

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de RELIZANE
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département : Chimie



MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en :
Chimie des matériaux

Intitulé

**Synthèse d'un Charbon Actif-Nanocompositie pour le traitement
des polluant organiques.**

Présenté par :

Mlle : NEBAH Rahma

Devant les membres de jury :

Président :	Mr Seghier Abdelkrim	Maître assistant (A) (U. Relizane)
Encadreur :	Mr DOUINAT Oukacha	Maître de conférence (A) (U. Relizane)
Co-Encadreur :	Mr BOUCHERDOUD Ahmed	Maître de conférence (A) (U. Relizane)
Examinatrice :	Mme Zerrouki Nawel	Maître assistant (A) (U. Relizane)

Année universitaire : 2023/2024

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

Au meilleur père et à ma très chère maman qu'ils ont été toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études. En signe de reconnaissance, qu'ils trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et de moyens pour me voir réussir dans mes études.

À mes chers frères et sœurs, Pour leur encouragement et leur bonté qu'ils m'ont accordé, j'exprime ma profonde reconnaissance et mon grand respect.

À mes amis(e) et collègues, puisse ce travail vous exprime mes souhaits de succès, et mes sincères sentiments envers vous.

À tous ceux qui me sont chers, aux personnes qui m'ont aidé et encouragé de près ou de loin, qui étaient toujours à mes côtés et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études.

NEBAH Rahma

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord exprimer ma gratitude envers Dieu le Tout-Puissant pour m'avoir accordé le courage et la patience tout au long de ces années d'études.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers Monsieur **DOUINAT Oukacha** pour avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

Je tiens également à exprimer ma gratitude respectueuse envers tous les membres du jury, Monsieur **SEGHIER Abdelkrim** et Madame **Zerrouki Nawel**, qui m'ont fait l'honneur de participer à cette évaluation. Leurs commentaires et discussions enrichissantes me permettent de bénéficier de leurs connaissances approfondies et de leur esprit critique constructif, ce qui m'aidera à améliorer encore davantage mon travail.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers mon promoteur, Monsieur **BOUCHERDOUD Ahmed**, pour son accompagnement et son soutien tout au long de mon travail, ainsi que pour son aide documentaire et ses encouragements.

Je remercie chaleureusement Monsieur **TABTI Senouci** pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée dans mon travail et pour ses précieux conseils.

Un grand merci à tous les membres du laboratoire qui m'ont toujours accompagné pendant de longues journées, pour leur intérêt et leur aide concernant mon travail.

Enfin, je remercie tous mes amis et mes collègues, ainsi que toutes les personnes qui m'ont encouragé et soutenu de près ou de loin durant la réalisation de mon travail, en particulier les professeurs du département de chimie.

ملخص :

تهدف الدراسة المقدمة في هذه الرسالة إلى معالجة المياه الملوثة باستخدام تقنية الامتزاز ، وهي الطريقة المعترف بها لفعاليتها في إزالة الملوثات من مياه الصرف الصحي. في هذه الدراسة، تم اختيار الأزرق الميثيلين كملوث نموذجي، واستخدم الفحم النشط النانومتري، المستمد من الكتلة الحيوية، كمادة امتزاز.

تم إجراء تجارب لتقييم كفاءة امتزاز الأزرق الميثيلين على الفحم النشط النانومتري. تم دراسة تأثير مختلف المعلمات على عملية الامتزاز ، مثل تركيز الصبغة، وقيمة الحموضة في المحلول، ودرجة الحرارة، ووقت الاتصال، وكمية المادة الممتزة. تشير النتائج إلى أن الفحم النشط النانومتري المستمد من الكتلة الحيوية المختارة يمكن استخدامه كمادة امتزاز فعالة لمعالجة الملوثات العضوية. وهذا يفتح الباب أمام التطبيقات المحتملة لهذه المادة في مجال مكافحة التلوث المائي، مما يوفر بديلاً مثيراً للاهتمام للطرق التقليدية لمعالجة مياه الصرف الملوثة. وبالإضافة إلى ذلك، تظهر النتائج أن النموذج الايزوثيرمي لانجمير يتناسب بشكل أفضل مع البيانات التجريبية، مع سعة امتزاز الأزرق الميثيلين بلغت 46.37 ملغ/جرام. في بيئة قاعدية، معدل إزالة الأزرق الميثيلين أعلى من في بيئة حمضية، وزيادة درجة الحرارة تحسن الامتزاز.

كلمات مفتاحية: ملوثات عضوية، فحم نشط، امتزاز ، النموذج الايزوثيرمي لانجمير، والنانوكومبوزيت

Abstract:

The research presented in this thesis aims to treat polluted water using adsorption technology, a method recognized for its effectiveness in removing contaminants from wastewater. In this study, methylene blue was chosen as a model contaminant, and nanocomposite activated carbon, derived from biomass, was used as the adsorbent material.

Experiments were conducted to evaluate the efficiency of methylene blue adsorption on the nanocomposite activated carbon. The impact of various parameters on the adsorption process, such as dye concentration, solution pH, temperature, contact time, and adsorbent quantity, was studied.

The results suggest that the nanocomposite activated carbon derived from selected biomass could be used as an effective adsorbent material for treating organic pollutants. This opens the door to potential applications of this material in water pollution control, providing an interesting alternative to traditional methods of treating contaminated water. Furthermore, the results show that the Langmuir isotherm fits better with experimental data, with a methylene blue adsorption capacity of 46.37 mg/g. In a basic environment, the methylene blue removal rate is higher than in an acidic environment, and increasing the temperature improves adsorption.

Keywords: Organic pollutants, activated carbon, adsorption, Langmuir isotherm, and nanocomposite.

Résumé :

La recherche présentée dans ce mémoire vise à traiter les eaux polluées en utilisant la technologie de l'adsorption, une méthode reconnue pour son efficacité dans l'élimination des contaminants présents dans les eaux chargées de déchets. Pour cette étude, le bleu de méthylène a été choisi comme contaminant modèle, et le charbon actif nanocomposite, dérivé de la biomasse de bois, a été utilisé comme matériau adsorbant.

Des expériences ont été menées pour évaluer l'efficacité de l'adsorption du bleu de méthylène sur le charbon actif nanocomposite. L'impact de différents paramètres sur le processus d'adsorption, tels que la concentration du colorant, le pH de la solution, la température, le temps de contact et la quantité de l'adsorbant, a été étudié.

Les résultats suggèrent que le charbon actif nanocomposite dérivé de la biomasse sélectionnée pourrait être utilisé comme matériau adsorbant efficace pour le traitement des polluants organiques. Cela ouvre la voie à de potentielles applications de ce matériau dans le domaine de la dépollution de l'eau, offrant ainsi une alternative intéressante aux méthodes traditionnelles de traitement des eaux contaminées. De plus, les résultats montrent que l'isotherme de Langmuir s'adapte mieux aux données expérimentales, avec une capacité d'adsorption du bleu de méthylène de 46,37 mg/g. Dans un environnement basique, le taux d'élimination du bleu de méthylène est plus élevé que dans un environnement acide, et l'augmentation de la température améliore l'adsorption.

Mots clés : Polluants organiques, charbon actif, adsorption isotherme de Langmuir, et Nanocomposite

Liste des abréviations

Liste des abréviations :

CA : Charbon actif.

PPCP : Les produits pharmaceutiques et de soins personnels.

J.-C : Jesus-Christ.

XXe : 20^e siècle (commence le 1^{er} janvier 1901 et finit le 31 décembre 2000).

PCM : Matériaux à base de carbone pyrogène.

Fig :Figure.

GAC : Grains de charbon actif.

EAC : Charbons actifs extrudés.

PH : Potentiel hydrogène.

H₃PO₄ : L'acide phosphorique.

ZnCl₂ : Le chlorure de zinc.

PM : Un poids moléculaire.

COV : Les composés organiques volatils.

HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques.

PCB : Polychlorobiphényles.

CVD : Dépôt chimique en phase vapeur.

PNC : Les nanocomposites polymères.

CNT : Les nanotubes de carbone.

TiO₂ : Dioxyde de titane.

Fe₂O₃ :Oxide de fer III (Oxide ferrique) .

ZnO : Oxide de zinc.

AgNP : Les nanoparticules d'argent.

g-C₃N₄ : Graphique carbon nitride.

Liste des abréviations

UV-Visible : Ultraviolet et visible .

MnO₂ : Dioxyde de manganèse.

HCl : L'acide chlorhydrique.

NaOH : Hydroxyde de sodium.

BM : bleu de méthylène.

Na₂S₂O₃ : Le thiosulfate de sodium.

M : Mol par litre (mol/L).

g : Le gramme.

mg : Un milligramme.

°C : Degre celsius.

SOMMAIRE

Liste des abréviations

Liste des Tableaux

Liste des figures

Introduction générale.....01

Chapitre I : Charbon actifs

I. Introduction..... 03

I.1. Charbon actif..... 03

I.2. Caractéristiques de charbon actif 04

 I.2.1. Les caractéristiques physiques 04

 a- Structure poreuse..... 04

 b- La densité 05

 c- La couleur..... 06

 d- La Forme 06

 I.2.2. Les caractéristiques chimiques..... 06

 a- Composition élémentaire..... 06

 b- Surface fonctionnelle..... 07

I.3. Adsorption 07

 I.3.1. Les paramètres influencent sur l'adsorption 08

 a- Le pH..... 08

 b- La préparation d'un charbon actif..... 08

I.4. Application de charbon actif..... 09

 a- Application du charbon actif dans la pollution de l'environnement..... 09

 b- Application du carbone dans l'industrie l'alimentation et des jus..... 10

 c- Application du charbon actif dans la fabrication de médicaments et de compléments nutritionnels 11

Sommaire

d- Application du charbon actif en cosmétique	12
I.5.Conclusion	12

Chapitre II : Nanocomposite pour le traitement des eaux

II. Introduction.....	13
II.1. Définition.....	13
II.2. Classification de nanocomposite	13
II.2.1. Classification selon la matrice	13
a- Nanocomposites à matrice céramique.....	14
b- Nanocomposites à matrice métallique.....	14
c- Nanocomposites à matrice polymère	15
II.2.2. Classification selon l'organisation des charges.....	15
a- Nanocomposite exfoliés	15
b- Nanocomposite intercalés	16
c- Nanocomposites floculés.....	16
II.3. Synthèse des Nanocomposites.....	17
II.3.1. Méthodes Top-Down	17
a- Méthode de broyage mécanique.....	17
b- Méthode de Précipitation	17
c- Méthode de Lithographie	18
II.3.2. Méthodes Bottom-Up	18
a- Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)	19
b- La réduction chimique.....	19
c- Polymérisation in situ.....	20
II.4. Caractéristiques de nanocomposite.....	20
II.4.1. Caractéristiques mécaniques.....	20
II.4.2. Stabilité thermique et effet retardateur de flamme	20
II.4.3. Caractéristiques optiques	21

Sommaire

II.5. Application des pour le traitement des eaux.....	21
II.5.1. Nanocomposite pour l'adsorption	21
II.5.2. Nanocomposite pour la photocatalyse	22
II.5.3. Nanocomposite pour la Filtration	22
II.5.4. Nanocomposite pour la désinfection.....	23
II.6. Conclusion	23

Chapitre III : Matériels et méthodes

III Introduction	25
III.1 Matériels utilisés	25
III.2 Produits utilisés	25
III.3 Préparation de charbon actif.....	25
III.4 Test d'adsorption de Bleu d méthylène sur le charbon actif nanocomposite.....	29
III.4.1 Effet du temps	29
III.4.2 Effet de masse	29
III.4.3 Effet de concentration de Méthylène bleu.....	30
III.4.4 Effet de Ph	30
III.4.5 Effet de la température	31
III.5 Analyses de spectrophotomètre Uv-visible.....	31
III.6 Conclusion.....	32

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV. Introduction	33
IV.1 Optimisation des paramètres influencent sur l'adsorption.....	33
IV.1.1 Effet du temps	33
IV.1.2 Effet de masse	34
IV.1.3 Effet de pH de la solution de BM	36
IV.2 Isotherme d'adsorption	37

Sommaire

IV.2.1 Isotherme de Langmuir	38
IV.2.2 Isotherme de Freundlich.....	40
IV.3 Effet de température sur l'adsorption.....	42
IV.4 Conclusion.....	43
Conclusion générale	45
Référence.....	47

Liste t des tableaux

Liste des tableaux

Tableau IV.1 : paramètre d'isotherme de Langmuir	39
Tableau IV.2 : paramètres d'isotherme de Freundlich	42

Liste des figures

Liste des figures :

Fig I.1: Charbon actif en poudre.....	04
Fig I.2: Charbon actif Filtralib en vrac	04
Fig II.1 : Constituions de nanocomposite.....	13
Fig II.3 : Nanocomposites à matrice céramique	14
Fig II.3 : Nanocomposites à matrice métallique.....	15
Fig II.4 : Nanocomposites à matrice polymère	15
Fig II.5 : Nanocomposite exfoliés	16
Fig II.6 : Nanocomposite intercalés	16
Fig III.1 Le déchet végétale après le tamisage.....	26
Fig III.2 : Préparation des nanoparticules de dioxyde de manganèse	26
Fig III.3 : Lavage de charbon active nanocomposite préparé.	27
Fig III.4 : Le produit finale obtenu.....	27
Fig III.5 : Schéma présenter les étapes de fabrication du charbon actif.....	28
Fig III.6 : Test de l'effet du temps sur l'adsorption de BM	29
Fig III.7 : Résultat de l'effet de concentration de BM sur le taux d'élimination	30
Fig III.8 : Résultat de l'effet de pH sur le taux d'élimination de BM.....	30
Fig III.9 : Expérience de l'effet de la température sur l'adsorption de BM.....	31
Fig III.10 : L'appareil de spectrophotomètre UV-visible	31
Fig IV.1 : Effet de temps sur taux d'élimination de BM.....	33
Fig IV.2 : Effet de temps sur taux la quantité de BM absorbé	34
Fig IV.3 : Effet de masse sur le taux d'élimination et la quantité adsorbé de BM par le charbon actif nanocomposite.....	35
Fig IV.4 : Effet de pH sur le taux d'élimination de BM par le charbon actif nanocomposites	36

Liste des figures

Fig IV.5 : Effet de pH sur la quantité de BM adsorbé par le charbon actif nanocomposite	37
Fig IV.6 : Isotherme d'adsorption de BM	38
Fig IV.7 : Isotherme de Langmuir de l'adsorption de BM sur le charbon actif nanocomposite	40
Fig IV.8 : Isotherme de Freundlich de l'adsorption de BM sur le charbon actif nanocomposite	41
Fig IV.9 : Effet de température sur la quantité de BM adsorbé par le charbon actif nanocomposite.....	42

Liste des tableaux :

Tableau IV.1 : paramètre d'isotherme de Langmuir	39
Tableau IV.2 : paramètres d'isotherme de Freundlich	42

Introduction générale :

Ces dernières années, des concentrations alarmantes de micropolluants émergents ont été fréquemment observées, tels que les pesticides, les produits pharmaceutiques et de soins personnels (PPCP) et les perturbateurs endocriniens (EDC), dans l'eau de surface, le sol et l'eau potable. Les produits chimiques anthropiques émis et accumulés dans la nature représentent une menace potentielle pour la santé humaine et l'environnement aquatique. Ainsi, il est primordial de développer une technologie performante et réalisable afin de supprimer ces micropolluants [1].

Le phénomène d'adsorption est l'une des méthodes utilisées pour traiter les micropolluants. Il s'agit d'un processus de surface permettant d'éliminer les polluants organiques et inorganiques. Lorsqu'une solution contenant un soluté absorbable entre en contact avec un solide ayant une surface très poreuse, les forces d'attraction entre les molécules solides et liquides entraînent la concentration ou le dépôt de certaines molécules de soluté de la solution sur la surface du solide. Le soluté ainsi retenu à la surface du solide est désigné sous le nom d'adsorbat, tandis que le solide qui le retient est désigné sous le nom d'adsorbant. L'adsorption se réfère à l'accumulation superficielle de l'adsorbât sur l'adsorbant. La formation d'une phase adsorbée présentant une composition différente de celle de la phase liquide massive est considérée comme une étape cruciale [2].

Le charbon actif nanocomposite est couramment utilisé comme sorbant pour éliminer les composés organiques. Nous nous concentrons sur la fabrication du charbon actif, proposant la pyrolyse des matières premières ainsi que diverses techniques d'activation (physiques et chimiques). De plus, les propriétés physiques telles que la surface, la taille et la distribution des pores, ainsi que la composition chimique de la surface (groupes fonctionnels de la surface), sont décrites. La capacité d'adsorption du charbon actif est fortement influencée par sa porosité et sa composition chimique de surface [3].

Dans ce travail, le premier chapitre aborde le charbon actif, sa définition, ses propriétés (chimiques et physiques), en mettant particulièrement l'accent sur l'adsorption, sa fabrication et ses utilisations dans divers domaines. Le deuxième chapitre, quant à lui, se penche sur les nanocomposites pour le traitement de l'eau, en définissant ce concept, en présentant ses classifications, sa synthèse, ses propriétés et son application dans le traitement de l'eau.

Enfin, nous avons préparé de la poudre de charbon actif à partir de déchets végétaux en passant par plusieurs étapes, notamment l'activation chimique, la pyrolyse et le séchage, en ajustant la

Introduction générale

quantité d'activateur et la durée d'activation pour optimiser les propriétés physiques et chimiques du charbon actif. Nous avons ensuite évalué la capacité de ce charbon actif à adsorber les métaux à travers plusieurs expériences et analysé les résultats obtenus.

I. Introduction :

L'utilisation du carbone remonte à des millénaires, avec des preuves de son utilisation par les anciens Égyptiens et Sumériens dès 3750 avant J.-C. pour la réduction des minerais de cuivre, de zinc et d'étain dans la production de bronze. Ces civilisations ont découvert que le carbone pouvait agir comme un agent réducteur dans les processus métallurgiques, permettant ainsi la fabrication de bronze, un alliage crucial pour leur développement technologique.

En 1773, Carr Wilhelm, un chimiste originaire de Poméranie, une région de la mer Baltique sous contrôle suédois à l'époque, a fait une découverte importante en mettant en évidence le pouvoir d'absorption des substances dérivées du carbone provenant de différentes sources. Cette observation a jeté les bases de la compréhension moderne de l'adsorption et a ouvert la voie à de futures recherches sur les applications du carbone dans divers domaines.

Cependant, ce n'est qu'au début du XXe siècle que le premier charbon actif fabriqué de manière industrielle, connu sous le nom commercial d'Eponit, a été introduit en Autriche en 1911 par la société Fanto Works. Cette innovation a marqué le début de l'utilisation généralisée du charbon actif dans diverses industries, notamment dans le domaine de la purification de l'eau, du traitement des gaz et des liquides, et de nombreuses autres applications. [4].

I.1. Charbon actif

Le terme "charbon actif" est souvent utilisé pour décrire les matériaux à base de carbone possédant une structure poreuse interne développée [5], connus également sous le nom de matériaux à base de carbone pyrogène (PCM) [6]. Le charbon actif est principalement un solide amorphe avec une surface interne extrêmement étendue. Ses propriétés d'adsorption uniques sont le résultat du choix du matériau de départ, de la méthode d'activation et du contrôle des conditions de traitement. Les matériaux organiques riches en carbone sont souvent utilisés pour fabriquer des produits commerciaux à base de charbon actif, tels que le charbon, le lignite, le bois, les coquilles de noix, la tourbe, le brai et le coke [7]. Avec sa surface élevée et sa macroporosité bien développée, comprenant des pores de tailles moyennes, moyennes et grandes, ainsi qu'une variété de groupes fonctionnels présents à sa surface, ce matériau est polyvalent et peut être utilisé dans de nombreux domaines, notamment dans la lutte contre la pollution environnementale [8].



Figuier I.1: Charbon actif en poudre [9]



Figuier I.2Charbon actif Filtralib en vrac [10]

I.2. Caractéristiques de charbon actif :

Le charbon actif est essentiellement constitué d'une structure poreuse [11], ce qui signifie qu'il contient de nombreux petits espaces ou "pores" à l'intérieur de sa structure. Ces pores sont formés par des arrangements d'atomes de carbone. Cette porosité est cruciale car elle offre une surface interne considérable où les molécules indésirables présentes dans un liquide ou un gaz peuvent être piégées ou "adsorbées".

Les propriétés physiques et chimiques du charbon actif déterminent la taille, la forme et la distribution de ces pores, ainsi que la nature des interactions chimiques entre le charbon et les molécules qu'il adsorbe. Par exemple, une plus grande surface interne et une porosité plus étendue augmentent généralement la capacité d'adsorption du charbon actif. De même, les groupes chimiques présents à la surface du charbon actif peuvent interagir différemment avec les molécules cibles, ce qui affecte également son efficacité d'adsorption.

I.2.1. Les caractéristiques physiques :

a- Structure poreuse :

Les charbons actifs se distinguent par leurs remarquables propriétés de surface, caractérisées par une variété de pores de différentes tailles et accessibilités. Ils sont généralement classés en trois catégories principales :

Micropores : Ce sont des pores ultrafins de moins de 0,7 nanomètre de diamètre, ainsi que des pores superfins dont le diamètre varie de 0,7 à 2 nanomètres. Ces pores sont extrêmement petits, avec un diamètre de moins de 0,7 nanomètre. Leur taille réduite signifie qu'ils sont capables d'adsorber des molécules de petite taille et sont particulièrement efficaces pour

piéger les substances organiques et inorganiques à l'échelle moléculaire. Les micropores sont essentiels pour augmenter la surface spécifique du charbon actif et améliorer son pouvoir d'adsorption, notamment pour les polluants de petite taille tels que les gaz toxiques et les composés organiques volatils.

Mésopores : Ils ont un diamètre compris entre 2 et 50 nanomètres. Ces pores ont un diamètre compris entre 2 et 50 nanomètres. Ils sont plus grands que les micropores, ce qui leur permet d'adsorber des molécules de taille moyenne, telles que les colorants, les pesticides et les composés organiques plus volumineux. Les mésopores contribuent également à la surface spécifique du charbon actif, mais leur taille relativement plus grande les rend également accessibles à un plus large éventail de molécules

Macropores : Ces pores ont un diamètre dépassant les 50 nanomètres. Ce sont les plus grands pores, avec un diamètre dépassant les 50 nanomètres. Bien qu'ils ne représentent qu'une petite partie de la surface interne du charbon actif, les macropores sont importants car ils permettent une circulation rapide des liquides et des gaz à travers la structure du charbon actif. Cela favorise une adsorption efficace en permettant un accès rapide des molécules cibles aux pores plus petits.

Les charbons actifs sont principalement composés de mésopores et de micropores, qui cumulent généralement environ 95 % de leur surface interne [12]. Cependant, la distribution et l'accessibilité de ces pores peuvent varier selon plusieurs facteurs, notamment la méthode de production, les matières premières utilisées et les conditions de traitement.

b- La densité :

La densité réelle du charbon actif fait référence à la masse de charbon actif par unité de volume, mesurée en grammes par centimètre cube (g/cm^3) ou en livres par pied cube (lb/ft^3). Une densité réelle typique pour le charbon actif se situe entre 2,0 et 2,2 g/cm^3 (ou entre 125 et 137 lb/ft^3) [13]. Cette plage de valeurs peut varier en fonction de plusieurs facteurs, notamment la méthode de production, les matières premières utilisées, le degré d'activation, et la granulométrie du charbon actif. Une densité plus élevée indique généralement une plus grande compacité du matériau, ce qui peut être dû à une plus grande concentration de matière ou à une réduction de la porosité. Cependant, une densité plus élevée n'indique pas nécessairement une meilleure performance d'adsorption, car la structure poreuse du charbon actif est cruciale pour son efficacité. Une densité plus basse peut parfois être préférée dans certaines applications pour favoriser une meilleure accessibilité des pores et une adsorption plus efficace des contaminants.

c- La couleur:

Le charbon actif présente une teinte noire. Cette couleur sombre est principalement due à sa composition à base de carbone et à son processus de fabrication qui implique souvent la pyrolyse de matières organiques à haute température. Cette pyrolyse conduit à la formation de carbone amorphe, ce qui confère au charbon actif sa couleur noire caractéristique.

La couleur noire du charbon actif est également associée à ses propriétés d'adsorption. Les surfaces poreuses du charbon actif absorbent et retiennent les substances indésirables, ce qui peut contribuer à assombrir davantage sa couleur. Cette capacité à adsorber les impuretés est ce qui rend le charbon actif si efficace dans diverses applications de purification de l'eau, du gaz et d'autres liquides.

d- La Forme :

Il existe une grande variété de charbons actifs disponibles pour les utilisations de purification dans les secteurs industriels [14]. Parmi ceux-ci, on peut distinguer plusieurs types courants :

Grains de charbon actif (GAC) : Ce sont des granulés de charbon actif généralement utilisés dans les filtres à lit fixe pour la purification de l'eau potable, le traitement des eaux usées, et d'autres applications où une grande surface de contact est nécessaire.

Charbons actifs extrudés ou granulés (EAC) : Ces charbons actifs sont fabriqués sous forme de cylindres ou de granulés et sont souvent utilisés dans les filtres à lit mobile pour la purification de l'eau et du gaz, ainsi que dans les applications de désodorisation et de purification de l'air.

1.2.2. Les caractéristiques chimiques :

a- Composition élémentaire :

La composition chimique du charbon actif classique peut varier en fonction de plusieurs facteurs, notamment le type de matière première utilisée, les conditions de production et d'activation, ainsi que les processus de post-traitement. Cependant, une composition typique du charbon actif pourrait être la suivante :

Environ 88% de carbone : Le carbone est l'élément principal constitutif du charbon actif. Il est responsable de ses propriétés d'adsorption et de sa capacité à piéger les substances indésirables.

Chapitre I : Charbon actifs :

Environ 0,5% de phosphore : Le phosphore peut être présent en petites quantités dans le charbon actif, souvent provenant des matières premières utilisées ou des processus de production. Sa présence peut varier selon les sources de matières premières et les conditions de production.

Environ 0,5% de sodium : Le sodium peut également être présent en petites quantités, souvent introduit pendant le processus de production ou d'activation. Sa présence peut affecter les propriétés chimiques du charbon actif, mais généralement à des niveaux très faibles.

Environ 1,0% de potassium : Le potassium est un autre élément qui peut être présent en quantités variables dans le charbon actif, également en fonction des matières premières et des processus de production [15].

De 6 à 7% d'oxygène : L'oxygène est un élément important dans la structure du charbon actif, et sa quantité peut varier en fonction des conditions de production et d'activation. La présence d'oxygène contribue à la formation de groupes fonctionnels à la surface du charbon actif, ce qui peut influencer ses propriétés d'adsorption [15].

Le reste peut être constitué de cendres inorganiques, qui sont des résidus minéraux résultant de la combustion ou de la décomposition des matières premières. Ces cendres peuvent varier en composition selon les matières premières et les processus de production utilisés.

b- Surface fonctionnelle :

En règle générale, les charbons actifs présentent une surface interne très développée et se distinguent par une structure poreuse polydispersée constituée de pores de diverses tailles et formes. Différentes techniques ont été employées pour évaluer la forme des pores, ce qui a donné lieu à des pores en forme d'encrier, de fente régulière, de V, de capillaires ouverts aux deux extrémités ou dont une extrémité est fermée, et bien d'autres encore. Cependant, il a été compliqué d'obtenir des renseignements précis sur la véritable configuration des pores. Il est désormais largement reconnu que les charbons actifs possèdent des pores allant de moins d'un nanomètre à plusieurs milliers de nanomètres. [15].

1.3.Adsorption :

L'adsorption est un processus par lequel des molécules ou des ions sont piégés ou retenus à la surface d'un matériau solide, appelé adsorbant. Dans le contexte de la purification de l'eau ou

de l'air, l'adsorption est utilisée pour éliminer les substances indésirables présentes dans ces milieux.

Le carbone est un matériau particulièrement efficace pour l'adsorption en raison de ses propriétés de surface étendue. En effet, le charbon actif, une forme de carbone poreux largement utilisée dans les processus d'adsorption, possède une surface interne importante constituée de pores et de sites actifs. Cette structure poreuse offre une grande surface spécifique où les contaminants organiques peuvent être piégés ou adsorbés.

Les contaminants organiques ont souvent des charges moléculaires importantes et une faible polarité, ce qui les rend difficiles à éliminer par d'autres méthodes de traitement. Cependant, le charbon actif peut adsorber efficacement ces substances en raison de ses interactions physiques et chimiques avec les molécules organiques. Les forces d'attraction, telles que les forces de Van der Waals et les interactions dipôle-dipôle, entre les molécules organiques et les sites actifs du charbon actif permettent une adsorption efficace.

1.3.1. Les paramètres influencent sur l'adsorption

a- Le pH :

Le pH de la solution affecte la charge électrique des molécules organiques et inorganiques présentes dans l'eau. À différents pH, les molécules peuvent être ionisées ou non-ionisées, ce qui peut influencer leur capacité à être adsorbées par le charbon actif. Par conséquent, le pH de la solution peut affecter l'efficacité de l'adsorption des contaminants. En maintenant le pH de la solution dans la plage recommandée, on assure généralement des conditions optimales pour l'adsorption efficace des contaminants par le charbon actif tout en préservant sa stabilité. Cependant, des ajustements du pH peuvent parfois être nécessaires pour des applications spécifiques afin d'optimiser les performances du charbon actif en fonction des caractéristiques des contaminants à éliminer.

b- La préparation d'un charbon actif :

La préparation du charbon actif repose sur deux étapes fondamentales. La carbonisation est la première et l'activation est la seconde [16]. Pendant la carbonisation, la majorité des substances non carbonées sont évacuées. Les atomes de carbone restants se regroupent en feuilles de systèmes de cycles aromatiques condensés, souvent courbés, dont l'organisation mutuelle est irrégulière, laissant des espaces vides qui peuvent être remplis ou bloqués par du carbone désorganisé provenant du dépôt et de la décomposition des goudrons. Ainsi, la porosité du

charbon - les interstices - reste difficile à atteindre entièrement. L'activation physique vise à améliorer cette structure poreuse en gazéifiant partiellement le charbon dans de la vapeur, du dioxyde de carbone, de l'air ou un mélange de ces éléments.

L'expression "activation chimique" fait référence à la combustion du précurseur suite à l'ajout de substances qui restreignent la formation de goudron (comme le H_3PO_4 , le $ZnCl_2$, etc.) ; ainsi, un produit carbonisé avec une porosité satisfaisante (après un lavage adéquat) peut être obtenu en une seule opération. Il est évidemment envisageable de fusionner ces deux méthodes d'activation.

Les différentes substances employées lors de l'activation chimique partagent tous la caractéristique d'être des agents déshydratants qui ont un impact sur la décomposition pyrolytique et empêchent la formation de goudron, ce qui améliore le rendement en carbone [17].

En fonction du type d'activation utilisé, l'activation peut être effectuée avant ou après la carbonisation afin de supprimer les substances bitumeuses présentes dans le biochar . Cela peut aider à améliorer la porosité et à offrir des surfaces élevées pour les AC [18].

1.3.2. Application de charbon actif :

Le charbon actif est utilisé dans de multiples domaines en raison de sa surface poreuse et de sa capacité d'adsorption. Les secteurs les plus fréquemment utilisés sont les suivants :

a- Application du charbon actif dans la pollution de l'environnement :

Même si l'emploi de matériaux à base de carbone remonte à l'Antiquité, l'utilisation du charbon actif dans sa forme actuelle a commencé dans la seconde moitié du XXe siècle, suite à la prise de conscience de la pollution de l'environnement. De nos jours, on recourt fréquemment au charbon actif afin de supprimer différentes substances organiques et inorganiques des eaux de surface, des eaux souterraines et des eaux usées.

- Le charbon actif dans le traitement de l'eau potable : De nos jours, les difficultés liées au traitement de l'eau potable dépassent largement la simple régulation du goût et des odeurs. La reconstitution et la surveillance de nombreux énantiomères et composés inorganiques présents dans l'eau sont très importantes. La présence de composés organiques synthétiques suscite des préoccupations, et l'un des moyens les plus efficaces et fiables pour se débarrasser de ces polluants est l'adsorption avec du charbon actif.

- Le charbon actif dans le traitement des eaux usées : En général, le charbon actif adsorbe des substances organiques telles que les pesticides, les herbicides, les solvants aromatiques, les solvants aromatiques polynucléaires, les solvants aromatiques chlorés, les phénols, les solvants chlorés, les acides aliphatiques de poids moléculaire élevé, les acides aromatiques, les amines de poids moléculaire élevé et les amines aromatiques, les carburants, les esters, les éthers, les alcools, les tensioactifs et les colorants organiques solubles. Les substances qui possèdent un poids moléculaire (PM) et une polarité élevés, comme les amines de PM 1, les nitrosamines, les glycols et certains éthers, ne peuvent pas être adsorbés. Un grand nombre de composés de ces catégories sont présents dans différents déchets industriels et, dans une certaine mesure, dans les eaux usées. Depuis le milieu des années 1960, l'utilisation du charbon actif en tant que sorbant a gagné en importance en tant que moyen de filtration des eaux usées [19].
- Le carbone pour éliminer les gaz polluants et les odeurs : La qualité de l'air est continuellement altérée par les émissions de polluants dans l'air. En réalité, la pollution atmosphérique est devenue l'un des principaux défis engendrés par l'expansion rapide des activités industrielles et la croissance considérable de la population. Il est donc essentiel de combattre la pollution de l'air afin de garantir un développement durable à l'avenir. En ce moment, la méthode d'adsorption sur charbon est couramment utilisée pour purifier les polluants gazeux [20]. La capacité du charbon actif à stériliser et à agir sur les polluants gazeux qui polluent l'air est également réputée. De cette manière, il offre la possibilité de filtrer les composés organiques volatils (COV) et les gaz tels que le formaldéhyde - qui est principalement présent dans les produits ménagers -, le benzène, et permet de capturer les vapeurs qui peuvent être dangereuses pour les résidents de la maison, telles que celles générées par le tabac, la cuisine et les bougies parfumées. De cette manière, le tabagisme passif diminue et l'odeur du tabac s'estompe. Ainsi, la purification de l'air intérieur de la maison est parfaite lorsque le filtre détruit de nombreuses particules, allergènes et odeurs [21].

b- Application du carbone dans l'industrie l'alimentation et des jus :

La production alimentaire fait partie des secteurs les plus rigoureusement régulés. Il est essentiel que les producteurs accordent une grande importance à la santé publique et que tous les polluants et impuretés potentiellement dangereux soient éliminés. Le charbon actif est une excellente alternative pour éliminer les substances toxiques, mais aussi pour changer le goût, les couleurs et les odeurs.

- Huiles alimentaires : On utilise fréquemment du charbon actif pour purifier les huiles alimentaires, tant pour : Changer la teinte, Supprimer certains polluants dangereux (HAP - Hydrocarbures aromatiques polycycliques, Dioxines et PCB Polychlorobiphényles) Les performances de nos charbons actifs en poudre sont à la pointe de l'industrie pour cette application.³.
- Jus de fruits : On retrouve souvent du charbon actif dans la fabrication de jus de fruits concentré. Il est capable d'éliminer de manière efficace la patuline, un composé organique très réglementé, présent dans les pommes et d'autres fruits. Il peut également servir à changer la teinte et éliminer les odeurs.
- Colorants : Le charbon actif est un colorant alimentaire très efficace, employé pour donner une teinte à des confiseries (notamment la réglisse), des fromages et des cosmétiques [22].

c- Application du charbon actif dans la fabrication de médicaments et de compléments nutritionnels :

Le charbon actif est très important pour le corps humain et est donc utilisé dans l'industrie pharmaceutique car il adsorbe de nombreuses substances dans notre corps. Parmi ses applications les plus importantes pour le corps humain figurent les suivantes :

- Le charbon actif combat l'inflammation abdominale et les gaz : Le charbon actif constitue une solution idéale pour apaiser les douleurs abdominales provoquées par une surcharge d'inflammation et de gaz. Effectivement, ses substances organiques se combinent avec les déchets afin de faciliter leur élimination. Le charbon actif est un moyen naturel de prévenir la formation de gaz dans les intestins et de décomposer naturellement tous les aliments qui sont responsables de leur formation.
- Prévenir et combattre les effets de l'alcool : Bien que cette substance ne puisse pas absorber l'alcool dans le sang, elle est très-utile pour éliminer les toxines qui se développent dans notre corps lorsque nous consommons une quantité trop importante de cette substance. Cela signifie que lorsqu'on consomme du charbon actif, cela encouragera la métabolisation des boissons alcoolisées.
- Contrôler le taux de cholestérol : Les composés de charbon actif nous permettent de supprimer les éléments néfastes et L'accumulation de cholestérol dans nos artères prévient la formation de plaques. Il se lie aux matières grasses et les empêche de se fixer dans les parois des artères. Le charbon actif joue également un rôle dans l'amélioration de l'élasticité des artères. Grâce à cet effet, ils ne se durcissent pas et favorisent la

circulation sanguine. Ainsi, il est également extrêmement bénéfique pour gérer la tension artérielle et diminuer le risque de cancer.

- Le charbon actif combat les virus et les bactéries : Ce produit est aussi extrêmement bénéfique pour renforcer le système immunitaire de l'organisme, car il accroît sa résistance aux virus et aux bactéries qui causent de nombreuses maladies. Le charbon actif, grâce à ses caractéristiques, renforce le bon fonctionnement de nos défenses naturelles contre les agents pathogènes extérieurs.

d- Application du charbon actif en cosmétique :

De nombreux experts cosmétiques utilisent le charbon actif dans de nombreux produits cosmétiques, grâce à sa bonne qualité et sa capacité d'absorption. La plupart des aspects des cosmétiques sont les suivants :

- Il améliore l'aspect général de notre peau.
- Il blanchit les dents.
- Le charbon actif prévient le vieillissement prématuré [23].

1.4.Conclusion,

Le charbon actif joue un rôle essentiel dans l'industrie alimentaire, notamment dans la fabrication de jus de fruits concentré. Ses propriétés d'adsorption en font un outil précieux pour éliminer les contaminants organiques, tels que la patuline, ainsi que pour décolorer les jus et éliminer les odeurs et les saveurs indésirables.

En agissant comme un agent de purification, le charbon actif contribue à garantir la sécurité alimentaire en éliminant les substances nocives et en répondant aux normes réglementaires. De plus, il améliore la qualité sensorielle des produits alimentaires en éliminant les impuretés responsables des arômes ou des saveurs désagréables.

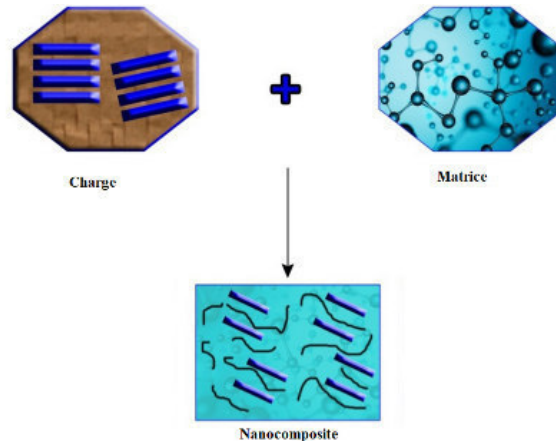
Grâce à ses multiples applications dans l'industrie alimentaire, le charbon actif est un ingrédient précieux qui permet de produire des produits de haute qualité, sûrs et conformes aux exigences des consommateurs et des régulateurs. Son utilisation continue de manière responsable contribue à garantir l'intégrité et la satisfaction des consommateurs dans le domaine des produits alimentaires.

II. Introduction :

Les nanocomposites se sont avérés efficaces pour surmonter les limitations des microcomposites et des matériaux monolithiques, tout en posant des défis liés au contrôle précis de la composition élémentaire et de la stœchiométrie dans la phase nanocluster. Considérés comme les matériaux du 21^e siècle, ils se distinguent par une conception innovante et des propriétés inédites par rapport aux composites traditionnels. Bien que ces propriétés ne soient pas encore entièrement comprises, les premières études les concernant ont été publiées dès 1992. Vers la fin des années 1990, le nombre d'articles scientifiques traitant de la nanoscience, de la nanotechnologie et des nanomatériaux doublait environ tous les 1,6 ans [24].

II.1. Définition :

Les nanocomposites sont une classe de matériaux innovants, des composites dont au moins l'un des composants présente des dimensions d'environ nanomètre. Dans cette situation, la matrice est souvent massive et le renfort est de taille nanométrique. Ce type de matériau peut être constitué de particules, de trichites, de fibres, de tubes, etc. Grâce à leur renfort de surface/volume élevé, les nanocomposites attirent l'attention des chercheurs et des industriels. En réalité, une faible dose de renfort peut être suffisante pour avoir un impact visible sur les caractéristiques macroscopiques du matériau composite [25].



Figuier II.1 Constituions de nanocomposite

II.2. Classification de nanocomposite :

Plusieurs critères peuvent être utilisés pour classer les nanocomposites, tels que la nature de la matrice et la manière dont les charges sont organisées dans la matrice.

II.2.1. Classification selon la matrice :

Trois grandes catégories de nanocomposites sont identifiées en fonction de la nature de la matrice :

- a-** Nanocomposites à matrice céramique : Cette catégorie comprend des matériaux où la matrice est principalement constituée de céramiques, telles que des oxydes, des nitrures, des borures et des silicides. Souvent, un métal est ajouté comme second composant. Pour obtenir les propriétés spécifiques à l'échelle nanométrique, il est crucial de bien disperser les composants métallique et céramique. L'utilisation de ces nanocomposites a permis d'améliorer significativement les propriétés optiques, électriques et magnétiques, ainsi que la tribologie, la résistance à la corrosion et d'autres propriétés protectrices. [26]. Les céramiques sont des matériaux solides mais fragiles. De nombreuses recherches ont été menées pour améliorer la résistance des céramiques, en utilisant des particules ou des fibres courtes pour dévier les fissures ou les fractionner. Des matériaux céramiques solides peuvent aussi être fabriqués à partir de matériaux composites à matrice céramique et à fibres longues [27].



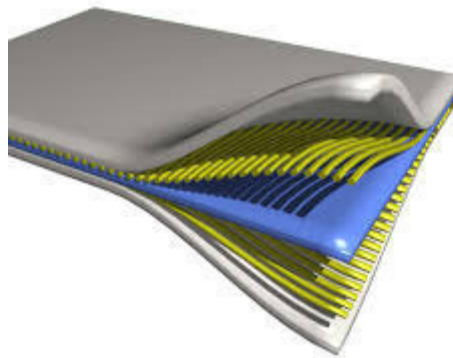
Figurier II.2 Nanocomposites à matrice céramique

- b-** Nanocomposites à matrice métallique : À partir des années 1960, des composites à matrice métallique ont été développés pour combiner les propriétés des métaux (telles que la ductilité, la conductivité et la résistance au feu) avec celles des matériaux de renfort. Cette combinaison offre des caractéristiques supérieures à celles des métaux et alliages métalliques traditionnels. Aujourd'hui, ces matériaux sont utilisés dans divers domaines, notamment l'aéronautique, l'aérospatiale, l'automobile et le nucléaire. Cet article examine les composants essentiels de ces composites (matrice, renfort et interface), les méthodes de fabrication associées, ainsi que les principales caractéristiques pour des applications spécifiques. [28].



Figuier II.4 Nanocomposites à matrice métallique

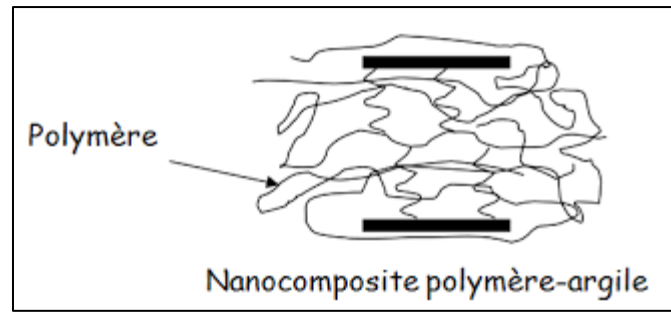
- c- Nanocomposites à matrice polymère : Les membranes à matrice polymère représentent une avancée dans le domaine des membranes polymères, intégrant des nanomatériaux dispersés dans leurs matrices polymères. Ces techniques peuvent être utilisées pour séparer les gaz, les liquides et les solides. Les propriétés des nanocomposites polymères, contenant des nanoparticules plus petites que la taille des enchevêtrements aléatoires de leurs chaînes polymères hôtes, sont bien connues. Elles incluent une faible viscosité et une température de transition vitreuse plus basse que celles des polymères fondus purs. On pense que la diffusion rapide des nanostructures dans le polymère hôte est responsable de ces propriétés inhabituelles, permettant ainsi la relaxation des chaînes polymères en libérant les contraintes et d'autres conditions. [29,30].



Figuier II.4 Nanocomposites à matrice polymère

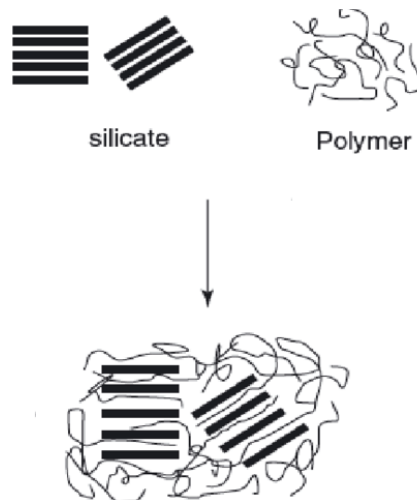
II.2.2. Classification selon l'organisation des charges :

- a- Nanocomposite exfoliés : Selon la charge d'argile, les différentes couches d'argile sont dispersées et séparées dans une matrice polymère continue, en fonction de la charge d'argile. Comparativement aux nanocomposites intercalés, cette catégorie de nanocomposites contient une quantité d'argile bien moindre. En effet, dans les nanocomposites exfoliés, les couches d'argile sont dispersées individuellement et non pas empilées ou intercalées les unes avec les autres.



Figuier II.5 Nanocomposite exfoliés

- b- Nanocomposite intercalés : Dans ce type de nanocomposite, les nanoparticules sont insérées entre les couches d'un matériau hôte, formant ainsi une structure stratifiée. Dans ce type de nanocomposite, les nanoparticules sont disposées de manière ordonnée entre les feuillets du matériau hôte, ce qui peut conduire à des propriétés améliorées par rapport aux matériaux de base. L'insertion des nanoparticules entre les couches du matériau hôte peut modifier les propriétés mécaniques, thermiques, optiques, et électriques du matériau, en fonction de la nature des nanoparticules et de la matrice hôte. Cette disposition en couches permet également de contrôler précisément les propriétés du matériau en ajustant la concentration et la taille des nanoparticules, ainsi que l'espacement entre les couches.



Figuier II.6 Nanocomposite intercalés

- c- Nanocomposites floculés : Les nanocomposites intercalés présentent une grande similarité. Il arrive parfois que les couches de silicate soient floculées dans cette catégorie de composites en raison de l'interaction hydroxylée entre les couches de silicate [31]. Les nanoparticules forment des agrégats ou des floccs. Contrairement aux nanocomposites exfoliés ou intercalés, où les nanoparticules sont dispersées de manière

homogène dans la matrice, les nanocomposites floculés présentent une agglomération des nanoparticules en structures plus volumineuses. Dans les nanocomposites floculés, les nanoparticules peuvent se regrouper en raison de divers facteurs, tels que les interactions électrostatiques, les forces de Van der Waals, ou des conditions de traitement spécifiques. Ces agrégats de nanoparticules peuvent influencer les propriétés du matériau final, telles que la conductivité électrique, la perméabilité, la résistance mécanique, et d'autres caractéristiques.

II.3. Synthèse des Nanocomposites :

Il existe de nombreuses façons de synthétiser des nanocomposites :

II.3.1. Méthodes Top-Down :

Les méthodes "top-down" de fabrication de nanocomposites impliquent la réduction de matériaux à une échelle nanométrique à partir de structures macroscopiques ou de matériaux de plus grande taille. Ces approches permettent de créer des nanostructures en réduisant progressivement la taille des matériaux à partir de leur forme d'origine. Quelques-unes des techniques les plus couramment utilisées dans ces méthodes comprennent le broyage mécanique, la lithographie, le dépôt chimique.

- a. **Méthode de broyage mécanique :** La méthode de broyage mécanique est une technique largement utilisée pour réduire les matériaux macroscopiques en particules nanométriques. Ce processus implique l'utilisation d'équipements spéciaux tels que des broyeurs à haute énergie ou des broyeurs par attrition pour fragmenter les matériaux à l'échelle nanométrique. Ses avantages résident dans sa simplicité d'utilisation et son coût abordable, ce qui en fait une option attrayante pour de nombreux chercheurs. Cependant, malgré ses avantages, le broyage mécanique présente également des inconvénients significatifs. Il peut entraîner une détérioration des caractéristiques des matériaux, affectant leur structure cristalline, leur surface spécifique et leur composition chimique. De plus, le processus de broyage mécanique peut générer des débris et des contaminants, ce qui peut polluer les échantillons. Enfin, il peut être difficile de contrôler de manière précise la taille et la distribution des particules obtenues, en particulier dans le cas du broyage par attrition. Ainsi, bien que la méthode de broyage mécanique soit largement utilisée en raison de sa simplicité et de son coût abordable, il est important de prendre en compte ces limitations lors de son utilisation dans la fabrication de nanocomposites. [32].
- b. **Méthode de Précipitation :** est une approche couramment utilisée pour la synthèse de nanoparticules, où les particules se forment à partir d'une solution sursaturée. Cette

méthode offre plusieurs avantages, notamment la possibilité d'obtenir un contrôle précis sur la taille et la forme des nanoparticules produites, ce qui est essentiel pour de nombreuses applications. De plus, elle est relativement facile à mettre en œuvre et peut être adaptée pour produire des quantités variables de nanoparticules, ce qui la rend adaptable à différentes échelles de production. Cependant, la méthode de précipitation présente également des inconvénients. Après la formation des nanoparticules, des étapes de purification peuvent être nécessaires pour éliminer les impuretés ou les réactifs non réagis, ce qui peut complexifier le processus. De plus, il existe un risque d'agglomération des nanoparticules formées, ce qui peut compromettre leurs propriétés et leur utilisation dans certaines applications. En conclusion, bien que la méthode de précipitation offre un contrôle précis sur la taille et la forme des nanoparticules, ses inconvénients potentiels doivent être pris en compte lors de son utilisation dans la fabrication de nanocomposites. [33].

- c. **Méthode de Lithographie** : est une méthode sophistiquée utilisée pour graver des motifs à l'échelle nanométrique en utilisant un matériau comme support. Ses avantages résident dans sa capacité à offrir une précision exceptionnelle et une résolution élevée lors de la création de motifs, ce qui permet la fabrication de structures complexes avec une grande précision. De plus, elle offre un contrôle complet sur la conception et la fabrication des motifs, offrant ainsi une flexibilité significative pour la création de structures personnalisées répondant à des besoins spécifiques. Cependant, cette méthode présente également des inconvénients notables. Tout d'abord, son coût élevé limite souvent son accessibilité, nécessitant des équipements spécialisés et coûteux ainsi qu'une expertise technique avancée. De plus, la lithographie est un processus complexe, avec de multiples étapes et des exigences techniques rigoureuses, ce qui peut rendre sa mise en œuvre difficile et exigeante en termes de temps et de ressources. Enfin, sa capacité de production est souvent limitée par la taille de la surface à traiter et la durée du processus, ce qui peut restreindre son utilisation pour la fabrication à grande échelle de nanocomposites ou d'autres produits. [34].

II.3.2. Méthodes Bottom-Up :

Les méthodes Bottom-Up de fabrication de nanocomposites sont des approches où les nanostructures sont construites à partir de molécules ou d'atomes individuels, qui s'auto-assemblent pour former des structures plus complexes à l'échelle nanométrique. Contrairement aux méthodes Top-Down qui impliquent la réduction de matériaux de plus grande taille, les

méthodes Bottom-Up partent de matériaux de petite taille pour construire des structures plus grandes et plus complexes.

Quelques exemples de méthodes Bottom-Up comprennent la synthèse chimique, l'auto assemblage moléculaire, la croissance cristalline contrôlée et la biominéralisation. Ces techniques permettent de contrôler précisément la taille, la forme et la composition des nanostructures produites, offrant ainsi un niveau élevé de précision et de flexibilité dans la conception des nanocomposites.

- a. **Dépôt chimique en phase vapeur (CVD):** Le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) est une méthode sophistiquée utilisée pour créer des nanoparticules à partir de précurseurs gazeux déposés sur un substrat. Cette technique offre des avantages significatifs, notamment la possibilité d'obtenir une vérification précise de la dimension et de la forme des nanoparticules produites. De plus, le CVD permet un contrôle minutieux du processus de croissance des nanoparticules, offrant ainsi une grande polyvalence dans la conception des matériaux. Cependant, malgré ses avantages, le CVD présente également des inconvénients notables. Tout d'abord, sa mise en œuvre nécessite des équipements spécialisés coûteux et des conditions de traitement précises, ce qui peut entraîner des coûts élevés de mise en place et de fonctionnement. De plus, le CVD est un processus complexe, avec plusieurs étapes et paramètres à contrôler, nécessitant ainsi une expertise technique avancée pour son utilisation efficace. En outre, sa capacité de production peut être limitée par la taille des substrats et les temps de dépôt nécessaires, ce qui peut restreindre son utilisation pour la fabrication à grande échelle de nanocomposites ou d'autres matériaux nanostructurés. [35].
- b. La réduction chimique est une méthode largement utilisée pour la production de nanoparticules à partir d'ions métalliques en solution. Sa simplicité d'utilisation en fait un choix attrayant pour de nombreux chercheurs et ingénieurs. En effet, elle ne nécessite pas d'équipement spécialisé complexe, ce qui la rend accessible à un large éventail d'utilisateurs. De plus, cette méthode est hautement adaptable et peut être appliquée à divers matériaux, offrant ainsi une grande flexibilité dans la conception des nanocomposites. Malgré ses avantages, la réduction chimique présente certains inconvénients. L'un des principaux défis est la difficulté à contrôler précisément la taille et la forme des nanoparticules produites. Cette limitation peut conduire à une distribution non uniforme des tailles et des formes dans le matériau final, ce qui peut influencer ses propriétés. De plus, la variabilité des conditions de réaction peut entraîner

des variations entre les lots de production, ce qui peut affecter la reproductibilité des résultats et la qualité du produit final. [36].

- c. **Polymérisation in situ** : est une méthode largement utilisée pour intégrer des nanomatériaux dans une matrice polymère, offrant une dispersion homogène des nanoparticules. Ce processus débute par le mélange des nanomatériaux avec un monomère pur ou une solution de monomère, suivi de la polymérisation en présence des nanoparticules dispersées. L'avantage majeur de cette méthode réside dans sa capacité à assurer une dispersion efficace des nanoparticules dans la matrice polymère, ce qui peut considérablement améliorer les propriétés du matériau final, telles que sa résistance mécanique ou thermique. L'un des défis majeurs est la difficulté à contrôler précisément la taille et la forme des nanoparticules produites au cours du processus. Cette limitation peut entraîner une distribution inégale des tailles et des formes de nanoparticules dans le matériau final, ce qui peut influencer ses propriétés et sa performance globale. [37].

II.4. Caractéristiques de nanocomposite :

Les nanocomposites offrent un ensemble de propriétés uniques qui les distinguent souvent des matériaux composites conventionnels. Ces propriétés sont cruciales dans divers domaines d'application.

II.4.1. Caractéristiques mécaniques :

Les nanocomposites se distinguent par leur capacité à améliorer les caractéristiques mécaniques par rapport aux composites conventionnels. Ce qui les rend particulièrement attrayants, c'est leur efficacité à obtenir des performances similaires, voire supérieures, avec des concentrations de renforts beaucoup plus faibles. Cette caractéristique permet une réduction significative du poids total du matériau, tout en maintenant ou en améliorant ses propriétés mécaniques. En résumé, les nanocomposites offrent une optimisation remarquable des performances mécaniques tout en réduisant la densité globale du matériau, ce qui les rend particulièrement adaptés à une variété d'applications où la légèreté et la robustesse sont des critères essentiels.

II.4.2. Stabilité thermique et effet retardateur de flamme :

Les nanocomposites polymère/silicate lamellaire se distinguent par leurs caractéristiques améliorées en termes de stabilité thermique et de résistance au feu. En effet, ces matériaux présentent généralement une meilleure résistance à la chaleur et une réduction de leur inflammabilité par rapport aux polymères non renforcés. Cette amélioration significative de la stabilité thermique et de l'effet retardateur de flamme résulte de l'incorporation des nanoparticules de silicate lamellaire dans la matrice polymère. Ces nanoparticules agissent comme des barrières physiques qui retardent la propagation des flammes et réduisent ainsi la

combustion du matériau. De ce fait, les nanocomposites polymère/silicate lamellaire représentent une option attrayante pour les applications nécessitant une résistance thermique élevée et une sécurité accrue contre les incendies.

II.4.3. Caractéristiques optiques :

Les caractéristiques optiques des nanocomposites sont influencées par la taille des particules qui les composent. En raison de leur petite taille, ces particules ont une influence minimale sur l'absorption ou la diffusion de la lumière visible, surtout lorsqu'elles sont dispersées de manière optimale dans la matrice polymère. Cette dispersion uniforme permet de minimiser les interactions entre les particules et la lumière, ce qui se traduit par une transparence élevée et une faible absorption de la lumière visible. Ainsi, les nanocomposites offrent souvent des propriétés optiques remarquables, ce qui les rend adaptés à diverses applications nécessitant une transparence optique ou une faible absorption de la lumière, comme dans les domaines de l'optique, de l'électronique ou de l'emballage de produits. [38].

II.5. Application des pour le traitement des eaux :

En raison de la rareté croissante de l'eau potable et des préoccupations environnementales liées aux eaux usées municipales et industrielles, il est impératif de développer de nouvelles technologies pour produire de l'eau propre et éliminer les impuretés et les contaminants toxiques. Les nanocomposites polymères (PNC) ont suscité un intérêt croissant de la part de la recherche ces dernières années en raison de leur potentiel pour répondre à ces défis et pour une variété d'applications. [39]. Certaines utilisations du nanocomposite dans le traitement de l'eau sont les suivantes :

II.5.1. Nanocomposite pour l'adsorption :

Les nanocomposites pour l'adsorption sont des matériaux avancés qui intègrent des nanoparticules dans une matrice polymère ou inorganique pour améliorer leur capacité à adsorber des substances chimiques ou des polluants de l'environnement. Ces nanocomposites offrent une grande surface spécifique en raison de la présence de nanoparticules, ce qui augmente considérablement leur capacité d'adsorption par rapport aux matériaux conventionnels. Ils sont largement utilisés dans le domaine du traitement de l'eau, de l'air et des déchets

Les nanocomposites à base de carbone présentent des propriétés d'adsorption remarquables grâce à la surface spécifique élevée du graphène et de ses dérivés tels que l'oxyde de graphène et le graphène réduit. Cette surface importante leur confère une grande capacité d'adsorption pour une large gamme de polluants organiques et inorganiques. De même, les nanotubes de carbone (CNT) sont largement reconnus pour leur utilité dans diverses applications, y compris

l'adsorption de composés organiques présents dans l'eau, ce qui en fait un matériau de choix pour les opérations de catalyse, de séparation et de désinfection. [40,41].

Les nanocomposites métalliques, notamment les oxydes métalliques tels que le TiO_2 , le Fe_2O_3 et le ZnO , sont également efficaces pour l'adsorption des polluants organiques et inorganiques. Les nanoparticules d'argent (AgNP) sont particulièrement prometteuses dans le traitement des effluents de colorants en raison de leur efficacité d'adsorption et de leurs propriétés antimicrobiennes bien connues. [42,43].

Les nanocomposites polymères, comme le chitosane, offrent une compatibilité et une capacité d'adsorption élevée pour les métaux lourds et les colorants. Lorsqu'ils sont combinés avec d'autres polymères, ils peuvent également adsorber efficacement une variété de polluants organiques et inorganiques. Ces nanocomposites constituent donc une solution polyvalente et prometteuse pour le traitement des eaux et la purification de l'environnement [44,45].

II.5.2. Nanocomposite pour la photocatalyse :

Les nanoparticules semi-conductrices sont activées par la lumière solaire pour décomposer les polluants, offre des perspectives prometteuses dans le domaine du traitement de l'eau et de la purification de l'environnement. Les nanocomposites à base de TiO_2 sont largement étudiés pour leur capacité à dégrader les polluants organiques par l'oxydation des radicaux [46]. De même, ces nanocomposites se sont révélés efficaces pour éliminer divers micro-organismes tels que les bactéries Gram-négatives et Gram-positives, ainsi que les champignons filamenteux unicellulaires.

Les nanocomposites à base de ZnO , en particulier les nanoparticules dopées, sont préférés pour leur faible taux de recombinaison et leur activité photocatalytique et antimicrobienne remarquable lorsqu'ils sont exposés à la lumière solaire [48]. De même, le g-C $_3$ N $_4$ est reconnu pour son activité photocatalytique vis-à-vis de la lumière visible, ce qui en fait une solution prometteuse pour lutter contre les polluants de l'eau [49].

En outre, l'utilisation de photocatalyseurs semi-conducteurs et de photoluminescence pour diviser l'eau en hydrogène et oxygène est une voie de recherche importante. Cette approche est perçue comme une solution alternative aux combustibles fossiles non renouvelables pour résoudre les problèmes environnementaux et la crise de l'eau. Ainsi, les nanocomposites photocatalytiques offrent une stratégie novatrice et efficace pour traiter les contaminants et contribuer à la préservation de l'environnement[50].

II.5.3. Nanocomposite pour la Filtration :

Les nanocomposites pour la filtration sont des matériaux avancés qui combinent des nanoparticules avec une matrice polymère ou inorganique pour améliorer l'efficacité de la

filtration. Ces matériaux sont utilisés dans une variété d'applications, y compris le traitement de l'eau, la purification de l'air, et la filtration des particules fines dans divers processus industriels. Les nanocomposites dans la filtration offrent plusieurs avantages par rapport aux matériaux de filtration conventionnels. Leur structure nanométrique permet une plus grande surface spécifique, ce qui augmente l'efficacité de capture des contaminants. De plus, les nanoparticules peuvent être fonctionnalisées pour cibler spécifiquement certains types de polluants, améliorant ainsi la sélectivité de la filtration [51, 52].

II.5.4. Nanocomposite pour la désinfection :

La désinfection est un aspect crucial dans la préservation de la santé publique, mettant en avant la puissance et l'efficacité des désinfectants, notamment les nanocomposites à base de dioxyde de chlore, dans la lutte contre les bactéries et autres micro-organismes [53]. Ces nanocomposites présentent des propriétés antibactériennes et virucides bien documentées [54]. En outre, l'élimination du fluorure des eaux usées est d'une importance primordiale pour éviter les effets néfastes sur la santé humaine dus à une accumulation excessive de fluorure dans l'environnement. Des études ont démontré que les nanocomposites à base d'hydroxyde d'aluminium jouent un rôle clé dans l'absorption du fluorure. Enfin, les nanomatériaux sont également envisagés pour leur potentiel dans la purification de l'eau, en tenant compte de divers facteurs tels que la localisation, la disponibilité, la faisabilité et les aspects économiques [56].

II.6. Conclusion

Les nanocomposites offrent des perspectives prometteuses dans divers domaines liés à l'environnement, tels que la filtration, la désinfection et la purification de l'eau. Leur capacité à intégrer des nanoparticules dans une matrice polymère ou inorganique les rend extrêmement polyvalents et efficaces pour traiter une large gamme de contaminants. Que ce soit pour améliorer l'efficacité des filtres, combattre les bactéries et les virus, ou éliminer les polluants comme le fluorure, les nanocomposites constituent une solution innovante et efficace. Toutefois, il est essentiel de poursuivre les recherches pour mieux comprendre leur comportement et optimiser leurs performances, tout en tenant compte des aspects économiques et environnementaux. En investissant dans le développement et l'application de ces matériaux avancés, nous pourrions contribuer de manière significative à la préservation de l'environnement et à la promotion de la santé publique.

III Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons en détail la méthode de verdissement du charbon actif, étape par étape. Nous expliquerons également les différents tests effectués sur le charbon actif après sa fabrication afin d'évaluer sa qualité d'absorption. Ces tests incluent, entre autres, la mesure de la surface spécifique, l'analyse des pores et la détermination de la capacité d'adsorption des substances organiques et inorganiques.

III.1 Matériels utilisés :

Les équipements utilisés comprenaient une variété de verreries de laboratoire et d'outils indispensables. Parmi ces verreries, nous avons employé des béchers, des Erlenmeyers, des éprouvettes et des fioles jaugées pour réaliser des manipulations et effectuer des mesures volumétriques. Pour des mesures précises de masse, nous avons fait usage d'une balance, tandis que les traitements thermiques ont été effectués à l'aide d'un four à moufle. Le contrôle de l'acidité des solutions a été assuré par un pH-mètre. L'étuve a été utilisée pour le séchage du charbon actif préparé, et les tests d'adsorption ont été menés avec une plaque d'agitation et un barreau magnétique. L'analyse spectrale de la solution de colorants traités a été réalisée grâce à un spectrophotomètre UV-Visible, tandis qu'une centrifugeuse de laboratoire a été employée pour séparer les phases solides du charbon actif des solutions liquides contenant les polluants.

III.2 Produits utilisés :

Les produits utilisés dans cette section comprennent une gamme variée de substances nécessaires aux expériences menées. Nous avons utilisé de l'eau distillée comme solvant neutre ainsi que des déchets végétaux pour représenter une matrice organique. Les réactifs chimiques incluent une source de permanganate et une solution réductrice pour convertir les ions de Mn en ions MnO_2 . De plus, nous avons utilisé une solution d'acide chlorhydrique (HCl) à une concentration de 0,1 M pour ajuster le pH des solutions et une solution de soude (NaOH) à une concentration similaire pour la neutralisation. Enfin, nous avons employé une solution de bleu de méthylène (BM) comme source de pollution synthétique. Ces produits ont été sélectionnés pour leur pertinence dans les expériences prévues, contribuant ainsi à la réalisation des objectifs de l'étude

III.3 Préparation de charbon actif

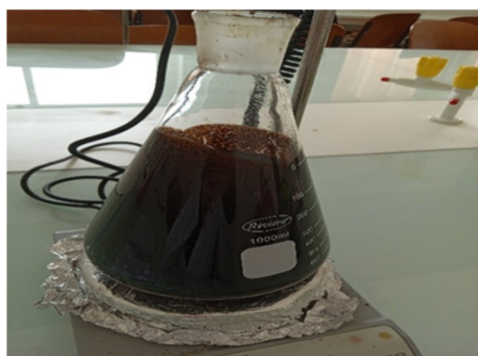
Tout d'abord, les déchets végétaux sont collectés puis soumis à une étape de lavage préliminaire pour éliminer les impuretés. L'eau est utilisée pour laver le déchet végétal jusqu'à ce que l'eau de lavage soit claire et que la couleur soit uniforme, éliminant ainsi toute poussière ou substance

soluble dans l'eau. Ensuite, les déchets végétaux sont séchés dans un four. Par la suite, la matière première est grossièrement broyée à l'aide d'un moulin électrique



Figuier III.1 Le déchet végétale après le tamisage

Après avoir préparé la solution de Mn (0,5 M), on y ajoute les déchets et on laisse agiter pendant plusieurs heures afin d'assurer une bonne interaction entre les déchets et le Manganèse de. Une fois le mélange homogène, on y ajoute la solution de réducteur et on poursuit l'agitation pendant 24. La réaction entre le Manganèse et le réducteur, en l'occurrence le thiosulfate de sodium ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), permet de former des nanoparticules de dioxyde de manganèse (MnO_2).



Figuier III.2 Préparation des nanoparticules de dioxyde de manganèse

La carbonisation est l'une des étapes les plus importantes de la fabrication du charbon actif (CA). Ce processus permet de transformer les déchets organiques en une forme poreuse de carbone avec une grande surface spécifique, essentielle pour l'adsorption. Après le processus d'activation, qui augmente la porosité et améliore les propriétés adsorbantes du matériau, et la

filtration, qui élimine les impuretés, nous plaçons les déchets dans un four à 500°C pendant 24 heures. Cette étape de carbonisation à haute température assure que tous les déchets se carbonisent complètement, garantissant ainsi la formation de structures carbonées stables et efficaces pour l'adsorption. Une fois refroidi, on ajoute une grande quantité d'eau distillée au charbon actif afin de se débarrasser de l'excès d'agent activateur et de la partie soluble des cendres. On ajuste également le pH de la solution entre 7 et 8 pour s'assurer que le charbon actif est dans des conditions optimales pour ses futures applications.



Figure III.3 Lavage de charbon active nanocomposite préparé.

Le charbon actif est ensuite séché à une température de 120°C pendant 24 heures. Il est ensuite stocké pour être utilisé dans plusieurs domaines

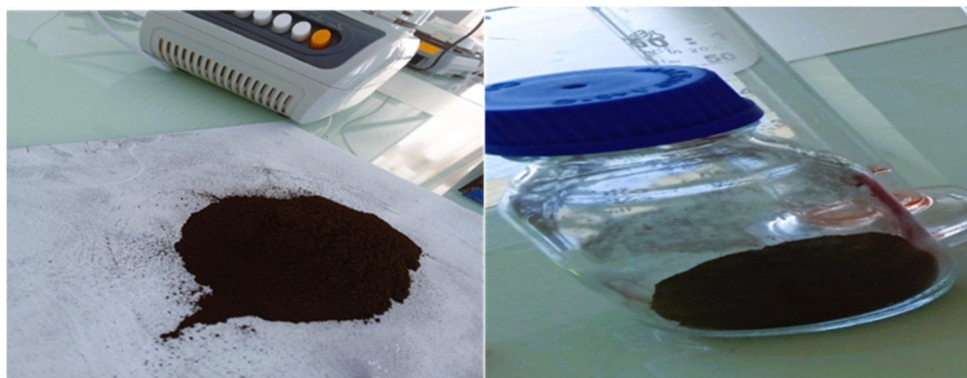
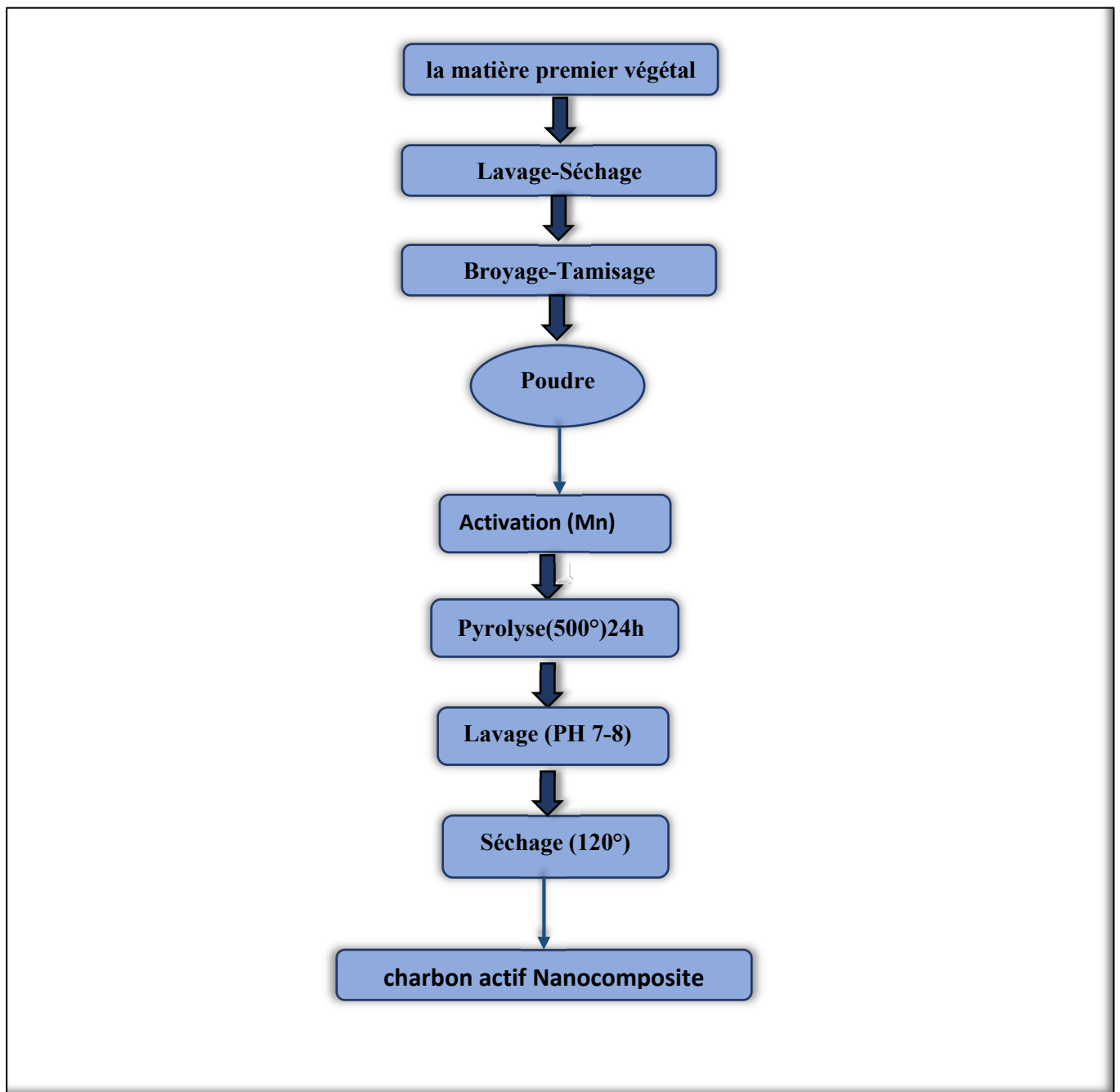


Figure III.4 Le produit finale obtenu



Figurier III.5 Schéma présenter les étapes de fabrication du charbon actif

III.4 Test d'adsorption de Bleu de méthylène sur le charbon actif nanocomposite :

Après avoir préparé et stocké le CA, nous effectuons des tests pour déterminer sa capacité à adsorber. Dans ce test, nous utilisons une solution de Bleu de méthylène (BM) pour évaluer plusieurs paramètres, tels que la capacité d'adsorption, le temps de contact optimal, et l'efficacité globale du charbon actif nanocomposite. Le Bleu de méthylène est couramment utilisé comme modèle de polluant organique pour tester les propriétés adsorbantes des matériaux en raison de sa couleur intense et de sa solubilité dans l'eau, permettant une évaluation visuelle et quantitative facile de l'adsorption.

III.4.1 Effet du temps :

Dans cette expérience, nous utilisons un volume constant de solution de Bleu de méthylène (BM) de concentration connue. Ensuite, une masse fixe de charbon actif (CA) est ajoutée à la solution, et le mélange est laissé à agiter pendant des durées variables, comprises entre 10 et 60 minutes. Cette gamme de temps permet d'évaluer l'effet de la durée d'agitation sur la capacité d'adsorption du charbon actif. Une fois le temps écoulé, nous procédons à la séparation du liquide et du solide en utilisant une centrifugeuse pendant une durée de 20 minutes. Cette étape de centrifugation permet de séparer efficacement les particules solides du charbon actif adsorbé dans la solution liquide, facilitant ainsi la mesure de la capacité d'adsorption du charbon actif.

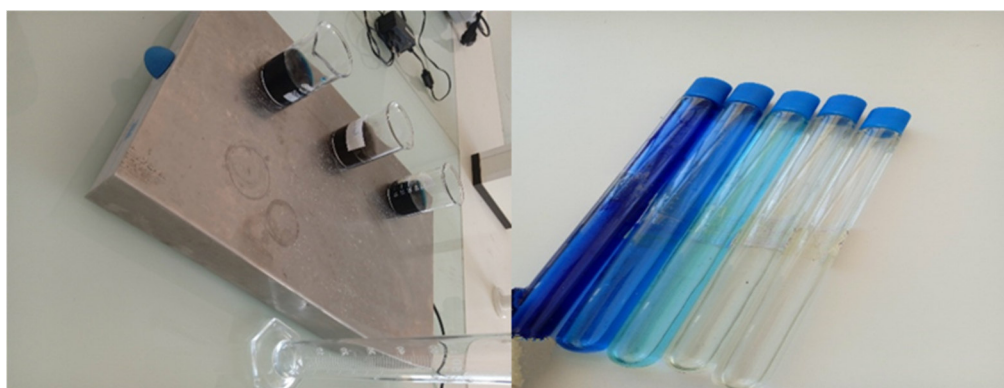


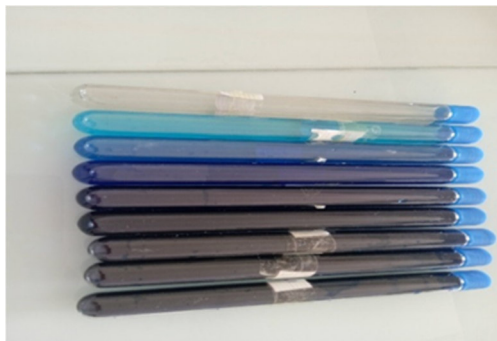
Figure III.6 Test de l'effet du temps sur l'adsorption de BM

III.4.2 Effet de masse :

Pour étudier l'effet de masse de charbon actif sur la capacité d'adsorption de BM, nous utilisons un volume constant de solution de Bleu de méthylène (BM) de concentration connue. Ensuite, nous ajoutons des quantités variables de charbon actif (CA) comprise entre 0.1 et 0.2 g et les laissons agiter pendant une heure. Après cette période, nous séparons le liquide du solide à l'aide d'une centrifugeuse pendant 20 minutes.

III.4.3 Effet de concentration de Méthylène bleu :

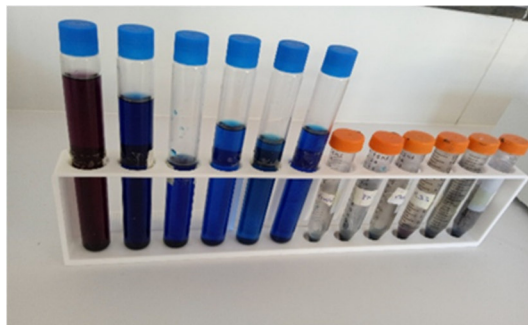
Dans cette expérimentation, nous utilisons un volume constant de solution de Bleu de méthylène (BM) présentant différentes concentrations, comprises entre 50 et 1000 mg/L. Ensuite, une masse constante de charbon actif (CA) est introduite dans chaque échantillon, et le mélange est laissé à agiter pendant une durée d'une heure. À la fin de cette période, nous procédons à la séparation du liquide et du solide en utilisant une centrifugeuse pendant une durée de 20 minutes.



Figurier III.7 Résultat de l'effet de concentration de BM sur le taux d'élimination

III.4.4 Effet de pH :

Pour tester l'effet du pH, nous utilisons un volume constant de solution de Bleu de méthylène (BM) de concentration connue. Nous y ajoutons une masse fixe de charbon actif (CA) et ajustons chaque solution de BM à un pH spécifique, compris entre 2 et 10, en utilisant une solution d'acide chlorhydrique (HCl) et une solution de soude (NaOH). Ensuite, nous laissons les solutions agiter pendant une heure. Une fois le temps écoulé, nous procédons à la séparation du liquide et du solide à l'aide d'une centrifugeuse pendant 20 minutes.



Figurier III.8 Résultat de l'effet de pH sur le taux d'élimination de BM

III.4.5 Effet de la température :

Pour examiner l'impact de la température sur l'adsorption du BM par le charbon actif, nous préparons deux solutions de BM de concentration de 100 mg/L. Ensuite, nous divisons chaque solution en 3 béchers de même volume. Dans chaque bécher, une quantité fixe de charbon actif est ajoutée, puis le mélange est laissé à agir pendant une heure à des températures spécifiques (30°C, 40°C, 50°C). Une fois le temps écoulé, nous utilisons une centrifugeuse pour séparer le liquide du solide pendant 20 minutes.



Figurier III.8 Expérience de l'effet de la température sur l'adsorption de BM

III.5 Analyses de spectrophotomètre Uv-visible :

À ce stade de l'expérience, nous préparons les échantillons pour les analyses spectrophotométriques UV-visibles. Avant de les introduire dans le spectrophotomètre, nous diluons les échantillons très concentrés afin de les rendre compatibles avec l'instrument, car celui-ci ne peut pas lire les solutions trop concentrées. Nous enregistrons avec précision le facteur de dilution utilisé pour chaque échantillon, ce qui sera crucial pour les calculs ultérieurs.



Figurier III.9 L'appareil de spectrophotomètre UV-visible

Après avoir terminé les analyses, nous revenons aux calculs, et l'une des lois les plus importantes en spectrophotométrie est la loi de Beer-Lambert. La formule de la loi de Beer-Lambert est la suivante :

$$A = \varepsilon L C \quad (\text{III.1})$$

A : absorbance

ε : absorptivité molaire

L : longueur du trajet parcouru par la lumière

C : concentration de la solution de BM

Le principe de la spectrophotométrie UV-visible repose sur l'absorption de la lumière par les molécules présentes dans la solution. Lorsqu'un rayonnement lumineux UV-visible traverse un échantillon, certaines longueurs d'onde de la lumière sont absorbées par les composés présents dans la solution. Cette absorption de lumière est due à l'excitation des électrons des molécules de la solution vers des niveaux d'énergie supérieurs. La quantité de lumière absorbée est proportionnelle à la concentration des composés absorbants dans la solution, ainsi qu'à l'épaisseur de la couche traversée par la lumière.

Le spectrophotomètre UV-visible mesure l'intensité de la lumière transmise à travers l'échantillon par rapport à celle de la lumière incidente. Cette mesure est ensuite convertie en absorbance, qui est le logarithme négatif du rapport de l'intensité de la lumière incidente à l'intensité de la lumière transmise. L'absorbance est ensuite utilisée pour déterminer la concentration des composés dans la solution en se référant à une courbe d'étalonnage établie à partir de solutions de référence connues.

III.6 Conclusion

Cette étude a examiné l'effet des paramètres principaux, à savoir la masse de charbon actif, le temps, la concentration de la solution de BM, le pH et la température, sur le taux d'adsorption du Bleu de méthylène (BM) par le charbon actif. Les résultats ont montré que ces paramètres jouent un rôle significatif dans l'efficacité de l'adsorption. La variation du temps d'agitation a permis de comprendre la cinétique d'adsorption du BM, tandis que l'effet de la température a révélé une augmentation de l'efficacité d'adsorption avec l'élévation de la température. De plus, l'ajustement du pH a démontré une influence sur l'adsorption du BM, soulignant ainsi l'importance de l'acidité ou de la basicité de la solution.

IV. Introduction

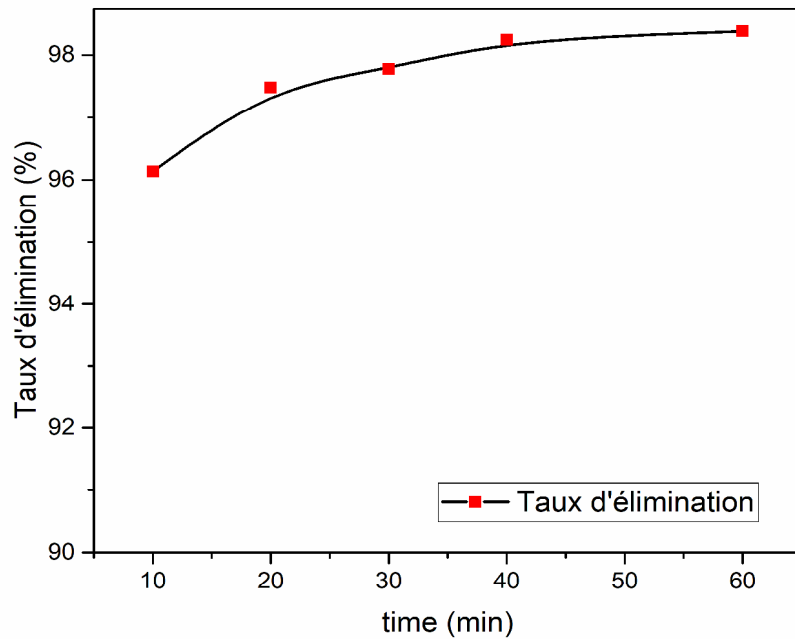
Les expériences d'adsorption ont été réalisées pour évaluer la capacité des nanocomposites de charbon actif à adsorber le BM. Les résultats montrent que l'adsorption est influencée par plusieurs paramètres, notamment le pH, la concentration initiale de BM, la dose d'adsorbant et le temps de contact. Les études cinétiques ont révélé que l'adsorption suit le modèle de pseudo-second ordre, suggérant une adsorption chimique impliquant des interactions spécifiques entre le BM et les sites actifs du nanocomposite.

IV.1 Optimisation des paramètres influencent sur l'adsorption

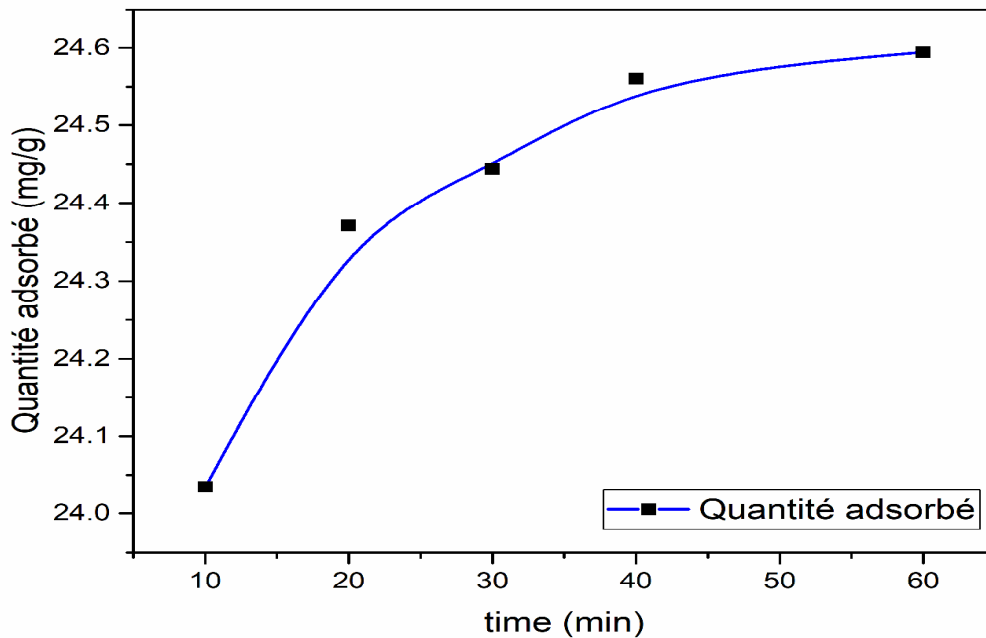
IV.1.1 Effet du temps :

L'étude de l'effet du temps sur l'adsorption est essentielle pour comprendre la cinétique du processus d'adsorption et pour déterminer le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre.

Dans cette étude, l'effet du temps sur l'adsorption du Bleu de Méthylène (BM) par le nanocomposite de charbon actif a été évalué. Une masse de 0,1 g de nanocomposite a été introduite dans une solution de BM à une concentration initiale de 100 mg/L. Figure IV.1 illustre l'influence du temps sur le taux d'élimination du Bleu de Méthylène (BM) par adsorption sur du charbon actif nanocomposites. Selon les données présentées, on constate que le taux d'élimination de BM augmente avec le temps. Au début, l'augmentation est rapide, atteignant un taux de 98 % en 40 minutes. Après cette période, le taux d'élimination se stabilise, indiquant que l'adsorption de BM sur le charbon actif atteint un état d'équilibre à partir de ce moment-là.



Figuier IV.1 Effet de temps sur taux d'élimination de BM



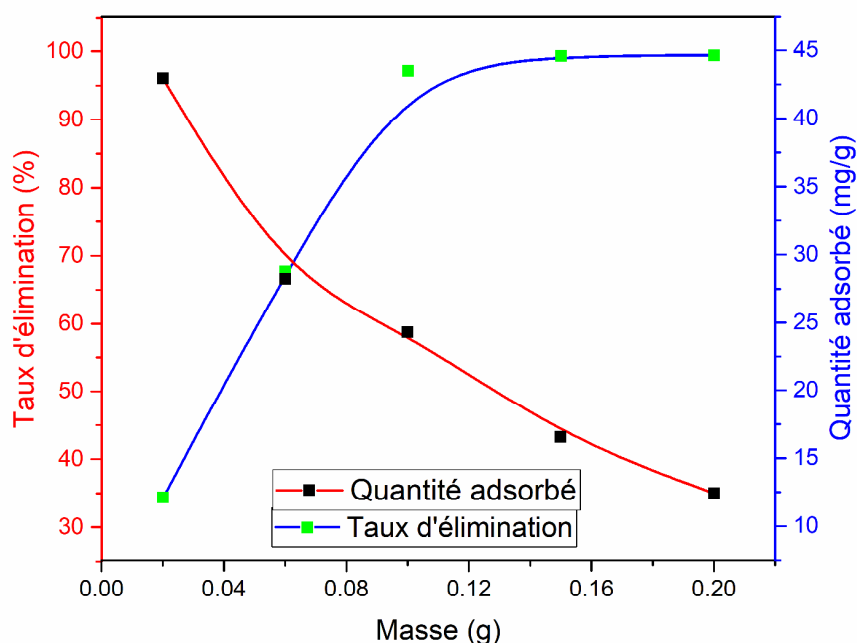
Figuier IV.2 Effet de temps sur la quantité de BM adsorbée.

Le **graphique IV.2** montre l'effet du temps sur la quantité de Bleu de Méthylène (BM) adsorbée sur le charbon actif. D'après les données du graphique, on observe que la quantité de BM

adsorbée augmente progressivement avec le temps, atteignant une valeur de 25,55 mg/L après 40 minutes. Au-delà de cette période, la quantité adsorbée se stabilise, indiquant que l'équilibre d'adsorption est atteint.

IV.1.2 Effet de masse :

La masse de charbon actif joue un rôle crucial dans l'adsorption, influençant à la fois la capacité d'adsorption et le taux d'élimination des contaminants. Une étude approfondie de ce facteur permet d'optimiser les conditions d'adsorption pour obtenir les meilleurs résultats.

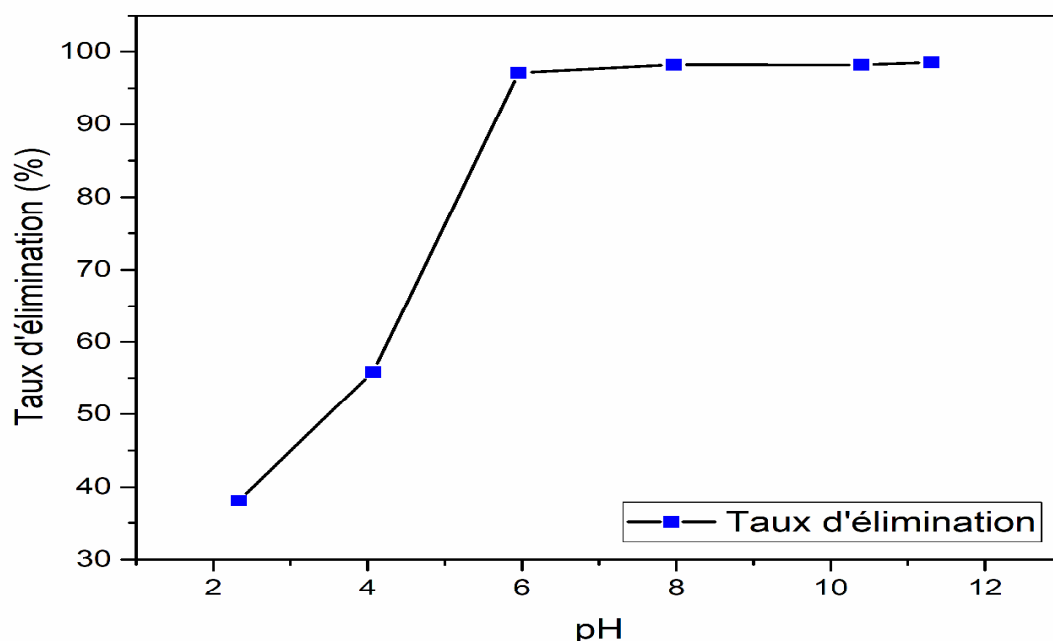


Figuier IV.3 Effet de masse sur le taux d'élimination et la quantité adsorbée de BM par le charbon actif nanocomposite.

La figuier IV.3 représente l'effet de masse sur le taux d'élimination et la quantité adsorbée de BM par le charbon actif nanocomposite. Lorsque la masse de charbon actif augmente, la quantité de bleu de méthyle adsorbée augmente également, atteignant une valeur maximale de 44,9 mg/g lorsque la masse de charbon actif atteint 0,1 g. Cela s'explique par la disponibilité croissante des sites d'adsorption sur le charbon actif. Cependant, une fois que tous les sites d'adsorption sont occupés, la quantité adsorbée se stabilise et n'augmente plus, même avec une augmentation supplémentaire de la masse de charbon actif. Cette phase est appelée la phase de saturation.

Par ailleurs, le taux d'élimination du bleu de méthyle suit une tendance décroissante, passant de 98,5 % à 35 % lorsque la masse de charbon actif augmente. Cela signifie que bien que la quantité totale de bleu de méthyle adsorbée augmente, l'efficacité d'adsorption par unité de masse de charbon actif diminue. Cette diminution peut être attribuée à une dilution de l'efficacité d'adsorption, où une plus grande masse de charbon actif entraîne une proportion moindre de bleu de méthyle éliminée par unité de masse.

Effet de pH de la solution de BM :

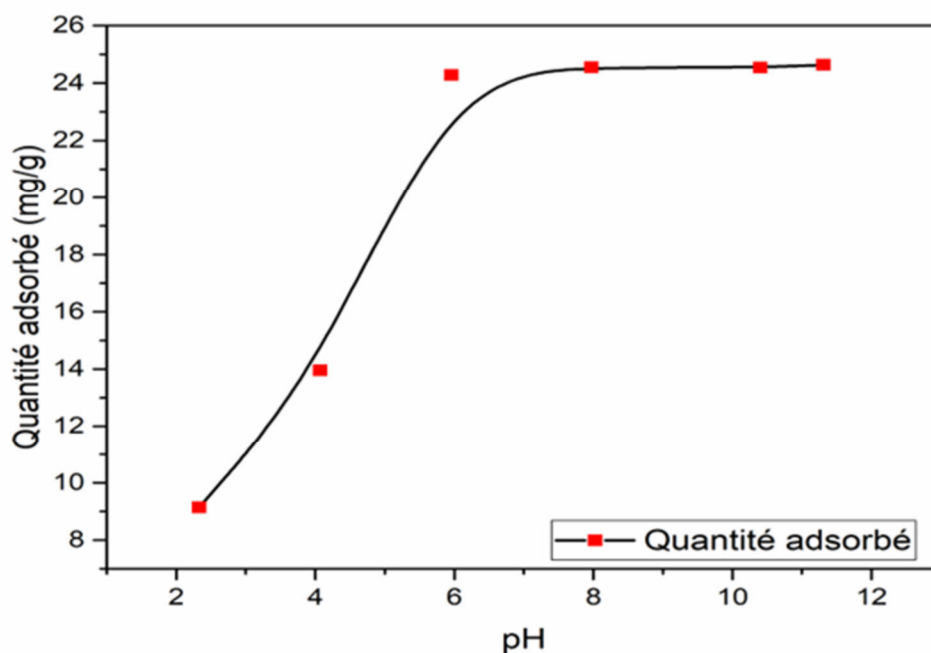


Figurier IV.4 Effet de pH sur le taux d'élimination de BM par le charbon actif nanocomposites

Le pH de la solution de BM joue un rôle essentiel dans l'adsorption du bleu de méthyle sur le charbon actif en influençant la charge de surface de l'adsorbant et l'état d'ionisation des molécules adsorbées. Pour optimiser l'adsorption, il est crucial de déterminer le pH optimal où les interactions entre le charbon actif et le bleu de méthyle sont les plus favorables.

La figure IV.4 représente l'effet du pH sur le taux d'élimination du bleu de méthyle par le charbon actif. En divisant la courbe en deux segments distincts, on observe que dans le milieu basique ($\text{pH} > 7$), le taux d'élimination augmente jusqu'à atteindre 97%. Cela peut être attribué à une meilleure interaction électrostatique entre la surface négativement chargée du charbon

actif et les molécules de bleu de méthyle. En revanche, dans le milieu acide ($\text{pH} < 7$), le taux d'élimination se stabilise, probablement en raison de la protonation des sites d'adsorption sur le charbon actif, qui réduit l'efficacité des interactions avec le bleu de méthyle. Ainsi, le pH basique favorise une élimination plus efficace, tandis qu'en milieu acide, l'efficacité d'élimination reste constante.

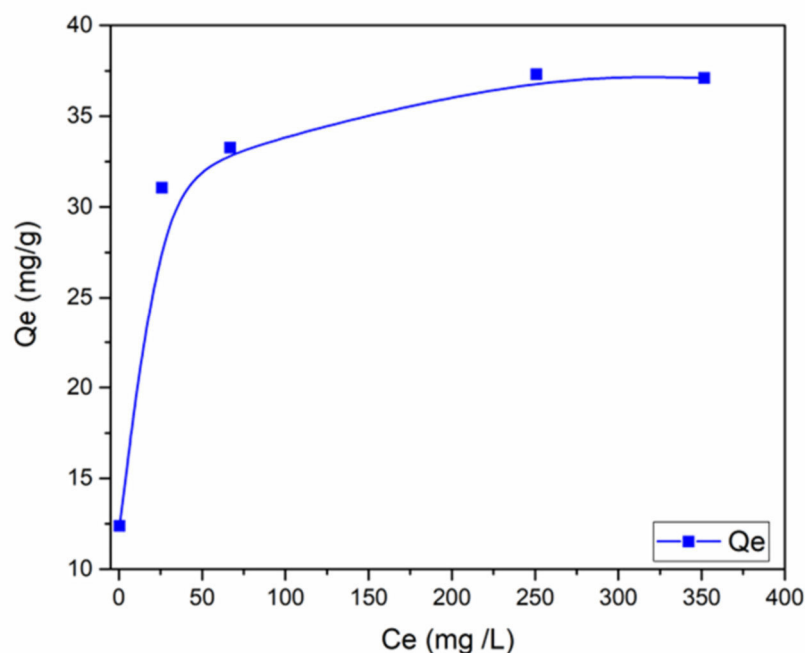


Figurier IV.5 Effet de pH sur la quantité de BM adsorbé par le charbon actif nanocomposite

La figure IV.5 montre également l'effet du pH sur la quantité de bleu de méthyle adsorbée par le charbon actif. Dans le milieu acide ($\text{pH} < 7$), on observe que la quantité adsorbée augmente jusqu'à atteindre 24 mg/g. Cette augmentation peut être expliquée par une force électrostatique élevée entre le charbon actif et le bleu de méthyle, favorisant une adsorption efficace. En revanche, dans le milieu basique ($\text{pH} > 7$), la quantité adsorbée se stabilise. Cela s'explique par une force électrostatique plus faible entre le charbon actif et le bleu de méthyle, rendant l'adsorption moins efficace. Ainsi, en milieu acide, les interactions électrostatiques fortes favorisent une plus grande quantité d'adsorption, tandis qu'en milieu basique, les interactions électrostatiques faibles limitent l'efficacité de l'adsorption, comme le montre la courbe.

IV.2 Isotherme d'adsorption :

L'isotherme d'adsorption décrit la relation entre la quantité d'adsorbant retenue sur la surface d'un matériau adsorbant et la concentration de l'adsorbant dans la solution à température constante. Les isothermes d'adsorption sont essentielles pour comprendre et modéliser le processus d'adsorption et pour concevoir des systèmes d'adsorption efficaces



Figuier IV.6 Isotherme d'adsorption de BM

À partir du graphe, on observe que la quantité adsorbée Q_e augmente jusqu'à atteindre 32,5 mg/g, après quoi la pente de la courbe diminue et la courbe s'aplatit légèrement. Cette observation indique que l'adsorption suit une isotherme de type H. Au début, la forte augmentation de Q_e reflète une haute affinité initiale entre le charbon actif et le bleu de méthyle, avec une rapide occupation des sites d'adsorption. Lorsque Q_e atteint 32,5 mg/g, la pente diminue, suggérant une saturation progressive des sites disponibles. L'aplatissement de la courbe signale que l'adsorption approche de sa capacité maximale, avec les derniers sites disponibles étant occupés plus lentement. Ce comportement est typique des isothermes de type H, qui peuvent souvent être modélisées efficacement par l'isotherme de Langmuir, indiquant une adsorption sur des sites homogènes avec une capacité d'adsorption définie.

Afin d'évaluer le processus d'élimination du colorant de BM, plusieurs modèles Mathématique peuvent être utilisés pour décrire les données expérimentales des isothermes, à Savoir : modèle de Langmuir, Freundlich,

IV.2.1 Isotherme de Langmuir

L'isotherme de Langmuir repose sur l'hypothèse que l'adsorption se produit sur des sites spécifiques d'adsorption homogènes avec une énergie d'adsorption constante et sans interaction entre les molécules adsorbées. La formule de Langmuir est donnée par :

$$\frac{C_e}{q_e} = \left(\frac{1}{Q_m K_L}\right) + \left(\frac{1}{Q_m}\right)C_e \quad (\text{IV.1})$$

Où :

q : quantité de soluté adsorbée par unité de masse de l'adsorbant à l'équilibre (mg/g).

Q_m : capacité d'adsorption ultime (mg/g).

C_e : concentration du soluté dans la phase liquide à l'équilibre (mg/l).

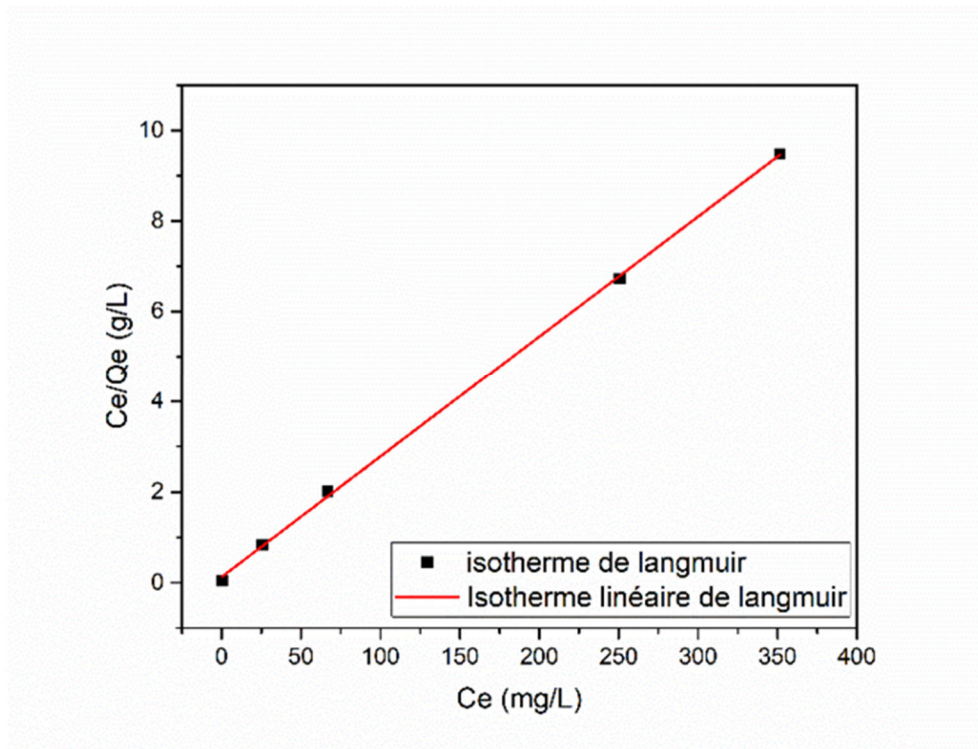
K_L : constante de Langmuir

Il est possible de déterminer la capacité ultime Q_m et la constante de dissociation K_L avec :

Les résultats des isothermes d'adsorption sont présentés sous forme de courbes $C_e/Q_e = f(C_e)$ (**Figure IV.7**). Les résultats de la modélisation montrent que l'isotherme de Langmuir s'adapte mieux aux données expérimentales, avec un coefficient de corrélation R^2 de 0,999. Cette haute valeur de R^2 indique une excellente concordance entre le modèle de Langmuir et les données expérimentales, suggérant que l'adsorption se produit sur des sites homogènes avec une capacité d'adsorption maximale définie. En conséquence, l'isotherme de Langmuir est appropriée pour décrire le processus d'adsorption du bleu de méthyle sur le charbon actif dans cette étude. Les paramètres d'isotherme de Langmuir sont montrés dans le tableau IV.1. La constante d'affinité K_L a une valeur de 4,5 L/mg. Cette valeur élevée de K_L suggère une forte affinité entre le charbon actif et le bleu de méthyle, indiquant que les molécules de bleu de méthyle sont facilement adsorbées par le charbon actif.

Tableau IV.1 paramètre d'isotherme de Langmuir

Paramètres	Isotherme de Langmuir
Equation	$y = 0.0266x + 0.122$
Q_{max}	37.59
Q_{max} Expérimentale	37.09
b	0.22
K_L	4.57
R^2	0.9996



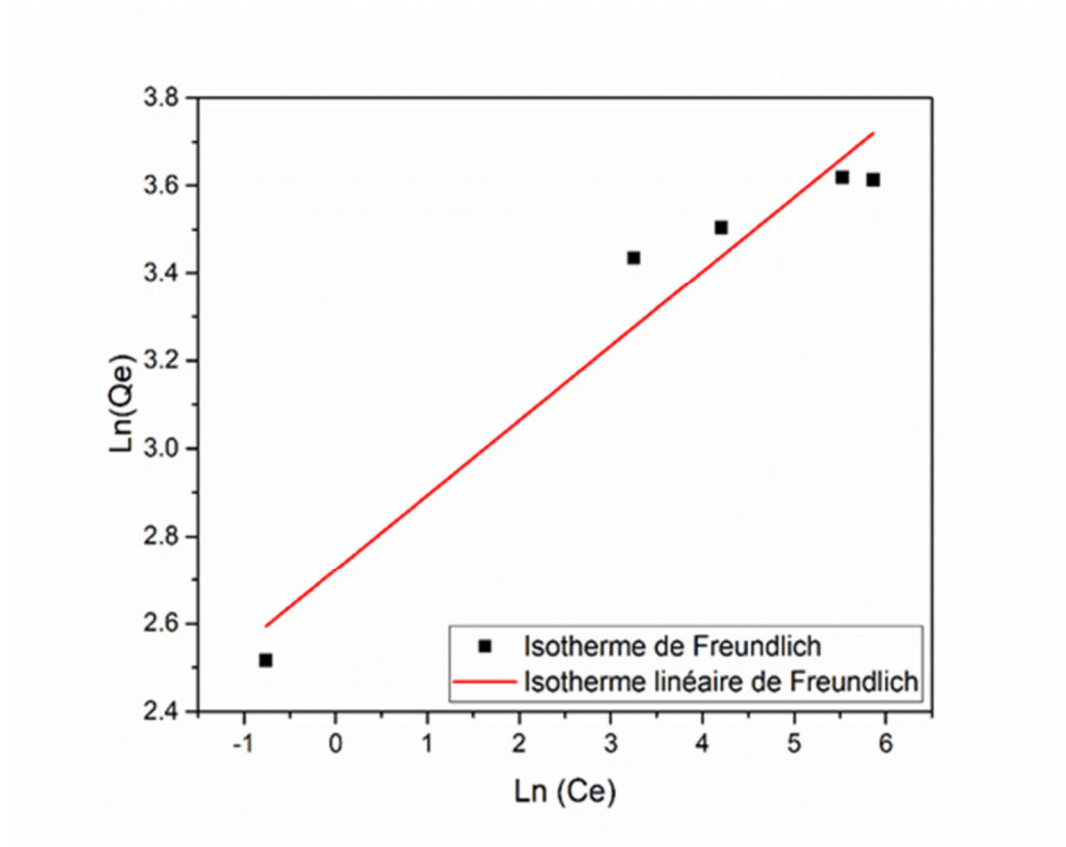
Figuiers IV.7 Isotherme de Langmuir de l'adsorption de BM sur le charbon actif nanocomposite

IV.2.2 Isotherme de Freundlich

L'isotherme de Freundlich est un modèle empirique qui s'applique à l'adsorption sur des surfaces hétérogènes et suppose une distribution exponentielle des sites et des énergies d'adsorption. La formule de Freundlich est donnée par :

$$q = k_F C_e^{1/n} \quad (\text{IV.3})$$

Avec : K, n : constantes expérimentales qui dépendent respectivement de la nature de l'adsorbât et de l'adsorbant. Contrairement à l'isotherme de Langmuir, cette isotherme empirique tient compte de la disparité de l'énergie d'adsorption entre les différents sites.



Figuiér IV.8 Isotherme de Freundlich de l'adsorption de BM sur le charbon actif nanocomposite.

Dans notre étude, l'isotherme de Freundlich ne montre pas une bonne corrélation avec les données expérimentales, avec un coefficient de corrélation R^2 de 0,9433. Les paramètres obtenus, $K_F=17.227$ et $n = 5.882$ tableau IV.2, indiquent une capacité d'adsorption élevée du charbon actif pour le bleu de méthyle et une adsorption fortement favorisée (puisque $n>1$). Une valeur élevée de K_F reflète la forte capacité d'adsorption, tandis qu'un n élevé suggère que l'adsorption est particulièrement efficace à basse concentration, caractéristique d'une surface hétérogène. Cependant, bien que l'isotherme de Freundlich ne décrive pas bien le comportement d'adsorption.

Tableau IV.2 paramètres d'isotherme de Freundlich

Paramètres	Isotherme de Freundlich
Equation	$y = 0.17x + 2.723$
n	5.882
$Q_{\max}$ Expérimentale	37.09
K_F	17.227
R^2	0.9433

IV.3 Effet de température sur l'adsorption :

L'effet de la température sur l'adsorption est un aspect crucial à étudier car il peut influencer la capacité d'adsorption et le mécanisme d'interaction entre l'adsorbant et l'adsorbat. Voici une explication de l'effet de la température sur l'adsorption, avec les concepts clés et leur interprétation. Les résultats de l'effet de la température sur l'adsorption du bleu de méthyle (BM) par le charbon actif nanocomposite, représentés dans la Figure IV.9,

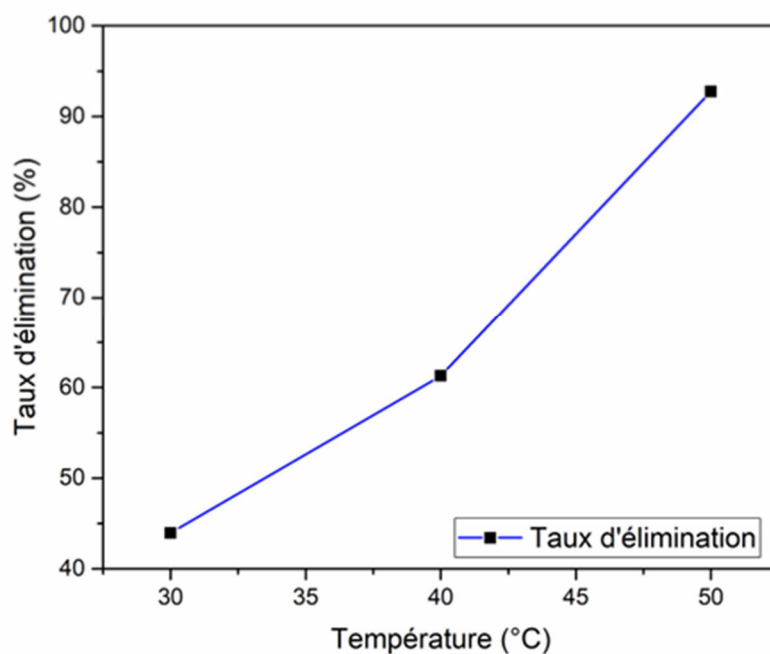


Figure IV.9 Effet de température sur la quantité de BM adsorbé par le charbon actif nanocomposite

On observe une augmentation significative du taux d'élimination du BM avec l'augmentation de la température. En passant de 30 à 50 °C, le taux d'élimination du BM augmente de 66 % à

92%, entraînant une augmentation de la capacité d'adsorption de 21,97 à 46,37 mg/g. Cette tendance indique que le processus d'adsorption est endothermique, où l'augmentation de la température favorise l'adsorption des molécules de BM sur le charbon actif nanocomposite. La chaleur supplémentaire permet aux molécules de BM de surmonter les barrières d'activation et d'atteindre les sites d'adsorption plus efficacement. Par conséquent, à des températures plus élevées, la diffusion des molécules de BM dans les pores du charbon actif est améliorée, augmentant l'efficacité de l'adsorption. En conclusion, l'augmentation de la température améliore notablement la capacité d'adsorption du BM par le charbon actif nanocomposite, rendant ce matériau particulièrement efficace pour le traitement des eaux contaminées par le bleu de méthyle.

IV.4 Conclusion

Cette étude a exploré les paramètres influençant l'adsorption du bleu de méthyle (BM) par le charbon actif nanocomposite, en se concentrant sur l'effet de la masse de l'adsorbant, du pH, de la température et sur la modélisation des isothermes d'adsorption. Les résultats ont montré que l'augmentation de la masse de charbon actif augmente initialement la quantité adsorbée de BM jusqu'à atteindre un plateau de saturation, tandis que le taux d'élimination diminue avec une augmentation supplémentaire de la masse, en raison de la saturation des sites d'adsorption.

L'étude de l'effet du pH a révélé que dans un milieu basique ($\text{pH} > 7$), le taux d'élimination du BM augmente jusqu'à 97 %, tandis que dans un milieu acide ($\text{pH} < 7$), la courbe se stabilise. De plus, la capacité d'adsorption atteint 24 mg/g dans un milieu acide et se stabilise dans un milieu basique, soulignant que les conditions acides favorisent une adsorption plus forte en raison des forces électrostatiques entre le charbon actif et le BM. L'analyse des isothermes d'adsorption a montré que l'isotherme de Langmuir s'adapte mieux aux données expérimentales, avec un coefficient de corrélation R^2 de 0,999, suggérant une adsorption sur des sites homogènes avec une capacité d'adsorption maximale définie. En revanche, l'isotherme de Freundlich, bien qu'indiquant une bonne capacité d'adsorption et une adsorption favorable, s'adapte moins bien avec un coefficient de corrélation R^2 de 0,9433.

Enfin, l'effet de la température sur l'adsorption a démontré une augmentation significative de la capacité d'adsorption du BM par le charbon actif nanocomposite lorsque la température passe de 30 à 50 °C. Cette tendance suggère que le processus d'adsorption est endothermique, où la chaleur supplémentaire favorise l'adsorption des molécules de BM.

Chapitre 4 : Résultats et discussion

Cette étude confirme que le charbon actif nanocomposite est un adsorbant efficace pour le bleu de méthyle, avec des performances optimisées dans des conditions acides et à des températures élevées. Les résultats fournissent une base solide pour le développement de systèmes de traitement des eaux usées utilisant le charbon actif nanocomposite pour éliminer les contaminants organiques comme le bleu de méthyle.

Conclusion générale :

L'objectif de notre travail a été d'étudier l'élimination des polluants organiques à partir la technique d'adsorption sur des charbons actifs d'origines végétales élaborées dans notre laboratoire. Avant de concevoir notre matériau, nous avons mené des études sur le charbon activé, ses méthodes de fabrication (activation et pyrolyse) et ses propriétés, soulignant sa capacité d'absorption élevée. Nous avons ensuite étudié les nanocomposite en suite des recherches sur les classifiant, les synthétisant et examinant leurs propriétés, y compris leur capacité d'adsorption des composés nanométriques.

Dans cette étude, nous avons examiné les facteurs qui impactent l'adsorption du bleu de méthyle (BM) par le charbon actif nanocomposite. Nous avons mis l'accent sur l'impact de la masse de l'adsorbant, du pH, de la température et sur la modélisation des isothermes d'adsorption. D'après les résultats, il a été démontré que l'augmentation de la masse de charbon actif entraîne d'abord une augmentation de la quantité adsorbée de BM jusqu'à atteindre un niveau de saturation, tandis que le taux d'élimination diminue si la masse augmente davantage, en raison de la saturation des sites d'adsorption.

L'analyse de l'impact du pH a montré que dans un environnement basique ($\text{pH} > 7$), le BM est éliminé à 97 %, tandis que dans un environnement acide ($\text{pH} < 7$), la courbe reste stable. En outre, l'adsorption atteint 24 mg/g dans un environnement acide et se stabilise dans un environnement basique, mettant en évidence le fait que les conditions acides favorisent une adsorption plus intense en raison des forces électrostatiques entre le charbon actif et le BM.

Les résultats de l'analyse d'adsorption ont démontré que l'isotherme de Langmuir s'ajuste davantage aux données expérimentales, avec un coefficient de corrélation R^2 de 0,999. Cela suggère une adsorption sur des sites homogènes avec une capacité d'adsorption maximale évaluée. Par contre, l'isotherme de Freundlich, même si elle indique une capacité d'adsorption considérable et une adsorption favorable, s'ajuste moins bien avec un coefficient de corrélation R^2 de 0,9433.

Finalement, les résultats ont montré que l'impact de la température sur l'adsorption a entraîné une nette amélioration de la capacité d'adsorption du BM par le charbon actif nanocomposite lorsque la température passe de 30 à 50 °C. Selon cette tendance, le processus d'adsorption est endothermique, ce qui implique que la chaleur supplémentaire favorise l'adsorption des molécules de BM.

Cette étude confirme que le charbon actif nanocomposite est un adsorbant efficace pour le bleu de méthyle, avec des performances optimisées dans des conditions acides et à des températures

Conclusion générale

élevées. Les résultats fournissent une base solide pour le développement de systèmes de traitement des eaux usées utilisant le charbon actif nanocomposite pour éliminer les contaminants organiques comme le bleu de méthyle.

Dans l'ensemble, l'étude du processus de fabrication du charbon actif met en évidence la nécessité de faire preuve de précision et de minutie pour obtenir un produit final répondant à des normes élevées. La compréhension des facteurs influençant les propriétés du charbon actif et le contrôle rigoureux du processus de fabrication sont essentiels pour garantir l'obtention des résultats souhaités.

Références bibliographies

- [1] Adsorption of emerging pollutants on activated carbon.
- [2] degruyter.com - Z Jeirani, CH Niu, J Soltan - Reviews in Chemical Engineering, 2017
- [3] Adsorption technique for the removal of organic pollutants from water and wastewater.
- [4] books.google.com - MN Rashed - Organic pollutants-monitoring, risk and treatment, 2013
- [5] Adsorption of organic compounds on activated carbons.
- [6] Elsevier - M Belhachemi... Materials for Controlling Environmental Pollution, 2021
- [7] Historical production and use of carbon materials: the activated carbon.
- [8] Springer - T Gupta, T Gupta - Carbon: The Black, the Gray and the Transparent, 2018
- [9] An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications.
- [10] Elsevier - A Bhatnagar, W Hogland, M Marques... - Chemical Engineering..., 2013
- [11] Activated Carbon, Biochar and Charcoal: Linkages and Synergies across Pyrogenic [HTML] Carbon's ABCS.
- [12] mdpi.com - N Hagemann, K Spokas, HP Schmidt, R Kägi...- Water, 2018
- [13] Activated carbon.
- [14] Wiley Online Library - FS Baker, CE Miller, AJ Repik..... Othmer Encyclopedia of ..., 2000
- [15] An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications.
- [16] Elsevier - A Bhatnagar, W Hogland, M Marques... - Chemical Engineering..., 2013
- [17] <https://images.app.goo.gl/wPyQJF6R8pjtJzzh7>
- [18] <https://images.app.goo.gl/r8VSA6NCBknfGhK37>
- [19] Activated carbon [B].
- [20] books.google.com - H Marsh, FR Reinoso – 2006
- [21] OpenEdition Books. <https://books.openedition.org>
- [22] <https://www.activatedcarbon.net/fr/Resources/density-of-activated-carbon/>
- [23] <https://carbonimpulse.com/presentation-de-quelques-types-de-charbons-actifs/>
- [24] Activated carbon adsorption [B]
- [25] taylorfrancis.com - RC Bansal, M Goyal - 2005
- [26] Microwave assisted preparation of activated carbon from biomass: A review

Références bibliographies

- [27] Elsevier - W Ao, J Fu, X Mao, Q Kang, C Ran, Y Liu..... and Sustainable Energy ..., 2018
- [28] Preparation of activated carbon by chemical activation with ZnCl₂
- [29] Elsevier - F Caturla, M Molina-Sabio, F Rodriguez-Reinoso - Carbon, 1991
- [30] Microwave assisted preparation of activated carbon from biomass: A review
- [31] Elsevier - W Ao, J Fu, X Mao, Q Kang, C Ran, Y Liu..... and Sustainable Energy ..., 2018
- [32] Activated carbon for water and wastewater treatment: integration of adsorption and [B] biological treatment
- [33] books.google.com - F Çeçen, O Aktas – 2011
- [34] Synthesis of activated carbon from lignocellulosic biomass and its applications in air pollution control-a review
- [35] Elsevier - NM Nor, LC Lau, KT Lee, AR Mohamed - Journal of Environmental..., 2013
- [36] <https://www.airandme.fr> > blog > Le charbon actif pour purifier l'air : avantages
- [37] <https://www.jacobi.net>
- [38] <https://amelioresetasante.com/8-utilisations-charbon-actif-devez-vous-connaître/>
- [39] Nanocomposites: synthesis, structure, properties and new application opportunities [HTML]
- [40] SCIELO Brasil - PHC Camargo, KG Satyanarayana, F Wypych - Materials Research, 2009
- [41] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/nanoscience-nanocomposite-15290/>
- [42] Synthèse des nano-composites à matrices céramiques et métallique renforcées par des [PDF] nanotubes de carbone par combustion: modélisation mathématique.....
- [43] dspace.univ-guelma.dz-A Geuffaz-2012
- [44] <https://metalblog.ctif.com/2018/03/19/les-composites-a-matrice-metallique-pour-resister-a-lusure/>
- [45] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/methodes-de-caracterisation-et-d-analyse-des-metaux-et-alliages-42532210/materiaux-composites-a-matrices-metalliques-m250/>
- [46] Polymer-matrix nanocomposite membranes for water treatment
- [47] Elsevier-JYin. B.Deng-Journal of membrane science, 2015.
- [48] Polymer nanocomposites: polymer and particle dynamics
- [49] pubs.rsc.org - D Kim, S Srivastava, S Narayanan, LA Archer - Soft Matter, 2012.

Références bibliographies

- [50] <https://textilelearner.net/nanocomposites-classification-properties/>
- [51] <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/09673911211068923>
- [52] <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/24/7673>
- [53] <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmats.2021.629792>
- [54] <https://snfquide.stanford.edu/guide/equipment/purpose/deposition/chemical-vapor-deposition-cvd>
- [55] https://www.researchgate.net/figure/Synthesis-and-purification-of-the-nanocomposites-by-the-chemical-reduction-of-Au-and-Pt_fig1_350864548
- [56] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/in-situ-polymerisation>
- [57] Elaboration et caractérisation de Nanocomposites modèles Laponite/Polyoxyde [PDF]d'ethylene cyberdoc.univ-lemans.fr-A Loiseau - Université du Maine, 2006
- [58] Recent advances in synthesis and application of polymer nanocomposites for water and wastewater treatment
- [59] Elsevier-M Khodakarami, M Bagheri - Journal of Cleaner Production, 2021
- [60] [https://www.graphene-info.com/graphene water treatment\)](https://www.graphene-info.com/graphene%20water%20treatment)
- [61] <https://www.mdpi.com/2504-477X/4/3/135>
- [62] [https://www.researchgate.net/publication/277689632_Metal Oxide Nanomateria](https://www.researchgate.net/publication/277689632_Metal_Oxide_Nanomateria)
- [63] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10145794/>
- [64] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012817966600025X>
- [65] <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/cr200263w>
- [66] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226086X13003092>
- [67] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7079867>
- [68] <https://encyclopedia.pub/entry/19526>
- [69] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479723016833>
- [70] [https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/par-2020-0062/html? lang=en](https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/par-2020-0062/html?lang=en)
- [71] <https://www.safewater.org/fact-sheets-1/2017/1/23/ultrafiltrationnanoandro>
- [72] <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.8b00562>
- [73] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9015185>
- [74] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10145794/>
- [75] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389421017842>
- [76] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321001693>