure1.4a : fleurs de moringa Oleifera | 15 |
| Figure1.4b : feuilles de moringa Oleifera..... | 15 |
| figure 1.5a : les graines de Moringa Oleifera | 15 |
| figure1.5b :L'arbre de moringa Oleifera | 15 |
| Figure 2.1 : Structure du bleu de méthylène..... | 24 |
| Figure 4.1 : les écorces des grains Moringa | 30 |
| Figure 4.2 : la structure chimique du colorant bleu dméthylène..... | 32 |
| Figure 5.1 : Figure 5.1 : Spectre IR des écorces de Moringa Oleifera..... | 38 |
| Figure 5.2 : résultat pH_{pzc} de EGMO..... | 40 |
| Figure 5.3 : Rendement d'élimination de BM en fonction de temps..... | 41 |

| | |
|--|----|
| Figure 5.4: Rendement d'élimination de BM en fonction de masse de l'adsorbant..... | 41 |
| Figure 5.5 : Rendement d'élimination de BM en fonction de pH de L'adsorbant..... | 43 |
| Figure 5.6 : Rendement d'élimination de BM en fonction de concentration de L'adsorbant..... | 44 |
| Figure 5.7: Modèle de pseudo-premier ordre de l'adsorption de BM sur EGMO..... | 45 |
| Figure.5.8 : Modèle de pseudo-second ordre de l'adsorption de BM sur EGMO..... | 45 |
| Figure.5.9 : Modélisation par le modèle de Freundlich de EGMO..... | 47 |
| Figure 5.10 : Modélisation par le modèle de Langmuir de l'isotherme d'EGMO..... | 47 |

Sommaire

Résumé

Dédicace

Remercîment

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste les tableaux

Introduction

Chapitre 1 : Généralités sur l'adsorption

| | |
|--|----|
| 1.1 Définition et généralité sur le processus l'adsorption..... | 03 |
| 1.2 Types d'adsorption..... | 03 |
| 1.2.1 Adsorption physique (ou physisorption)..... | 03 |
| 1.2.2 Adsorption chimique (ou chimisorption)..... | 04 |
| 1.3. Cinétique d'adsorption..... | 05 |
| 1.3.1. Equation Cinétique de pseudo 1er ordre..... | 06 |
| 1.3.2. Equation Cinétique de pseudo 2ème ordre..... | 06 |
| 1.4. Description du mécanisme d'adsorption..... | 07 |
| 1.5. Facteurs influençant le phénomène d'adsorption :..... | 08 |
| 1.5.1. Nature de l'adsorbant..... | 08 |
| 1.5.2. L'influence de l'adsorbat..... | 08 |
| 1.5.3. Effet de la température..... | 08 |
| 1.5.4. Effet de la surface spécifique..... | 08 |
| 1.5.5. Effet de l'agitation..... | 08 |
| 1.5.6. Effet du ph..... | 08 |
| 1.5.7. Effet de la concentration..... | 09 |
| 1.6. Paramètres influant sur le système adsorbant/solvant..... | 09 |
| 1.7. Paramètres influant sur le système adsorbant/adsorbat..... | 10 |
| 1.7.1. Granulométrie..... | 10 |
| 1.8. Les paramètres influant sur le système adsorbant/solvant..... | 10 |
| 1.9. Les isothermes d'adsorption..... | 10 |
| 1.10. Modélisation des équilibres d'adsorption..... | 12 |

| | |
|---|----|
| 1.10.1. Modèle de Freundlich :..... | 12 |
| 1.10.2. Modèle de Langmuir :..... | 13 |
| 1.10.3. Modèle de Temkin :..... | 14 |
| 1.11. Généralité sur les adsorbants..... | 15 |
| 1.11.1. Adsorbants synthétiques..... | 15 |
| 1.11.2. Adsorbants naturels..... | 16 |
| 1.12. Moringa Oleifera..... | 17 |
| 1.12.1. Dénomination et taxonomie..... | 17 |
| 1.12.2. Description botanique..... | 17 |
| 1.12.3. Aspect écologique..... | 19 |
| 1.12.4. Application du Moringa dans la purification de l'eau..... | 19 |

Chapitre 2 : colorants

| | |
|--|----|
| 2.1. Généralités sur les colorants..... | 20 |
| 2.2. Classification des colorants..... | 21 |
| 2-2-1- Classification chimique..... | 21 |
| 2-2-2- Classification tinctoriale..... | 21 |
| 2.3. Utilisation et application des colorants | 22 |
| 2.4. Les colorants et leurs impacts environnementaux | 22 |
| 2.5. Toxicité des colorants | 23 |
| 2.6. Procédés d'élimination des colorants..... | 23 |
| 2.7. Bleu de méthylène..... | 23 |
| 2.7.1. Caractéristiques physico-chimiques du Bleu de Méthylèn..... | 24 |
| 2.7.2. Nature du colorant | 24 |
| 2.7.3. Toxicité du bleu de méthylène..... | 25 |

Chapitre 3 : Synthèse bibliographique

| | |
|---|----|
| 3.1. Quelques travaux sur quelques de recherche sur l'utilisation de MORINGA dans le domaines de traitement des eaux..... | 26 |
|---|----|

Chapitre 4 : Matériels et méthodes

| | |
|--|-----|
| Introduction..... | 29 |
| 4.1. Réactifs utilisés | 29 |
| 4.1.1. Préparation d'adsorbant ; la poudre des écorces des graines de Moringa Oleifera(EGMO)..... | 29. |
| 4.2. Caractérisations des de la EGMO | 30 |
| 4.2.1Caractérisation par FTIR | 30 |
| 4.2.2.Potentiel de charge nulle (PH_{pzc})..... | 31 |
| 4.3. Adsorption du bleu de Méthylène sur le matériaux EGMO..... | 32 |
| 4.3.1.1. Préparation des solutions de BM et établissement de la courbe d'étalonnage | 33 |
| 4.3.2. Etude paramétrique de l'adsorption du bleu de méthylène sur EGMO..... | 33 |
| 4.3.2.1. Effet du temps de contact..... | 34 |
| 4.3.2.1.1. Expression de résultats RESULTATS ET DISCUSSIONS..... | 34 |
| 4.3.2.2. Effet de la masse de l'adsorbant..... | 35 |
| 4.3.2.3. Effet du pH..... | 35 |
| 4.3.2.4. Effet de la concentration initial | 36 |
| 4.4. Calcul des quantités adsorbées..... | 36 |

CHAPITRE 5 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

| | |
|---|----|
| 5.1. Caractérisation physico-chimique du EGMO..... | 38 |
| 5.1.1. Résultats de spectroscopie infrarouge à transformée de fourrier (IRTF) de EGMO.. | 38 |
| 5.1.2. Résultat de pH_{pzc} | 39 |
| 5.2. Résultats de l'étude paramétrique du colorant bleu méthylène sur EGMO..... | 40 |
| 5.2.1. Effet de temps de contact..... | 40 |
| 5.2.2. Effet du masse..... | 41 |
| 5.2.3. Effet de pH..... | 42 |
| 5.2.4. Effet de concentration initiale..... | 43 |

| | |
|--|----|
| 5.3. Modélisation de la cinétique d'adsorption..... | 44 |
| 5.3.1. Modèle cinétique de pseudo-premier ordre..... | 44 |
| 5.3.2. Modèle cinétique de pseudo-second ordre..... | 45 |
| 5.4. Modélisation des isothermes d'adsorption..... | 46 |
| 5.4.1. Modèle de Freundlich | 46 |
| 5.4.2. Modèle de Langmuir..... | 47 |
| Conclusion..... | 49 |

LES références Bibliographiques

Annexxe

Introduction générale

Introduction générale

L'eau est à l'origine de la vie sur la terre. Pourtant, diverses activités humaines : industrielles, urbaines ou agricoles, provoquent sa pollution. A titre d'exemple, les teintures synthétiques utilisées en industrie textile sont déversées directement dans l'environnement aquatique sans aucun traitement préalable. Suite à cette grande menace de l'environnement, de nombreux travaux ont été réalisés sur la dépollution de l'eau au cours de ces dernières années. Plusieurs techniques de dépollution sont développées, dont l'adsorption est la plus employée [1].

La technique de l'adsorption est la méthode la plus favorable pour l'élimination des colorants. Elle est devenue une méthode analytique de choix, très efficace et simple dans son utilisation [2]

.Le principe du traitement par adsorption est de piéger les colorants (espèces) par un matériau solide appelé adsorbant. Il existe, dans la littérature, plusieurs matériaux solides (argiles, zéolites, alumines activées, boue, biomasses, résidus agricoles, sous-produits industriels et charbon actif...) pouvant être utilisés dans les procédés de décoloration des eaux. Le bleu de méthylène est le colorant le plus couramment utilisé dans la teinture du coton, du bois et de la soie. Il peut provoquer des brûlures oculaires responsables de blessures permanentes aux yeux de l'homme et des animaux. Son inhalation peut donner lieu à des difficultés respiratoires et son ingestion par la bouche produit une sensation de brûlure, provoque des nausées, des vomissements, transpiration et sueurs froides abondantes [3].

Le traitement des rejets industriels contenant ce type de colorant s'avère d'un grand intérêt. Une large variété de techniques physiques, chimiques et biologiques a été développée et testée dans le traitement des effluents chargés en colorants [4].

La nouvelle méthode d'élimination des colorants textiles en solution de manière efficace et économique est basée sur l'utilisation de matériaux d'origine naturelle ou bien synthétique, caractérisés par leurs capacités d'adsorption, une importante surface spécifique ainsi leur abondance dans la nature.

Depuis la dernière décennie, il y a une avancée mondiale significative des applications et des technologies pour mettre en place et promouvoir des procédés d'épuration, mettant en œuvre des processus naturels et utilisant des végétaux telle que le Moringa Oleifera qui suscite un intérêt particulier des chercheurs du monde entier.

La recherche d'un autre adsorbant efficace et moins couteux s'avère donc intéressante.

Dans cette optique, nous avons mis en forme un matériau naturel (biomasse végétale), les écorces de graine de Moringa Oleifera (EGMO), pour leur application à l'adsorption du colorant le bleu de méthylène BM.

L'effet des paramètres réactionnels tels que le temps de contact, la masse de l'adsorbant, la concentration initiale du bleu de méthylène et le pH des solutions ont été étudiés.

Ce manuscrit expose ce travail en cinq chapitres :

- Le chapitre 1 est consacré aux rappels généraux sur le phénomène de l'adsorption et Les différents modèles mathématiques employés pour analyser quantitativement les résultats obtenus.
- Le deuxième chapitre est consacré aux généralités sur les colorants et le BM.
- Le troisième chapitre donne un aperçu sur les travaux de recherche en relation avec le sujet de notre étude.
- Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des matériels, produits et méthodes utilisés dans ce travail. Les méthodes de caractérisation et les protocoles expérimentaux utilisés y sont présentés.
- Le chapitre 5 est consacré à la présentation des différents résultats obtenus.

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

Chapitre 1

Généralités sur l'adsorption

Chapitre 1 : Généralités sur l'adsorption

Introduction

Le terme adsorption a été proposé pour la première fois par Kayser en 1881 [7], pour différencier une condensation de gaz à la surface et d'une adsorption de gaz, processus dans lequel les molécules de gaz pénètrent dans la masse, en fin, le terme désorption a été proposé en 1909 par Bain [7]. Il désigne aussi bien le phénomène d'adsorption que celui de désorption [7].

Ce chapitre reprend les notions de base concernant le phénomène d'adsorption et présente un rappel sur les types et les mécanismes d'adsorption, les différents paramètres influant, les classes et les modèles les plus utilisés pour la description de ce phénomène

1.1 Définition et généralité sur le processus l'adsorption

L'adsorption est un phénomène physico-chimique de transfert de matière d'un fluide vers la surface d'un solide. La substance qui se fixe est appelée *adsorbat*, le solide qui est le siège de l'adsorption est nommé *adsorbant*. Ce phénomène spontané provient de l'existence de forces non compensées à la surface de l'adsorbant [5], et il se traduit, en particulier, par une modification de concentration à l'interface de deux phases non miscibles (gaz /solide ou liquide/solide) [6]. C'est une technique efficace et facile à mettre en œuvre pour l'élimination de certains polluants organiques et inorganiques

1.2 Types d'adsorption

1.2.1 Adsorption physique (ou physisorption)

C'est une adsorption de type physique, qui se produit lorsque les forces qui fixent l'adsorbat dans une couche à la surface de l'adsorbant sont du même ordre que les forces de Van der Waals.

Ce type d'adsorption se caractérise par :

- ✓ La rapidité dans l'établissement de l'équilibre entre la phase adsorbée et la phase fluide.
- ✓ Une chaleur d'adsorption sensiblement du même ordre que la chaleur de liquéfaction du gaz adsorbé.
- ✓ Une réversibilité relativement facile et une absence de spécificité [8].

- ✓ Les valeurs d'enthalpie d'adsorption se situent souvent autour de 10 kJ/mol [9].

Ce phénomène consiste essentiellement en la condensation de molécules sur la surface du solide est favorisé par un abaissement de la température [10].

1.2.2 Adsorption chimique (ou chimisorption)

C'est une adsorption de type chimique, qui résulte des forces de liaison de nature chimique (nettement supérieures aux forces de Van der Waals) avec mise en commun ou transfert d'électrons; il y a donc des ruptures et des créations de liaisons chimiques en surface entre le réactif et les sites actifs de l'adsorbant.

La chimisorption se caractérise par:

- ✓ Un équilibre long à atteindre entre la phase adsorbée et le milieu fluide;
- ✓ Une augmentation de la quantité de matière adsorbée avec la température ;
- ✓ Une chaleur dégagée durant l'adsorption comparable aux chaleurs de réaction (de 40 à 100 kJ/mol), environ 10 fois supérieure à l'adsorption physique ;
- ✓ La non-réversibilité ;
- ✓ Une spécificité marquée, dans le sens que sur un adsorbant déterminé se fixent certains adsorbats [8].

L'enthalpie relative à la chimisorption est plus grande que celle de la physisorption et les valeurs se situent généralement autour de 200 kJ/mol [9],(tableux 1.1)

Tableau 1.1 Comparaison entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique. [11]

| Propriétés | Adsorption physique | Adsorption chimique |
|-----------------------------|--|---|
| Types de liaison | Liaison de Van Der Waals | Liaison chimique |
| Températures du processus | Relativement faible comparée à la température d'ébullition de l'adsorbat | Plus élevée que la température d'ébullition de l'adsorbat |
| Individualité des molécules | L'individualité des molécules est conservée | Destruction de l'individualité des molécules |
| Désorption | Facile | Difficile |
| Cinétique | Rapide, indépendante de la Température | Très lente |
| Chaleur d'adsorption | Inferieur à 10 kcal/mole | Superior à 10 kcal/mole |
| Energies mises en jeu | Faibles | Elevées |
| Type de formation | Formation en multicouches et monocouche | Formation en mono-couche |

1.3. Cinétique d'adsorption

Le phénomène d'adsorption, contrôlé par la diffusion des molécules, atteint

Son équilibre relativement rapidement (quelques secondes à quelques minutes). Mais, peut se prolonger sur des temps très longs pour les adsorbants microporeux en raison du ralentissement de la diffusion des molécules dans ces structures de dimensions voisines du diamètre des molécules du fluide. Le transfert d'une phase liquide contenant l'adsorbat vers une phase solide avec rétention de soluté à la surface de l'adsorbant se fait en plusieurs étapes .

- A. Diffusion externe : qui correspond au transfert du soluté (molécules de la phase liquide) du sein de la solution à la surface externe des particules.
- B. Diffusion interne : qui a lieu dans le fluide remplissant les pores ; les molécules se propagent de la surface des grains vers leur centre à travers les pores.

C. Diffusion de surface : pour certains adsorbants, il peut exister également une contribution de la diffusion des molécules adsorbées le long des surfaces des pores à l'échelle d'un grain d'adsorbant

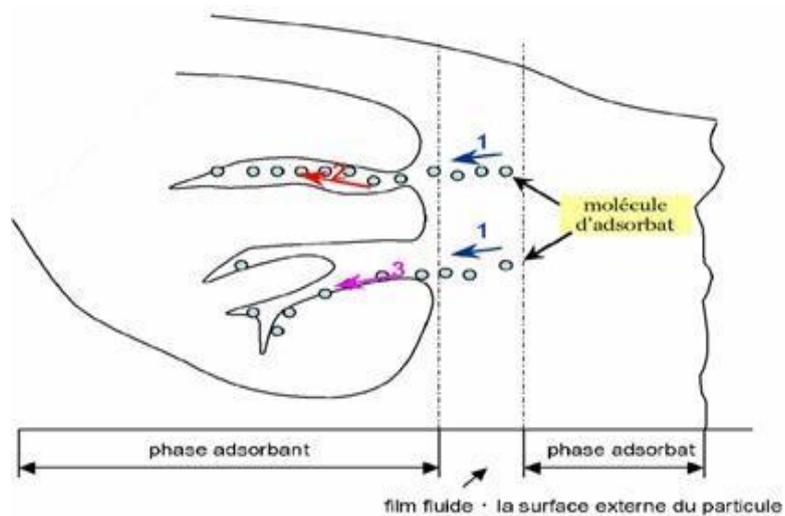


Figure 1.1 : Schéma de mécanisme de transport de l'adsorbat au sein d'un grain : 1- diffusion externe, 2- diffusion interne (dans les pores), 3- diffusion de surface.

1.3.1. Equation Cinétique de pseudo 1er ordre :

$$\frac{dq}{dt} = k_1 \times (Q_e - Q_t) \quad (\text{Equation 1.1})$$

Q_e et Q_t : capacités d'adsorption à l'équilibre et au temps t [mg g^{-1}].

k_1 : constante d'adsorption du pseudo 1er ordre [min^{-1}].

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

$$\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - \frac{k_1}{2,303} t \quad (\text{Equation 1.2})$$

1.3.2. Equation Cinétique de pseudo 2ème ordre :

$$Q_t = \frac{Q_e^2 \times k_2 \times t}{1 + (Q_e \times k_2 \times t)} \quad (\text{Equation 1.3})$$

k_2 : constante d'adsorption du pseudo 2ème ordre [$\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$].

En intégrant et en linéarisant l'équation 3, on retombe sur l'équation 4 qui permet d'obtenir k_2 et Q_e . Pour la linéarisation, il faut prendre t/Q_t en fonction du temps.

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{Q_e} t + \frac{1}{k_2 Q_e^2} \quad (\text{Equation 1.4})$$

1.4. Description du mécanisme d'adsorption

L'adsorption se produit principalement en quatre étapes. La figure 1.2 représente un matériau (adsorbant) avec les différents domaines dans lesquels peuvent se trouver les molécules organiques ou inorganiques qui sont susceptibles de rentrer en interaction avec le solide

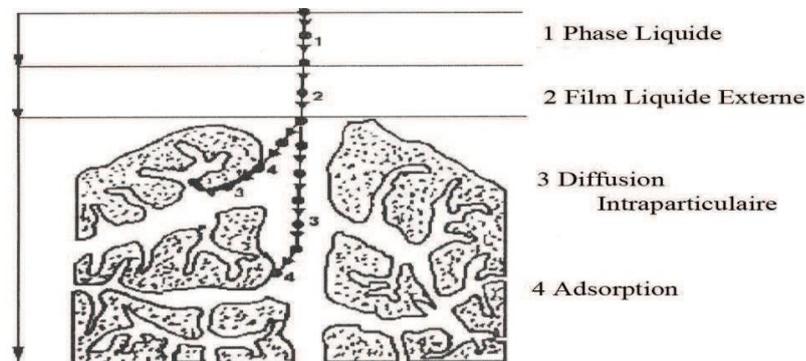


Figure 1.2 Domaines d'existence d'un soluté lors de l'adsorption sur un matériau microporeux [13].

Avant son adsorption, le soluté va passer par plusieurs étapes :

- 1)- Diffusion de l'adsorbât de la phase liquide externe vers celle située au voisinage de la surface de l'adsorbant.
- 2)- Diffusion extra-granulaire de la matière (transfert du soluté à travers le film liquide vers la surface des grains).
- 3)- Transfert intragranulaire de la matière (transfert de la matière dans la structure poreuse

de la surface extérieure des graines vers les sites actifs).

4)- Réaction d'adsorption au contact des sites actifs, une fois adsorbée, la molécule est considérée comme immobile.

1.5. Facteurs influençant le phénomène d'adsorption :

1.5.1. Nature de l'adsorbant

On peut classer les adsorbants en : adsorbants apolaires, ayant plus d'affinité pour substances non polaires. L'adsorbant polaire, adsorbe les électrolytes, dans ce cas l'adsorption est sélective. Ainsi selon la charge de la surface de l'adsorbant, les cations ou les anions seront fixés [15].

1.5.2. L'influence de l'adsorbat

L'adsorption est aussi influencée par la structure chimique des corps dissous, ainsi les composés aromatiques s'adsorbent mieux par rapport aux composés aliphatique possédant le même nombre de carbone [16].

1.5.3.Effet de la température

L'adsorption est un phénomène endothermique ou exothermique suivant le matériau adsorbant et la nature de molécules adsorbées [15].

1.5.4.Effet de la surface spécifique

L'adsorption est proportionnelle à la surface spécifique [17]. Généralement, la surface spécifique externe ne représente qu'une portion minime de la surface totale disponible à l'adsorption. Cette surface totale peut être augmentée par broyage de la masse solide qui multiplie encore sa porosité totale [18].

1.5.5.Effet de l'agitation

Les expériences montrent que le type d'agitateur utilisé et l'intensité de l'agitation ont une influence parfois non négligeable sur la quantité adsorbée [19].

1.5.6.Effet du pH

Le ph peut conditionner à la fois la charge superficielle de l'adsorbant ainsi que la structure de l'adsorbat. Cette grandeur caractérise les eaux et sa valeur dépendra de l'origine de l'effluent. La technique de traitement à adopter dépendra fortement de la valeur

du pH [20].

1.5.7.Effet de la concentration

L'adsorption de substances ou ions accroît avec l'augmentation de leur concentration dans la solution. Toutefois, cet accroissement n'est pas proportionnel à cette concentration. Il se produit plus lentement [21].

1.6. Paramètres influant sur le système adsorbat/solvant

Le transfert des polluants est régi par trois phénomènes physico-chimiques : l'équilibre thermodynamique entre les deux phases qui exprime la limite du procédé d'adsorption, la cinétique de l'adsorption et la compétition entre les différents adsorbats. Plusieurs facteurs vont donc influencer sur ces phénomènes comme la concentration du polluant en solution, les caractéristiques hydrodynamiques de l'échange (notamment le temps de contact) ou encore les caractéristiques de la solution dont [22].

- **le pH** : Le pH est le facteur d'influence le plus étudié sur l'adsorption. En effet, il détermine la spéciation du polluant, mais également la nature des fonctions de surface de l'adsorbant. L'adsorption peut être réduite ou améliorée selon que les interactions électrostatiques entre adsorbat et adsorbant soient répulsives ou attractives.
- **la force ionique** : Les charges de l'adsorbant peuvent être également masquées par l'ajout d'une espèce ionique comme NaCl (effet écran). Cet effet s'observe également en présence de molécules non chargées.
- **la température** : L'adsorption physique est généralement un processus exothermique et par conséquent son déroulement est favorisé à basse température. La quantité adsorbée à l'équilibre augmente quand la température diminue. Alors que la chimisorption est endothermique.
- **la solubilité** : Les capacités d'adsorption suivent l'ordre inverse des solubilités : la capacité d'adsorption la plus forte est obtenue avec l'espèce la moins soluble.
- **Polarité** : La polarité Pour qu'il y ait une bonne adsorption il faut qu'il y ait d'abord une affinité entre le solide et le soluté. En règle générale, les solides polaires, adsorbent préférentiellement d'autres corps polaires. Par contre les solides non polaires, adsorbent préférentiellement des substances non polaires.

1.7. Paramètres influant sur le système adsorbant/adsorbat

1.7.1. Granulométrie

La granulométrie conditionne la vitesse d'adsorption (plus le grain est petit, plus le transfert diffusionnel vers le centre est rapide car le chemin à parcourir pour les molécules est plus faible) [22]. 1.6.2. Porosité et la surface spécifique

En général, plus la porosité et la surface spécifique sont importantes, plus l'adsorption sera efficace [23].

1.8. Les paramètres influant sur le système adsorbant/solvant

Pour un système donné, les sites à la surface de l'adsorbant seront occupés soit par une molécule d'intérêt, soit par une molécule de solvant. C'est l'affinité de la surface pour l'un ou l'autre qui déterminera l'efficacité d'adsorption [24]. Certains auteurs ont affirmé que l'adsorption dans l'eau est plus favorable aux substances polaires, moins efficace contre les solvants apolaires et les composés chlorés à faible poids moléculaire [25].

1.9. Les isothermes d'adsorption

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

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

La classification d'isothermes d'adsorption-désorption théoriques, (Figure I.4) a été établie par Brunauer[27].

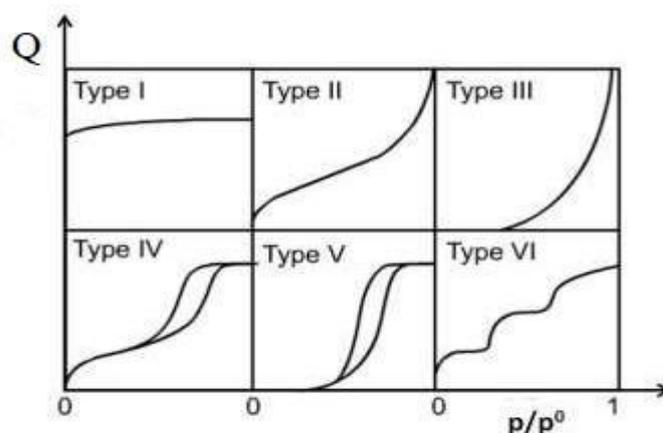


Figure 1.3 : Classification des isothermes d'adsorption physique selon l'IUPAC[28].

- Isotherme d'adsorption de type I est caractérisée par l'existence d'une horizontale traduisant une saturation de l'adsorbant, malgré l'augmentation de la pression : cette isotherme est obtenue avec des adsorbants ayant uniquement des micropores qui se remplissent à des pressions d'autant plus basses que leur largeur est plus faible.
- L'isotherme d'adsorption de type II est caractérisée par une augmentation progressive de la quantité adsorbée en fonction de la pression relative d'équilibre : cette isotherme est obtenue pour des adsorbants non poreux ou macroporeux à la surface des quels la couche adsorbée s'épaissit progressivement. Cette isotherme d'adsorption est caractéristique d'une adsorption multimoléculaire.
- L'isotherme d'adsorption de type IV a la même allure que l'isotherme d'adsorption de type II pour les pressions relatives les plus basses ($<0,42$ dans le cas de l'adsorption de diazote à 77K). Mais pour les pressions relatives les plus élevées l'isotherme de type IV est caractérisée par un palier de saturation de longueur variable pouvant être parfois réduit à un point d'inflexion. Cette isotherme d'adsorption est obtenue avec des adsorbants mésoporeux dans lesquels se produit une condensation capillaire. La désorption de l'azote condensé par capillarité dans les mésopores n'est pas réversible et une hystérèse est généralement observée.
- Les isothermes de type III et V sont rares et diffèrent des isothermes d'adsorption du type II et IV aux pressions les plus faibles. Ce changement de courbure du début de l'isotherme est interprété comme la faiblesse des interactions adsorbant/adsorbable. Ce type d'isotherme est observé dans le cas d'adsorption de vapeur d'eau par une surface hydrophobe.
- L'isotherme d'adsorption de type VI présente des "marches". Cette isotherme est observée dans le cas de formation de couches adsorbées successives sur des surfaces énergétiquement homogènes.

Les isothermes réelles obtenues expérimentalement ne correspondent que rarement à l'un des types précités [29]. Une interprétation d'isotherme expérimentale est faite donc par portions en fonction de ces isothermes types.

.110. Modélisation des équilibres d'adsorption

La capacité d'adsorption à l'équilibre est définie par l'équation suivante:

$$Q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{\frac{m}{v}} \quad (\text{Equation 1.5})$$

Avec:

Q_e : capacité d'adsorption à l'équilibre ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$).

1.10.1. Modèle de Freundlich :

En 1926 FREUNDLICH a établi une isotherme très satisfaisante qui peut s'appliquer avec succès à l'adsorption des gaz, mais qui a été principalement utilisée pour l'adsorption en solution, il a constaté que le mécanisme de ce processus est assez complexe, du fait de l'hétérogénéité de la surface ce qui rend la chaleur d'adsorption variable. On ne peut dans ce cas affirmer que tous les sites d'adsorption sont identiques du point de vue énergétique, du fait de la présence de différents types de défauts de structure dans l'adsorbant.

Cette équation prend la forme suivante [30]

$$Q_e = KF \times C_e^{1/n} \quad (\text{Equation 1.6})$$

Le coefficient K donne une information sur la capacité d'adsorption tandis que $1/n$ est relié à l'hétérogénéité de la surface. Il est généralement admis que des faibles valeurs de $1/n$ ($0,1 < 1/n < 0,5$) sont caractéristiques d'une bonne adsorption, alors que des valeurs plus élevées révèlent une adsorption modérée ($0,5 < 1/n < 1$) ou faible ($1/n > 1$) [32].

C_e : Concentration à l'équilibre, exprimé en (mg/l),

Q_e : quantité du produit adsorbé à l'équilibre par unité de masse d'adsorbant exprimé en (mg/g).

KF et n: paramètres de Freundlich, caractéristiques de la solution et de l'adsorbant, déterminés expérimentalement.

L'équation linéaire de Freundlich est la suivante :

$$\ln Q_e = \ln K + n \ln C \quad (\text{Equation 1.7})$$

Avec :

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

K, n : Constante.

1.10.2. Modèle de Langmuir :

La théorie de LANGMUIR (1918) a permis l'étude de l'adsorption de molécules de gaz sur des surfaces métalliques. Elle repose sur les hypothèses suivantes :

- L'adsorption se produit sur des sites localisés d'égale énergie ;
- L'adsorption se produit en monocouche ;
- Il n'y a pas d'interaction latérale entre les molécules adsorbées à la surface ;
- La réaction est réversible (c'est-à-dire qu'il y a équilibre entre l'adsorption et la Désorption) ;
- Le nombre des sites d'adsorption sur la surface est limité.

L'isotherme de LANGMUIR est difficilement utilisable pour des systèmes naturels où l'adsorption en couche simple sur un seul type de site est rarement rencontrée.

L'isotherme est représentée par l'équation suivante [31] :

$$Q_E = \frac{Q_m \times k_l \times C_e}{1 + k_l \times C_e} \quad (\text{équation 1.8})$$

Q_m : représente la capacité maximale d'adsorption

K_L : correspond au rapport entre les constantes de vitesse d'adsorption et désorption.

Sa formule linéaire sous la forme suivante :

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{C_e}{Q_m} + \frac{1}{Q_m \cdot b} \quad (\text{Equation 1.9})$$

Avec :

C_e : Concentration à l'équilibre (mg/l).

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

q_m : capacité maximale d'adsorbant (mg/g).

1.10.3. Modèle de Temkin

L'isotherme de Temkin est défini par la relation suivante :

$$Q_e = \frac{R.T}{b} \cdot \ln(A \cdot C_e) \quad (\text{Equation 1.10})$$

Où, sous la forme linéaire :

$$Q_e = B \cdot \ln A + B \ln C_e \quad (\text{Equation 1.11})$$

Avec $B = RT/b$, A et b des constantes caractéristique du système adsorbant/adsorbant.

La constante b est lié à l'énergie d'adsorption. En portant Q_e en fonction de $\ln C_e$ on obtient une droite de pente B et d'ordonnée à l'origine $B \cdot \ln A$, cela permet détermination des deux paramètres A et b .

1.11. Généralité sur les adsorbants :

Généralement, les adsorbants permettent de réaliser la séparation des composants d'un mélange en retenant plus ou moins, ceux-ci, par le biais de liaisons dont l'intensité varie selon la nature des molécules présentes dans le mélange. Au sens strict, tous les solides sont des adsorbants. Ce pendant, seuls les adsorbants ayant une surface spécifique suffisante (surface par unité de masse) peuvent avoir des intérêts pratiques. Les adsorbants industriels ont généralement des surfaces spécifiques au-delà de $100 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, atteignant même quelques milliers de $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$. Ces adsorbants sont nécessairement microporeux avec des tailles de pores inférieures à 2 nm ou méso-poreux avec des tailles de pores comprises entre 2 nm et 50 nm (selon la classification de l'IUPAC) [33].

1.11.1. Adsorbants synthétiques :

Les adsorbants industriels les plus courants sont les suivants :

a. zéolithes :

Les zéolithes sont des adsorbants de squelette cristallin aluminosilicate tridimensionnel constitué de tétraèdres SiO_4 et AlO_4 , de formule globale $(\text{AlO}_2\text{M}, n\text{SiO}_2)$ où M représente le plus souvent un métal alcalin ou alcalino-terreux et non terreux. Il existe plus de 100 espèces de zéolithes, différant par la valeur de n et la structure

cristallographique. Ils ont une structure microporeuse faite de cavités et de canaux qui leur confèrent des propriétés adsorbantes. Ils sont sous forme de poudre, granulés ou extrudés. La surface spécifique ne dépasse pas $900 \text{ m}^2/\text{g}$, mais ils présentent une bonne sélectivité [34].

b. Alumines activées :

Les alumines activées sont obtenues par thermolyse flash du tri-hydroxyde d'aluminium $\text{Al}(\text{OH})_3$ qui conduit à un produit de composition approximative à $\text{Al}_2\text{O}_3,0.5\text{H}_2\text{O}$, possédant une structure poreuse résultant du départ de molécules d'eau. La surface des pores est couverte de groupements Al-OH , et l'adsorption se fait préférentiellement par liaison hydrogène. Les alumines activées sont des adsorbants amorphes, moyennement polaires et hydrophiles. Ils ont une surface spécifique de $300 \text{ m}^2/\text{g}$ [35].

c. Gels de silice :

Les gels de silice sont préparés à partir de $\text{Si}(\text{OH})_4$ en phase aqueuse, obtenu par acidification d'un silicate de sodium, ou bien à partir d'un sol de silice. Les groupements Si-OH conduisent à des liaisons hydrogène. Il existe deux types de gels de silice : les microporeux, assez hydrophiles, et les macroporeux, versatiles, qui diffèrent par la taille des pores comme le nom l'indique. Leur surface spécifique peut être de 300 à $800 \text{ m}^2/\text{g}$ [36].

d. adsorbants à base de polymère :

Ce sont pour la plupart des produits en développements qui n'ont actuellement que des applications très spécifiques et peu nombreuses. Le plus répandu est un copolymère du styrène et du divinyl benzène : le polystyrène forme des chaînes reliées entre elles par des ponts de di vinylbenzène, ce qui confère une porosité inter chaîne à la structure. Une caractéristique importante de ces adsorbants est qu'ils sont très hydrophobes. Ces produits peuvent être utilisés tel quel ou subir une carbonisation. On obtient alors des adsorbants voisins des charbons actifs. Si le polymère initial est préparé en fibres, on peut le tisser et obtenir des tissus de charbon actif.

Le diamètre de fibre étant de l'ordre de 10 microns, le temps de transfert est beaucoup plus rapide que pour tous les autres adsorbants. Sa surface spécifique peut

atteindre pour les tissus de charbon actif 2000 m²/g [37].

1.11.2. Adsorbants naturels :

Les adsorbants naturels sont pour la plupart des déchets agricoles et industriels ayant des propriétés intrinsèques qui leur confèrent une capacité d'adsorption non négligeable. Plusieurs sous-produits et résidus agricoles ou agroalimentaires peuvent être utilisés en adsorption, comme :

- ✓ *Déchets de fruits* : les noyaux d'olives ; les coquilles d'amandes ; d'abricot et de pêche ; la peau de grenade et d'orange.
- ✓ *Déchets agricoles* : Xiuli et al. [38] ont utilisé la feuille de lotus pour l'élimination de bleu de méthylène.
- ✓ *Déchets industriels* : tels que le charbon dérivé du caoutchouc de pneu ; les boues de traitements ; la moelle de bagasse (qui est un déchet significatif de l'industrie de canne à sucre).
- ✓ *Déchets d'algues et de fruits de mer* : tels que les algues vertes ; la chitine qui est trouvée dans la paroi cellulaire de quelques champignons. Liu et al. [39] ont utilisé ce déchet comme adsorbant pour l'élimination de bleu de méthylène.

Dans la présente étude nous avons utilisé un adsorbant naturel, il s'agit (les écorces des Graines de *Moringa oleifera*)

1.12. Moringa Oleifera

Moringa Oleifera est une espèce originaire des régions d'Agra et d'Oudh, au Nord-est de l'Inde, au sud de la chaîne de montagne de l'Himalaya. Elle est appartenue à une famille mono-générique d'arbres et arbustes, les Moringa-aceae. Elle est cultivée aujourd'hui dans toutes les régions tropicales et sub-tropicales du monde. Son introduction en Afrique de l'Est a eu lieu au début du 20^{ème} siècle par le biais du commerce et des échanges maritimes durant cette période [41].

1.12.1. Dénomination et taxonomie

La *Moringa Oleifera* appartient à la classification suivante présentée dans le tableau 1.2

Tableau 1.2 : Classification systématique de Moringa Oleifera [41]

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

1.12.2. Description botanique

MoringaOleifera est une plante qui a l'aspect d'un arbuste dont la hauteur peut atteindre 4 à 5 m. Le diamètre du tronc varie entre 20 et 40 cm. Son tronc effilé porte parfois des ramifications dès la base, mais en général, le tronc atteint 1,5 à 2 mètres de haut avant de se ramifier ; plusieurs branches partent de celles-ci formant une couronne dense en forme de parasol. Le diamètre d'un fût de 1,30 m de longueur mesure entre 9 à 20 cm. L'écorce est de couleur brun-pâle et lisse parfois tachetée de marron. Son bois tendre et mou ne supporte pas les vents agressifs [41].

Les feuilles se développent principalement dans la partie terminale des branches. Elles mesurent 20 à 70 cm de long avec un long pétiole et 8 à 10 paires de pennes composées chacune de deux paires de folioles opposées, plus une terminale ; les folioles sont ovales et longues de 1 à 2 cm. [41]. La figure ci-dessous présente Moringa Oleifera.



Figure1.4a : fleurs de moringa Oleifera



Figure1.4b : feuilles de moringa Oleifera[40]



figure 1.5a : les graines de Moringa Oleifera



figure1.5b :L'arbre de moringa Oleifera [40]

1.12.3. Aspect écologique

MoringaOleifera est une plante qui s'adapte à des milieux différents. Cependant, certaines conditions du milieu favorisent son épanouissement. Voir tableau 1.3 ci-dessous.

Tableau1.3 : Conditions environnementales de MoringaOleifera [41].

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

1.12.4. Application du Moringa dans la purification de l'eau

Les graines de Moringa Oléifera peuvent être utilisées comme un adoucisseur d'eau dure, un désinfectant et pour éliminer les métaux lourds dans le traitement de l'eau potable [42].

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

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

Chapitre 2 :

Colorants

Chapitre 2 : Colorants

2.1. Généralités sur colorants :

Un colorant doit posséder, outre sa couleur propre, la propriété de teindre. Cette propriété résultant d'une affinité particulière entre le colorant et la fibre est à l'origine des principales difficultés rencontrées lors des traitements. En effet, selon le type d'application et d'utilisation, les colorants synthétiques doivent répondre à un certain nombre de critères afin de prolonger la durée de vie des produits textiles sur lesquels ils sont appliqués: résistance à l'abrasion, stabilité photo lytique des couleurs, résistance à l'oxydation chimique (notamment les détergents) et aux attaques microbiennes.

L'affinité du colorant pour la fibre est particulièrement développée pour les colorants qui possèdent un caractère acide ou basique accentué. Ces caractéristiques propres aux colorants organiques accroissent leur persistance dans l'environnement et les rendent peu disposés à la biodégradation [43].

Les matières colorantes se caractérisent par leur capacité à absorber les rayonnements lumineux dans le spectre visible (de 380 à 750 nm). La transformation de la lumière blanche en lumière colorée par

réflexion sur un corps, ou par transmission ou diffusion, résulte de l'absorption sélective d'énergie par certains groupes d'atomes appelés chromophore, La relation entre la longueur d'onde et la couleur transmise est donnée dans le Tableau (2.1), [43,44].

Tableaux 2.1 : Relation entre la fréquence absorbée et la couleur transmise

| λ longueur d'onde absorbée (Å) | Couleur observe (transmise) |
|--|-----------------------------|
| 4000 (violet) | Jaune verdâtre |
| 4250 (bleu nuit) | Jaune |
| 4500 (bleu) | Orange |
| 4900 (bleu vert) | Rouge |
| 5100 (vert) | Pourpre |
| 5300(jaunevert) | Violet |
| 5500 (jaune) | bleu nuit |
| 5900 (orange) | Bleu |

La molécule colorante étant le chromogène. Plus la facilité du groupe chromophore à donner un électron est grande plus la couleur sera intense (groupes chromophores classés par intensité décroissante dans le Tableau 2.2. D'autres groupes d'atomes du chromogène peuvent intensifier ou changer la couleur due au chromophore : ce sont les groupes auxo-chromes [43].

Les colorants sont utilisés dans de nombreux secteurs industriels tels que les teintures du textile, du papier, du cuire dans les industries alimentaires et cosmétiques. Les colorants ont la réputation d'être des substances toxiques et persistantes dans l'environnement, ils nécessitent des techniques physico- chimiques pour les dégrader [45].

Tableau 2.2 : Principaux groupes chromophores et auxo-chromes, classés par intensité croissante [43].

| Groupes chromo-phores | Groupes auxo-chromes |
|------------------------------------|--|
| Azo (-N=N-) | Amino (-NH ₂) |
| Nitroso (-NO ou -N-OH) | Méthyl-amino (-NHCH ₃) |
| Carbonyl (=C=O) | Diméthyl-amino ((-N(CH ₃) ₂) |
| Vinyl (-C=C-) | Hydroxyl (-HO) |
| Nitro (-NO ₂ ou =NO-OH) | Alkoxy (-OR) |
| Sulphure (>C=S) | Groupes donneurs d'électrons |

2.2. Classification des colorants:

Les principaux modes de classification des colorants reposent soit sur leur constitution chimique (classification chimique), soit sur leurs méthodes d'application aux différents substrats (classification tinctoriale) [45].

2-2-1- Classification chimique:

Le classement des colorants selon leur structure chimique repose sur la nature du groupement chromophore, qui consiste le squelette nécessaire à coloration de la molécule [44,46].

2-2-2- Classification tinctoriale:

Si la classification chimique présente un intérêt pour le fabricant de matières colorantes, le teinturier préfère le classement par domaines d'application. Ainsi, il est renseigné sur la

solubilité du colorant dans le bain de teinture, son affinité pour les diverses fibres et sur la nature de la fixation. Celle-ci est de force variable selon que la liaison colorant/substrat est du type ionique, hydrogène, de Van der Waals ou covalente.

On distingue différentes catégories tinctoriales définies cette fois par les auxo-chromes [46].

2.3. Utilisation et application des colorants :

Les grands domaines d'application des colorants sont les suivants :

- ❖ Dans l'industrie textile de la fourrure, du cuir (textile à usage vestimentaire, de Décoration, de bâtiment, de transport, textile à usage médical...).
- ❖ Dans l'industrie de matières plastiques (pigments).
- ❖ Dans l'industrie du bâtiment : peintures (pigments).
- ❖ Dans l'industrie pharmaceutique (colorants)
- ❖ Dans l'industrie des cosmétiques.
- ❖ Dans l'industrie agroalimentaire (colorants alimentaires).
- ❖ Dans diverses industries utilisées pour des carburants et des huiles.
- ❖ Dans l'imprimerie (encre, papier) [47].

2.4. Colorants et leurs impacts environnementaux :

Beaucoup de colorants sont visibles dans l'eau même à de très faibles concentrations ($< 1 \text{ mg}^{-1}$). Ainsi, ils contribuent aux problèmes de pollution liés à la génération d'une quantité considérable d'eau usée contenant des colorants résiduels. Le rejet de ces eaux résiduaires dans l'écosystème est une source dramatique de pollution, d'eutrophisation et de perturbation non esthétique dans la vie aquatique et par conséquent présente un danger potentiel de bioaccumulation schématisé par le phénomène d'accumulation d'une substance dans le cas où un organisme donné ne dispose pas de mécanismes spécifiques, soit pour empêcher la résorption d'une substance, soit pour l'éliminer une fois qu'elle est absorbée. Les espèces qui se trouvent à l'extrémité supérieure de la chaîne alimentaire, y compris l'homme, se retrouvent exposées à des teneurs en substances toxiques pouvant aller jusqu'à cent mille fois plus élevées que les

concentrations initiales dans l'eau [48].

2.5. Toxicité des colorants :

Les rejets d'effluents des industries textiles, chargés en colorants, dans les rivières, peuvent nuire considérablement aux espèces animales, végétales ainsi qu'aux divers micro-organismes vivant dans ces eaux. Cette toxicité, donc, pourrait être liée à la diminution de l'oxygène dissout dans ces milieux. Par ailleurs, leur très faible biodégradabilité, due à leur poids moléculaire élevé et à leurs structures complexes,

Confère à ces composés un caractère toxique pouvant être élevé ou faible. De ce fait, ils peuvent persister longtemps dans ce milieu, engendrant ainsi des perturbations importantes dans les différents mécanismes naturels existant dans la flore (pouvoir d'auto-épuration des cours d'eau, inhibition de la croissance des végétaux aquatiques...) et dans la faune (destruction d'une catégorie de poissons, de microorganismes...).

Les données bibliographiques ont mentionné que :

- ❖ Le colorant "noir de l'uxanthol G" est très nocifs pour les jeunes guppies à la concentration de 5mg/l [49-50].
- ❖ Le bleu de méthylène est toxique pour les algues et les petits crustacés à partir des concentrations de 0,1 mg/l et 2 mg/l respectivement [50].
- ❖ Le bleu de victoria, le violet de méthyle, le noir anthracite BT et le vert diamant sont très toxiques pour la flore à partir de concentrations 1 mg/l [50].

Les colorants cationiques (ou basiques) sont généralement très toxiques et résistent à toute oxydation. En effet, d'autres études ont montré que le colorant cationique (Sandocryl orange) est très toxique pour les micro-organismes [49].

2.6. Procédés d'élimination des colorants:

De nombreuses techniques de dépollution des effluents chargés en colorants sont développées au cours de ces dernières années [50]. Dans notre étude on s'intéresse par un procédé très important qui est le phénomène d'adsorption.

2.7. Bleu de méthylène:

Le bleu de méthylène est un colorant cationique très utilisé en médecine comme antiseptique et dans d'autres domaines tels que la biologie, la chimie, l'industrie

textile...etc. Ce polluant existe dans la nature à cause des rejets fluides des industries qui peut influencer directement sur les organismes vivants et l'environnement.

Le Bleu de Méthylène (Figure 2.1), pris comme polluant model est utilisé sans aucune purification préalable. Les solutions sont préparées en dissolvant les quantités du colorant dans de l'eau distillé. [51].

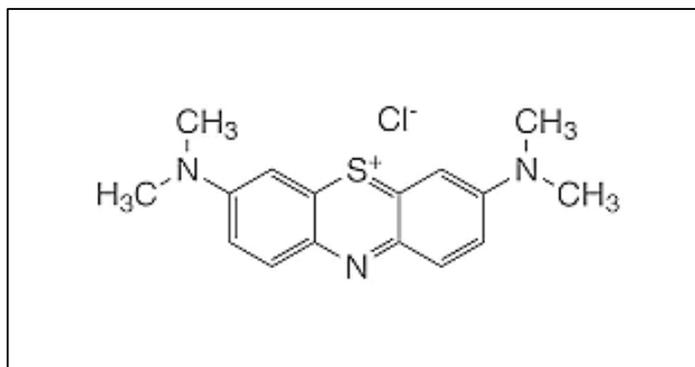


Figure 2.1 : Structure du bleu de méthylène. [51].

2.7.1. Caractéristiques physico-chimiques du Bleu de Méthylène

Les caractéristique de bleu de méthylène sont rassemble dans le tableaux 2.3

Tableau 2.3 : Caractéristiques physico-chimiques du bleu de méthylène[51].

| Nom usual | Formule chimique | Masse molaire | Solubilité dans l'eau | λ_{max} (nm) | Pka | I.C Indice de couleur |
|-------------------|--|----------------------|------------------------------|--|------------|------------------------------|
| Bleu de méthylène | C ₁₆ H ₁₈ ClN ₃ S | 319.86 | Elevée | 664 | 3.8 | 52015 |

2.7.2. Nature du colorant :

Le bleu de méthylène, ou chlorhydrate de tétraméthylthionine, dont la base est une base ammonium, est obtenu par l'action de l'oxyde d'argent ; cette base a été appelée bleu Borrel par LAVERAN. C'est un colorant basique progressif.

Il fait partie du groupe des Quinones-imides, section des Thiazines, qui sont des colorants sulfurés dans lequel deux noyaux benzéniques sont unis par un anneau fermé constitué d'un atome d'azote, d'un atome de soufre et de 4 atomes de carbone.

Dans ce groupe, on va trouver : la thionone (ou violet de Lauth), le bleu de toluidine, le nouveau bleu de méthylène (qui est dérivé de l'éthyltoluidine, et non de la diméthylaniline comme son homonyme ; ils sont très voisins dans leur action !), le violet de méthylène, l'azur de méthylène et le vert de méthylène (bleu de méthylène nitré).

2.7.3. Toxicité du bleu de méthylène:

Les données toxicologiques relatives à l'utilisation du bleu de méthylène chez l'homme depuis de nombreuses années ont indiqué jusqu'à présent l'absence de danger lié à l'utilisation de ce produit comme médicament, dont la dose totale administré ne doit pas dépasser 7 mg/kg.

Il peut causer des douleurs thoraciques, une dyspnée; une anxiété, des tremblements, des hypertensions, et même coloration de la peau si la dose est élevée.

Le bleu de méthylène n'est pas fortement dangereux, mais il a un effet nocif sur les organismes vivants et les eaux.

L'exposition aiguë à ce produit causera:

Exposition externe : irritation de la peau et des dommages permanentes aux yeux.

Par l'inhalation : respiration rapide ou difficile et augmentation de la fréquence cardiaque.

Par l'ingestion : irritation de l'appareil gastro-intestinal, nausée, transpiration prodigue, confusions mentaux, cyanose et nécrose des tissus humains [53].

Chapitre 03

Synthèse bibliographique

Chapitre 03 : Synthèse bibliographique

3.1. Quelques travaux sur quelques travaux de recherche sur l'utilisation de MORINGA dans le domaines de traitement des eaux:

- **Hamdad B, Raham A en 2015**

L'objectif de ce travail consiste à étudier le pouvoir adsorbant du *M. oleifera* dans l'élimination des ions de Nickel ainsi le pouvoir floculant de cette dernière dans le traitement d'une eau synthétique à base de bentonite

Les résultats obtenus en laboratoire, permis de tirer les principales conclusions, quant à l'intérêt de la mise en œuvre à l'échelle pilote, puis industrielle, du biofloculant en clarification :

Lors l'utilisation du *M.oleifera* comme un adsorbant pour l'élimination du Nickel, la diminution de concentration en Nickel est de 0.98 mg/l après les premiers 24 heures avec un pH optimal de 5.5 et dont l'adsorption est meilleur, puisque elle est rapide (50 minutes) et avec un taux d'élimination plus important de 90.2%.

Pour l'eau synthétique, lors l'utilisation du *M. oleifera* sans sel, le taux d'abattement de la turbidité pour les différentes charges initiales de la bentonite utilisée est compris entre 96.76 et 97.83%, pour une dose du bifloculant appartenant à l'intervalle [0,4 ; 1 mg/l], pour un pH 8 de l'eau synthétique et un temps de décantation de 30 minutes. Avec l'utilisation du *M. oleifera* solubilisé dans le sel le taux d'abattement augmente de 2% comparativement aux résultats précédents.

Une parfaite déstabilisation de la solution (bentonite + acide humique) a été obtenue pour une dose appartenant à l'intervalle [0,1 ;2 mg/l], avec un abattement quasi-total de la turbidité. Cependant, à partir de 2,5 mg/l, la ré-stabilisation de la solution en question (ré- augmentation de la turbidité) commence à avoir lieu.

Par ailleurs, le pH, la turbidité initiale et la dose du *M. oleifera* jouent un rôle important dans le processus de coagulation floculation. Le *M. oleifera* peut être efficace dans une large gamme du pH. Pour une dose de 3 mg/l de ce biomatériau est suffisante pour réduire 99.43% de la turbidité dans une solution acide (pH=5,5). Cependant, la ré-augmentation de la turbidité commence à avoir lieu à partir d'une solution alcaline.

- Boudarn S, Boukedroun A En **2017**

Le présent travail a porté sur l'évaluation de quelques activités biologiques des extraits d'une espèce médicinale *M. oleifera* Lam, de la famille des Moringaceae, espèce introduite dans les zones arides du Sahara Algérien et plus particulièrement dans la région d'Adrar. Le screening phytochimique effectué sur les feuilles et les racines a permis de mettre en évidence diverses classes de métabolites secondaires : les flavonoïdes, les anthocyanes, les alcaloïdes, les tanins (catéchiques et galliques), les mucilages, les glucosides. Cependant, les saponines se sont avérées absentes. La présence de ces composants est liée à leur rôle important dans les réponses des plantes aux stress environnementaux ou pour assurer un mécanisme de défense aux agressions provoquant des maladies chez les végétaux.

Les résultats, suggèrent que *M.oleifera* Lam pourrait représenter une source naturelle et prometteuse de molécules chimiques qui possède des activités biologiques très importantes.

- Gettafi M, Sadouk R En **2021**

Cette étude a été consacrée à l'élimination des polluants émergents de type pharmaceutiques par adsorption. Bien que la quantité de ces substances rejetées dans l'environnement soit faible, leurs accumulations constituent un risque potentiel pour l'homme, la faune et la flore à long terme.

Le présent travail est basé sur l'utilisation des écorces de Moringa Oleifera pour l'élimination des polluants émergents, plusieurs essais d'adsorption ont été réalisés en prenant en compte l'influence de plusieurs paramètres opératoires à savoir : le temps de contact, la concentration initiale du polluant en solution, la masse d'adsorbant, la taille des particules et le pH. Les résultats obtenus de cette présente étude :

- L'étude de l'adsorption du rejet sur l'adsorbant à base des écorces Moringa Oleifera a montré qu'un rendement de l'ordre de 99% a été trouvé, cela implique que notre adsorbant possède de très bonnes propriétés d'adsorption,

- Belkacem S, Bensaifi H En **2021**

L'objectif principal de la présente étude est la réduction des acides humiques (AH) en solution aqueuse par le procédé de coagulation-floculation en utilisant deux coagulants : le sulfate d'Aluminium et les graines de *Moringa Oleifera*.

Une étude paramétrique de la coagulation-floculation des AH a été réalisée en faisant varier le pH de la solution, la dose du coagulant, le temps de décantation....

Le coagulant naturel (graines de *Moringa Oleifera*) a été caractérisé en utilisant la spectroscopie à transformée de Fourier (FTIR) et par la détermination du pHpzc.

Les expériences réalisées ont montré que les graines de *Moringa Oleifera* possèdent une efficacité remarquable dans le domaine de traitement des eaux et peuvent être considérés comme alternatif aux coagulants synthétisés

les résultats obtenus dans cette étude ont permis de considérer l'hypothèse selon laquelle il est possible de remplacer les coagulants chimiques par les coagulants naturels tels que les graines de *Moringa Oleifera* pour le traitement des eaux chargées en acides humiques (AH).

Chapitre 4

Matériel et méthodes

Chapitre 4 : Matériel et méthodes

Introduction :

Le présent chapitre est consacré à la description de l'ensemble des expériences effectuées. Il comprend les méthodes de préparation des différentes solutions, les modes opératoires ainsi que les techniques de caractérisation utilisés pour la réalisation de ce travail.

4.1. Réactifs utilisés

Les produits et les réactifs chimiques utilisés dans le présent travail sont rassemblés dans le tableau 4.1

Tableaux 4.1 : Réactifs utilisés

| Nom du produit | Formule chimique | Pureté (%) | Densité (g/cm ³) | Fournisseur |
|---------------------|------------------|------------|------------------------------|-------------|
| Acide chlorhydrique | HCl | 37 | 1.18 | Prolabo |
| Hydroxyde de Sodium | NaOH | 98 | 2.13 | Origine CE |

4.2. Préparation du biosorbant : Ecorces des graines de Moringa Oleifera (EGMO)

La préparation du biosorbant a été faite à partir des écorces des graines de Moringa Oleifera EGMO qui sont obtenus après décorticage des graines à main puis leur séchage à l'air libre pendant 5 jours (figure 4.1)

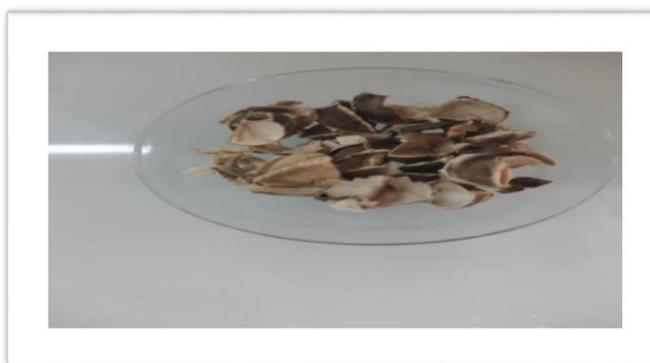


Figure 4.1 : Ecorces des graines de Moringa

4.2. Caractérisations de la EGMO :

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

4.2.1 Caractérisation par FTIR :

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) permet d'obtenir des informations sur la nature des liaisons chimiques et peut être employée pour l'identification de composés. En effet, cette technique, sensible aux vibrations des liaisons présentant un moment dipolaire, produit des spectres comportant des bandes d'absorption dont la position est caractéristique des liaisons mises en jeu car dépend de la masse des atomes et de la force de la liaison. Le spectre infrarouge d'un échantillon est établi en faisant exposer cet échantillon à un faisceau de lumière infrarouge. Lorsque la longueur d'onde du faisceau émis est proche de l'énergie de vibration de la molécule, cette dernière absorbe le rayonnement et on enregistre une diminution de l'intensité réfléchié ou transmise. De ce fait, l'énergie du rayonnement IR se retrouve diminuée après l'interaction, conduisant à l'apparition d'une bande d'absorption à cette fréquence. Cette absorption n'est pas systématique ; elle dépend de la géométrie de la molécule ainsi que de sa symétrie. Les modes de vibration actifs en infrarouge peuvent être déterminés pour une géométrie donnée en utilisant les relations décrites par la théorie des groupes. La position de ces bandes d'absorption dépend de la différence d'électronégativité des atomes (force de la liaison) et de leur masse. Par conséquent, un matériau donné présentera un ensemble de bandes d'absorption caractéristiques permettant de l'identifier [55].

4.2.2 Potentiel de charge nulle (PH_{pzc})

Le point de charge zéro est une caractéristique importante pour les surfaces des matériaux, car il représente une estimation de son caractère acide ou basique. Il est défini comme étant le pH pour lequel la charge de surface est nulle, c'est-à-dire la somme des charges positives est égale à la somme des charges négatives.

Ce paramètre est très important dans les phénomènes d'adsorption, surtout quand des forces électrostatiques sont impliquées dans les mécanismes.

Une méthode simple et rapide est utilisée pour déterminer le pHPzc [54]. Le point de charge nulle de l'échantillon étudié a été déterminé selon la procédure suivante.

Mode opératoire

- Prélever 100mL d'eau distillée dans un bécher puis ajouter une masse de 0,5g de solide (adsorbant). La solution obtenue est notée **S1**,
- Remplir la burette par la solution d'acide chlorhydrique HCl0, 1M,
- Déterminer le pH initial de la solution **S1**.
- Doser la solution **S1** goutte à goutte par la solution d'acide chlorhydrique HCl jusqu'à la stabilisation totale de la valeur du pH. Noter la variation du pH.

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

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

✓ Cas de HCl : $Q_a = (C_a + [OH^-] - [H^+]) / m$ Equation 4.1

✓ Cas de NaOH : $Q_b = (-C_b + [OH^-] - [H^+]) / m$ Equation 4.2

Avec :

Q : Charge de surface en mol.g⁻¹

C_a : Concentration d'acide en mol.l⁻¹

C_b : Concentration de base en mol.l⁻¹

m : prise d'essai en g

4.3. Adsorption du bleu de Méthylène sur le matériau EGMO

Le bleu de méthylène est une poudre cristalline, bleu sombre à reflets cuivrés, il est soluble dans 28% d'eau froide, moins soluble dans l'alcool et insoluble dans l'éther.

Il a été utilisé contre le paludisme et contre différentes infections bactériennes. Il s'agit en fait d'un antiseptique peu puissant mais qui a l'avantage d'être dépourvu de toxicité.

Le bleu de méthylène est cependant quelquefois irritant lorsqu'il est utilisé pour le traitement oculaire, un contact prolongé pouvant être responsable d'une coloration bleue du fond d'œil.

Il est actuellement utilisé dans les collyres et en stomatologie, [52].

La figure 4.2 représente la structure chimique du colorant bleu de méthylène

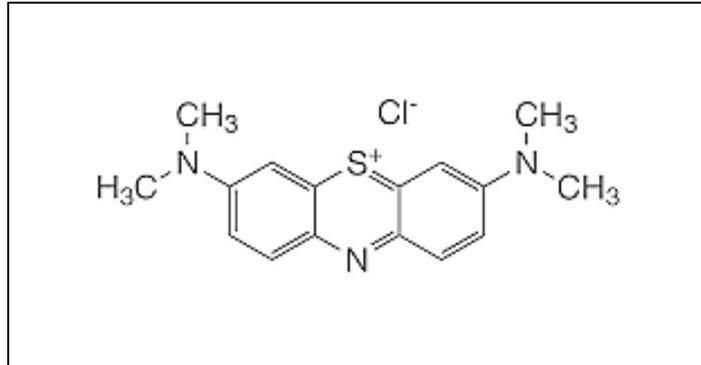


Figure 4.2 : Structure chimique du colorant bleu de méthylène

Les caractéristiques physico-chimiques du BM sont regroupées dans le tableau suivant 4.2

Tableau 4.2 : Caractéristiques physico-chimiques du bleu de méthylène

| | |
|---|---|
| Dénomination | Bleu de méthylène ou chlorure de tétraméthylthionine, Basic blue 9 (C.I.) |
| Appellation chimique | Chlorure de 3.7-bis (diméthylamino) phénazonium |
| Famille | Colorant basique |
| Formule brut | C ₁₆ H ₁₈ ClN ₃ S |
| Masse molaire (mg.L ⁻¹) | 319,85 |
| Solubilité dans l'eau (g.L ⁻¹) à 20°C | 40 |
| Point de fusion (°C) | 190 |
| pka | 3,8 |

4.3.1. Préparation des solutions de BM et établissement de la courbe d'étalonnage

Une solution concentrée du BM de 1 g. L^{-1} a été préparée dans l'eau distillée. Des solutions filles de BM ont été préparées par dilution, à partir de la solution mère de 1 g. L^{-1} . La gamme de concentrations choisie est : 5, 10, 15, 20, et 30 mg. L^{-1} . La méthode d'analyse et la courbe d'étalonnage sont décrits dans la partie Annexe. Les absorbances des solutions préparées ont été mesurées par spectrométrie à 661 nm.

Pour calculer la concentration du BM dans les échantillons, on utilise une courbe d'étalonnage. Cette courbe est établie par tracer une droite d'absorbance en fonction de concentrations connues de BM, puis l'équation linéaire de cette droite est utilisée pour le calcul de la concentration inconnue d'une solution de BM donnée. La courbe d'étalonnage de BM a été préparée comme montré en Annexe.

4.3.2. Etude paramétrique de l'adsorption du bleu de méthylène sur EGMO

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

- I. Effet de temps de contact adsorbant-adsorbat.
- II. Effet de la quantité de l'adsorbant.
- III. Effet de pH de la solution aqueuse,
- IV. Effet de la concentration initiale de l'adsorbat.

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

4.3.2.1. Effet du temps de contact

Il s'agit de trouver le temps optimal d'adsorbant qui assure le maximum de rétention à une concentration donnée de polluant.

Le temps de contact joue généralement un rôle essentiel dans les études sur l'adsorption, car il fournit des informations sur le temps nécessaire au système adsorbat-adsorbant pour atteindre le temps d'équilibre.

Mode opératoire

Des flacons en verre fermés à bouchant contenant, tous, les mêmes quantités (1g) du solide EGMO aux quelles sont ajoutés séparément 100 mL de la solution du BM à 10 mg. L^{-1} .

Les flacons sont ensuite placés sur une table oscillante sous agitation à la température ambiante.

Le temps de contact adsorbant-adsorbat pour chaque flacon a été fixé respectivement à : 0, 5, 10, 20, 30, 40,50 et 60 minutes.

Une fois la durée d'agitation achevée, la solution aqueuse de BM est séparée par centrifugation à 3000 tr/min pendant 30 min. La solution ainsi récupérée est ensuite analysée dans le visible à 661 nm (Annexe).

4.3.2.1.1. Expression de résultats

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

$$R (\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad \text{Equation 4.3}$$

C_i : concentration initial

C_f : concentration finale

4.3.2.2. Effet de la masse de l'adsorbant

Il s'agit de trouver la masse optimale de l'adsorbant qui assure le maximum d'élimination à une concentration donnée de polluant dans un temps de contact supposé infini.

Mode opératoire

Des masses croissantes en adsorbant 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 1 ; 2 et 1,5 g ont été mises en contact avec 100 mL de la solution de BM à 10 mg. L⁻¹.

- le mélange ainsi obtenu a été ensuite mis en agitation magnétique pendant 60 min
- en fin d'agitation la solution résiduelle de polluant est séparée par centrifugation à 3000 tr/min pendant 30 min
- la solution a été récupérée afin de mesurer son absorbance puis analysé à 661 nm.

Enfin, exprimer les résultats obtenus sous forme de courbe, rendement d'élimination en fonction de la masse, afin de choisir la meilleure masse.

4.3.2.3. Effet du pH

Principe

Le pH est un facteur important dans toute étude d'adsorption, du fait qu'il peut influencer à la fois sur la structure d'adsorbant et son état d'ionisation, celle de l'adsorbât, sa solubilité, structure chimique ainsi que le mécanisme d'adsorption.

Dans ce travail, nous avons étudié l'efficacité de l'adsorption pour le BM, en variant le pH de 2 à 11 à l'aide d'une solution d'acide chlorhydrique HCl ou de la soude NaOH selon le pH désiré.

Mode opératoire

Pour déterminer l'influence de pH sur le phénomène d'adsorption, le mode opératoire suivant a été effectué :

- Le pH de la solution de bleu méthylène a été ajusté à des valeurs allant de 2 à 11 par l'addition de HCl ou de NaOH de façon que le changement de concentration par l'ajout est négligeable ;
- une masse de 0,5 g de EGMO a été introduite dans 100 mL de bleu méthylène à 10mg/L.
- le mélange obtenu a été ensuite agité pendant 60 min, la solution a été récupérée puis analysée à 661 nm.

Les différents résultats obtenus ont été exprimés sous forme de courbes, le rendement d'élimination en fonction du pH, afin de connaître le meilleur milieu d'adsorption.

4.3.2.4. Effet de la concentration initiale

Il s'agit de trouver la concentration optimale de BM qui assure le maximum d'élimination.

Mode opératoire

Des concentrations croissantes de BM 5, 50, 100 et 150 dans un 100 mL avec une masse de 0,5g.

- le mélange obtenu a été ensuite agité pendant 60 min, la solution a été récupérée puis analysée à 661 nm.
- les différents résultats obtenus ont été exprimés sous forme de courbes, le rendement d'élimination en fonction du pH, à fin de connaître le meilleur milieu d'adsorption

4.4.Calcul des quantités adsorbées

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

$$Q_e = \frac{C_0 - C_e}{\frac{m}{v}} \quad \text{Equation 4.4}$$

Où les paramètres suivants représentent :

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

C₀ : Concentration initiale (mg. L⁻¹)

C_e: Concentration résiduelle à l'équilibre (mg.l⁻¹)

V : Volume de l'adsorbat (l)

m : Masse de l'adsorbant (g)

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

CHAPITRE 5

RESULTATS ET DISCUSSIONS

CHAPITRE 5 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

L'objectif de ce chapitre est de montrer et d'interpréter tous les résultats expérimentaux pour la caractérisation de EGMO et les résultats de l'étude paramétrique de l'adsorption du bleu de méthylène sur cette biomasse végétale (Ecorces de grains de Moringa Oleifera).

5.1. Caractérisation physico-chimique de EGMO

5.1.1. Caractérisation par spectroscopie infrarouge à transformée de fourrier (IRTF)

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier constitue un outil pour élucider les groupes fonctionnels et les modifications structurelles dans les échantillons, en particulier en ce qui concerne la disponibilité des principaux groupes impliqués dans les phénomènes d'adsorption. Cette technique a une capacité de discordance que ne permettent pas certaines autres techniques, car elle possède une région unique appelée empreinte digitale où la position et l'intensité des bandes sont spécifiques à chaque matrice.

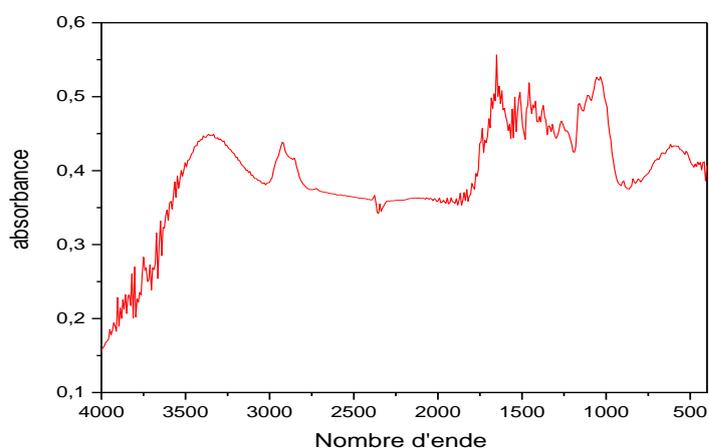


Figure 5.1 : Spectre IR des écorces de Moringa Oleifera

La figure 5.1 montre le spectre FTIR des granulés des écorces de Moringa Oleifera. Ce spectre montre l'apparition de plusieurs pics traduisant l'existence de nombreux groupements fonctionnels au sein de notre adsorbant, indiquant ainsi la nature complexe de ce matériau. La bande passante centrée sur 3336 cm^{-1} pourrait être attribuée à l'étirement des liaisons O-H présentes dans les protéines, les acides gras, les glucides et les unités de lignine ; ce groupe fonctionnel (OH) apparaît principalement dans les structures des protéines et acides gras présents dans les écorces de Moringa Oleifera. En raison de la teneur élevée en

protéines dans ces écorces, cette bande 3285 cm^{-1} contribuerait également dans cette région à l'étirement NH de la liaison amide. Dans la région comprise entre 1800 et 1500 cm^{-1} , un certain nombre de bandes se chevauchant sont observées et celles-ci pourraient être attribuées à l'étirement de la liaison carbonyle C=O. En raison de la nature hétérogène de l'écorce de *Moringa Oleifera* le groupe carbonyle peut être lié à différentes parties dont la partie lipidique des acides gras bandes à 1745 cm^{-1} ou la partie protéique des amides bande 1656 cm^{-1} [54].

5.1.2. Résultat de pH_{pzc}

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

Les suspensions préparées ont été maintenues sous agitation, à température ambiante, pendant 24 h. En traçant la courbe $Q_s = f(\text{pH})$ puis la détermination de point d'intersection entre cette courbe et l'axe des abscisses où la quantité $Q_s(\text{mg/g})$ est nulle ($Q_s = 0$).

La figure.5.2 représente l'évolution de la charge de surface Q en fonction du pH pour l'adsorbant (EGMO). Le pH_{pzc} a été trouvé de l'ordre de 6,33.

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

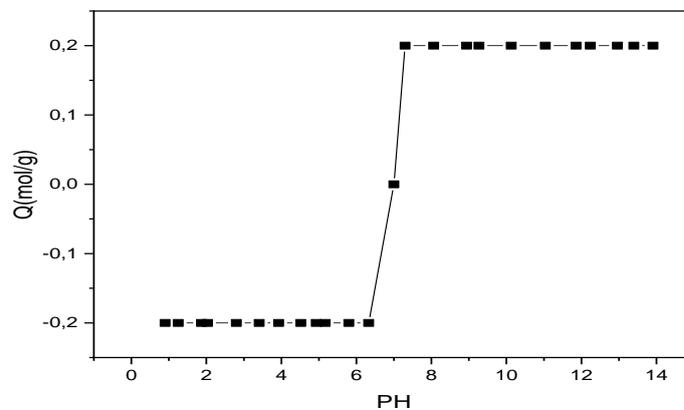


Figure 5.2 : résultat pH_{pzc} de EGMO

5.2. Résultats de l'étude paramétrique du colorant bleu de méthylène sur EGMO

5.2.1. Effet de temps de contact

La figure 5.3 représente l'évolution du rendement d'élimination du BM par EGMO en fonction du temps. Les résultats obtenus montrent que la capacité d'adsorption de polluant augmente en fonction du temps de contact jusqu'à atteindre un palier de saturation.

La courbe met en évidence deux parties distinctes : la première partie consiste en une adsorption rapide, cette phase correspond à un transfert de l'adsorbât de la phase liquide à la surface du matériau. Ce phénomène est constaté pendant 10 minutes de la réaction, ceci peut être interprété par le fait qu'en début d'adsorption, le nombre des sites actifs disponibles à la surface du matériau adsorbant est beaucoup plus important que celui des sites restant après un certain temps. La deuxième partie est plus lente. Cette zone correspond à l'établissement d'un équilibre entre les vitesses d'adsorption et de désorption.

L'équilibre est atteint au bout de 60min avec un rendement de 80,1%

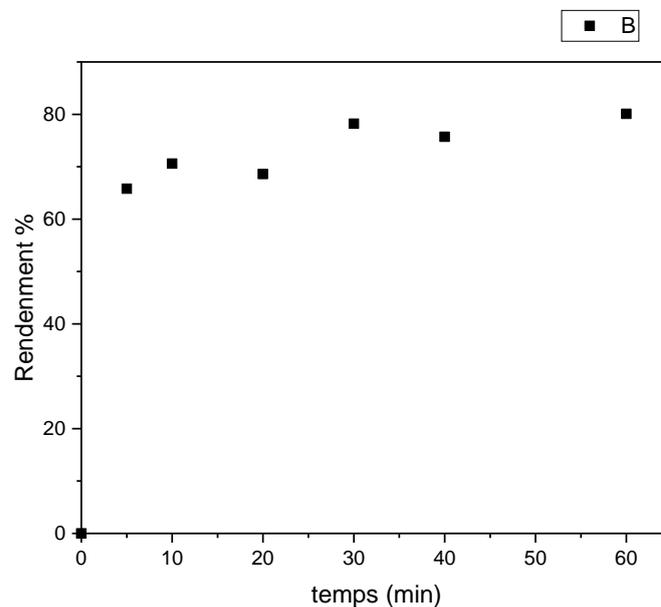


Figure 5.3 : Rendement d'élimination de BM en fonction du temps de contact
pH =6,8, t = 60 min , C=10mg/L

5.2.2. Effet de la masse

Les résultats de cette étude sont représentés sur la figure5.4.

Les résultats obtenus montrent que lorsque la masse est de 0,5g, le rendement d'élimination atteint 73%. Lorsque la masse de EGMO varie entre 0,5 et 1,5 g, il a été constaté que l'allure de graphe enregistre une légère diminution par rapport au rendement d'adsorption. Ce phénomène est peut-être expliqué par l'encombrement et non-saturation des sites d'adsorption. Par conséquent une masse de 0,5g est considérée comme suffisante pour atteindre le meilleur rendement d'adsorption.

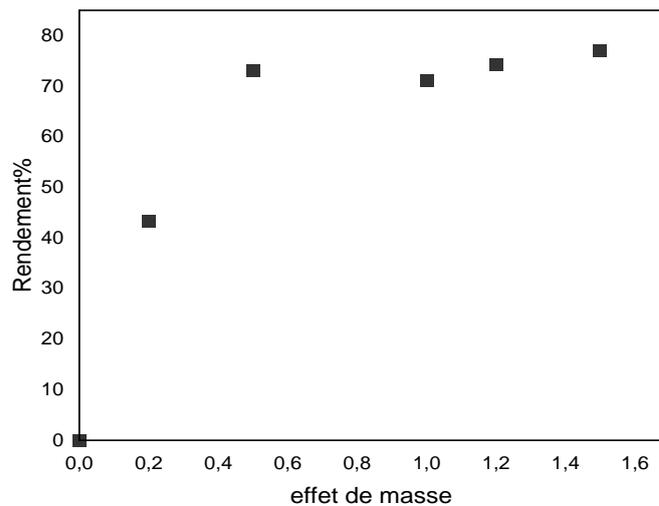


Figure 5.4 : Rendement d'élimination de BM en fonction de masse de l'adsorbant ;
pH=6.8, t=60min, C =10mg/l)

5.2.3. Effet de pH

La figure 5.5 représente l'évolution du rendement d'élimination du BM par PEGMO en fonction du pH.

La courbe met en évidence deux parties distinctes : première partie dont le pH varie de 2 à 5, il y a une croissance du rendement d'élimination.

En effet à pH inférieur à 6,33 l'adsorbant est chargé positivement ce qui implique des interactions entre les sites chargés positivement du matériau et le polluant anionique (pK_a du BM =3,8). Par contre aux pH supérieurs à 6,33 le matériau est chargé négativement ce qui engendre des répulsions électrostatiques entre les anions du polluant et la surface des graines de Moringa.

Les résultats obtenus montrent bien que la meilleure rétention du BM par l'adsorbant EGMO est obtenue au pH de la solution aqueuse synthétique préparée.

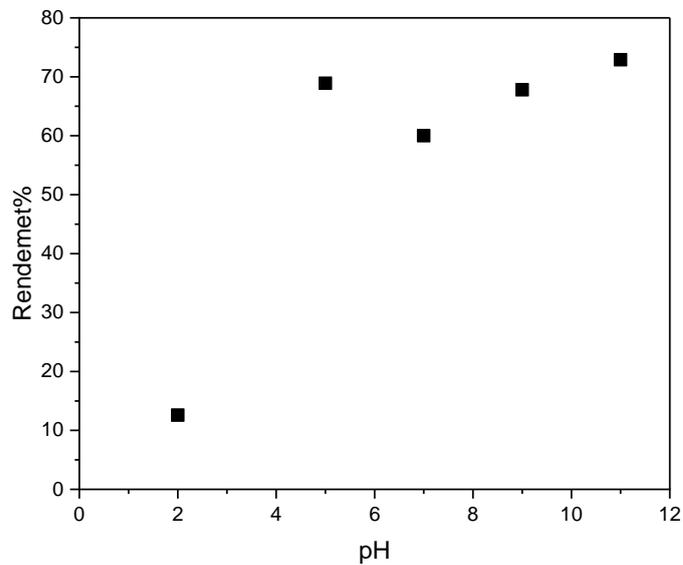


Figure 5.5 : Rendement d'élimination de BM en fonction de pH de L'adsorbant, pH=6,8, t=60min, C=10mg /L.

5.2.4. Effet de concentration initiale

La figure 5.6 représente l'évolution de la quantité du BM adsorbée sur EGMO en fonction de la concentration initiale de l'adsorbat.

Nous remarquons que la quantité du colorant fixée sur l'absorbant est optimale (42%) à 5 mg/L. Elle décroît ensuite avec l'augmentation de la concentration initiale

Et enfin, une concentration initiale de 5mg/L est considérée comme valeur optimale pour l'adsorption du colorant bleu de méthylène sur le solide PEGMO

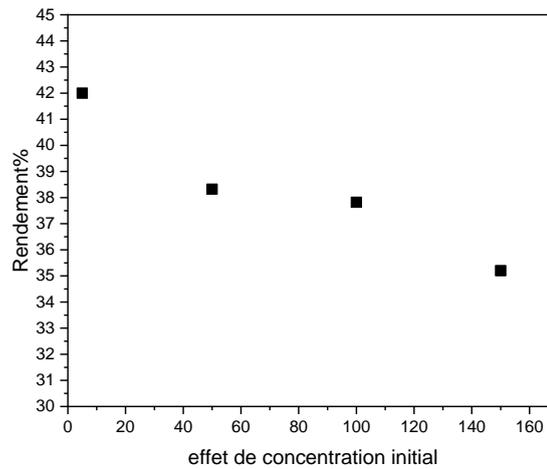


Figure 5.6 : Rendement d'élimination de BM en fonction de concentration de L'adsorbant (pH=6.8, t=60min, C=10mg)

5.3. Modélisation de la cinétique d'adsorption

Il est très important de prédire la vitesse au quel le polluant a été éliminé. Pour quantifier les changements de l'adsorption avec le temps et également pour évaluer les paramètres de la cinétique, deux modèles ont été appliqués : Modèle de pseudo-premier-ordre et modèle de pseudo-second-ordre.

5.3.1. Modèle cinétique de pseudo-premier ordre

Le tracé de la courbe : $\ln(Q_e - Q_t)$ en fonction du t permet de déterminer la constante k_1 et la quantité adsorbée à l'équilibre Q_e . Les résultats sont présentés dans la figure.5.7

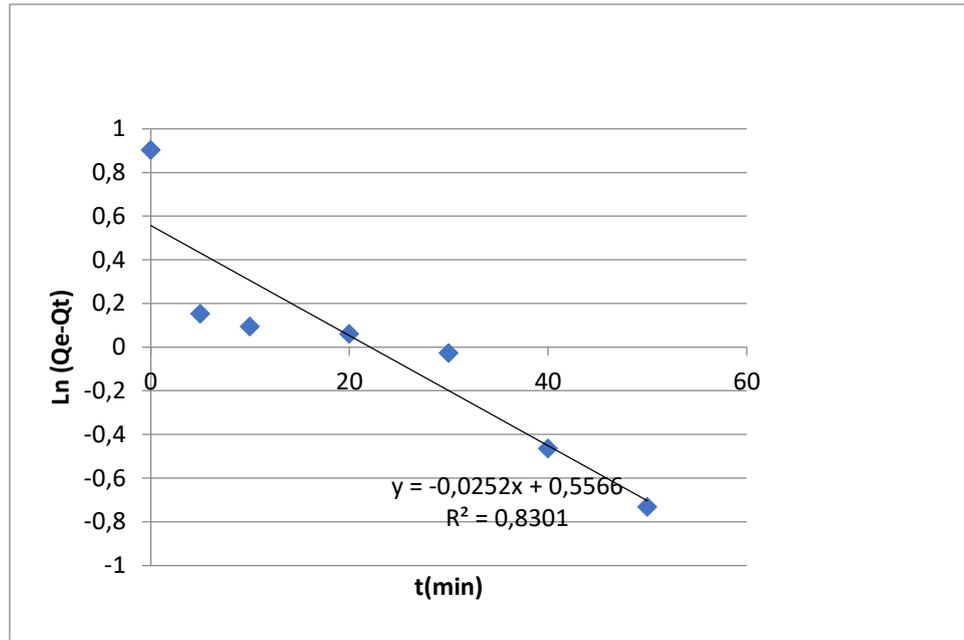


Figure 5.7 : Modèle de pseudo-premier ordre de l'adsorption de BM sur EGMO

5.3.2. Modèle cinétique de pseudo-second ordre

La courbe t/Q_t en fonction du t détermine la constante K_2 . Les résultats sont représentés sur la figure 5.8

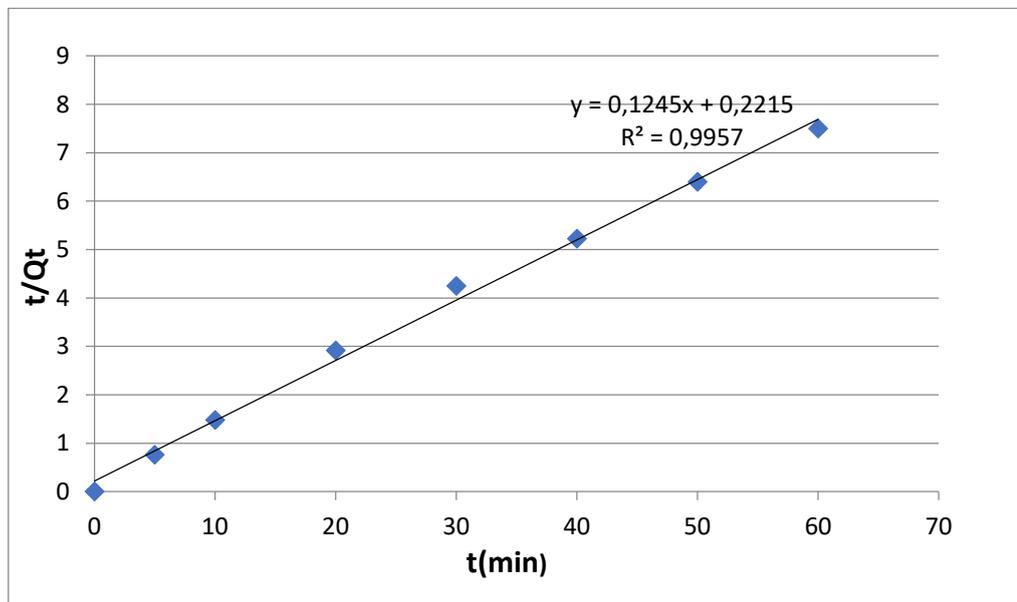


Figure.5.8 : Modèle de pseudo-second ordre de l'adsorption de BM sur EGMO

D'après les résultats obtenus et regroupés dans le tableau 5.1 de ci-dessous, il a été remarqué que le modèle du pseudo second ordre est décrit mieux les données cinétiques de l'adsorption du BM puisque le coefficient de corrélation est proche de l'unité ($R^2=0,99$). De même, il a été constaté que la valeur de la capacité d'adsorption calculée est très proche de celle déterminée expérimentalement.

Le modèle du pseudo second ordre est le mieux adapté pour décrire le comportement du BM sur les écorces des graines de Moringa. La plupart des systèmes d'adsorption sur les matériaux solides suivent une cinétique de pseudo-second ordre [54].

Tableau 5.1: Paramètres cinétiques pour l'adsorption du BM sur EGMO

| Modèle pseudo-1 ^{er} ordre | | | Modèle pseudo-2 ^{ème} ordre | | |
|--|----------------------------|-------|---|----------------------------|-------|
| $\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - K_1 t / 2.303$ | | | $\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{Q_e} t + \frac{1}{K_2 Q_e^2}$ | | |
| Q_e (mg/g) | K_1 (min ⁻¹) | R^2 | Q_e (mg/g) | K_2 (min ⁻¹) | R^2 |
| 1,74 | $-1,085 \cdot 10^{-2}$ | 0,83 | 8,03 | $-7 \cdot 10^{-2}$ | 0,99 |

5.4. Modélisation des isothermes d'adsorption

5.4.1. Modèle de Freundlich

En traçant $\ln(Q_e) = f(\ln C_e)$, les résultats obtenus sont représentés par la figure 5.9. D'où la pente de la droite est n et l'ordonnée à l'origine est $\log K_F$.

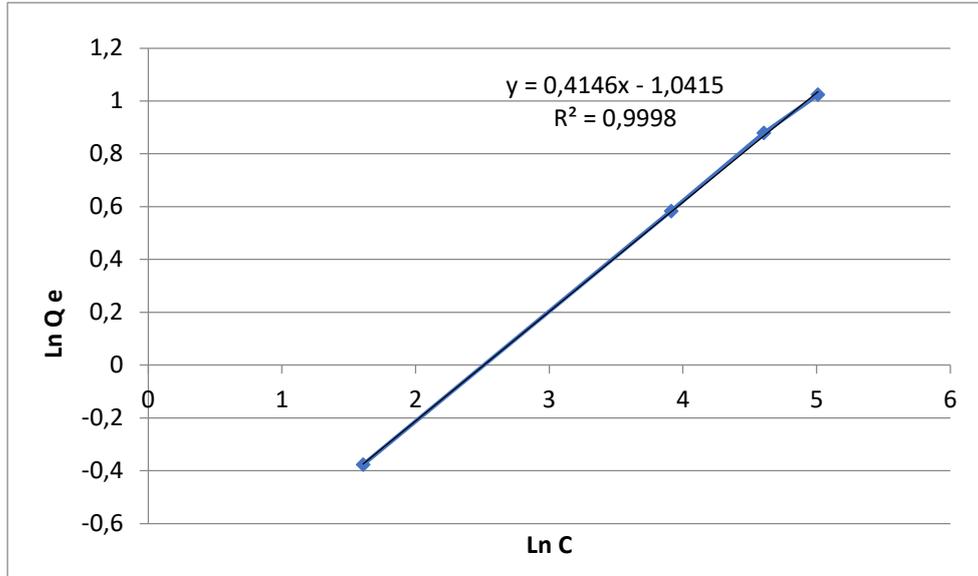


Figure.5.9 : Modélisation par le modèle de Freundlich

5.4.2. Modèle de Langmuir

En traçant $(C_e/Q_e) = f(C_e)$, les résultats obtenus sont représentés par la figure.5.10

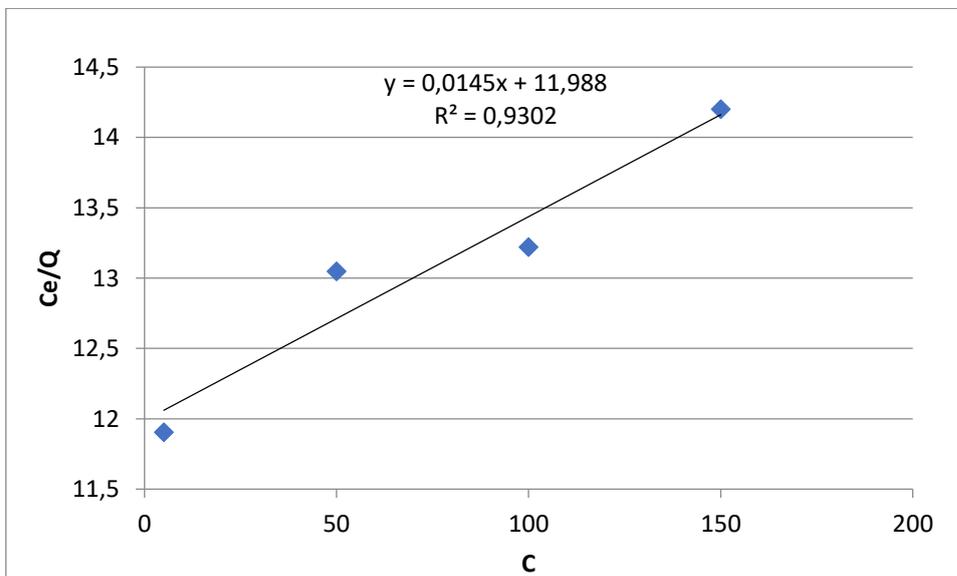


Figure 5.10 : Modélisation par le modèle de Langmuir

D'après les résultats obtenus indiqués dans le tableau 5.2, le modèle Freundlich est le mieux adapté pour décrire l'isotherme d'adsorption du bleu de méthylène sur les écorces des graines de Moringa puisque le coefficient de corrélation est proche de l'unité ($R^2=0,99$). De même, nous remarquons que la valeur de K_F est favorable pour démontrer que le modèle de

Freundlich est satisfaisant.

Le modèle de Freundlich s'applique bien notamment dans le cas d'adsorption multicouche avec des interactions possibles entre les molécules adsorbées.

Tableau 5.2 : les paramètres des deux modèles étudiés pour EGMO

| Langmuir | | | Freundlich | | |
|-----------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|------|----------------|
| Q _m (mg/g) | B | R ² | K _F (L/mg) | n | R ² |
| 68,69 | 1,21×10 ⁻³ | 0,93 | 2,83 | 0,41 | 0,99 |
| | | | | | |

Conclusion générale

Conclusion générale

Le présent travail est basé sur l'utilisation des écorces des graines de *Moringa Oleifera* (EGMO) pour la rétention du bleu de méthylène (BM) en système batch à la température ambiante. Plusieurs essais d'adsorption ont été réalisés en prenant en compte de l'influence de plusieurs paramètres opératoires à savoir : le temps de contact, la concentration initiale du polluant en solution, la masse d'adsorbant, et le pH.

Les résultats obtenus lors de notre présente étude, nous a permis de constater que:

- La cinétique d'adsorption du BM sur EGMO révèle un temps d'équilibre de 60 min avec un rendement de 80,1%
- Un rendement maximal de la rétention du BM de 73% est obtenu sur une masse égale à 0,5 g.
- L'adsorption du BM est très rapide aux faibles concentrations en BM. Le rendement optimal est atteint à une valeur de concentration $C_{ini} = 5 \text{ mg/L}$. Au-delà de cette valeur, une diminution du rendement d'élimination a été enregistrée.
- Le rendement d'élimination est influencé par la variation du pH. Il est de l'ordre de 76,7% pour un pH de ??? et 69% pour le pH de la solution synthétique préparée (6,8).
- Les données cinétiques d'adsorption montrent que le modèle de pseudo seconde ordre décrit mieux l'ordre de la cinétique de l'adsorption du BM sur EGMO.
- L'adsorption du BM sur EGMO suit bien l'isotherme de Freundlich avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.99$.
- Le potentiel de charge nul (pH pzc) est de l'ordre de 6,33.

Les résultats obtenus de la caractérisation du solide permettent de mettre en évidence les bandes caractéristiques du matériau.

En perspectives et vue l'originalité du sujet, nous envisageons de :

- Approfondir la caractérisation de l'adsorbant étudié par d'autres techniques telles que le microscope électronique à balayage (MEB), microscope électronique à transmission (MET), mesure de la surface spécifique par BET, la diffraction des rayons X...

- Compléter l'étude d'adsorption en faisant varier d'autres paramètres tels que la température, l'agitation ...etc.
- Faire une étude thermodynamique pour bien comprendre la nature du processus d'adsorption.
- Déterminer la stœchiométrie de la réaction afin de déterminer le mécanisme réactionnel entre le BM et les sites actifs du solide.
- Calculer l'énergie d'activation pour déterminer le type de l'adsorption : physique ou chimique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Robinson T, G. McMull an, R. March ant et P. Nigam (2001). Remediation of dyes in textile effluent: 388 Adsorption du bleu de méthylène à critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. Bioresour. Technol., 77, 247-255.
- [2] M.J. Ahmed, S.K. Dhedan. Equilibrium isotherms and Kinetics modeling of methyleneblue adsorption on agricultural Wastes-based activated carbons. Flui. Phas. Equil. 317 (2012) 9-14.
- [3] Juang R.S, F.C. Wu et R.L. Tseng (1997). The ability of activated clay for the adsorption of dyes from aqueous solutions. Environ. Technol., 18, 525-531.
- [4] H.Sadki, K.Zait ,M.Saidi, Adsorption d'un colorant cationique d'un milieu aqueux sur une argile locale activé, Rapport bibliographique, Université Abdelmalek Essaàdi -Maroc, 2014.
- [5] : L. Naidja ; Elimination du colorant orange en solution aqueuse par voie photochimique et par adsorption ; mémoire de magistère en chimie ; université de Mentouri Constantine ; p 23 ;(2010).
- [6] :I. Bounour ; Modélisation des isothermes d'adsorption dans le cas de : phénol et de bleu de méthyle sur le charbon actif en grain ; mémoire d'ingénieur d'état ; école nationale supérieure polytechnique ; p 3;(2009)
- [7] : starasbourg (géochimie de l'environnement), réactivité de surface d'argiles naturelles. Etude de l'adsorption de colorants anioniques, 21/03/2011, P47, 58, 59.
- [8] : Sedira N. Etude de l'adsorption des métaux lourds sur un charbon actif issu de noyaux de datte :Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Massaadia Souk-Ahras, 2012/2013
- [9] : Bouaziz A. Biosorption du nickel par la biomasse Pleurotusmutilus, Ecole Nationale polytechnique, juin, 2009.
- [11] : Kanouri R. Labide A. Adsorption du phénol sur la bentonite de Maghnia,Mémoire master Académique, Université KasdiMerbah-Ouargla, 2012/2013
- [11] :Khalifaoui A. Etude Expérimentale de L'élimination de Polluants Organiques et Inorganiques par Adsorption sur des Matériaux Naturels: Application aux Peaux d'Orange et de Banane, Thèse de Doctorat, Université Mentouri -Constantine, 2012

- [12] : Lauwerys, R., Toxicologie industrielle et intoxications professionnelles. Masson ed. Vol. 3. 1990, Paris
- [13]:W.J. Weber, B.M. Vanvliet, In: Activated carbon adsorption of organic from the aqueous phase, Ed. I.H. Suffet, M.J. Mc Guire1
- [14] : Boulkrah H. Etude comparative de l'adsorption des ions plomb sur différents adsorbants, Mémoire de Magister, l'université du 20 août 1955-Skikda, 2008
- [15] :Afnor. La qualité des sols, thermologie, échantillonnage, contrôle et qualité. Tomme 1. Editor AFNOR, 1996, Paris, p 299-310
- [16] :S. chitour, chimie physique des phénomènes de surface, OPU, Alger, 1976
- [17]: F. edeline, l'épuration physico-chimique, théorie et technologie des eaux ED, CEBEDOC SPRL Liège, 1998.
- [18]: W. J. MESSCHELEIN. Processus unitaires du traitement de l'eau potable. ED, CEBEDOC SPRL Liège1996.
- [19]: R. CALVET, le sol, propriété et fonctions, tome I constitution et structure, phénomènes aux interfaces, Editions France Agricole, 2003, P318.
- [21]: Brevet APG-RCC : PCT / FR 99 / 00748 du 31 mars 1999.
- [21]: J. Jimmy, L. HUMPHRY, E. George, Procédé de séparation, Technique sélection, Dimensionnement, DUNOD 2001
- [22]: N. Bouchelkia, « Etude de l'élimination du Plomb, du Zinc et du cadmium par adsorption sur un charbon actif préparé à base des noyaux de jujube », Mémoire de Magister, Université de Bejaia (2015).
- [23]: adsorption et catalyse hétérogène. Thèse de Doctorat : Génie des Matériaux. Algérie : Université Mohammed Seddik Benyahia (Jijel), 2018, 186.
- [24]: Krou N.J., 2010 - Etude expérimentale et modélisation d'un procédé séquentiel AD-OX d'élimination de polluants organiques. Thèse de doctorat, université de Toulouse, 169 p.
- [25]:Nussbaum, F., 2008 - Développement d'une installation de bio sorption à l'échelle pilote. Mémoire de l'ingénieur, Haute école spécialisée de suisse occidentale, 124 p.
- [26] :Cornet, D., Techniquesdel'ingénieur. Géniedesprocédésin 1J1250, 1J1250. 1992.
- [27] : Brunauer, S., et al., On a theory of the van der Waals adsorption of gases. Journal of the American Chemical society, 1940. **62**(7): p. 1723-1732.
- [28] : Sing, K.S.W., et al., Reportingphysisorptiondataforgas/solidssystemswithspecialreference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984). Pure and applied chemistry, 1985. **57**(4): p. 603-619

- [29]: Rouquerol, F., J. Rouquerol, and K.S.W. Sing, *Adsorption by Powders and Porous Solids*.
- [31]: G. D. Halsey. The role of surface heterogeneity. *Advan. catalysis*, 1952,4,259-269.
- [31]: Dipa et coli 2002 ; avom et coll., 2001
- [32]: Freundlich .H, (1909), *Kapillarchemie*. Akademische verlagshesellschaft, Leipzig, Germany
- [33]: Chouatm. laboubiF. Etude de l'adsorption du bleu méthylène par charbon actif, Mémoire de Master, Université Mohamed Khaider-Biskra, Juin2013
- [34]: Barrer; *Zeolites and clay minerals as sorbents and molecular sieves*; Academic Press
- [35]: J.Weber; B.M. Vanvliet; In: *Activated carbon adsorption of organic from the aqueous Phase*; Ed. I.H. Suffet; M.J. Mc Guire1.
- [36]: C.Moreno-castilla; *Adsorption of organic molecules from aqueous solution on carbon materials*; carbon; 42; 83; 94;(2004).
- [37]: L. Robert, . F.Dardel ; *Adsorption J 2730 ; Traité Génie des procédés* ;(1988).
- [38]: H.Xiuli, W. Wel, M. Xiaojian; *Adsorption characteristics of methylene blue onto low cost biomass material lotus leaf*. *Chemical Engineering Journal*.Vol171; p1-8;(2011).
- [39]: Y.Liu, Y.Zheng, A.Wang; *Enhanced adsorption of methylene blue from aqueous solution by chitosan-g-poly; acrylic acid. vermiculite hydrogel composites*. *J. Environ. Sci. Vol22 ; p486-493*; (2010).
- [41]:https://www.peresblancs.org/le_moringa.h
- [41]:.N.bensacia,N.taoualit *adsorption des polluants émergents pharmaceutique sur les écorces de moringa oleifera 2021*
- [42]: Abbas H..2021,Louni S., 2009 - *Extraction et caractérisation physicochimique del'huile de graines de Moringa oleifera*. Mémoire de Magister, Ecole Nationale Supérieure Agronomique El-Harrach, 90 p
- [43]: N.Bouanimba ,*Modélisation et optimisation de la cinétique de dégradation photo catalytique de polluants organiques en solution*, Diplôme de Magister, Université Mentouri Constantine- Algérie,2009.
- [44]: D.Chebli , *Traitement des eaux usées industrielles: Dégradation des colorants azoïques par un procédé intégré couplant un procédé d'oxydation avancée et un traitement biologique*, Thèse de Doctorat, Université Farhat Abbas-Sétif-Algérie,2012.
- [45]: E.guechi, *Enlèvement de colorants à partir de solutions aqueuses par des matériaux sorbants non conventionnels et à faible coût*, Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba-Algérie, 2013.

- [46] : F.Benamraoui, Elimination des colorants cationiques par des charbons actifs synthétisés à partir des résidus de l'agriculture, Diplôme de Magister, Université Ferhat Abbas –Sétif-Algérie,2014.
- [47] : Zidani Leila, Thèse magister ; Etude de la dégradation de quatre colorants azoïques par photo-catalyse comparaison avec d'autres procédés d'oxydation avancés (POA), Université Batna, 2009.
- [48] : Hammami Samiha , Thèse doctorat, Etude de dégradation des colorants de textile par les procédés d'oxydation avancée. Application à la dépollution des rejets industriels, Université Paris-Est, 2008.
- [49] : Radouane Salah, Thèse magister ; Elimination d'un polluant organique par des photo-inducteurs en phase homogène et hétérogène, Université Constantine, 2010.
- [51] : Bailleux, 2003 ; Ozerov et al.2000 ; Fay, 2003, Peternel et al.2007].
- [51] :Benkara A , Elaboration et Caractérisation des Nanocomposites à base de Graphène par voie Électrophorèse : Application à la Dégradation de Polluants Organiques Le Bleu de Méthylène(université blida 1,2019)
- [52] :IrkiI A, Contrôle de qualité microbiologique des 4 produits pharmaceutiques non obligatoirement stérile « l'éosine aqueuse bleu de méthylène, violet de gentiane, eau oxygénée »(universite blida 1,2013)
- [53] : Fatima Zahra SAIDI . Elimination du Bleu de Méthylène par des Procédés d'Oxydation Avancée . Mémoire de magister en chimie (Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen -) ; 2013 ; p11
- [54] :hamida A ,boubekour S, contribution a l'étude de l'adsorption de bleu de méthylène sur deux adsorbants ;synthétique (hydroxydes doubles lamellaires Mg-Al-HDL) et naturel(graines de moringa oleifera),université blida 2021
- [55] :Gueham K, ctérisation des couches minces de l'oxyde de zinc (ZnO) déposées par la technique APCVD,(université blida 1 2020

Annexe

La courbe d'étalonnage de bleu de méthylène

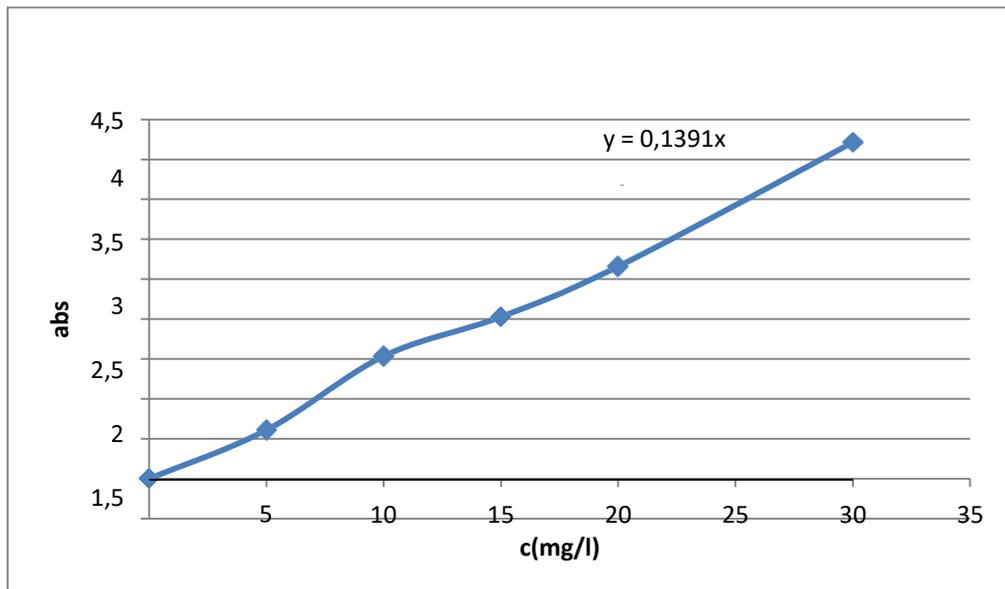


Figure 4: Courbe d'étalonnage du bleu de méthylène pH=6.8 et $\lambda_{\max} = 661\text{nm}$

| | | | | | |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C(mg/l) | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 |
| V (ml) | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1 | 1.50 |
| Abs | 0.609 | 1.534 | 2.027 | 2.659 | 4.213 |