

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Génie de l'environnement.

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLÔME DE MASTER

FILIÈRE : Génie des procédés

Spécialité : Gestion des changements environnementaux en Méditerranée.

Par

CHIHI CHOUROUK & KERROUCHE AHLEM

Intitulé

*Utilisation de biocharbon actif à partir de résidus de biomasse
(Luffa) pour la décoloration des effluents industriels*

Soutenu le : 24/06/2024

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Établissement</i>
<i>Mme.Banou M</i>	<i>MAA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mme.Bekri S</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadrant</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.Bahah S</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2023/2024

Remerciement

Ce travail a été effectué dans le cadre de l'obtention du diplôme de Master système LMD en Génie des procédés à la faculté des sciences et technologie à l'université Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Bordj-Bou-Argeridj.

Nous aimerions, tout d'abord remercier chaleureusement notre encadratrice, Mme. BEKRI Sarra pour avoir accepté de diriger ce travail. Ses orientations, ses conseils, ses remarques et ses suggestions avisées ont facilité le travail de recherche.

Nos remerciements les membres de jury pour le grand honneur qu'ils nous font en acceptant de juger ce travail : M.Bahah S et Mme.Banou M

Nous tenons à remercier tous ceux ou celles qui nous ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce modeste travail.

إهداء التخرج

من قال أنا لها "نالها" ونحن لها وإن أبت رغما عنها أتينا بها..

الى الأيادي الطاهرة التي أزلت من طرقنا أشواك الفشل..

الى من ساندنا بكل حب عند ضعفنا

الى من رسموا لنا المستقبل بخطوط من الثقة والحب..

الى عائلاتنا

نهدي فرحة تخرجنا الى من كلل العرق جبينيهما وعلمونا أن النجاح لا يأتي إلا بالصبر والإصرار ..

الى آبائنا

الى تلك الإنسانين العظيمتين التي طالما تمنوا ان تقرأ أعينهما برؤيتنا في يوم كهذا ..

الى امهاتنا

والى من انتظروا هذه اللحظات ليفتخروا بنا

الى من نشد عضدنا بهم ..

الى اخوتنا واخواتنا

المخلص

تعتبر النفايات السائلة الصناعية مصدرا مهما لتلوث المياه. يعد تغيير لون هذه النفايات السائلة خطوة حاسمة لمعالجتها قبل إطلاقها في البيئة. الكربون المنشط هو مادة ماصة واعدة لإزالة اللون من النفايات السائلة الصناعية. تستكشف هذه الأطروحة استخدام الكربون المنشط من بقايا الكتلة الحيوية للليفة لإزالة لون النفايات السائلة الصناعية. حضرنا هذا الكربون المنشط في عدة خطوات، وهي: (1) المعالجة المسبقة، (2) الكربنة، (3) التنشيط، ثم درسنا خصائصه، والتي هي: نقطة الشحنة الصفيرية، مطياف الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه، حيود الأشعة السينية، تحليل ترموجرافيمتري، مؤشر الميثيلين الأزرق، عدد اليود. قمنا بإعداد محلول صبغة الملكيت الخضراء لدراسة امتصاص الكربون المنشط الذي صنعناه عليه، لأن هذه الصبغة توجد بكثرة في النفايات السائلة الصناعية، ودرسنا فعالية هذا الكربون المنشط على الصبغة بعدة تأثيرات، وهي: منحنى المعايرة، تأثير الأس الهيدروجيني، تأثير الكتلة، حركية الامتزاز، وتأثير التركيز الأولي للمحلول.

الكلمات الرئيسية: فحم نشط حيوي، الليفة، نزع اللون، مخلفات صناعية

Résumé :

Les effluents industriels constituent une source importante de pollution de l'eau. La décoloration de ces effluents est une étape cruciale pour leur traitement avant rejet dans l'environnement. Le charbon actif est un matériau adsorbant prometteur pour la décoloration des effluents industriels. Ce mémoire explore l'utilisation du charbon actif issu des résidus de biomasse de Luffa pour la décoloration des effluents industriels. Nous avons préparé ce charbon actif en plusieurs étapes, à savoir :1) prétraitement, 2) carbonisation, 3) activation, puis nous avons étudié ses propriétés, qui sont : la charge au point zéro pH_{PZC} , FTIR, DRX, ATG, indice de bleu de méthylène, indice d'iode. Nous avons préparé une solution de colorant vert de malachite pour étudier l'absorption du charbon actif que nous avons préparé, comme ce colorant se trouve en abondance dans les effluents industriels, nous avons étudié l'efficacité de ce charbon actif sur le colorant par plusieurs effets à savoir : l'effet du pH, l'effet de masse, cinétique d'adsorption, Isothermes d'adsorption.

Mots clés : Charbon actif, Luffa, Décoloration, Effluents industriels.

Abstract:

Industrial effluents are an important source of water pollution. The discoloration of these effluents is a crucial step for their treatment before discharge into the environment. Activated carbon is a promising adsorbent material for the decolorization of industrial effluents. This thesis explores the use of activated carbon from Loofah biomass residues for the decolorization of industrial effluents. We created this activated carbon in several steps, namely:1) pretreatment, 2) carbonization, 3) activation, then we studied its properties, which are: zeropoint charge pH_{PZC} , FTIR, DRX, ATG, methylene blue index, iodine number. We have prepared a solution of malachite green dye to study the absorption of the activated carbon that we have manufactured on it, as this dye is found in abundance in industrial effluents, we have studied the effectiveness of this Activated Carbon on the dye by several effects namely: the calibration curve, the pH effect, the mass effect, adsorption kinetics, adsorption isotherms.

Keywords : Activated biocharbon, Luffa, Discoloration, Industrial effluents

sommaire :

Introduction générale	01
------------------------------------	-----------

Partie I : PARTIE THEORIQUE

Chapitre 1 : La pollution de l'eau et les effluents industriels

I.1. La pollution de l'eau	03
I.2. Les différentes formes de la pollution d'eau	03
I.2.1. Pollution chimique.....	03
I.2.2. Pollution biologique	03
I.2.3. Émissions de chaleur.....	03
II. Les effluents industriels et leurs caractéristiques	03
II.1. Les effluents industriels.....	03
II.2. Les caractéristiques des effluents industriels	04
II.3. Les sources des effluents industriels	04
II.4. Les impacts environnementaux des effluents	06
II.4.1. Conséquences pour les écosystèmes aquatiques.....	06
II.4.2. Conséquences sur les écosystèmes de la Terre	06
II.4.3. Répercussions sur la santé humaine	07
III.1. Définition des colorants.....	07
III.2. Types de colorants	07
III.3. Propriétés des colorants	09
III.4. Applications des colorants	10
III.4.1. Textiles	10
III.4.2. Aliments	10
III.4.3. Cosmétiques.....	10
III.4.4. Matériaux de construction	10
III.4.5. Arts et loisirs	10
III.5. Le colorant : vert de malachite	11

III.6. La toxicité de vert de la malachite	11
III.7. Les procédés d'élimination des colorants.....	13
III.7.1. Les procédés chimiques	13
III.7.2. les procédés physiques.	13
III.8. Choix du procédé	14
III.8.1. Le type de colorant	14
III.8.2. La concentration des colorants	14
III.8.3. La présence d'autres polluants	14
III.8.4. Le coût du traitement	14

Chapitre 02 : Généralité sur L'adsorption

IV. L'adsorption	15
IV.1. Définition de l'adsorption	15
IV.2. Les types d'adsorption	15
IV.2.1. Adsorption physique.....	15
IV.2.2. Adsorption chimique	16
IV.3. Comparaison entre deux les types d'adsorption.....	17
IV.4. Application de l'adsorption	17
IV.4.1. Séparation de gaz	17
IV.4.2. Purification de l'air	18
IV.4.3. Catalyse.....	18
IV.4.4. Stockage d'énergie	18
IV.4.5. Séparation de produits chimiques	18
IV.4.6. Purification de l'eau	18
IV.5. Facteurs influençant le phénomène d'adsorption	18
IV.5.1. Facteurs liés à l'adsorbat.....	18
IV.5.1.1. Nature chimique	18
IV.5.1.2. Concentration en solution	19
IV.5.1.3. Température	19
IV.5.2. Facteurs liés à l'adsorbant	19

IV.5.2.1. Surface spécifique	19
IV.5.2.2. Nature chimique	19
IV.5.2.3. Structure poreuse	19
IV.5.2.4. Forces intermoléculaires	19
IV.6. Cinétique de l'adsorption	19
IV.6.1. Définition de l'adsorption cinétique	19
IV.6.2. Description des mécanismes d'adsorption.....	20
IV.6.3. Modélisation des cinétiques d'adsorption	20
IV.6.3.1. Modèle cinétique du pseudo premier ordre	20
IV.6.3.2. Modèle cinétique du pseudo-second ordre.....	21
IV.6.3.3. Modèle d'Elovich.....	22
IV.6.3.4. Modèle de la diffusion intra-particule	22
IV.7. Isotherme d'adsorption	22
IV.7.1. Définition de l'Isotherme d'adsorption	22
IV.7.2. Classification des isothermes d'adsorption	23
IV.7.2.1. Isotherme de type C	24
IV.7.2.2. Isotherme de type L	24
IV.7.2.3. Isotherme de type H	25
IV.7.2.4. Isotherme de type S	25
IV.7.3. Modélisation des isothermes d'adsorption	25
IV.7.3.1. Isotherme de Langmuir	25
IV.7.3.2. Isotherme de Freundlich	27
IV.8. Les adsorbants	28
IV.8.1. Définition des adsorbants	28
IV.8.2. Les types d'adsorbants	28
IV.8.2.1. Charbon actif	28
IV.8.2.2. Gel de silice.....	29
IV.8.2.3. Alumine activée	29
IV.9.1. Définition de charbon actif	30
IV.9.2. Applications du charbon actif	31

IV.9.2.1. Purification de l'eau et de l'air	31
IV.9.2.2. Agriculture.....	31
IV.9.2.3. Conditionnement du sol	31
IV.9.2.4. Industrie.....	31
IV.9.3. Types de charbon actif	31
IV.9.3.1. Charbon actif en poudre (CAP).....	32
IV.9.3.2. Charbon actif granulaire (CAG).....	32
IV.9.3.3. Charbon actif extrudé (CAE)	32
IV.9.4. Préparation et propriétés du charbon actif.....	33
IV.9.4.1. Fabrication du charbon actif	33
IV.9.4.1.1. Carbonisation.....	34
IV.9.4.1.2. Activation.....	34
IV.9.4.2. Propriétés du charbon actif.....	34
IV.9.5. Charbon actif à partir de la biomasse de luffa.....	35
IV.9.5.1. Définition de luffa	35
IV.9.5.2. Définition de charbon à partir de luffa.....	35
IV.9.5.3. Processus de production.....	35
IV.9.5.4. Propriétés du charbon actif de luffa.....	36
IV.9.5.5. Applications du charbon actif de luffa	36
IV.9.5.6. Avantages et Inconvénients du charbon actif de luffa.....	37
IV.9.5.6.1. Les Avantages.....	37
IV.9.5.6.2. Les Inconvénients.....	37
IV.9.6. Caractérisation du charbon actif.....	38
IV.9.6.1. Caractérisation physico-chimiques	38
IV.9.6.1.1. pH de point de charge nulle (pH_{pzc}).....	38
IV.9.6.1.2. Rendement d'activation R (%).....	38
IV.9.6.2. Caractérisation structurale	39
IV.9.6.2.1. Caractérisation par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR).	39
IV.9.6.2.2. Diffraction du rayon X (DRX).....	39
IV.9.6.3. Caractérisation thermique.....	40
IV.9.6.3.1. Analyse Thermogravimétrique (ATG).....	40

IV.9.6.4. Caractérisations texturales	41
IV.9.6.4.1. L'indice de bleu de méthylène	41
IV.9.6.4.2. L'indice d'iode.....	42

Partie II : PARTIE EXPERIMENTALE

Chapitre 03 : Le charbon actif

V. La préparation de l'adsorbant	44
V.1. Lavage par l'eau de Javel	44
V.2. Lavage avec une solution de la soude NaOH	45
V.3. Traitement avec l'acide phosphorique H ₃ PO ₄	45
V.4. Traitement avec carbonate de sodium Na ₂ CO ₃	46
V.5. Le séchage.....	47
V.6. Carbonisation	47
V.7. Le broyage.....	48
V.8. Le tamisage.....	49
V.9. Le rendement d'activation.....	49
VI. Les caractéristiques de Charbon actif.....	50
VI.1. Caractérisation physico-chimiques.....	50
VI.1.1. L'effet de pH de point de charge nulle pHPZC	50
VI.2. Caractérisation structurale.....	52
VI.2.1. Caractérisation par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF)...	52
VI.2.2. Diffraction du rayon X (DRX).....	53
VI.3. Caractérisation thermique.....	54
VI.3.1. Analyse Thermogravimétrique (ATG).....	54
VI.4. Caractérisations texturales.....	56
VI.4.1. L'indice de bleu de Méthylène BM.....	56
VI.4.2. L'indice d'iode.....	56

Chapitre 04 : Les Colorants

VII.1. Caractéristiques du colorant vert de malachite	57
---	----

VII.1. 1.Le spectre d'absorption en UV-visible.....	57
VIII.2. Protocoles expérimentaux des études d'adsorption.....	57
VIII.2.1. Préparation des solutions du colorant.....	57
VIII.2.2. La courbe d'étalonnage de vert de malachite.....	58
VIII.2.3. Contrôle du non dégradation du colorant vert de malachite VM à la lumière du jour	59
VIII.2.4. L'effet du pH sur l'équilibre d'adsorption du colorant VM.....	60
VIII.2.5. L'effet de masse	62
VIII.2.6. Cinétique d'adsorption du vert de malachite VM.....	63
VIII.2.6.1. La modélisation des cinétiques d'adsorption (Ordre cinétique de l'adsorption)	65
VIII.2.6.1.a. Le modèle du pseudo-premier ordre.....	65
VIII.2.6.1.b. Le modèle de pseudo-deuxième ordre	66
VIII.2.6.1.c. Le modèle d'Elovich	66
VIII.2.6.1.d. Modèle de diffusion intra-particulaire.....	67
VIII.2.7. Comparaison des modèles cinétiques.....	68
VIII.2.8. Isothermes d'adsorption du vert de malachite VM.....	69
VIII.2.8.1. La modélisation des isothermes d'adsorption.....	70
VIII.2.8.1.a. Modèles de Langmuir.....	70
VIII.2.8.1.a.1. Modèles de Langmuir I.....	70
VIII.2.8.1.a.2. Modèles de Langmuir II.....	70
Conclusion générale	71

Liste des figures :

- Figure. 01:** le vert de malachite.
- Figure. 02 :** Représentation de l'adsorption de l'adsorbat à la surface d'un adsorbant.
- Figure. 03 :** Schéma de l'adsorption physique.
- Figure. 04 :** Schéma de l'adsorption chimique.
- Figure. 05 :** Etapes de transfert de masse pour l'adsorption sur charbon actif.
- Figure. 06 :** Les quatre principaux types d'isothermes d'après Giles et coll.
- Figure. 07 :** Isotherme d'adsorption : modèle de Langmuir.
- Figure. 08 :** Isotherme d'adsorption : modèle de Freundlich.
- Figure. 09 :** Charbon actif en poudre (PAC).
- Figure. 10 :** Gel de silice.
- Figure. 11 :** Alumine activée.
- Figure. 12 :** Zéolite (tamis moléculaire).
- Figure. 13 :** Charbon actif en poudre (CAP).
- Figure. 14 :** Charbon actif en grains (CAG).
- Figure. 15 :** Charbon actif extrudé (CAE).
- Figure. 16 :** La courge éponge ou luffa.
- Figure. 17 :** spectrophotomètre infrarouge (IRTF).
- Figure. 18 :** Analyse Thermogravimétrique (ATG).
- Figure. 19 :** Lavage à l'eau de Javel.
- Figure.20 :** L'hydroxyde de sodium NaOH.
- Figure.21 :** Traitement avec l'acide phosphorique H_3PO_4 .
- Figure.22 :** Traitement avec le carbonate de sodium Na_2CO_3 .
- Figure.23 :** Luffa traitée avec de l'acide phosphorique après le séchage.
- Figure.24 :** Une machine bruyante.
- Figure.25 :** Un tamiseur.
- Figure.26 :** Courbe représente le pH_{pzc} du charbon activé par acide CA Acide.
- Figure.27 :** Courbe représente le pH_{pzc} du charbon activé par sel CA Sel.
- Figure.28 :** Spectres d'IRTF de charbons actifs préparés.
- Figure. 29 :** Schéma de diffraction des rayons X (DRX).
-

Figure.30 : La perte de masse (%) en fonction de la température (T °C) obtenues par ATG pour les charbons actifs.

Figure.31 : Le spectre d'absorption en UV-visible du colorant vert de malachite.

Figure.32 : La solution mère en vert de malachite VM.

Figure.33 : des solutions de colorant avec des concentrations comprises.

Figure .34. Courbe d'étalonnage de VM par spectrophotométrie UV-visible.

Figure.35 : Des solutions (10 et 100 mg.L⁻¹), du vert de malachite VM avant dégradation à la lumière et à l'obscurité.

Figure.36 : Des solutions (10 et 100 mg.L⁻¹), d'un vert de malachite VM après dégradation à la lumière et à l'obscurité.

Figure.37 : L'effet du pH de la solution sur l'adsorption du VM.

Figure.3 8. L'effet du pH de la solution sur l'adsorption du VM.

Figure.39 : L'effet de masse des charbons actifs sur l'adsorption du VM.

Figur40 : L'effet de masse des charbons actifs sur le rendement d'adsorption du VM.

Figure. 41 : La cinétique d'adsorption de VM sur le **CA Acide**.

Figure.42 : Cinétique d'adsorption de pseudo premier-ordre de VM.

Figure.43 : La cinétique d'adsorption du modèle de pseudo deuxième-ordre de VM.

Figure. 44 : Cinétiques d'adsorption par le modèle d'Elovich de VM.

Figure.45 : La cinétique d'adsorption Modèle de diffusion intra-particulaire de vert de malachite VM.

Figure.46 : Isothermes d'adsorption de VM sur le charbon actif **CA Acide** à 25° C.

Figure.47 : Isothermes d'adsorption de modèles de Langmuir I de vert de malachite VM.

Figure.48 : Isothermes d'adsorption de modèles de Langmuir II de vert de malachite VM.

Liste des tableaux :

Tableau. 01: Principales différences entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique.

Tableau. 02 : Le rendement des charbons actifs.

Tableau. 03 : Résultat de l'indice de bleu de méthylène des charbons actifs.

Tableau. 04 : Résultat de l'indice d'iode des charbons actifs.

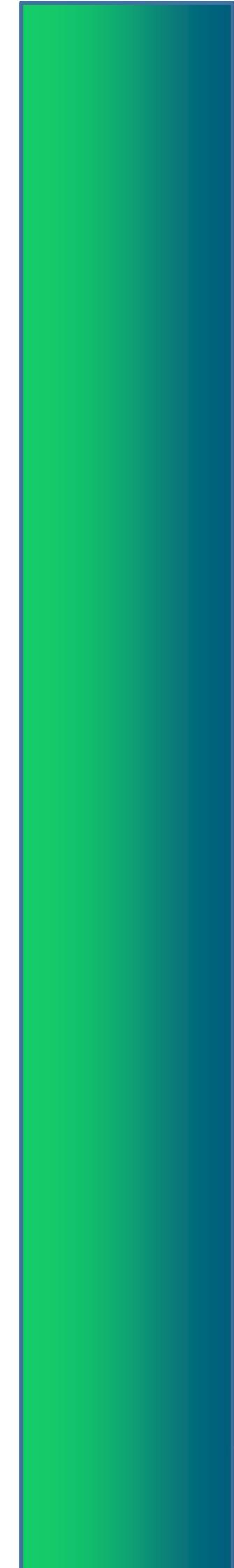
Tableau.05 : Evolution du colorant vert de malachite VM à la lumière du jour après 60 jours d'exposition.



Liste d'abréviation :

ABS	Absorbance.
ATG	Analyse Thermogravimétrique.
BM	Bleu de Méthylène.
C₀	La concentration initiale de bleu de méthylène (mg/L).
CA	Charbon actif.
CAA	Charbon actif acide.
C_e	Concentration de l'adsorbé à l'équilibre (mg L ⁻¹).
C_f	La concentration finale de bleu de méthylène (mg/L).
d	La distance interréticulaire entre les plans diffractant.
DBO	La demande Biologique en oxygène.
DCO	La demande chimique en oxygène.
DRX	Diffraction du rayon X.
EAC	Charbon actif extrudé.
GAC	Charbon actif granulaire.
H₃PO₄	Acide phosphorique.
IBM	l'indice de bleu de méthylène (mg/g).
IRTF	Infrarouge à transformée de Fourier.
K₁	Constante de vitesse de premier ordre (min ⁻¹).
m	La masse de charbon actif (g).
m_i	Masse de l'échantillon avant pyrolyse (g).
m_f	Masse de l'échantillon après pyrolyse (g).
NaOH	Hydroxyde de sodium.
Na₂CO₃	Carbonate de sodium.
PAC	Charbon actif en poudre.
pH_{pzc}	pH de point de charge nulle.
q_e	Quantité adsorbée à l'équilibre en mg/g .
q_m	Capacité d'adsorption maximale mg /g
q_t	Quantité adsorbée à l'instant t en mg/g .
R	La constante de gaz parfait (8,31 J mol ⁻¹ K ⁻¹).

- R%** Rendement.
- UV** Ultraviolet.
- V** le volume de la solution de bleu de méthylène (L).
- VM** vert de malachite.
- ϵ** Le potentiel de Polanyi.
- θ** L'angle entre le faisceau incident et les plans diffractant.
- λ** La longueur d'onde du faisceau incident ($\lambda = 1.54181\text{\AA}$).
-

A vertical bar on the left side of the page with a gradient from green at the top to blue at the bottom.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Afin d'assurer une qualité de vie optimale, il est essentiel d'avoir un environnement propre qui comprend des mesures essentielles pour préserver l'eau, le sol et l'atmosphère. De nos jours, à mesure que les méthodes analytiques avancent, on observe une hausse de la pollution des sols et des eaux usées par différents composés organiques et inorganiques. Les principales sources de ces toxines et polluants sont actuellement les sources agricoles et industrielles, telles que les métaux lourds, les plastifiants, les pesticides, les résidus pharmaceutiques et les colorants.[1] Les eaux usées peuvent être contaminées par les effluents colorés de ces industries, ce qui constitue une menace pour la santé humaine en raison de leurs effets toxiques et cancérigènes.[2] Effectivement, les colorants possèdent souvent des structures moléculaires aromatiques complexes qui les rendent plus complexes à dégrader et à traiter. Par conséquent, il est essentiel de traiter ces polluants. [3]

Plusieurs techniques physicochimiques et biologiques ont été employées afin de traiter et de supprimer les colorants présents dans les eaux usées, comme la dégradation biologique, élimination par électrochimie, sédimentation, échange d'ions, dégradation par la lumière, adsorption.[4] Dans ce cas, la consommation de charbon actif issu de résidus de biomasse s'avère être une solution prometteuse et durable pour la décoloration des déchets industriels. Le charbon actif est une substance poreuse et adsorbante issue de la biomasse, produite en carbonisant des résidus de biomasse comme le luffa dans des conditions rigoureuses, ce qui crée une structure poreuse avec une surface spécifique importante, ce qui permet au charbon actif d'adsorber efficacement les colorants et autres impuretés présents dans les effluents.[5]

La préparation de charbon actif à partir de résidus de biomasse (luffa) présente divers bénéfices :

- La durabilité du luffa réside dans sa nature renouvelable et biodégradable, ce qui en fait une matière première durable pour la production de charbon actif.
- Economie : Les résidus de biomasse (luffa) sont souvent abordables ou gratuits, ce qui permet de fabriquer du charbon actif à un prix abordable.

Le luffa possède une structure poreuse et une surface spécifique importante, ce qui en fait un matériau performant pour l'adsorption des colorants.[5]

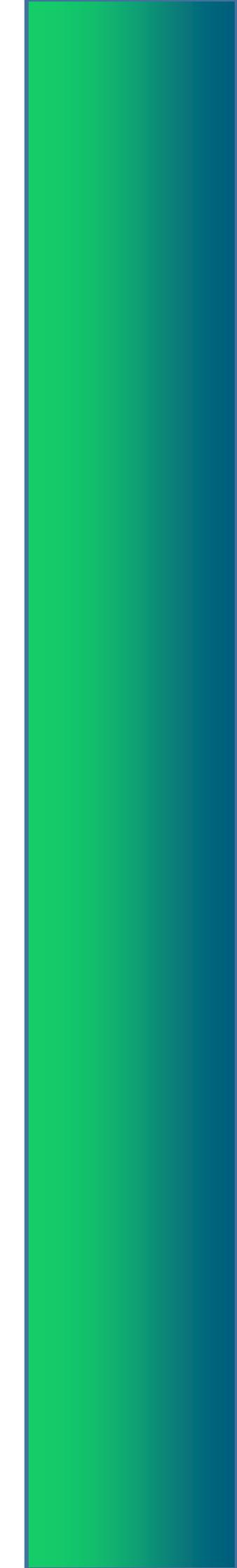
Dans cette étude, nous nous focalisons sur la préparation d'échantillons de charbons actifs à partir de biomasse de luffa, qui est un précurseur de sous-produits agricoles, en raison de sa disponibilité en Algérie.

Nous avons cherché à éliminer les colorants utilisés dans les usines par adsorption sur des charbons actifs préparés.

La première partie de la thèse traite d'une revue bibliographique sur les effluents industriels et les colorants, ainsi que sur le charbon actif et ses domaines d'application.

Dans la deuxième partie de la thèse, nous commencerons par une description du processus d'activation de la biomasse de luffa par imprégnation à l'acide phosphorique et le sel de carbonate de sodium, suivie d'une description des propriétés physiques, chimiques et histologiques des produits obtenus. Ensuite, nous étudierons l'adsorption du colorant vert de malachite sur les charbons actifs synthétisés.

Pour résumer, ce mémoire apportera une contribution à la recherche sur l'utilisation de biocharbon actif provenant de luffa pour la décoloration des effluents industriels, dans le but de concevoir une solution durable et efficace afin de préserver nos ressources en eau et la santé publique.

A vertical bar on the left side of the page with a gradient from green at the top to blue at the bottom.

*Revue
Bibliographique*

CHPITRE I



Chapitre 01 : La pollution de l'eau et les effluents industriels

I.1. La pollution de l'eau :

La pollution de l'eau se réfère à la contamination par des produits chimiques, des déchets industriels, des pesticides, des matières organiques, des micro-organismes ou des déchets plastiques. Différentes sources de pollution peuvent être impliquées, comme les activités industrielles, agricoles, domestiques ou même naturelles, et peuvent avoir des conséquences néfastes sur les écosystèmes aquatiques ainsi que sur la santé humaine. [6]

I.2. Les différentes formes de la pollution d'eau :

La pollution de l'eau peut être catégorisée selon les différentes substances qu'elle contient. Voici les principaux types de pollution de l'eau :

I.2.1. Pollution chimique : cela signifie que des substances chimiques dangereuses comme les métaux lourds, les pesticides, les produits pharmaceutiques, les produits chimiques industriels, etc. sont présentes dans l'environnement.

I.2.2. La pollution biologique : englobe les micro-organismes tels que les bactéries, les virus, les parasites et les algues toxiques qui polluent l'eau et la rendent inappropriée pour la consommation humaine.

I.2.3. Émissions de chaleur : il s'agit de l'augmentation des températures de l'eau causée par des rejets d'eau chaude provenant d'installations industrielles ou de centrales électriques, ce qui peut perturber les écosystèmes aquatiques et diminuer la diversité biologique.[7]

II. Les effluents industriels et leurs caractéristiques :

II.1. Les effluents industriels :

Les eaux usées produites par les activités industrielles sont appelées effluents industriels. Ils peuvent renfermer une variété de polluants, tels que :

- Des substances organiques et inorganiques.
- Métaux lourds : Substances chimiques dangereuses.
- Colorants : Agents infectieux.

II.2. Les caractéristiques des effluents industriels :

Les propriétés des déchets industriels sont très différentes selon le type d'industrie qui les produit. Toutefois, certaines caractéristiques fréquentes comprennent :

II.2.1. Niveau de pH : Les effluents provenant de l'industrie peuvent présenter un pH acide, neutre ou alcalin.

II.2.2. La demande chimique en oxygène (DCO) : une mesure qui évalue la quantité de matière organique dans les effluents. En général, les déchets industriels présentent une DCO élevée.

II.2.3. La demande biochimique en oxygène (DBO) : une mesure de la consommation d'oxygène par les micro-organismes lors de la décomposition de la matière organique présente dans les effluents. Aussi, les déchets industriels présentent une DBO élevée généralement.

II.2.4. Solides en suspension : Les effluents industriels peuvent contenir des solides en suspension, tels que des particules et des fibres.

II.2.5. Métaux lourds : Les effluents industriels peuvent contenir des métaux lourds, tels que le plomb, le mercure et le cadmium.

II.2.6. Produits chimiques toxiques : Les effluents industriels peuvent contenir des produits chimiques toxiques, tels que les solvants, les pesticides et les produits pharmaceutiques. [8]

II.3. Les sources des effluents industriels :

Les effluents industriels sont issus d'une multitude d'activités industrielles, parmi lesquelles les principales sont :

II.3.1. Secteurs chimiques : Production de substances chimiques, de pesticides, d'engrais, de médicaments, etc. Ces activités produisent des déchets qui renferment des substances chimiques toxiques, des métaux lourds et d'autres polluants dangereux.

II.3.2. Secteurs de l'agroalimentaire : Produire des aliments transformés, fabriquer des boissons, fabriquer des produits laitiers, etc. Ces activités génèrent des déchets riches en substances organiques, en nutriments, en micro-organismes et en agents pathogènes.

II.3.3. Les secteurs du textile : Les textiles sont traités, blanchis, imprimés et finis. Ces secteurs produisent des déchets qui renferment des colorants, des produits chimiques de traitement et des microfibres textiles.

II.3.4. Les secteurs de la métallurgie : Sidérurgie, fonderie, mélange de métaux, et ainsi de suite. Ces secteurs génèrent des déchets contenant des métaux lourds, des cyanures et d'autres polluants dangereux.

II.3.5. Les industries pétrolières et gazières se concentrent sur l'extraction, le raffinage et le transport du pétrole et du gaz naturel. Ces secteurs produisent des déchets riches en hydrocarbures, en produits chimiques toxiques et en eaux salines.

II.3.6. Les activités liées au papier et à la pâte à papier comprennent la production de papier, de carton et de produits issus du bois. Ces secteurs génèrent des déchets abondants en fibres de bois, en produits chimiques de traitement et en substances polluantes organiques.

II.3.7. Secteur énergétique : Centrales thermiques électriques, centrales nucléaires, etc. Ces industries génèrent des effluents chauds, radioactifs et contenant des produits chimiques de traitement.

II.3.8. Autres industries : Fabrication de cuir, de caoutchouc, de plastique, de verre, etc.

Chacune de ces industries génère des effluents spécifiques à ses activités.

En plus des activités industrielles mentionnées précédemment, d'autres sources d'effluents industriels peuvent être identifiées, comme :

-Les eaux utilisées pour nettoyer les équipements et les véhicules industriels.

-Les fluides utilisés pour refroidir les installations industrielles.

-Les eaux pluviales qui sont contaminées par les usines.

Il est essentiel de gérer et de traiter de manière adéquate toutes ces sources d'effluents industriels afin de prévenir la pollution de l'eau. [9]

II.4. Les impacts environnementaux des effluents industriels :

Lorsqu'ils ne sont pas correctement traités, les déchets industriels peuvent entraîner des conséquences dévastatrices sur les écosystèmes aquatiques et terrestres.

II.4.1. Conséquences pour les écosystèmes aquatiques :

Les polluants présents dans les effluents industriels peuvent être nocifs pour les poissons, les invertébrés et d'autres organismes aquatiques, ce qui peut entraîner leur décès en masse.

La destruction des habitats aquatiques peut être causée par la présence de sédiments et de nutriments excessifs provenant des effluents industriels, ce qui peut étouffer les plantes aquatiques et entraîner la destruction de l'habitat de nombreuses espèces.

La croissance d'algues nuisibles peut être favorisée par l'excès de phosphore et d'azote présents dans les effluents industriels, ce qui peut épuiser l'oxygène dans l'eau et causer la mort des poissons.

Les polluants contenus dans les déchets industriels peuvent se former dans les organismes aquatiques et perturber la chaîne alimentaire, ce qui peut avoir un impact sur les prédateurs tels que les oiseaux et les mammifères marins.

II.4.2. Conséquences sur les écosystèmes de la Terre :

- Contamination des sols et des eaux souterraines : Les effluents industriels peuvent contaminer les sols et les eaux souterraines par le biais de fuites ou de déversements, rendant l'eau impropre à la consommation et nocive pour les plantes et les animaux.
- Perte de biodiversité : La contamination des sols et des eaux souterraines peut conduire à la disparition d'espèces végétales et animales qui dépendent de ces habitats pour leur survie.

II.4.3. Répercussions sur la santé humaine :

Problèmes de santé : Les personnes exposées aux déchets industriels contaminés peuvent développer des problèmes de santé graves tels que des cancers, des affections respiratoires et des difficultés de reproduction.

Il est important de noter que les conséquences des déchets industriels sur l'environnement peuvent varier en fonction de la nature des polluants présents, de leur concentration et de la sensibilité des écosystèmes environnants. Une surveillance et une gestion efficaces des déchets industriels sont essentielles pour prévenir ces impacts néfastes sur l'environnement et la santé humaine. [10]

III.1. Définition des colorants :

Les colorants sont des substances chimiques capables d'absorber et de réfléchir sélectivement la lumière visible, conférant ainsi une couleur à une matière. Ils sont utilisés dans une large gamme d'applications, notamment : Textiles, Aliments, Cosmétiques, Matériaux de construction, et Arts et loisirs. [11]

III.2. Types de colorants :

Les colorants sont des substances qui confèrent de la couleur aux matériaux. Ils peuvent être classés en différents types en fonction de leur structure chimique, de leur application, de leur origine, de leur solubilité et de leur résistance à la lumière.

III.2.1. Selon leur structure chimique :

-Colorants azoïques : Ils contiennent un groupe azo ($-N=N-$) dans leur structure.

-Colorants anthraquinoniques : Ils sont dérivés de l'anthraquinone.

-Colorants triphénylméthaniques : Ils contiennent un noyau triphénylméthane dans leur structure.

-Colorants phtaléiques : Ils sont dérivés de l'anhydride phtalique.

-Colorants soufrés : Ils contiennent du soufre dans leur structure.

III.2.2. Selon leur application :

-Colorants textiles : Utilisés pour teindre les fibres textiles comme la mauvéine utilisée pour la soie et le coton.

-Colorants alimentaires : Utilisés pour colorer les aliments et les boissons comme ; le rouge citrus N°2, le canthaxanthine et le carotène.

-Colorants cosmétiques : Utilisés dans les produits cosmétiques, tels que les rouges à lèvres et les fards à paupières par exemple le triphénylméthane (bleu) et l'azoïque (rouge).

-Colorants pharmaceutiques : Utilisés dans les médicaments, comme l'érythrosine (E127) et l'azorubine (E122).

III.2.3. Selon leur origine :

-Colorants naturels : Dérivés de sources naturelles, telles que les plantes, les animaux et les minéraux.

-Colorants synthétiques : Produits chimiquement.

III.2.4. Selon leur solubilité :

-Colorants solubles dans l'eau : Se dissolvent facilement dans l'eau.

-Colorants insolubles dans l'eau : Ne se dissolvent pas facilement dans l'eau.

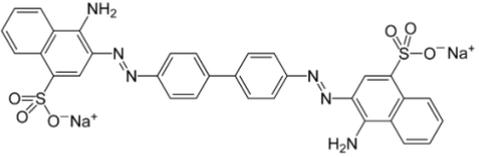
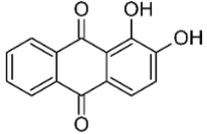
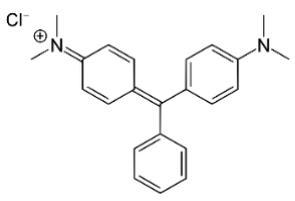
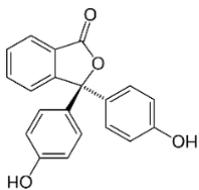
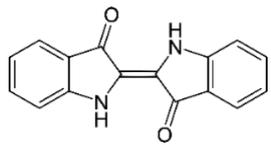
III.2.5. Selon leur résistance à la lumière :

-Colorants résistants à la lumière : Résistent à la décoloration par la lumière du soleil.

-Colorants non résistants à la lumière : Se décolorent lorsqu'ils sont exposés à la lumière du soleil.

[12]

-Exemples de colorants :

<p>Rouge Congo (colorant azoïque)</p> 	<p>Alizarine (colorant anthraquinonique)</p> 
<p>Vert malachite (colorant triphénylméthanique)</p> 	<p>Phénolphtaléine (colorant phtaléique)</p> 
<p>Indigo (colorant naturel)</p> 	

III.3. Propriétés des colorants :

Les propriétés importantes des colorants incluent :

- Force de teinture : La capacité du colorant à teindre une matière.
- Solidité à la lumière : La résistance du colorant à la décoloration par la lumière du soleil.
- Solidité au lavage : La résistance du colorant à la décoloration par le lavage.
- Solidité à la chaleur : La résistance du colorant à la décoloration par la chaleur.
- Compatibilité avec la matière : La capacité du colorant à adhérer à la matière à teindre. [12]

III.4. Applications des colorants:

Les colorants sont utilisés dans une large gamme d'applications, notamment :

III.4.1. Textiles : La teinture des vêtements est l'une des applications les plus importantes des colorants. Les colorants sont utilisés pour donner aux vêtements une variété de couleurs et de motifs.

III.4.2. Aliments : Les colorants sont utilisés pour ajouter de la couleur aux aliments et aux boissons. Cela peut rendre les aliments plus appétissants et les rendre plus attrayants pour les consommateurs.

III.4.3. Cosmétiques : Les colorants sont utilisés pour colorer le maquillage, les produits de soin de la peau et les produits capillaires. Cela peut aider à améliorer l'apparence des gens et à leur donner un regain de confiance.

III.4.4. Matériaux de construction : Les colorants sont utilisés pour colorer le béton, le plastique et d'autres matériaux de construction. Cela peut donner aux bâtiments et aux structures une apparence plus esthétique et les rendre plus résistants aux intempéries.

III.4.5. Arts et loisirs : Les colorants sont utilisés dans une variété d'activités artistiques, telles que la peinture, le dessin et la sculpture. Ils permettent aux artistes de créer des œuvres d'art vibrantes et expressives. [13]

III.5. Le colorant : vert de malachite :

Le vert de malachite est un pigment minéral naturel destiné à la peinture, à la teinture et à la décoration depuis l'Antiquité. Il est principalement obtenu à partir de la minérale malachite, un carbonate de cuivre hydroxylé. Ce pigment est une poudre fine de couleur verte éclatante. Sa couleur vive et sa stabilité lui valent d'être apprécié, mais il peut être toxique s'il est ingéré ou inhalé sous forme de pollen. Il a été limité dans certaines applications modernes en raison de sa toxicité potentielle, mais il est toujours utilisé dans l'art, l'archéologie et l'industrie de la couleur. [14]

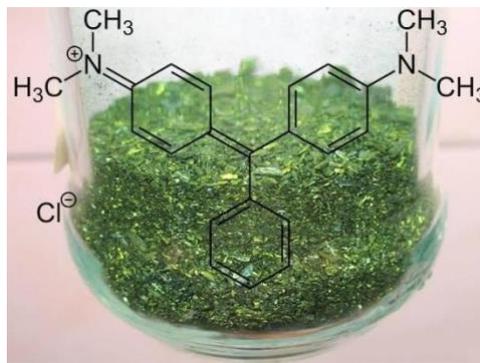


Figure 01: le vert de malachite

III.6. La toxicité de vert de la malachite :

III.6.1. La toxicité sur l'environnement :

L'utilisation réglementée du vert de malachite est due à sa toxicité significative pour l'environnement et la santé humaine.

- Influence sur l'écosystème :

-Très dangereux pour les animaux aquatiques ; le vert de malachite présente des effets néfastes sur les poissons, les invertébrés et les algues.[15]

-Il peut causer des mortalités importantes et perturber les écosystèmes aquatiques. Sa toxicité persiste dans l'environnement aquatique pendant plusieurs semaines.

- Polluant persistant :

Il est difficile de dégrader le vert de malachite dans l'environnement et il peut s'accumuler dans les sédiments et les tissus des organismes vivants. Les conséquences à long terme peuvent être préjudiciables pour la chaîne alimentaire. [16]

III.6.2. Toxicité sur la santé humaine :

- Toxique par ingestion, inhalation et contact cutané :

La présence de la malachite verte peut provoquer des irritations de la peau, des yeux et des voies respiratoires. La prise de grandes quantités peut causer des problèmes digestifs, des crises convulsives, des dommages aux reins et au foie, voire la mort.

- Cancérogène potentiel :

Certaines études suggèrent que le vert de malachite pourrait être cancérogène pour l'homme, Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour confirmer ce risque. [17]

- Danger pour la reproduction :

Le vert de malachite est perçu comme un poison reproducteur qui peut avoir un impact sur la fertilité des hommes et des femmes. [18]

Il présente aussi des risques pour la croissance du fœtus et peut entraîner des malformations congénitales.

- Régulation :

L'utilisation du vert de malachite est restreinte dans de nombreux pays. Son utilisation dans les industries pharmaceutique et agroalimentaire est interdite et son utilisation dans la pêche est soumise à une réglementation stricte.

Un produit toxique qui présente de graves risques pour la santé humaine et l'environnement. Il est essentiel de l'utiliser de manière responsable et de respecter les lois actuellement en vigueur.

III.7. Les procédés d'élimination des colorants :

III.7.1. Les procédés chimiques :

- Oxydation :

Ce processus détruit la coloration molécules en molécules plus petites et moins toxiques comme l'eau et le dioxyde de carbone. Plusieurs substances oxydantes, telles que le peroxyde d'hydrogène, l'ozone ou l'hypochlorite de sodium, peuvent être utilisées pour réaliser l'oxygénation comme le peroxyde d'hydrogène.

- Coagulation-floculation :

Ce processus implique l'ajout de composés coagulant à l'eau des composés à permettant de déstabiliser les particules colorantes et de les amener à s'agglomérer en floccs. Les floccs peuvent ensuite être éliminés de l'eau par filtration ou sédimentation.

- Dégradation biologique :

Ce processus utilise des micro-organismes, tels que les bactéries ou les champignons, pour dégrader les molécules colorantes. La dégradation biologique est un processus naturel et écologique qui ne produit pas de déchet dangereux. [19]

III.7.2. les procédés physiques:

- Filtration :

Cette méthode utilise un filtre pour retenir les particules de colorant en suspension dans l'eau. Les pores du filtre doivent être de taille adaptée à la taille des particules colorantes et être de la bonne taille pour correspondre à la taille des particules colorantes.

- Ultrafiltration :

Ce processus utilise une membrane semi-perméable pour séparer les molécules colorantes de l'eau. Les trous de la membrane sont plus petits que ceux des filtres traditionnels, des molécules colorantes plus petites peuvent être retenues.

- Adsorption :

Ce procédé consiste à faire adhérer les molécules de colorant à la surface d'un matériau adsorbant, tel que le charbon actif ou la zéolithe. etc.

L'efficacité de l'adsorption dépend des propriétés du colorant et de l'adsorbant, ainsi que des conditions opératoires. [20]

III.8. Choix du procédé :

Le choix du procédé d'élimination des colorants dépend de plusieurs facteurs, tels que :

III.8.1. Le type de colorant :

Selon leurs structures chimiques et caractéristiques, les colorants peuvent être divisés en plusieurs catégories. Le processus d'élimination dépend de la catégorie du colorant.

III.8.2. La concentration des colorants :

Les procédés physiques sont généralement plus efficaces pour les faibles concentrations de colorants, tandis que les procédés chimiques peuvent être plus efficaces pour les concentrations élevées.

III.8.3. La présence d'autres polluants :

L'eau usée peut contenir d'autres polluants en plus des colorants. Le choix du procédé d'élimination des colorants doit tenir compte de la présence de ces autres polluants.

III.8.4. Le coût du traitement :

Les différents procédés d'élimination des colorants ont des coûts variables. Le choix du procédé doit tenir compte du budget disponible.[21]

Les références :

- [1] : Forbes, V. E., & Forbes, T. L. (1997). Ecotoxicologie: théorie et applications. Editions Quae.
- [2] : DEHANE, F., & BENNA, A. (2018). Traitement des eaux usées industrielles de l'unité de production sofact de tissemsilt.
- [3] : Mansour, H. B., Boughzala, O., Dridi, D., Barillier, D., Chekir-Ghedira, L., & Mosrati, R. (2011). Les colorants textiles sources de contamination de l'eau: CRIBLAGE de la toxicité et des méthodes de traitement. *Revue des sciences de l'eau*, 24(3), 209-238.
- [4] : Crini, G., Montiel, A. J., & Badot, P. M. (2007). Traitement et épuration des eaux industrielles polluées: Procédés membranaires, bioadsorption et oxydation chimique. Presses Univ. Franche-Comté.
- [5] : Wang, S., Sun, H., Li, Z., Ren, H., & Huang, K. (2016) , Preparation and Application of Activated Carbon from Luffa Fibers for Dye Removal from Wastewater , *Journal of Cleaner Production*.
- [6] : Genin, B., Chauvin, C., & Ménard, F. (2003). Cours d'eau et indices biologiques : pollution, méthodes, IBGN. Educagri éditions.
- [7] : Khoubache, I., Laouar, N., & Bounamous, A. E. (2006). Etude de la pollution organique dans les eaux de l'Oued Kebir (W-Jijel) (Doctoral dissertation, Université de Jijel).
- [8] : Industrial Wastewater Treatment** <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/industrial-wastewater-treatment>
- [9] : Mouna, B. O. U. R. E. B. E. T., & Roumissa, D. J. E. H. I. C. H. E. (2023). Etude de la biodégradation d'un polluant organique (méthabenzthiazuron) en milieu aquatique (Doctoral dissertation, University center of Abdalhafid Boussouf-MILA).
- [10] : <https://www.vie-publique.fr/dossier/24018-la-politique-publique-de-leau>
<https://www.plasticcollectors.com/blog/water-pollution-solutions/>
- [11] : Smith, J. (2019). Chimie des colorants : Théorie et applications. Éditions Scientifiques Internationales.
- [12] : "Types of Dyes Used in Textile Industry." *Textile Advisor*. Consulté le 24 mai 2024, à partir de <https://www.textileadvisor.com/types-of-dyes-used-in-textile-industry/>
- [13] : STRUCTURE-PROPRIETES, E. D. C. (2010). Mohammad-Bassem BILAL (Doctoral dissertation, Université de Haute Alsace).
- [14] : Houcinat, I., Dib, L., Ghennam, S., & Bellir, K. (2015). Etude de la dégradation par procédé de fenton du vert de malachite en milieux aqueux.
- [15] : Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). Principes de la pêche responsable. Retrieved from <https://www.fao.org/3/w8617f/w8617f06.htm>
- [16] : European Chemicals Agency. (n.d.). Substance information: 100.028.5962. Retrieved from <https://echa.europa.eu/fr/substance-information/-/>
- [17] : Gerretsen, P., Müller, D. J., Tiwari, A., Mamo, D., & Pollock, B. G. (2009). The intersection of pharmacology, imaging, and genetics in the development of personalized medicine. *Dialogues in clinical neuroscience*, 11(4), 363-376.
- [18] : Humeau. (n.d.). Fiche de données de sécurité: Vert de malachite oxalate. Retrieved from https://www.humeau.com/media/lolfa_files/FDS_vert-malachite-oxalate-ral-100g-18003415940_FR.pdf
- [19] : [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(17\)30645-8](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(17)30645-8)
- [20]: Élimination des colorants : procédés de dégradation avancés. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/326731232_Elimination_des_colorants_procedes_de_degradation_avan-ceeds
- [21] Falahati, H & ,Sabbaghi, F. (2019).Preparation and characterization of TiO2/SiO2 nanocomposite for photocatalytic degradation of organic dyes. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* .382,111922 ,<https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.111922>
-

CHAPITRE II



Chpitre02 : Généralité sur l'adsorption et le Charbon actif

IV. L'adsorption

IV.1. Définition de l'adsorption :

L'adsorption est un processus physico-chimique qui consiste à accumuler une substance, connue sous le nom d'adsorbat, à la surface d'une autre substance, connue sous le nom d'adsorbant. Les interactions physiques ou chimiques entre les molécules de l'adsorbat et les sites actifs de la surface de l'adsorbant sont responsables de ce processus (**Figure.2**). La présence d'adsorption joue un rôle crucial dans divers domaines tels que la chimie, la physique, l'ingénierie et la biologie. [1]

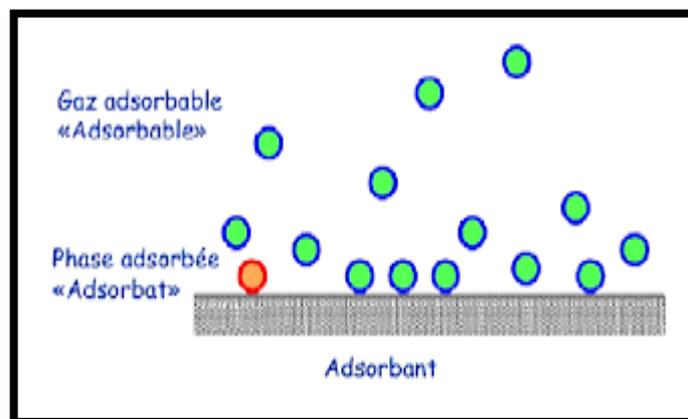


Figure.2 : Représentation de l'adsorption et de l'adsorbat à la surface d'un adsorbant.

IV.2. Les types d'adsorption :

Deux types d'adsorption sont identifiés en fonction des types et de la nature des interactions entre les adsorbats et les adsorbants, ainsi que des forces qui maintiennent les adsorbats sur la surface solide. Ces types d'adsorption sont la physisorption et la chimisorption.

IV.2.1. Adsorption physique (physisorption) :

Les interactions entre l'adsorbat et l'adsorbant dans l'adsorption physique sont causées par des forces intermoléculaires faibles, comme les forces de Van der Waals ou les liaisons hydrogène. En général, ces forces sont réversibles, ce qui facilite la désorption de l'adsorbat de la surface de l'adsorbant en cas de modification des conditions (température, pression). L'adsorption de ce genre est exothermique, c'est-à-dire qu'elle produit de la chaleur. [2] (**Figure 3**).

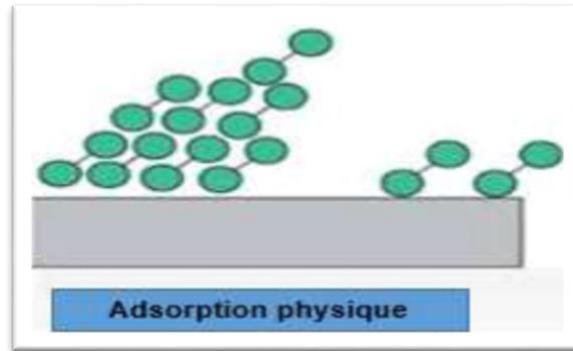


Figure.3 : Schéma de l'adsorption physique.

❖ **Exemples d'adsorption physique :**

- Adsorption de gaz sur du charbon actif.
- Adsorption d'eau sur des argiles. [2]

IV.2.2. Adsorption chimique :

Les liaisons chimiques entre les molécules de l'adsorbant et les sites actifs de la surface de l'adsorbant sont formées lors de l'adsorption chimique. En règle générale, ces liaisons sont supérieures aux forces intermoléculaires de l'adsorption physique, ce qui rend le processus irréversible ou plus difficile à résoudre. Dans certaines situations, l'adsorption chimique est généralement exothermique, mais peut également être endothermique. [3] (**Figure.4**)

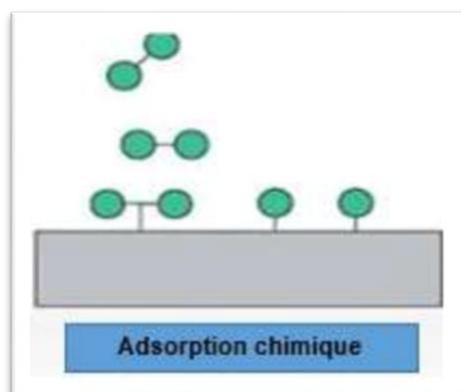


Figure.4 : Schéma de l'adsorption chimique.

❖ **Exemples d'adsorption chimique :**

- Adsorption d'ammoniac sur du platine.
- Adsorption d'oxygène sur des surfaces métalliques. [3]

IV.3. Comparaison entre deux les types d'adsorption :

- On utilise l'adsorption physique pour des applications telles que les déshydratants et la séparation des gaz à basse pression, car elle est un processus faible et réversible qui implique des forces intermoléculaires et la formation de couches multiples.
- La formation d'une monocouche est un processus puissant et irréversible qui implique des liaisons chimiques et une adsorption chimique. On l'emploie dans des domaines tels que la catalyse à haute intensité, le traitement de surface et la chromatographie.

Plusieurs éléments influencent la décision entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique pour une application spécifique, tels que la nature des molécules adsorbées, la surface de l'adsorbant, les conditions de fonctionnement et le résultat désiré. [4]

Tableau. 01: Principales différences entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique [4]

Caractéristique	Adsorption physique (physisorption)	Adsorption chimique (chimisorption)
Forces intermoléculaires	Forces de Van der Waals, forces dipôle-dipôle	Liaisons covalentes, ioniques ou métalliques
Réversibilité	Réversible	Irréversible
Formation de couches	Couches multiples	Monocouche
Changements d'énergie	Exothermique (dégagement de chaleur)	Exothermique (dégagement de chaleur important)

IV.4. Application de l'adsorption :

Le processus d'adsorption consiste à accumuler des molécules (adsorbat) à la surface d'un solide (adsorbant). C'est un phénomène répandu qui a un impact significatif dans différents domaines, tels que :

IV.4.1. Séparation de gaz :

La technique de l'adsorption permet de séparer les gaz en fonction de leur affinité envers des matériaux d'adsorption particuliers. Par exemple, on utilise souvent l'adsorption par la zéolite afin de séparer l'oxygène et l'azote de l'air.

IV.4.2. Purification de l'air :

Des substances adsorbants comme le charbon actif sont employées dans les systèmes de purification de l'air afin de supprimer les polluants atmosphériques tels que les composés.

IV.4.3. Catalyse :

Les catalyseurs sont fréquemment utilisés dans la catalyse hétérogène comme matériaux d'adsorption qui interagissent avec les molécules réactives afin d'accélérer les réactions chimiques. Les catalyseurs d'adsorption sont employés dans divers domaines, comme la fabrication de substances chimiques et la génération d'énergie.

IV.4.4. Stockage d'énergie (gaz) :

Il est possible d'utiliser des matériaux d'adsorption pour conserver l'énergie sous forme de gaz comprimé ou de chaleur. Par exemple, on utilise souvent du charbon actif pour conserver le méthane sous forme de gaz naturel comprimé.

IV.4.5. Séparation de produits chimiques :

Dans les processus de production industrielle, l'adsorption est également employée afin de séparer les produits chimiques, comme la séparation des isomères et l'extraction de composés spécifiques à partir de mélanges complexes.

IV.4.6. Purification de l'eau :

L'adsorption est couramment employée afin de supprimer les substances polluantes présentes dans l'eau potable et industrielle. On utilise des matériaux adsorbants comme le charbon actif afin de capturer et éliminer les polluants organiques, les substances chimiques toxiques, les métaux lourds et d'autres substances préjudiciables de l'eau usée. [5]

Ces illustrations ne représentent qu'une infime partie des multiples utilisations de l'adsorption. Ce processus est très flexible et efficace, ce qui en fait une méthode précieuse dans de nombreux domaines scientifiques et industriels importants.

IV.5. Facteurs influençant le phénomène d'adsorption :

L'adsorption est un processus par lequel des molécules (adsorbat) s'accumulent à la surface d'un solide (adsorbant) qui est influencé par de nombreux facteurs. On peut regrouper ces facteurs en deux catégories principales :

IV.5.1. Facteurs liés à l'adsorbat :

IV.5.1.1. Nature chimique :

L'interaction de l'adsorbat avec l'adsorbant est influencée par sa polarité, sa taille et sa structure. En général, les molécules plus polaires et plus grandes ont une affinité accrue pour les surfaces adsorbants.

IV.5.1.2. Concentration en solution :

La présence d'adsorbat dans la solution a un impact sur la quantité d'adsorbat adsorbée. En général, une concentration plus élevée d'adsorbat entraîne une adsorption accrue.

IV.5.1.3. Température :

En général, une augmentation de la température réduit l'adsorption car elle apporte davantage d'énergie aux molécules d'adsorbat, ce qui les rend moins susceptibles de se fixer à la surface de l'adsorbant. [5]

IV.5.2. Facteurs liés à l'adsorbant :

IV.5.2.1. Surface spécifique :

La capacité d'adsorption est grandement influencée par la surface spécifique, qui correspond à l'aire de surface totale par unité de masse de l'adsorbant. Une surface spécifique plus élevée d'un adsorbant permet d'avoir davantage de sites pour l'adsorption des molécules.

IV.5.2.2. Nature chimique :

L'interaction avec l'adsorbat est influencée par la nature chimique de la surface de l'adsorbant, qui se distingue par sa polarité et ses groupes fonctionnels. L'adsorption est favorisée par des affinités chimiques entre l'adsorbat et l'adsorbant.

IV.5.2.3. Structure poreuse :

Les adsorbants poreux, comme le charbon actif et les zéolithes, ont une structure interne constituée de pores qui facilitent grandement l'adsorption.

IV.5.2.4. Forces intermoléculaires :

L'attraction des molécules d'adsorbat est influencée par les forces intermoléculaires à la surface de l'adsorbant, comme les forces de Van der Waals et les liaisons hydrogène. [5]

Outre ces éléments clés, d'autres facteurs peuvent avoir un impact sur l'adsorption, comme la pression du gaz ou de la solution, le pH de la solution et la présence d'autres substances dans l'environnement.

IV.6. Cinétique de l'adsorption :

IV.6.1. Définition de l'adsorption cinétique :

L'adsorption cinétique est la vitesse à laquelle un fluide, connu sous le nom d'adsorbat, s'accumule à la surface d'un solide, connu sous le nom d'adsorbant. Elle étudie comment la

quantité d'adsorbat adsorbé varie au fil du temps en fonction de différents paramètres tels que la température, la concentration de l'adsorbat, la surface de l'adsorbant et la nature des interactions entre l'adsorbat et l'adsorbant. [6]

IV.6.2. Description des mécanismes d'adsorption :

L'adsorption de molécules de soluté initialement présentes en solution (substrat) sur des adsorbants solides poreux en fonction du temps comprend cinétiquement les étapes importantes suivantes :

- **Transport externe** : Depuis la phase bulk, l'adsorbat se propage vers la surface de l'adsorbant.
- **Transport interne** : En passant par les pores ou sur la surface de l'adsorbant, l'adsorbat se déplace vers les sites d'adsorption.
- **Adsorption** : Les sites d'adsorption sont liés par des forces physiques ou chimiques à l'adsorbat [6] (**Figure.5**)

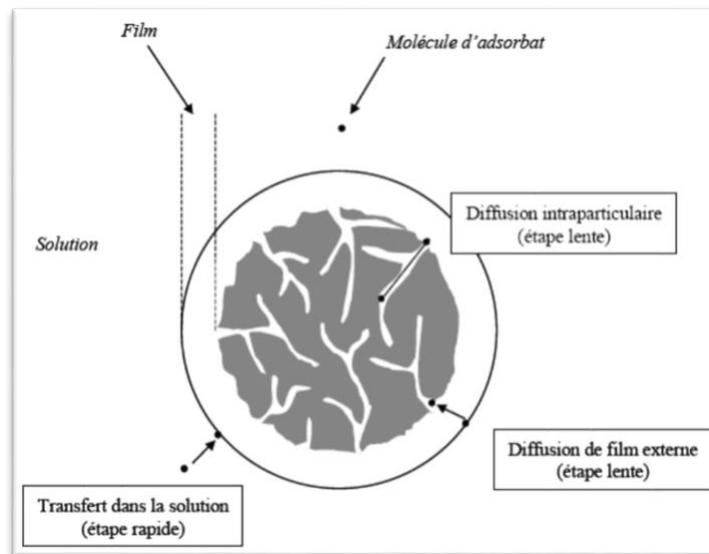


Figure.5: Etapes de transfert de masse pour l'adsorption sur charbon actif.

IV.6.3. Modélisation des cinétiques d'adsorption :

Dans le présent travail, quatre modèles cinétiques ont été sélectionnés pour étudier le comportement cinétique des colorants à la surface des charbons actifs, à savoir le modèle cinétique pseudo premier ordre, le modèle cinétique pseudo-second ordre, le modèle de diffusion intra-particulaire et modèle d'Elovich.

IV.6.3.1. Modèle cinétique du pseudo premier ordre :

Le pseudo-premier ordre cinétique est un modèle mathématique qui permet de décrire la vitesse d'une réaction chimique qui est déterminée par la concentration d'un seul réactif. On l'utilise fréquemment pour représenter les mécanismes d'adsorption, où un polluant est éliminé d'une solution liquide grâce à l'utilisation d'un matériau adsorbant solide. [7] Ce modèle peut être exprimé comme suit :

$$\frac{dq_t}{dt} = K_1(q_e - q_t) \quad (1)$$

Dont la forme linéaire s'écrit :

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \left(\frac{K_1}{2.303}\right)t \quad (2)$$

Avec :

q_t : Quantité adsorbée à l'instant t en mg.g⁻¹ ;

q_e : Quantité adsorbée à l'équilibre en mg.g⁻¹ ;

K₁ : Constante de vitesse de premier ordre (min⁻¹)

IV.6.3.2. Modèle cinétique du pseudo-second ordre :

Le pseudo-second ordre cinétique est un modèle mathématique qui permet de décrire la vitesse d'une réaction chimique en fonction de la concentration de deux réactifs. On l'utilise fréquemment pour représenter les mécanismes d'adsorption, où un polluant est éliminé d'une solution liquide grâce à l'utilisation d'un matériau adsorbant solide. [8]

L'équation du modèle est de la forme :

$$\frac{dq_t}{dt} = K_2(q_e - q_t)^2 \quad (3)$$

L'intégration de l'équation donne :

$$\left(\frac{t}{q_t}\right) = \left(\frac{1}{K_2 q_e^2}\right) + \left(\frac{1}{q_e}\right)t \quad (4)$$

Avec :

q_t et **q_e** (mg.g⁻¹) : Les quantités adsorbées aux temps t et à l'équilibre ;

K_2 (g.mg⁻¹.min⁻¹) : Constantes de vitesse du processus d'adsorption de pseudo premier ordre.

IV.6.3.3. Modèle d'Elovich :

Le modèle d'Elovich est une représentation mathématique de la cinétique d'une réaction chimique sur une surface non homogène. On l'utilise fréquemment pour représenter les mécanismes d'adsorption, où un polluant est éliminé d'une solution liquide grâce à l'utilisation d'un matériau adsorbant solide. [5]

L'équation du modèle est de la forme :

$$q_t = \left(\frac{1}{b}\right)\ln(t + t_0) - \left(\frac{1}{b}\right)\ln t_0 \quad (5)$$

Où

A : La vitesse d'adsorption initiale en (mg.g⁻¹ min), $t_0 = 1$ (a x b) en min et $t \gg t_0$.

B : La constante liée à la surface externe et à l'énergie d'activation de la chimisorption en (g.mg⁻¹).

L'équation peut également s'écrire :

$$q_t = \left(\frac{1}{b}\right)\ln(ab) + \left(\frac{1}{b}\right)\ln t \quad (6)$$

IV.6.3.4. Modèle de la diffusion intra-particule :

Le modèle de Weber et Morris est un modèle basé sur la vitesse de diffusion. On a supposé que si la diffusion intra-particule est engagée dans le processus d'adsorption, alors le tracé d'adsorption en fonction de la racine carrée du temps se traduirait par une relation linéaire. Le modèle peut être représenté par l'équation suivante : [5]

$$q_t = K_d t^{0.5} \quad (7)$$

Avec **q_t (mg g⁻¹)** : La quantité de soluté adsorbé à l'instant t.

K_d : La constante de vitesse de diffusion intra-particulaire.

IV.7. Isotherme d'adsorption :

IV.7.1. Définition de l'Isotherme d'adsorption :

Une isotherme d'adsorption représente visuellement la quantité d'un fluide, connu sous le nom d'adsorbat, adsorbée à la surface d'un solide, connu sous le nom d'adsorbant, en fonction de la pression ou de la concentration de l'adsorbat dans la phase gazeuse ou liquide à une température spécifique. Autrement dit, il s'agit d'une graphique qui établit une corrélation entre la quantité d'adsorbat adsorbé à l'équilibre et sa pression ou sa concentration dans la phase environnante.

Les isothermes d'adsorption sont des instruments indispensables pour analyser l'interaction entre l'adsorbat et l'adsorbant, ainsi que pour étudier les caractéristiques de la surface de l'adsorbant. [9] Elles permettent de :

- Déterminer la capacité d'adsorption de l'adsorbant, c'est-à-dire la quantité maximale d'adsorbat qu'il peut absorber.
- Analyser la forme de la courbe pour déterminer le type d'adsorption (physisorption ou chimisorption).
- Évaluer les caractéristiques thermodynamiques de l'adsorption, comme l'enthalpie et l'entropie d'adsorption.
- Mettre en évidence le comportement de l'adsorption dans diverses conditions [9]

IV.7.2. Classification des isothermes d'adsorption :

Selon l'Union internationale des Chimie pure et appliquée (IUPAC), les isothermes d'adsorption peuvent être classés par Giles [10] en quatre types principales nommées : S (Sigmoïde), L (Langmuir), H (Haute affinité) et C (partition Constante). (Figure.6) illustre la forme de chaque type d'isotherme.

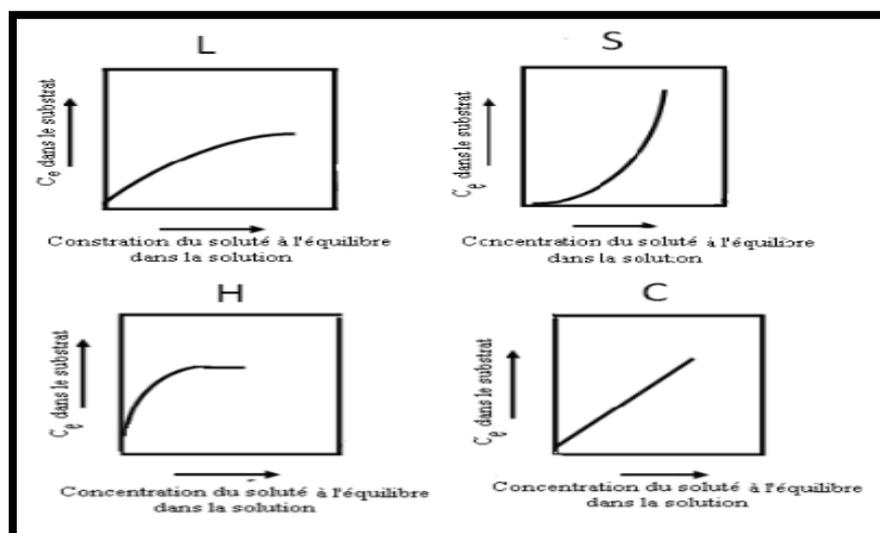


Figure.6 : Les quatre principaux types d'isothermes d'après Giles et coll.

IV.7.2.1. Isotherme de type C :

Les isothermes de classe C se distinguent par une répartition continue des adsorbats pour l'adsorbant jusqu'à un palier. La **Figure 5** présente une courbe linéaire qui traverse l'origine, ce qui indique que le nombre de sites libres reste constant pendant l'adsorption. Cela implique la création de sites lors de l'adsorption. Cela signifie que les isothermes de cette catégorie sont obtenues lorsque les molécules de soluté peuvent modifier la texture du substrat en ouvrant des pores qui n'avaient pas été ouverts auparavant par le solvant. [11]

IV.7.2.2. Isotherme de type L :

Les isothermes de classe L sont généralement associées à des concentrations en solution faibles. Lorsque la concentration augmente, le rapport entre la concentration retenue sur la phase solide et la concentration résiduelle en solution décroît quand la concentration augmente. Ainsi, la forme de l'isotherme est concave, avec une adsorption progressive et régulière, avec une augmentation linéaire de la quantité adsorbée. Selon cette isotherme, on peut observer une adsorption monocouche sur une surface homogène, avec des interactions faibles entre les molécules qui y sont adsorbées. [12]

IV.7.2.3. Isotherme de type H :

L'isotherme H (haute affinité) illustre une interaction intense entre l'adsorbant et l'adsorbant et constitue un cas extrême de type L, où la pente initiale est très élevée. Ce cas a été identifié afin de mettre en évidence les multiples situations où le composé présente une affinité élevée pour la phase solide, ce qui entraîne une pente initiale qui semble infinie, même si une pente réellement infinie est thermodynamiquement impossible. La présente forme d'isotherme indique une adsorption monocouche sur une surface uniforme. [5]

IV.7.2.4. Isotherme de type S :

La sigmoïdalité, ou isotherme de type S, est une adsorption coopérative où l'interaction entre l'adsorbat et l'adsorbat est plus forte que celle entre l'adsorbat et l'adsorbant. La forme sigmoïde de la courbe est marquée par un point d'inflexion qui témoigne de la présence d'au moins deux mécanismes d'adsorption. Il s'agit, par exemple, de l'adsorption de la première couche du soluté, puis de l'adsorption d'une ou plusieurs autres couches. Les molécules adsorbées encouragent l'adsorption future d'autres molécules. [12]

Ces catégories reposent sur des expériences et permettent de décrire le comportement d'adsorption d'un matériau ou d'un système particulier. Il convient de souligner que les

isothermes peuvent prendre différentes formes en fonction de divers facteurs, tels que la nature du matériau adsorbant, la température et la nature des molécules adsorbées.

IV.7.3. Modélisation des isothermes d'adsorption :

La conception des isothermes d'adsorption est une étape essentielle pour comprendre les phénomènes d'adsorption et choisir les matériaux adsorbants les plus efficaces. Cela offre la possibilité de mesurer la corrélation entre la quantité d'adsorbat adhérente à un adsorbant et la concentration d'adsorbat dans la phase fluide à l'équilibre. [13]

IV.7.3.1. Isotherme de Langmuir :

On peut appliquer l'isotherme de Langmuir aux adsorptions homogènes lorsque chaque molécule adsorbée sur la surface présente une énergie d'activation d'adsorption égale. On suppose que le solide possède une capacité d'adsorption restreinte Q_{\max} en raison d'un nombre restreint de sites d'adsorption (couche mono moléculaire). Elle est basée sur les suppositions suivantes. [12,14]

- L'adsorption se produit sur des sites localisés d'énergie égale.
- L'adsorption se produit en monocouche.
- Il n'y a pas d'interaction latérale entre les molécules adsorbées à la surface.
- La réaction est réversible (c'est-à-dire qu'il y a équilibre entre l'adsorption et la désorption).
- Le nombre de sites d'adsorption sur la surface est limité. L'isotherme de Langmuir est représentée par l'équation suivante : [14]

$$q_e = q_m * \left[\frac{K * C_e}{1 + (K * C_e)} \right] \quad (8)$$

Avec

q_e Quantité adsorbée à l'équilibre (mg g^{-1}).

C_e Concentration de l'adsorbat à l'équilibre (mg L^{-1}).

q_m Capacité d'adsorption maximale (mg g^{-1}).

K Constante de Langmuir liée à l'énergie de l'adsorption (L mg^{-1}). [14]

La linéarisation de l'équation du modèle de Langmuir donne :

$$1/q = \left[\left(\frac{1}{q_m} * K \right) * \left(\frac{1}{C_e} \right) \right] + \left(\frac{1}{q_m} \right) \quad (9)$$

En portant $1/q$ en fonction de $1/C_e$ on obtient une droite de pente $(1/q_m * K)$ et d'ordonnée à l'origine : $1/q_m$ ce qui permet de déterminer les deux paramètres caractéristiques de l'équilibre q_m et K . On peut également déduire q_m à partir de la courbe expérimentale représentée par $q=f(C_e)$ qui n'est rien d'autre que l'isotherme d'adsorption. Cependant celle-ci est moins précise que la méthode basée sur la linéarisation.[14] (Figure.7).

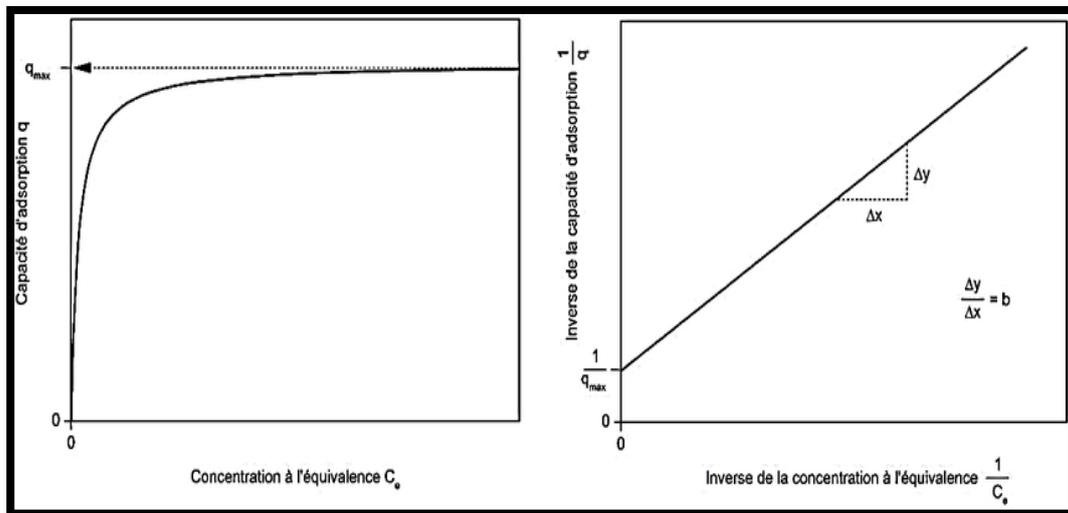


Figure.7: Isotherme d'adsorption ; modèle de Langmuir.

IV.7.3.2. Isotherme de Freundlich :

Un autre modèle a été proposé par l'ingénieur allemand Herbert Freundlich en 1906. L'équation empirique de Freundlich est couramment employée pour décrire l'équilibre d'adsorption dans des systèmes aqueux. Le modèle isotherme est exprimé. Freundlich explique la diversité de la surface et la répartition exponentielle des sites actifs et des énergies de ces sites. Une équation à deux paramètres (K_F et $1/n$) représente ce modèle, qui repose sur la corrélation entre la quantité de composé adsorbé sur la phase solide q_e et la concentration de composé restant en solution C_e [15]. On peut le décrire par l'équation ci-dessous :

$$q_e = K_F * C_e^{1/n} \quad (10)$$

Où :

Quantité adsorbée par gramme du solide (mg g^{-1}).

C_e Concentration de l'adsorbât à l'équilibre d'adsorption (mg L^{-1}).

K_F Constantes de Freundlich caractéristiques de l'efficacité d'un adsorbant.

$1/n$ L'affinité du soluté pour l'adsorbant ; constante se rapportant à l'intensité de l'adsorption en coordonnées logarithmiques ($n < 1$, généralement entre 0,3 et 0,5).

Les deux paramètres de Freundlich K_F et $1/n$ peuvent être déterminés expérimentalement par le passage au logarithmique de l'expression précédente pour donner :

$$\text{Ln } q_e = \text{Ln } K_F + \frac{1}{n} \text{Ln } C_e \quad (11)$$

En traçant $\text{Ln } q_e$ en fonction de $\text{Ln } C_e$, on obtient une droite de pente $1/n$ et d'ordonnée à l'origine $\text{Ln } K_F$. (Figure 8)

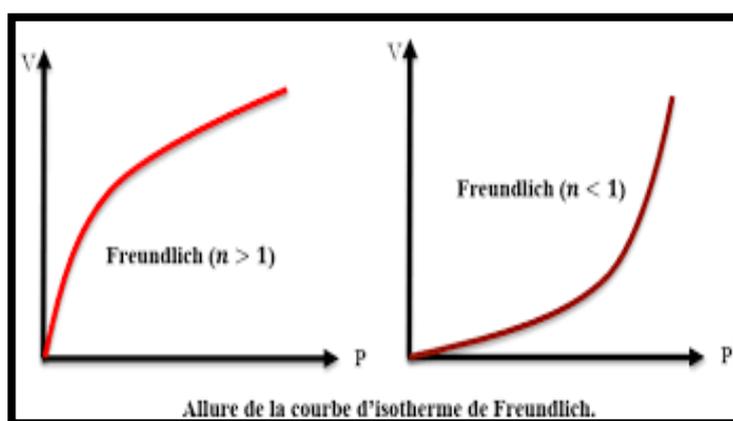


Figure.8 : Isotherme d'adsorption ; modèle de Freundlich. [16]

IV.8. Les adsorbants :

IV.8.1. Définition des adsorbants :

Les adsorbants sont des substances poreuses qui possèdent une surface spécifique importante, ce qui implique qu'elles ont une grande surface disponible pour adhérer aux molécules. Ils sont employés dans de nombreuses utilisations, telles que la purification de l'eau et de l'air, le traitement des eaux usées et la séparation des gaz. [17]

IV.8.2. Les types d'adsorbants :

Il existe de nombreux types d'adsorbants différents, mais certains des plus courants incluent :

IV.8.2.1. Charbon actif :

Le charbon actif est une variété d'adsorbant qui est produite à partir de matériaux tels que le bois, la noix de coco et le charbon. Il possède une surface spécifique extrêmement élevée, ce qui en fait un excellent moyen d'éliminer une grande diversité de polluants de l'air et de l'eau. On retrouve le charbon actif dans différentes applications, telles que les purificateurs d'air, les filtres à eau et les traitements des eaux usées. [18] (Figure 9).



Figure.9 : Charbon actif en poudre.

IV.8.2.2. Gel de silice :

Le gel de silice est une matière poreuse constituée de silicate de sodium. On le retrouve fréquemment en tant que déshydratant, car il a la capacité d'absorber l'humidité de l'air. On retrouve également le gel de silice dans diverses autres utilisations, comme la chromatographie et la purification des médicaments. [19] (Figure 10).



Figure.10 : Gel de silice

IV.8.2.3. Alumine activée :

L'alumine activée est un oxyde d'aluminium à surface spécifique élevée. On l'emploie fréquemment en tant que catalyseur, car il a la capacité d'accélérer les réactions chimiques. On

utilise également l'alumine activée dans diverses autres applications, comme la purification de l'eau et le traitement des gaz d'échappement. [20] (Figure 11).



Figure.11 : Alumine activée

IV.8.2.4. les zéolites :

Ce sont des cristaux microscopiques principalement composés de silicium et d'aluminium ($AlO_2M, nSiO_2$), dont la caractéristique majeure est leur grande porosité. Ils sont constitués de cavités et de pores dont la forme leur permet de reconnaître des espèces qui n'ont qu'un dixième de nanomètre de différence au niveau moléculaire, et d'autoriser ou de refuser leur passage. Ils sont sous forme de poudre, granulés ou extrudés. [20] (Figure 12).



Figure.12 : Zéolite (tamis moléculaire).

IV.9. Le charbon actif

IV.9.1. Définition de charbon actif :

Dernièrement, la fabrication d'adsorbants a connu une augmentation suite à l'augmentation de leur utilisation dans les secteurs industriels, en particulier dans les installations de traitement des eaux usées ou polluées. Tous les solides sont en théorie des adsorbants. Les zéolithes, les

gels de silice, les alumines activées et le charbon actif sont parmi les adsorbants les plus couramment employés. Afin de mieux appréhender la portée de la section de ce chapitre, il est essentiel de commencer par donner une définition précise du charbon actif.[21]

Le charbon actif est un matériau poreux principalement composé de matière carbonée. On le fabrique à partir de matières premières organiques comme le bois, les résidus agricoles et les déchets alimentaires, par une méthode dite de pyrolyse. La pyrolyse implique la combustion de la matière première sans oxygène, ce qui entraîne la transformation de la matière organique en charbon et la libération de gaz volatils.

La particularité du charbon actif réside dans sa surface spécifique élevée et sa structure poreuse complexe. C'est grâce à ces caractéristiques qu'il peut adsorber une grande diversité de molécules.[22]

L'adsorption sur le charbon actif est actuellement une méthode employée dans de nombreux domaines tels que la chimie fine, l'environnement, y compris le traitement des effluents.

IV.9.2. Applications du charbon actif :

Le charbon actif, grâce à ses caractéristiques d'adsorption remarquables, est utilisé dans divers secteurs, tels que la purification de l'eau et de l'air, l'agriculture et la médecine. Explorons quelques exemples pratiques :

IV.9.2.1. Purification de l'eau et de l'air :

- **Traitement des eaux usées :** Dans les stations d'épuration, le charbon actif est employé afin de supprimer les polluants organiques et inorganiques des eaux usées, ce qui contribue à préserver l'environnement. [23]
- **Purification de l'air :** Les filtres à charbon actif sont employés dans les foyers, les entreprises et les établissements industriels afin de capter les polluants atmosphériques tels que les gaz à effet de serre, la fine poussière et les gaz d'échappement, ce qui contribue à améliorer la qualité de l'air. [24]

IV.9.2.2. Agriculture:

- **Amélioration de la fertilité du sol :** Au sol, l'ajout de charbon actif accroît sa capacité à retenir de l'eau et des nutriments, ce qui favorise la croissance des plantes et diminue le besoin d'engrais chimiques. [25]

IV.9.2.3. Conditionnement du sol : Les racines des plantes bénéficient de l'amélioration de la structure du sol grâce au charbon actif, ce qui favorise son aération et son drainage. [26]

IV.9.2.4. Industrie:

- **Récupération des solvants** : Les solvants utilisés dans les processus industriels peuvent être récupérés grâce au charbon actif, ce qui permet de diminuer les déchets et les émissions nocives. [27]
- **Traitement des produits chimiques** : L'utilisation du charbon actif permet de purifier les produits chimiques et les catalyseurs, en éliminant les impuretés et en améliorant leur qualité.

IV.9.3. Types de charbon actif :

Il existe plusieurs types de charbon actif, chacun avec ses propres propriétés et ses propres applications. Les trois principaux types sont :

IV.9.3.1. Charbon actif en poudre (CAP) : Le CAP est la forme la plus fine et la plus étendue de charbon actif. Ainsi, il offre une grande efficacité dans l'adsorption des impuretés, mais il est également plus complexe à filtrer et peut s'encrasser plus rapidement. L'utilisation du CAP est fréquente dans les domaines où la vitesse d'adsorption est cruciale, tels que le traitement de l'eau et de l'air. [28] **(Figure 13)**



Figure.13 : Charbon actif en poudre (CAP).

IV.9.3.2. Charbon actif granulaire (CAG) : Le CAG est composé de particules plus grandes de charbon actif que le CAP. Il facilite le filtrage et a moins de chances de s'encrasser, mais il présente également une surface plus réduite. Le CAG est fréquemment employé dans les domaines où il est indispensable d'avoir un contact prolongé avec le charbon actif, tels que les filtres à eau et les purificateurs d'air. [29] **(Figure14)**



Figure.14 : Charbon actif en grains (CAG)

IV.9.3.3. Charbon actif extrudé (CAE) : Le CAP est comprimé en pastilles ou en cylindres pour produire l'CAE. En raison de sa densité supérieure à celle du CAP ou du CAG, il peut être employé dans des applications où l'espace est restreint. Le CAE présente également une grande résistance à l'attrition, ce qui en fait un choix parfait pour les applications où le charbon actif est soumis à un flux considérable. [30] (**Figure 15**)



Figure.15 : Charbon actif extrudé (CAE)

En plus de ces trois types principaux, il existe également plusieurs autres types de charbon actif spécialisés, tels que :

- **Charbon actif lavé à l'acide :** Un acide est utilisé pour traiter le charbon actif lavé à l'acide afin de supprimer les impuretés minérales. Ceci en fait un choix parfait pour les applications nécessitant une grande pureté, telles que la fabrication de produits pharmaceutiques et alimentaires. [31]
- **Charbon actif imprégné :** Le charbon actif imprégné est soumis à un traitement chimique afin de lui donner des caractéristiques particulières. Par exemple, il est possible d'incorporer des métaux précieux dans le charbon actif afin d'améliorer sa

capacité à absorber certains polluants. [32]. Plusieurs éléments influencent le choix du type de charbon actif le plus approprié pour une application spécifique, tels que la nature des impuretés à éliminer, le débit de la procédure et l'espace disponible. Il est primordial de solliciter l'avis d'un expert en charbon actif afin de sélectionner le type de charbon approprié à vos besoins. [33]

IV.9.4. Préparation et propriétés du charbon actif :

IV.9.4.1. Fabrication du charbon actif :

La préparation du charbon actif implique deux étapes principales :

IV.9.4.1.1. Carbonisation :

D'abord, on chauffe la matière première à une température élevée sans oxygène. C'est alors que le matériau se décompose et qu'il se forme un charbon riche en carbone. La température de carbonisation et le temps nécessaire pour le processus diffèrent selon la matière première employée. [34]

IV.9.4.1.2. Activation :

La vapeur d'eau, le gaz carbonique ou l'acide phosphorique sont ensuite utilisés pour activer le charbon, ce qui entraîne la formation de pores microscopiques dans le charbon, ce qui augmente considérablement sa surface spécifique. [35]

Le type de matière première, la température et la durée de la carbonisation, ainsi que le type d'agent activateur utilisé, influencent les propriétés du charbon actif final, telles que la surface spécifique, la taille des pores et la capacité d'adsorption.

Il existe deux types d'activation :

- **Activation physique :** Après la pyrolyse, cette méthode emploie des agents gazeux tels que la vapeur d'eau afin de générer des pores supplémentaires dans le charbon actif. Elle favorise une augmentation de la surface spécifique et une amélioration de la capacité d'adsorption. [36]
- **Activation chimique :** La pyrolyse modifie la structure chimique du charbon actif en utilisant des produits chimiques tels que l'hydroxyde de potassium. Grâce à elle, il est possible de former des groupes fonctionnels à la surface du charbon actif, ce qui le rend plus sensible à certaines molécules spécifiques. [37]

IV.9.4.2. Propriétés du charbon actif :

Le charbon actif a plusieurs propriétés importantes qui le rendent utile dans une variété d'applications :

- **Grande surface spécifique** : La surface interne du charbon actif est extrêmement vaste, pouvant atteindre 3000 m²/g. La surface élevée permet d'adsorber une quantité considérable de molécules. [37]
- **Adsorption** : Le charbon actif a la capacité d'adsorber diverses molécules, telles que les gaz, les liquides et les solides. La surface du charbon actif attire les molécules grâce à des forces intermoléculaires. [38]
- **Filtration** : Le charbon actif peut servir à éliminer les impuretés présentes dans les liquides et les gaz. L'adsorption des impuretés sur le charbon actif entraîne l'écoulement du liquide ou du gaz purifié. [39]
- **Catalyse** : Le charbon actif peut servir à éliminer les impuretés présentes dans les liquides et les gaz. L'adsorption des impuretés sur le charbon actif entraîne l'écoulement du liquide ou du gaz purifié. [37]

IV.9.5. Charbon actif à partir de la biomasse de luffa :

IV.9.5.1. Définition de luffa :

La luffa, ou éponge végétale, est un fruit fibreux d'une plante grimpante de la famille des cucurbitacées. Après avoir mûri et séché, la luffa se transforme en une éponge naturelle légère et poreuse, fréquemment employée pour le nettoyage et l'exfoliation. [40] (Figure.16)



Figure.16 : La courge éponge ou luffa

IV.9.5.2. Définition de charbon à partir de luffa :

Le charbon actif à base de biomasse de luffa est une substance poreuse issue des fibres végétales du luffa. En le carbonisant et en l'activant, on donne naissance à un charbon actif avec des propriétés intéressantes pour de nombreuses applications. [41]

IV.9.5.3. Processus de production :

La fabrication du charbon actif de luffa implique plusieurs étapes clés :

- 1) **Prétraitement** : On nettoie et on broie les résidus de luffa en petits morceaux afin d'augmenter la surface accessible lors des étapes suivantes.
- 2) **Carbonisation** : On chauffe les morceaux de luffa à une température élevée (environ 400-700°C) sans oxygène, ce qui donne naissance au charbon, un matériau à forte teneur en carbone. Les caractéristiques du charbon actif final sont influencées par la température et la durée de la carbonisation.
- 3) **Activation** : Un agent activateur, tel que la vapeur d'eau, le gaz carbonique ou l'acide phosphorique, est utilisé pour traiter le charbon de luffa. Dans le charbon, cette méthode génère des pores, ce qui accroît considérablement sa surface spécifique et sa capacité d'adsorption. Les caractéristiques du charbon actif final sont également influencées par les conditions d'activation, comme la température, la pression et la durée du traitement. [41]

IV.9.5.4. Propriétés du charbon actif de luffa :

- **Grande surface spécifique** : Jusqu'à 1500 m²/g, permettant une grande capacité d'adsorption.
- **Porosité développée** : Structure poreuse avec des pores de différentes tailles, adsorbant une large gamme de molécules.
- **Faible coût de production** : La luffa est une biomasse abondante et peu coûteuse, faisant du charbon actif de luffa une alternative économique. [42]

IV.9.5.5. Applications du charbon actif de luffa :

- **Traitement de l'eau** : Élimination des impuretés (produits chimiques organiques, métaux lourds, odeurs).
- **Traitement de l'air** : Élimination des polluants (COV, odeurs, gaz nocifs).

- **Agriculture** : Amendement pour améliorer la qualité du sol et la croissance des plantes.
- **Industrie pharmaceutique** : des procédés de purification des médicaments et élimination des impuretés. [43]

IV.9.5.6. Avantages et Inconvénients du charbon actif de luffa :

IV.9.5.6.1. Les avantages :

- **Utilisation de ressources renouvelables** : Le luffa est une plante grimpante qui se développe rapidement et abondamment, ce qui en fait une source de matière première durable et respectueuse de l'environnement.
- **Faible coût de production** : Le traitement du luffa en charbon actif est relativement simple et peu coûteux, ce qui le rend accessible à un large éventail d'utilisations.
- **Grande surface spécifique** : Le charbon actif de luffa possède une surface spécifique élevée, pouvant atteindre jusqu'à 1500 m²/g, ce qui lui confère une grande capacité d'adsorption des polluants et des impuretés.
- **Porosité développée** : La structure poreuse du charbon actif de luffa présente des pores de différentes tailles, lui permettant d'adsorber une large gamme de molécules, des petits polluants organiques volatils (COV) aux macromolécules.
- **Propriétés de surface** : Le charbon actif de luffa présente des propriétés de surface intéressantes, telles que la basicité et l'hydrophobicité, qui peuvent être optimisées pour des applications spécifiques.
- **Biocompatibilité** : Le charbon actif de luffa est généralement considéré comme biocompatible, ce qui le rend potentiellement intéressant pour des applications biomédicales. [44]

IV.9.5.6.2. Les inconvénients:

- **Variabilité des propriétés** : Les propriétés du charbon actif de luffa peuvent varier en fonction de la source de luffa, des conditions de culture et du processus de production. Cela peut nécessiter un contrôle qualité strict pour garantir des performances constantes.
- **Sensibilité à l'humidité** : Le charbon actif de luffa peut perdre une partie de son efficacité adsorbante s'il est exposé à une humidité élevée. Il est donc important de le stocker et de l'utiliser dans des conditions sèches.

- **Régénération limitée :** Le charbon actif de luffa ne peut être régénéré qu'un nombre limité de fois avant de perdre son efficacité. Il est donc important de prévoir son remplacement périodique.
- **Développement récent :** Le charbon actif de luffa est un matériau relativement nouveau et son développement n'est pas encore aussi avancé que celui des charbons actifs traditionnels. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour optimiser ses propriétés et ses applications. [40]

IV.9.6. Caractérisation du charbon actif :

IV.9.6.1. Caractérisation physico-chimiques :

IV.9.6.1.1. pH de point de charge nulle (pH_{pzc}) :

L'un des paramètres essentiels pour les adsorbants et les phénomènes d'adsorption est le pH du point de charge nulle ou zéro (pH_{pzc}), en particulier lorsque des forces électrostatiques sont impliquées dans les mécanismes réactionnels, comme c'est le cas avec les charbons actifs. La neutralité électrique de la surface de l'adsorbant est indiquée par le pH du point de charge zéro ou nulle (pH_{pzc}), qui correspond à la valeur de pH où la charge nette de la surface du charbon actif est nulle. La méthode employée est basée sur les recherches de Lopez-Ramon et al. Cela permet d'identifier si un charbon actif est plutôt acide ou basique et de calculer sa charge de surface nette en fonction du pH de la solution. [45]

Cette méthode consiste à placer 50 cm³ de solution de NaCl 0,01 M en flacons fermés, suivie de l'ajustement du pH de chaque solution (l'intervalle de pH varie de 2 à 12) en ajoutant une solution de NaOH (0,1 M) ou HCl (0,1 M) selon le cas. Ensuite, 0,15 g d'échantillon de charbon actif à caractériser sont ajoutés à chaque flacon. Les suspensions doivent être agitées et maintenues à température ambiante pendant 48 heures, et une nouvelle mesure du pH (pH_{final}) est effectuée. Le pH_{pzc} (pH ou point charge nulle) est déterminé par le point où la courbe pH_{final} en fonction du $\text{pH}_{\text{initial}}$ intercepte la ligne droite de $\text{pH}_{\text{final}} = \text{pH}_{\text{initial}}$. [46]

IV.9.6.1.2. Rendement d'activation R (%) :

Le rendement d'activation (R %) du charbon actif est un élément clé qui détermine sa capacité d'adsorption, c'est-à-dire sa capacité à fixer des molécules à sa surface. La surface du charbon actif est plus développée et poreuse à mesure que le taux d'activation augmente, ce qui lui permet d'adsorber plus de molécules. [47]

Le rendement d'activation R (%) est calculé selon l'équation suivant :

$$R (\%) = (m_i - m_f) \times 100 \quad (12)$$

Avec :

m_i : masse de l'échantillon avant activation (g) ;

m_f : masse de l'échantillon après activation(g) ;

R : Rendement d'activation (%)

Le terme "burn-off" désigne le pourcentage de perte de poids résultant du processus de thermoactivation, comme exprimé dans l'équation : [48]

$$\text{Burn-off} = 100 - R\% \quad (13)$$

IV.9.6.2. Caractérisation structurale :

IV.9.6.2.1. Caractérisation par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) :

La technique de spectroscopie infrarouge (IR) est largement employée afin de repérer les espèces présentes à la surface des matériaux solides. Le domaine infrarouge moyen ($4000 > \nu > 200 \text{ cm}^{-1}$) est le domaine d'énergie vibrationnelle des molécules, qui dépend de diverses propriétés moléculaires telles que la symétrie de la molécule, les constantes de force interatomiques, le moment d'inertie autour de certains axes, etc. [49] .L'étude infrarouge a été réalisée à l'aide d'un spectromètre FTIR Cary 630 avec une plage de fréquences allant de 400 à 4000 cm^{-1} . (Figure.17)



Figure.17 : spectrophotomètre infrarouge (IRTF)

IV.9.6.2.2. Diffraction du rayon X (DRX) :

Aujourd'hui, la diffraction des rayons X est largement utilisée pour étudier les matériaux cristallisés, ce qui en fait un moyen efficace d'identifier leur nature et leur structure en raison de l'organisation de leurs atomes selon des plans cristallins particuliers. Il s'agit d'une analyse

non destructive qui repose sur la diffusion réciproque des rayons X par les couches électroniques. [50]

La méthode repose sur l'application d'un rayonnement monochromatique de longueur d'onde de 0,1 à 10 nm sur l'échantillon à analyser, ce qui entraîne l'excitation des atomes qui émettent à leur tour des radiations dans toutes les directions.

Cela entraîne l'émergence de raies dans un diffractogramme qui illustre l'intensité en fonction de l'angle de diffraction θ . La distance réticulaire d_{hkl} donnée par la loi de Bragg représentée par l'équation correspond à chaque angle de diffraction. [51]

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (14)$$

Avec :

λ : La longueur d'onde du faisceau incident ($\lambda = 1.54181 \text{ \AA}$)

d : La distance interréticulaire entre les plans diffractant.

θ : L'angle entre le faisceau incident et les plans diffractant.

Le domaine de l'angle (2θ) est compris entre 10 et 80.

IV.9.6.3. Caractérisation thermique :

IV.9.6.3.1. Analyse Thermogravimétrique (ATG) :

La technique de l'analyse thermogravimétrique (ATG) est fréquemment employée afin de définir les caractéristiques thermiques du charbon actif. Grâce à elle, il est possible de mesurer la fluctuation de la masse d'un échantillon en fonction de la température et du temps, dans un environnement chauffé (**figure.18**). Les données tirées d'une ATG du charbon actif peuvent s'avérer utiles pour appréhender son comportement dans différentes applications, comme :

- **Adsorption et catalyse** : La décomposition thermique des groupes fonctionnels à la surface du charbon actif peut être étudiée par l'ATG, ce qui peut avoir un impact sur sa capacité d'adsorption et son activité catalytique.
- **Stabilité thermique** : La stabilité thermique du charbon actif peut être évaluée à l'aide de l'ATG, ce qui revêt une importance cruciale pour son utilisation dans des environnements hyperthermiques.
- **Combustion** : La vitesse et le mécanisme de combustion du charbon actif peuvent être données par l'ATG, ce qui peut être bénéfique pour son utilisation en tant que combustible ou dans des applications de traitement des gaz. [52]



Figure.18 : Analyse Thermogravimétrique (ATG)

IV.9.6.4. Caractérisations texturales :

IV.9.6.4.1. L'indice de bleu de méthylène :

Il s'agit de l'indice de bleu de méthylène (IBM), qui évalue la surface spécifique et la capacité d'adsorption d'un charbon actif. Le bleu de méthylène, un colorant cationique, est la quantité de

bleu de méthylène que 1 gramme de charbon actif peut absorber. On peut mesurer l'IBM en utilisant des milligrammes de bleu de méthylène par gramme de charbon actif. [53]

- **Détermination de l'indice de bleu de méthylène :**

La méthode standard pour déterminer l'IBM est décrite dans la norme ASTM D1618. Elle implique les étapes suivantes :

- 1) **Préparation d'une solution de bleu de méthylène :** Une solution aqueuse de bleu de méthylène de concentration connue est préparée.
- 2) **Mise en contact du charbon actif avec la solution :** Le charbon actif est mis en contact avec la solution de bleu de méthylène pendant une durée et à une température spécifique.
- 3) **Filtration et analyse de la solution :** La solution est filtrée pour séparer le charbon actif. La concentration de bleu de méthylène restante dans la solution est mesurée par spectrophotométrie.
- 4) **Calcul de l'indice de bleu de méthylène :**

L'IBM est calculé en utilisant la formule suivante :

$$\text{IBM} = (C_0 - C_f) * V / m \quad (15)$$

où :

IBM est l'indice de bleu de méthylène (mg/g)

C₀ est la concentration initiale de bleu de méthylène (mg/L)

C_f est la concentration finale de bleu de méthylène (mg/L)

V est le volume de la solution de bleu de méthylène (L)

m est la masse de charbon actif (g). [54]

IV.9.6.4.2. L'indice d'iode :

La mesure de la porosité et de la surface spécifique d'un charbon actif est l'indice d'iode (II). Il indique le nombre de milligrammes d'iode que 1 gramme de charbon actif peut absorber à partir d'une solution aqueuse standard. En règle générale, l'indice d'iode varie de 500 à 2000 mg/g pour les charbons actifs granulaires. [55]

Détermination de l'indice d'iode

La méthode standard pour déterminer l'indice d'iode est décrite dans la norme ASTM D4607. Elle implique les étapes suivantes :

- 1) **Préparation d'une solution d'iode :** une solution aqueuse d'iode et d'iodure de potassium de concentration connue est préparée.
- 2) **Mise en contact du charbon actif avec la solution :** le charbon actif est mis en contact avec la solution d'iode pendant une durée et à une température spécifiques.
- 3) **Titration d'iode non adsorbé :** l'iode non adsorbé restant dans la solution est titré avec une solution de thiosulfate de sodium.
- 4) **Calcul de l'indice d'iode :**

L'II est calculé en utilisant la formule suivante :

$$II = (C_0 - C_f) * V / m \quad (16)$$

Où :

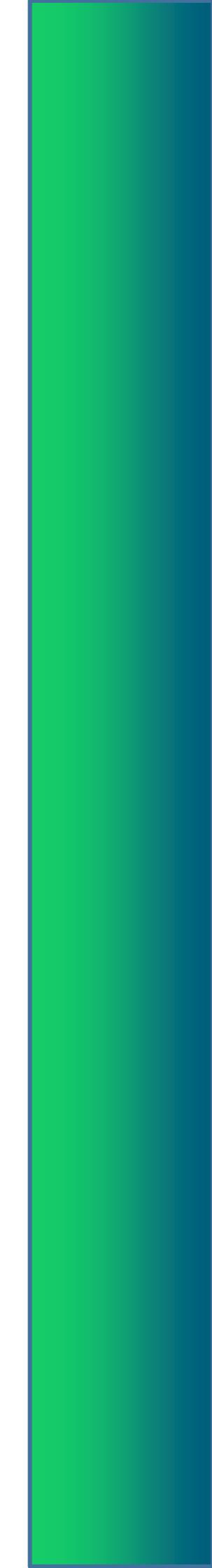
- **II** est l'indice d'iode (mg/g)
- **C₀** est la concentration initiale d'iode (mg/L)
- **C_f** est la concentration finale d'iode (mg/L)
- **V** est le volume de la solution d'iode (L)
- **m** est la masse de charbon actif (g) [55]

Les références :

- [1] : Samet, S., Sid Ahmed, N., & Chayeb, Y. (2019). Elimination d'un colorant cationique (le rouge GRL 180) dans une solution aqueuse par adsorption sur lichen modifier : *pseudevriniafuracea* (L)
- [2] : Ouakouak, A. (2017). *Elimination du cuivre, des nitrates et des phosphates des eaux par adsorption sur différents matériaux* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [3] : NEBBER, R., & LAFER, D. (2018). L'obtention du charbon actif à partir des déchets agroalimentaires (noyaux d'olive).
- [4] : Motreff-Zeisser, A. (2010). *Modification de surfaces de téflon et de SiO₂ par adsorption de complexes de cuivre (II)-carboxylates perfluorés* (Doctoral dissertation, Bordeaux 1).
- [5] : Abdelbaki, R., & Duclaux, L. (2017). Etude de l'adsorption de colorants organiques (rouge nylosan et bleu de méthylène) sur des charbons actifs préparés à partir du marc de café.
- [6] : Badaoui, H., Slimani, A., & MANA, S. (2022). *Contribution à l'utilisation de la Luffa Cylindrica dans la rétention de l'Oxytétracycline* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR).
- [7] : Brahim, D. A. M. I. Y. I. N. E. (2021). Valorisation de ressources naturelles (Argile marocaine) dans l'adsorption du colorant cationique: Modélisation et optimisation.
- [8] : ALI MOHRI, A., ALI MOHRI, A., & OUAZINE, L. (2023). *Effet de l'activation d'une argile par différentes solutions aqueuses sur la capacité d'adsorption des polluants organiques* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR).
- [9] : Dundar, E. (2014). *Modélisation par la théorie du potentiel des processus d'adsorption dans les matériaux microporeux* (Doctoral dissertation, Université du Québec à Trois-Rivières).
- [10] : Cardenas, C. (2021). *Analyse et modélisation du comportement des caissons d'épuration de l'air équipant les engins de chantier pour la protection des opérateurs contre les gaz et vapeurs* (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).
- [11] : Denden, R., & Chibani, A. (2021). Étude de l'adsorption du colorant azoïque Noir Eriochrom.eT par charbon actif. *Mémoire de Master, Université de Mostaganem, Algérie*
- [12] : C. H. Giles (1974). "The Classification of Isotherms for the Adsorption of Gases and Vapors on Solid Surfaces"
- [13] : Delgado Cano, B. (2017). Caractérisation des matériaux commerciaux et synthétisés destinés à adsorber le méthane et l'oxyde nitreux présents dans des émissions gazeuses et modélisation de l'adsorption.
- [14] : M. A. Habib et al. (2016). "Modeling adsorption of methane, ethane, and carbon dioxide on graphene surface: A comparative study of isotherm models"
- [15] : Rouquerol, J., Rouquerol, F., & Llewellyn, P. (2012). Adsorption and porosity. Elsevier Science
- [16] : Schaefer, J. (2010). Adsorption by porous solids. Springer Science & Business Media
- [17] : Mouna, C. H. E. R. I. F. I. (2018). Matériaux pour le traitement des eaux.
- [18] : Bechki, M. K. (2018). *Préparation et caractérisation du charbon actif à partir des noyaux du palmier dattier et des coquilles des noix* (Doctoral dissertation, Université Kasdi Merbah Ouargla).
- [19] : Benbettaieb N. (2022). Emballages actifs et intelligents. *Matériaux et procédés d'emballage pour les industries alimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques*, 209.
- [20] : HIRI, A., LITIM, K., & RADJI, G. (2019). *Elaboration, caractérisation et application des hydroxydes doubles lamellaires dans la dégradation du phénol* (Doctoral dissertation, Université Ahmed Draïa-Adrar).
- [21] : Crini, G., Montiel, A. J., & Badot, P. M. (2007). *Traitement et épuration des eaux industrielles polluées: Procédés membranaires, bioadsorption et oxydation chimique*. Presses Univ. Franche-Comté
-

- [22] : BOUAIK, H. (2019). contribution à la valorisation des algues rouges marocaines par le procédé de pyrolyse: production des biocarburants et des charbons actifs
- [23] : Courtemanche, M. (1998). *Traitement des eaux usées d'une usine de pâtes et papiers par le procédé de biofiltration ACTICONACT*. Université de Sherbrooke
- [24] : Reznicek, J. (2021). Développement d'une stratégie de compensation des émissions carbone de l'EPFL.
- [25] : Nesrine, M. (2021). L'effet du Compost et Biochar à base des palmes sur les paramètres du melon (*Cucumis melo*. L) dans une zone aride (Algérie).
- [26] : Manirakiza, E. (2021). Application combinée du biochar de pin et des biosolides mixtes de papetières: une option pour améliorer leur efficacité agronomique (Doctoral dissertation, Université Laval).
- [27] : Boukheris, T., Milti, A., & Sfaksi, Z. E. (2020). *Comparaison entre charbon actif et charbon (Étude théorique)* (Doctoral dissertation, Université de Jijel).
- [28] : Ayril, A., Hulea, V., Joulin, J. P., & Julbe, A. (2014). *Céramiques pour l'environnement: filtres, membranes, adsorbants et catalyseurs*. Editions TI.
- [29] : Huang et al. (2016) "A Review of Granular Activated Carbon Adsorption for Water Treatment".
- [30] : Yang et al. (2019) "Activated Carbon Extrusion: A Review".
- [31] : Pereira, F. (2003). *Production d'acide phosphorique par attaque chlorhydrique de minerais phosphatés avec réduction des nuisances environnementales et récupération des terres rares en tant que sous-produits* (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne).
- [32] : Ayril, C. (2009). *Elimination de polluants aromatiques par oxydation catalytique sur charbon actif* (Doctoral dissertation).
- [33] : Tegani, I. (2016). *Optimisation et contrôle d'un micro smart grid utilisant une pile à combustible, des supercondensateurs, des batteries, une éolienne et une source photovoltaïque* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [34] : Antonini, G., & Hazi, M. (2004). Pyrolyse-Gazéification de déchets solides. *Etude ADEMEPROCEDIS*. Juin.
- [35] : Goutas, W., Hammoud, A., & Djamaa, N. E. (2015). *Préparation et caractérisation d'un charbon actif à partir du bois* (Doctoral dissertation, Université de Jijel).
- [36] : Mhemed, H. A. (2021). Valorisation énergétique et environnementale des déchets de pneus usagés: amélioration des produits liquides de pyrolyse par catalyse (Doctoral dissertation, Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique; École nationale d'ingénieurs de Gabès (Tunisie)).
- [37] : Abdelbaki, R., & Duclaux, L. (2017). Etude de l'adsorption de colorants organiques (rouge nylosan et bleu de méthylène) sur des charbons actifs préparés à partir du marc de café.
- [38] : BOUDIA, R. (2021). *Etude comparative de l'élimination de colorants textiles par deux adsorbants: naturel et activé* (Doctoral dissertation).
- [39] : BOUTADARA, K., BEN ALI, L., & KALLOUM, S. (2017). *Valorisation des déchets ligno-cellulosiques, issus du palmier dattier, en charbon actif* (Doctoral dissertation, Université Ahmed Draia-ADRAR).
- [40] : Gonçalves et al. (2016) "Luffa cylindrica: A Potential Source of Bioactive Compounds" .
- [41] : Gupta et al. (2018) "Production and characterization of activated carbon from Luffa cylindrica for water treatment".
- [42] : Sousa et al. (2017) "Preparation and evaluation of activated carbon from Luffa cylindrica fibers for the adsorption of methylene blue"
- [43] : Gupta et al. (2020) "Applications of Luffa-Derived Activated Carbon for Water and Wastewater Treatment: A Review"
- [44] : Gary S.posito (2009) Adsorption and Desorption Processes in Environmental Protection".
-

- [45] : Ariche, N., Zazoua, D., & Bouremmad, F. E. (2016). *Valorisation de deux matériaux pour l'adsorption et la catalyse* (Doctoral dissertation, Université de Jijel).
- [46] : Tchakala, I., et al , 2019, Élimination des ions Fe(II) en solution aqueuse par adsorption sur la poudre d'écorces d'eucalyptus, *Algerian Journal of Separation and Purification*
- [47] : NEBBER, R., & LAFER, D. (2018). L'obtention du charbon actif à partir des déchets agroalimentaires (noyaux d'olive).
- [48] : Chuansheng Wang et al. (2017) "Effect of Pyrolysis Temperature on the Porosity and Surface Properties of Biochar Derived from Palm Kernel Shell" .
- [49] : Boulesbaa, M. (2008). *Contribution à l'étude par spectroscopie infrarouge des propriétés des films de SiOxNy* (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [50] : MEBAK, M. (2016). *Synthèse, caractérisation et modélisation des propriétés physico-chimiques de l'oxyde de magnésium MgO* (Doctoral dissertation, université ibn khaldoun-tiaret).
- [51] : LASGAA, B. N. (2021). Cours de Méthodes Physico-Chimiques d'Analyse.
- [52] : Lakhdar, Y. (2016). *Etude de la Stabilité et de la Dégradation de Polymères et Mélanges de Polymères à Base de Styrène* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [53] : Kouadio, D. L., Diarra, M., Djassou, A. C., Dibi, B., Dongui, B. K., Mamadou, K., & Traore, K. S. (2022). Etude expérimentale de l'adsorption du bleu 16 et du méthyle rouge sur du charbon issu de la coque de la cabosse de cacao. *Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie*, 51.
- [54] : Nko'o Abuiboto, M. C., Avom, J., & Mpon, R. (2016). Évaluation des propriétés de charbons actifs de résidus de Moabi (*Baillonella toxisperma* Pierre) par adsorption d'iode en solution aqueuse. *Revue des sciences de l'eau*, 29(1), 51-60.
- [55] : le Jury, D. (2018). *Mlle BAHNES Zohra Activation des noyaux de jujube pour l'obtention d'un charbon actif* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS MOSTAGANEM)
-

A vertical bar on the left side of the page with a gradient from green at the top to blue at the bottom.

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE III



Chapitre 03 : Le Charbon actif

V. La Préparation de l'adsorbant :

L'objectif de cette étape est d'obtenir du charbon actif à partir de la matière de "Luffa" pour d'obtenir un produit applicable dans le traitement des eaux et notamment pour la décoloration des effluents utilisés dans l'industrie.

Pour cela nous avons suivi les étapes d'un traitement complet qui comporte un traitement physicochimique :

- Lavage à l'eau de Javel.
- Lavage avec une solution de la soude NaOH.
- Lavage avec l'acide phosphorique H_3PO_4 .
- Traitement avec carbonate de sodium Na_2CO_3 .
- Séchage à 80 °C.
- Carbonisation à 500 °C.
- Broyage suivi par tamisage.

V.1. Lavage par l'eau de Javel :

Nous avons pris 100 g de luffa, que nous avons coupés en petits carrés de 1 cm de longueur, puis immergés dans 4 litres d'eau de Javel à 12° à température ambiante pendant une heure. Ensuite, nous les avons filtrés et rincés avec de l'eau distillée 5 fois jusqu'à obtenir un pH = 7 (**Figure.19.**).



Figure. 19. Lavage à l'eau de Javel.

Le traitement à l'eau de javel, fait dissoudre les impuretés internes et une rugosité interraticiale supplémentaire, par conséquent, les sites libres sont plus accessibles aux molécules d'adsorbat et la surface spécifique devient plus important [1].

V.2. Lavage avec une solution de la soude NaOH :

Ces morceaux sont trempés dans une solution d'hydroxyde de sodium NaOH 0.1% pendant 5h, Le processus de filtration, suivi de lavages à l'eau distillée, est répété onze fois jusqu'à obtenir un pH = 7.

La matière est séchée toute la nuit, ce qui permet d'obtenir 246 grammes de luffa.



Figure.20. L'hydroxyde de sodium NaOH.

Ce traitement alcalin a pour but, de réduire la rétention d'eau des fibres de luffa, l'élimination des composés gommeux et cireux et l'augmentation de l'hydrophobicité de l'hémicellulose et par conséquent elle se dissoute en solution. Il a été remarqué que la topographie de surface de fibres traitées avec la soude montre la formation des rayures grâce à la suppression de la lignine et l'hémicellulose donc ; l'amélioration de la surface spécifique de luffa [2].

La matière séchée a été divisée en deux parties, la première partie subit une activation par l'acide phosphorique (CAA) et la deuxième partie subit une activation par le sel de carbonate de sodium (CAS).

V.3. Traitement avec l'acide phosphorique H₃PO₄ :

Une masse de 123 g de luffa a été imprégnée d'une quantité calculée du poids à la densité multipliée par le volume et le pourcentage de solution aqueuse de H₃PO₄, pendant 24 heures à température ambiante, avec un taux d'imprégnation de 30%, où X_p est défini comme le pourcentage résultant d'un 100 fois le rapport pondéral H₃PO₄ (g) au poids de précurseur pour (g de luffa) obtenir du charbon actif à porosité variable.

$$X_P\% = [\text{masse du H}_3\text{PO}_4 \text{ (g)} / \text{masse du précurseur (g)}] * 100 \quad (17)$$

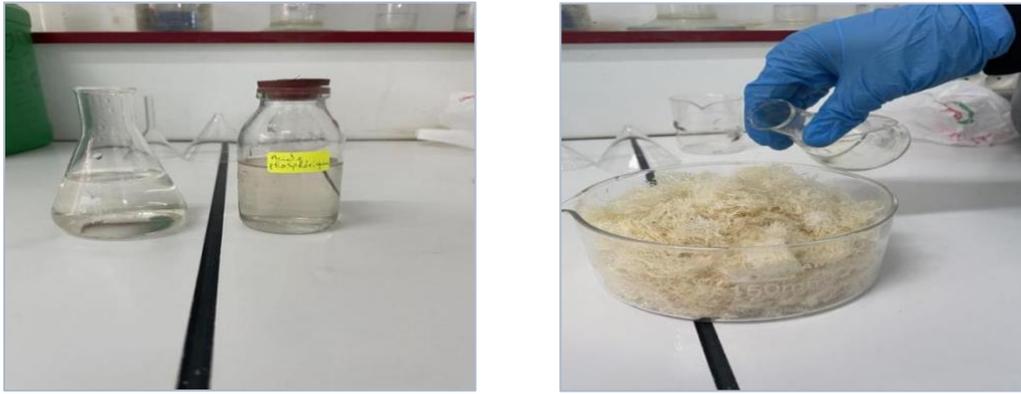


Figure.21. Traitement avec l'acide phosphorique H_3PO_4 .

V.4. Traitement avec carbonate de sodium Na_2CO_3 :

Une masse de 123 g de luffa a été trempé dans une solution de carbonate de sodium 0.1 M à température ambiante pendant un quart d'heure. Puis filtrée et rincée avec l'eau distillé huit fois, Pour obtenir un pH =7, placez ensuite dans l'étuve pendant 24 heures à une température de 80°C.

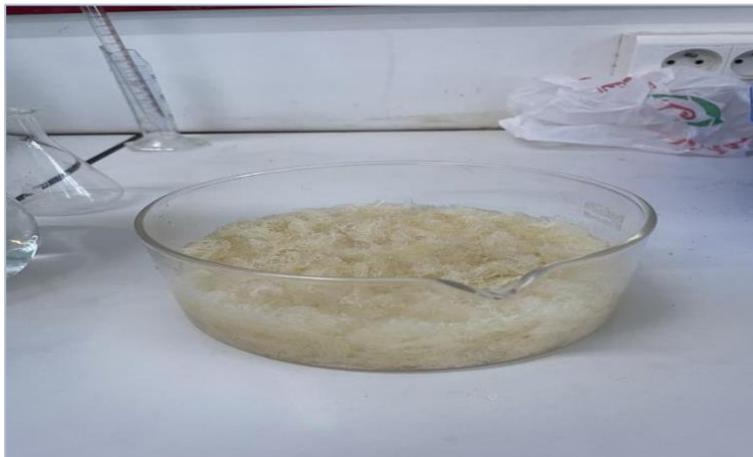


Figure.22. Traitement avec le carbonate de sodium Na_2CO_3

❖ Le but d'utilisation de H_3PO_4 et Na_2CO_3 :

Le traitement à l'acide phosphorique dans la fabrication du charbon actif est utilisé pour améliorer ses propriétés physiques et chimiques. Les avantages incluent :

- ✓ Augmentation de la porosité.
- ✓ Amélioration de l'activité de surface.
- ✓ Augmentation de la capacité d'adsorption.
- ✓ Stabilisation de la structure carbonée.
- ✓ Amélioration de la sélectivité.

Ces avantages rendent le charbon actif traité plus efficace dans des applications telles que la purification de l'eau et de l'air, et l'élimination des polluants dans diverses industries [3].

V.5. Le Séchage :

La matière traitée est séchée dans l'étuve à 80°C pendant 24 heures jusqu'à poids constant.

- La masse du Luffa traité par l'acide phosphorique H_3PO_4 = 58 g
- La masse du Luffa traité par carbonate de sodium Na_2CO_3 = 35.6 g

➤ Remarque :

Après 24 heures de séchage de la quantité de Luffa traitée avec de l'acide phosphorique, sa couleur est devenue noir.



Figure.23. Luffa traitée avec de l'acide phosphorique après le séchage.

V.6. Carbonisation :

Après un séchage, les échantillons ont été carbonisés dans un four à 500 °C pendant 1h30, la carbonisation ou la calcination consiste à chauffer l'échantillon à haute température (typiquement 500 à 1000 °C) pour provoquer des réactions physiques et chimiques.

-Après la calcination :

- la masse de charbon active par H_3PO_4 (CA Acide) =27 g
- la masse de charbon active par Na_2CO_3 (CA Sel)= 6.1 g

L'acide phosphorique résiduel dans le charbon actif traité a été éliminé de l'échantillon par lavage à l'eau distillée bouillante jusqu'à ce qu'aucun ion phosphate ne soit pas détecté dans l'eau.

L'eau de lavage d'échantillon est analysée à l'aide d'un pH-mètre pour confirmer l'absence de particules de phosphate résiduelles. La confirmation a été obtenue lorsque le pH s'est stabilisé à 7.

V.7. Le Broyage :

Le broyage de luffa est effectué avec une machine broyant, comme elle montre la **Figure.24**. Cette opération est effectuée jusqu'à l'obtention d'une poudre homogène.



Figure.24. Une machine broyeur

V.8. Le Tamisage :

Le tamisage a été effectué au département de génie civil en utilisant plusieurs tamis à différentes tailles afin d'obtenir des grains de taille 90 μm , cette opération consiste à classer par taille les grains de l'adsorbant broyé au moyen d'une série de tamis en plusieurs classes granulaires.

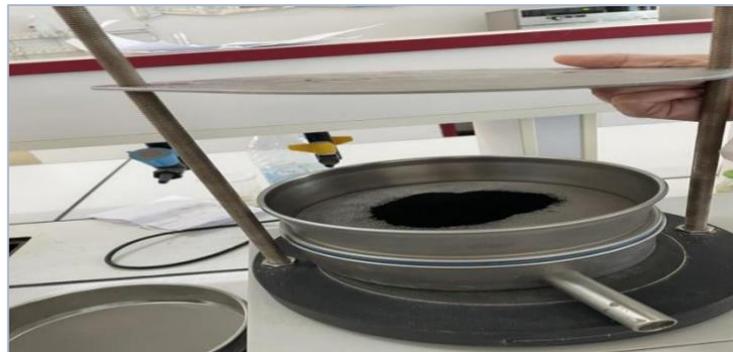


Figure.25. Un tamiseur

V.9. Le Rendement :

Le rendement de la préparation du charbon actif, défini comme le rapport du poids de charbon actif après thermoactivation, lavage et séchage (w_1) sur le poids du luffa sec (w_0), donné par l'équation (3) :

$$\text{rendement} (\%) = (W_1 / W_0) * 100 \quad (18)$$

W_1 La masse après thermoactivation.

W_0 La masse du précurseur.

Le terme « burn-off » désigne le pourcentage de perte de poids résultant du processus de thermoactivation, comme exprimé dans l'équation (4) :

$$\text{burn-off } (\%) = 100 - \text{rendement } \% \quad (19)$$

Les résultats de perte de masse sont présentés dans le **Tableau. 2**.

Tableau. 2. le rendement des charbons actifs.

Les charbons actifs	CA Sel	CA Acide
Le rendement de production de charbon actif (%)	12,2	21
La perte de masse (<i>Burn-off</i>) %	87,8	79

D'après les résultats obtenus, nous constatons que le rendement est faible où le rendement de activé par sel = 12,2 % ; ce qui est dû à la présence de substances telles que la cellulose, hémicellulose et les matières volatiles dans la luffa. Ces substances ont été éliminées pendant le processus d'activation, ce qui a réduit la quantité de luffa et, par conséquent, diminué le rendement. production de charbon activé par acide = 21 % ; et le rendement de production de charbon.

VI. Les caractéristiques de Charbon actif :

VI.1. Caractérisation physico-chimiques :

VI.1.1. L'effet de pH de point de charge nulle pH_{PZC} :

La détermination du pH_{PZC} a été effectuée en utilisant la méthode de dérive du pH [4]. Pour se faire, le pH a été ajusté à différentes valeurs initiales d'affilée, entre les valeurs 2 et 12 (est modifiée par l'acide chlorure d'hydrogène HCl et l'hydroxyde de sodium NaOH). Cette suspension a ensuite été agitée pendant 72h consécutives, et à l'issue de cette durée, la filtration a été effectuée et le pH_{final} a été mesuré et enregistré en fonction du $pH_{initial}$. Où le pH_{PZC} correspond à la valeur pour laquelle le pH_{final} est égal au $pH_{initial}$ (c'est-à-dire le point où la courbe du pH_{final} en fonction du $pH_{initial}$ croise la droite où le $pH_{final} = pH_{initial}$) [5].

Les **Figures. 26** et **27** illustre le graphique de la variation du $pH_{initial}$ en fonction du pH_{final} intercepte la ligne droite $pH_{final} = pH_{initial}$ pour chaque échantillon de charbon actif, à partir duquel les pH_{PZC} sont déduits.

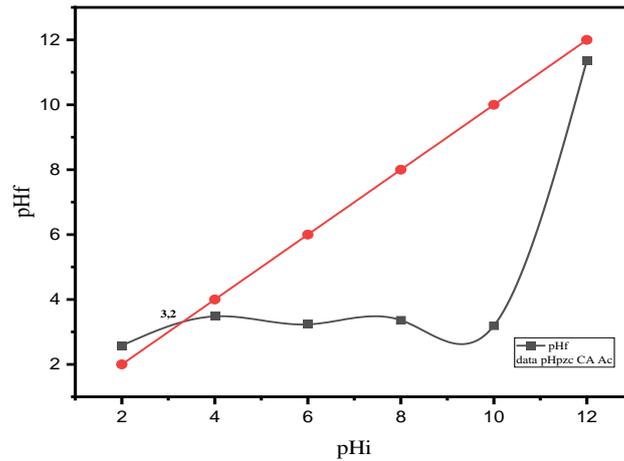


Figure.26. Courbe représente le pH_{pzc} du charbon activé par acide CA Acide

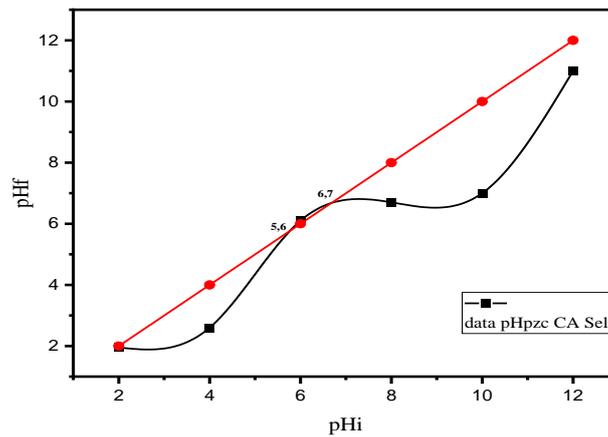


Figure.27. Courbe représente le pH_{pzc} du charbon activé par sel CA Sel

La surface du charbon actif peut acquérir une charge positive ou négative selon le pH du milieu. Lorsque le pH de la solution est inférieur au pH_{pzc} du charbon ($pH < pH_{pzc}$), celui-ci a un comportement basique qui favorise l'adsorption des espèces anioniques. Par contre, si le pH du milieu est supérieur au pH_{pzc} du charbon ($pH > pH_{pzc}$), la surface de charbon actif présente une charge négative, qui favorise l'adsorption des espèces cationiques. Les résultats montrent que le charbon activé par le H_3PO_4 a un comportement très acide, avec une valeur de pH_{pzc} de 3,2 et que pour le charbon traité par le Na_2CO_3 a un comportement légèrement acide, avec des valeurs de pH_{pzc} de 5,6 et 6,7. La diminution du pH_{pzc} après traitement des fibres de luffa par l'acide pourrait être expliquée par une augmentation du nombre de groupements acides après modification de la fibres de luffa favorisant ainsi l'adsorption des composants organiques cationiques.

VI.2. Caractérisation structurale :

VI.2.1. Caractérisation par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF):

L'étude infrarouge a été réalisée à l'aide d'un spectromètre FTIR Cary 630 avec une plage de fréquences allant de 400 à 4500 cm^{-1} pour étudier les types de zones de surface. Les spectres, illustrés dans la **Figure.28**, montrent que des bandes intenses de groupes fonctionnels existent à la surface des charbons actifs. L'interprétation de bande d'absorption dans l'intervalle :

- ✓ Le groupement OH : Les vibrations dues aux hydroxyles se définissent entre 2800 et 3500 cm^{-1} , le spectre présente un pic à 3200 cm^{-1} qui représente d'une part les vibrations de valence des OH de constitution et d'autres part celles des liaisons OH de l'eau adsorbée.
- ✓ Les pics situés en 1200 cm^{-1} caractérisent la vibration des groupes de (C-O-C), Les pics à 1701 cm^{-1} caractérisent les groupes carbonyles (C=O) de l'acide linoléique.
- ✓ Le groupement C=C : On trouve sur le spectre deux bandes qui se situent dans l'intervalle (1400 – 1600) cm^{-1} , la première à 1420 cm^{-1} et la deuxième à 1560 cm^{-1} ; elles sont dues aux liaisons du cycle aromatique (Phénol).
- ✓ Le pic à 1420 cm^{-1} est attribué au groupement (CH_2) de la cellulose.
- ✓ Le groupement C-C : la présence des pics situés à 874 cm^{-1} sont attribués à l'absorption de la liaison C-C. [12]

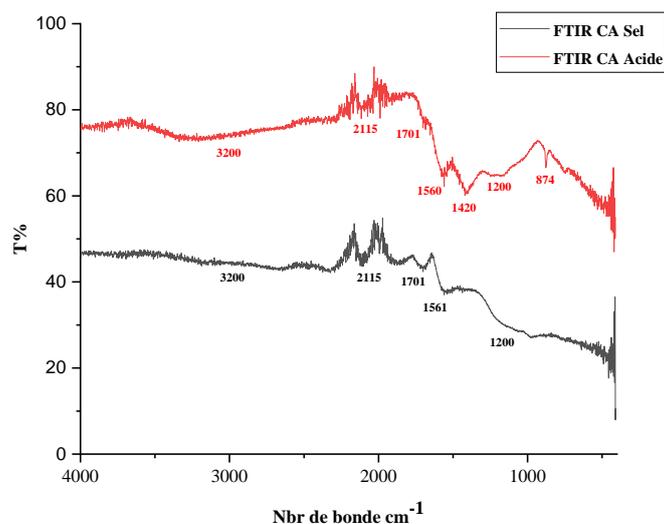


Figure.28. Spectres d'IRTF de charbons actifs préparés.

VI.2.2. Diffraction du rayon X (DRX) :

Les charbons actifs ont été analysés par diffraction des rayons X (DRX), qui est une méthode fondamentale pour évaluer la structure d'empilement du charbon, la **Figure.29.** montre les diffractogrammes obtenus. Nous avons remarqué que les spectres de DRX des charbons actifs **CA Sel** et **CA Acide** présentent des profils de diffraction avec des pics larges et nets qui indiquent une structure amorphe, ce qui est une propriété précieuse pour un matériau hautement poreux. La structure amorphe des charbons actifs est due à la forte teneur en hémicellulose et en lignine. [6]

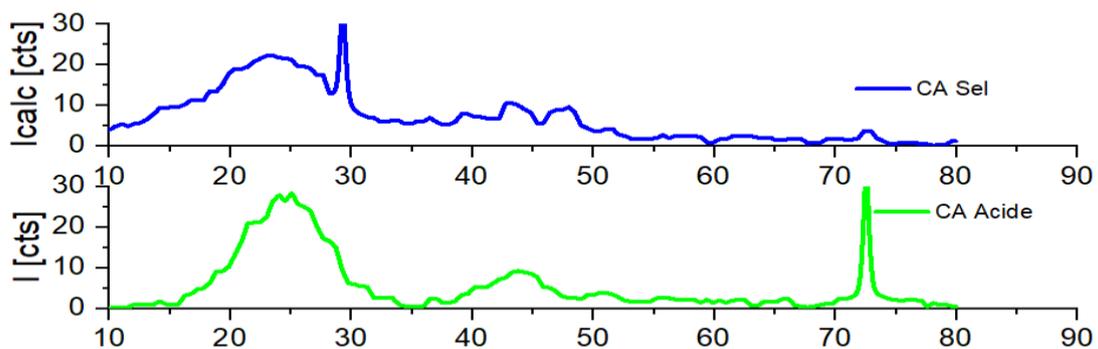


Figure. 29. Schéma de diffraction des rayons X (DRX).

Nous avons observé que pour les deux échantillons présentent des larges pics d'intensité à 2θ, s'étendant de [15° à 35°] et [40° à 50°], aussi on remarque des pics intenses s'étendant de 29° et 73°. Ces pics correspondent aux réflexions caractéristiques dans le cas des matériaux carbonés graphitisés et des oxydes.

VI.3. Caractérisation thermique :

VI.3.1. Analyse Thermogravimétrique (ATG) :

Afin d'étudier la perte de masse, les échantillons de charbon actif à base de la biomasse luffa **CA Acide** et **CA Sel** ont été caractérisés par analyse thermogravimétrique (ATG).

L'ATG a été réalisé sur un travail TA-60WS analyseur de station (Shimadzu Corp ; Kyoto, Japon) à une vitesse de chauffage de 10 °C.min⁻¹. Les échantillons étaient examinés sous flux d'azote (80 mL.min⁻¹) sur une plage de température de 30 à 700 °C.

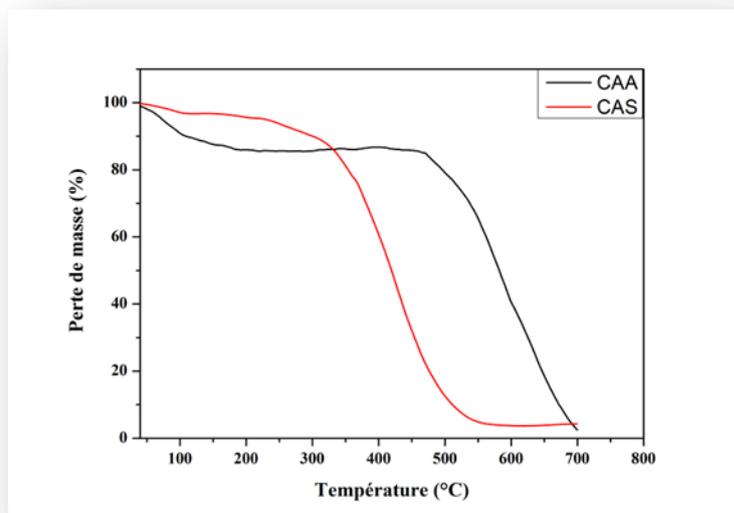


Figure.30. La perte de masse (%) en fonction de la température (T °C) obtenues par ATG pour les charbons actifs.

Le comportement des courbes ATG avec une étape de chauffage des charbons actifs, tel qu'illustré dans la **Figure.30**, montre :

➤ **Perte de masse initiale (30 - 150 °C) :**

- Les deux échantillons montrent une perte de masse initiale due à l'évaporation de l'eau et des composés volatils à basse température. La perte de masse est légèrement plus élevée pour le CAA, suggérant une teneur en humidité ou en volatils plus élevée.

➤ **Perte de masse intermédiaire (150 - 400 °C):**

- L'échantillon CAS présente une perte de masse significative entre 150 et 400 °C, attribuable à la décomposition des composants organiques et à la libération de substances volatiles. Cette forte baisse indique une stabilité thermique inférieure du charbon actif traité au sel.

- En revanche, la perte de masse du CAA est plus progressive, indiquant que le traitement à l'acide a conféré une plus grande stabilité thermique à l'échantillon.

➤ **Décomposition majeure (400 - 600 °C) :**

- Les deux échantillons subissent leur principale phase de décomposition dans cette plage de températures. Le CAA commence cette décomposition légèrement plus tard que le CAS, montrant une résistance accrue à la dégradation thermique.

- La perte de masse du CAA est plus étalée, suggérant une structure carbonée plus résistante due au traitement à l'acide.

➤ **Stabilité finale (600 - 700 °C) :**

- Au-delà de 600 °C, les échantillons atteignent une masse relativement stable, indiquant que la plupart des matériaux décomposables ont été volatilisés. Le CAA retient une masse résiduelle légèrement plus élevée que le CAS, indiquant une structure carbonée plus robuste.

✓ L'ATG montre que le charbon actif traité à l'acide (CAA) a une stabilité thermique supérieure à celui traité au sel (CAS), avec une dégradation plus progressive et une masse résiduelle plus élevée à haute température. Cela suggère que le traitement à l'acide produit un charbon actif avec une structure plus stable et résistante, potentiellement plus efficace pour des applications nécessitant une haute stabilité thermique.

VI.4. Caractérisations texturales :

VI.4.1. L'indice de bleu de Méthylène BM :

L'adsorption a été étudiée dans des erlenmeyers. Un volume de 25 ml de solution de BM (0,12 g de bleu de méthylène a été pris et 100 ml d'eau distillée ont été ajoutés, puis la solution a été agitée pendant 24 heures) avec 100 mg de charbon actif sont introduits dans ces erlenmeyers et agités à température ambiante (25 °C) pendant 30 min. Après la séparation de la phase liquide et de l'adsorbant par filtration à l'aide de centrifugeuse, l'évolution de la concentration des filtrats a été suivie à l'aide d'un spectrophotomètre UV-visible à la longueur d'onde 664 nm.

Le résultat pour la détermination l'indice de BM est présenté dans le **Tableau.3**.

Tableau. 3: Résultat de l'indice de bleu de méthylène des charbons actifs

Charbons actifs	CA Sel	CA Acide
l'indice bleu de méthylène (mg.g⁻¹)	727,4901	734,0937

D'après le résultat, nous remarquons une légère augmentation de l'indice de bleu de méthylène du charbon activé par acide CA Acide comparés au charbon activé par sel CA Sel. L'indice du bleu de méthylène des charbons actifs étudiés révèle que les charbons activés par le H_3PO_4 et le Na_2CO_3 possèdent une porosité mésopores.[15]

VI.4.2. L'indice d'iode :

Pour déterminé l'indice d'iode il faut préparer quelque solutions :

- Solution 01: Dans une fiole de 250 ml, on a dissous 4,15 g de Iodure de potassium KI dans un peu d'eau distillée, puis on a ajouté 3,17 g de diiode I_2 et complété avec de l'eau distillée, cette fiole agités à température ambiante ($25\text{ }^\circ\text{C}$) pendant 24 h.

-Solution 02 : dans une fiole de 500 ml, on a dissous 12.4 g de Thiosulfate de sodium $Na_2S_2O_3$, l'eau distillée a été ajouté.

-Solution 03 : (HCl 5%) : Dans une fiole de 100 ml, on a dissous 1.35 ml de chlorure d'hydrogène et complétés avec l'eau distillée.

-Solution 04 : Dans un bécher, 80 ml d'eau distillée ont été pris et chauffés jusqu'à ébullition. D'autre part, 1 g d'amidon a été dissous dans 10 ml d'eau distillée froide, bien mélangée, puis ajoutée aux 80 ml d'eau bouillante. Le mélange a été chauffé pendant 30 s, puis laissé refroidir.

Dans un bécher, 0,2 g de charbon actif a été placé et 10 ml de solution de HCl ont été ajoutés, puis le mélange a été agité et chauffé pendant une minute. Ensuite, 25mL d'une solution d'iode ont été introduits dans la dispersion. Ils sont agités pendant environ une minute et filtrés sur papier filtre. Nous avons prélevé 12,5 mL du filtrat obtenu après filtration du mélange et titré par la solution de thiosulfate de sodium. L'amidon agit comme un indicateur visuel pour indiquer le changement dans la réaction.

Les résultats pour la détermination l'indice de BM et d'iode sont regroupés dans le **Tableau.4**.

Tableau. 4 : Résultat de l'indice d'iode des charbons actifs

Charbons actifs	CA Sel	CA Acide
L'indice d'iode ($mg.g^{-1}$)	383,7392	632,4123

D'après le **tableau.4**. Nous remarquons une nette augmentation de l'indice d'iode du charbon activé par acide CA Acide comparés au charbon activé par sel CA Sel.

La taille d'un pore peut être décrite par sa largeur (dans le cas des pores en forme de fente), c'est-à-dire la distance moyenne entre ses parois. Les pores sont classés en trois catégories principales : les micropores (taille $< 20 \text{ \AA}$), les mésopores (taille comprise entre 20 \AA et 500 \AA) et les macropores (taille $> 500 \text{ \AA}$).

L'indice du bleu de méthylène et l'indice d'iode des charbons actifs étudiés révèlent que les charbons possèdent une porosité mésopores.

Les références:

- [1] : CHERIFI H., HANINI S., BENTAHAR F. « Adsorption of phenol from wastewater using vegetal cords as a new adsorbent ». *Desalination*. août 2009, Vol. 244, n°1-3, p.177-187.
- [2] : GHALI L., MSAHLI S., ZIDI M., SAKLI F. « Effect of pre-treatment of Luffa fibres on the structural properties ». *Materials Letters* . 15 janvier 2009,. Vol. 63, n°1, p. 61-63.
- [3] : Balogoun, C. K., Bawa, M. L., Osseni, S., & Aina, M. (2015). Préparation des charbons actifs par voie chimique à l'acide phosphorique à base de coque de noix de coco. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9(1), 563-580
- [4] : A. Gómez-Avilés, M. Peñas-Garzón, C. Belver, J. J. Rodriguez, J. Bedia, Equilibrium, kinetics and breakthrough curves of acetaminophen adsorption onto activated carbons from microwave-assisted FeCl₃-activation of lignin, *Sep. Purif. Technol.*, vol. 278, p. 119654, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.SEPPUR.2021.119654.
- [5] : N. Abbasi, S. A. Khan, T. A. Khan, Journal of Water Process Engineering Response surface methodology mediated process optimization of Celestine blue B uptake by novel custard apple seeds activated carbon FeMoO₄ nanocomposite, *J. Water Process Eng.*, vol. 43, no. July, p. 102267, 2021, doi: 10.1016/j.jwpe.2021.102267
- [6] : F. CHERDOUD , Elaboration, caractérisation et application de nouveaux types de carbones activés pour l'élimination de polluants ,Thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf/de M'sila, 2024.
-

Chapitre IV



VII.1. Caractéristiques du colorant vert de malachite :

VII.1. 1. Le spectre d'absorption en UV-visible :

Le spectre d'absorption du vert de malachite (Figure 31) a été mesuré avec un spectrophotomètre de type SHIMADZU UV-2401 PC sur une solution aqueuse de VM (100 mg.L⁻¹). Le balayage spectral permet d'obtenir directement la longueur d'onde d'adsorption maximale d'une solution aqueuse de VM entre 200 et 800 nm. La longueur d'onde d'absorption maximale de colorant vert de malachite VM est de : 614 nm

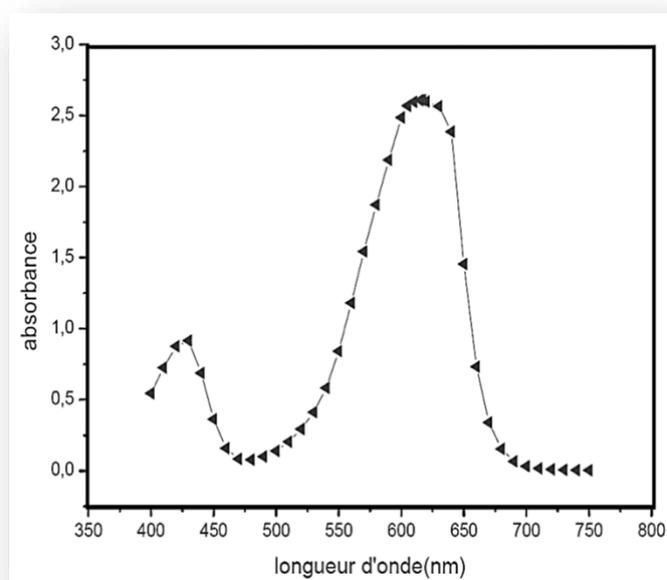


Figure.31 : Le spectre d'absorption en UV-visible du colorant vert de malachite.

VIII.2. Protocoles expérimentaux des études d'adsorption :

VIII.2.1. Préparation des solutions du colorant :

Les solutions mères en vert de malachite VM ont été préparées en utilisant de l'eau fraîchement distillée. Nous avons préparé une concentration de 1 g.L⁻¹ de solution mère de colorant avec des volumes importants (1 litre), afin d'assurer une bonne reproductibilité des résultats lors des études d'adsorption. Pour faciliter la dissolution, ces solutions mères sont agitées. Par la suite, des dilutions ont été réalisées jusqu'à obtenir les concentrations souhaitées de solutions de faible concentration. (Figure 32)



Figure.32 : La solution mère en vert de malachite VM.

VIII.2.2. La courbe d'étalonnage de vert de malachite :

Pour analyser les concentrations des solutions de vert de malachite VM, nous avons utilisé un spectrophotomètre (modèle SHIMADZU UV-2401PC) en mesurant leur absorbance à 614 nm.

Une courbe d'étalonnage des absorbances en fonction des concentrations en vert de malachite VM a été obtenue en utilisant des solutions de colorant avec des concentrations comprises entre de 5 à 50 mg.L⁻¹ (0 comme témoin avec de l'eau distillée) et volume de 25 ml (**Figure 3**) (préparées à partir de solutions mères avec une concentration de 1000 mg.L⁻¹)

Nous avons établi une ligne d'étalonnage représentant l'absorbance en fonction de la concentration du vert de malachite ($A = f(C)$), obtenant ainsi la relation de Bér Lambert. Les données expérimentales représentants dans la (**Figure 4**) démontrent une relation linéaire entre l'absorbance et la concentration avec un coefficient de détermination élevé ($R^2 = 0,9967$).



Figure.33 : des solutions de colorant avec des concentrations comprises.

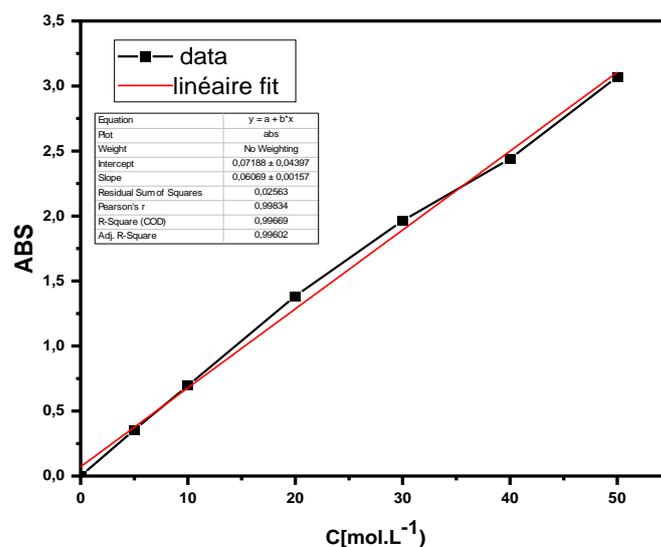


Figure .34. Courbe d'étalonnage de VM par spectrophotométrie UV-visible

VIII.2.3. Contrôle du non dégradation du colorant vert de malachite VM à la lumière du jour :

Des solutions (10 et 100 mg.L⁻¹), du vert de malachite VM ont été préparées et leurs absorbances ont été mesurées. Nous avons placé une fraction de chaque solution dans deux tubes à essai transparent l'un est protégé de la lumière et l'autre est exposé au soleil. Nous avons mesuré les absorbances de ces solutions pendant deux mois d'été de la ville de BBA. (Figure 35 et 36).

- Avant :

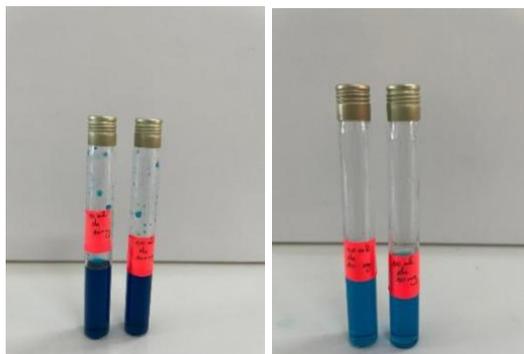


Figure.35 : Des solutions (10 et 100 mg.L⁻¹), du vert de malachite VM avant dégradation à la lumière et à l'obscurité.

- Après :

à la lumière :



à l'obscurité :

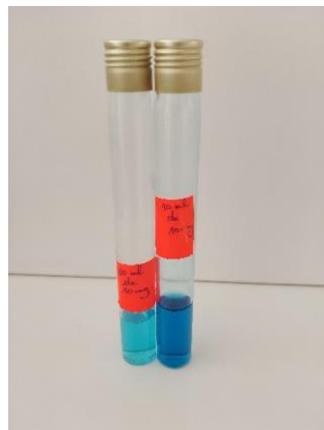


Figure.36 : Des solutions (10 et 100 mg.L⁻¹), d'un vert de malachite VM après dégradation à la lumière et à l'obscurité.

Les résultats présentés dans le **Tableau.5**. montrent que l'absorption des deux solutions de vert malachite VM (10 et 100 mg.L⁻¹) évolue fortement avec le temps. Par conséquent, les solutions du colorant vert de malachite VM sont très bien décomposables à la lumière, où elles se décomposent presque complètement, et les solutions du colorant vert de malachite VM se décomposent moyenne dans l'obscurité.

Tableau.5 : Evolution du colorant VM après 60 jours d'exposition à la lumière et à l'obscurité.

Concentration du colorant préparée (mg.L ⁻¹)	Concentration du colorant (mg.L ⁻¹) en Lumière	Concentration du colorant (mg.L ⁻¹) en Obscurité
10	0.08401977	7.25041186
100	0.13344316	39.6721582

VIII.2.4. L'effet du pH sur l'équilibre d'adsorption du colorant VM :

Le pH est le facteur le plus important dans l'étude de l'adsorption. Celui-ci contrôle le processus d'adsorption et peut déterminer à la fois la charge superficielle de l'adsorbant ainsi que l'ionisation de l'adsorbat. Afin d'évaluer l'effet du pH_{initial} sur l'efficacité de l'adsorption du vert de malachite VM par les charbons actifs, un test expérimental a été mené. Le pH_{initials} des solutions du colorant avec une concentration initiale constante de 100 mg.L⁻¹, ont été ajustés

dans la plage souhaitée de 2 ;3.15 ;7 ;10 en utilisant des ajouts d'acide chlorhydrique (HCl) à des concentrations de 1M et 0.1M, ou de soude (NaOH) à des concentrations de 1M et 0.1M selon le besoin avec une masse de 50 mg de charbon actif et nous l'avons laissé agiter pendant 24 heures. (Figure .37)

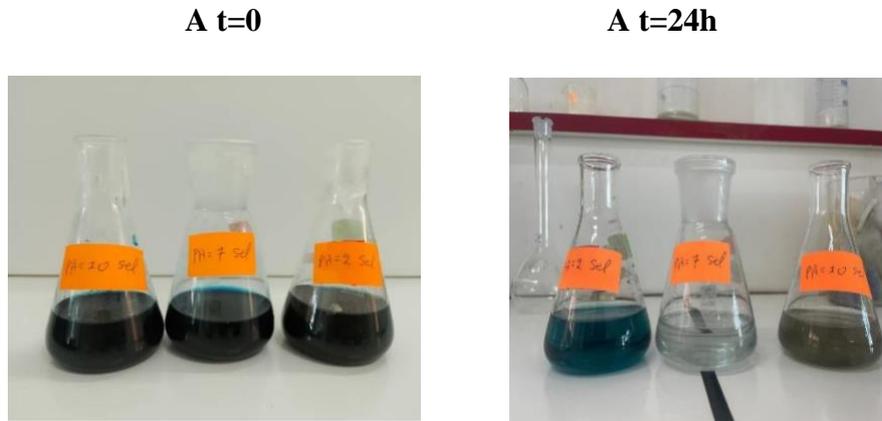


Figure.37 : L'effet du pH de la solution sur l'adsorption du VM.

Les résultats présentés dans la Figure.38 montrent que l'adsorption du colorant VM par le charbon activé par acide (CA Acide) est indépendante de l'acidité et la basicité du milieu, une élimination maximale de l'ordre de 99 mg/g. on peut remarquer aussi que le pH de milieu à un effet légèrement significatif sur les performances d'adsorption du charbon activé par sel (CA Sel) avec le VM et le maximum est obtenu pour des $pH \geq 3,15$.

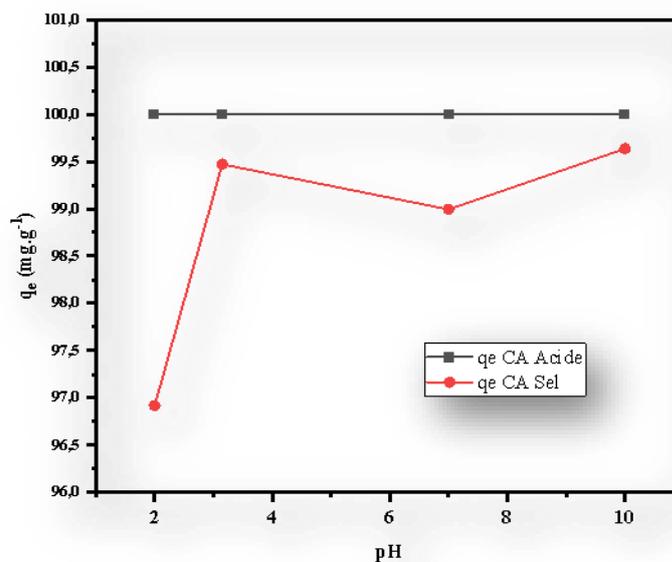


Figure.3 8. L'effet du pH de la solution sur l'adsorption du VM.

VIII.2.5. L'effet de masse :

Pour étudier les mécanismes impliqués dans l'adsorption du vert de malachite VM par les charbons actifs, nous avons examiné l'influence de la masse sur l'équilibre d'adsorption. On fait varier la masse des charbons actifs ($m=0.01\text{g}$; 0.02g ; 0.025g ; 0.03g ; 0.05g , et 0.1g), la concentration de colorant Vert de Malachite est de 100 mg/l , à température ambiante, avec un $\text{pH}= 3.15$ pour le **CA Acide** et un $\text{pH}=7$ pour le **CA Sel**, le temps de contact est 24 heures. (Figure .39)

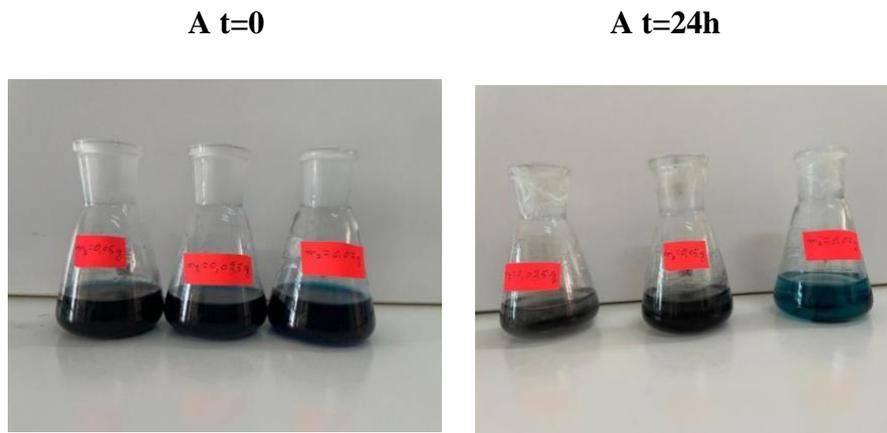
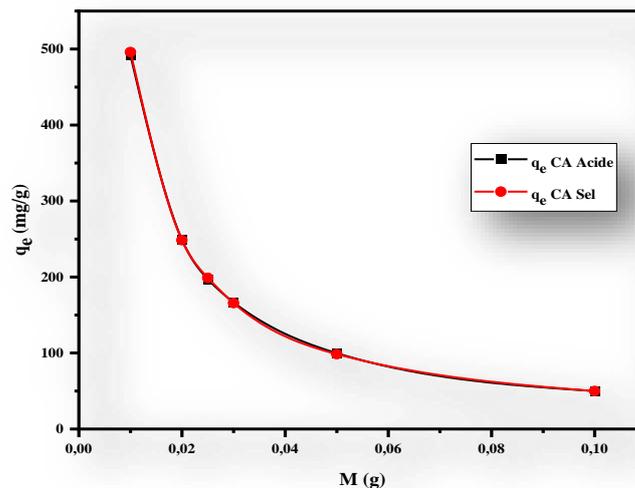


Figure.39 : L'effet de masse des charbons actifs sur l'adsorption du VM.

L'effet de la masse du charbon actif sur l'adsorption du VM, Plus la masse du charbon actif est petite, plus la quantité d'adsorption est grande.



Figur40 : L'effet de masse des charbons actifs sur le rendement d'adsorption du VM.

VIII.2.6. Cinétique d'adsorption du vert de malachite VM :

L'étude cinétique de l'adsorption est indispensable pour la détermination du temps nécessaire pour atteindre l'équilibre d'adsorption ou à un état de saturation d'adsorbant par l'adsorbat. Elle fournit des informations relatives aux mécanismes d'adsorption et sur le transfert des solutés de la phase liquide à la phase solide. Elle permet également de déterminer, de façon comparative, les quantités de colorant adsorbées en fonction du temps de contact. L'étude de l'adsorption d'un composé sur un adsorbant nous permet d'examiner l'influence du temps de contact sur sa rétention. Cette étude a été menée de manière à déterminer les quantités fixées d'adsorbat (colorant) depuis sa mise en contact jusqu'à l'équilibre.

La procédure expérimentale suivie est simple et consiste à mettre en contact, 25 mg de charbon actif avec 25 mL de solution du colorant de concentration 500 mg.L^{-1} . Les suspensions sont agitées à 25°C et à pH du milieu = 3,15 pendant des durées variables allant de 30 à 300 min. La quantité de colorant adsorbée en fonction du temps $q_t = f(t)$ sont indiqués sur la **Figure. 41**

L'analyse de la concentration de colorant initiale ou résiduelle est effectuée par spectroscopie d'adsorption UV-Visible. Les différents résultats obtenus sont tracés sous forme de courbe $q_t = f(t)$.

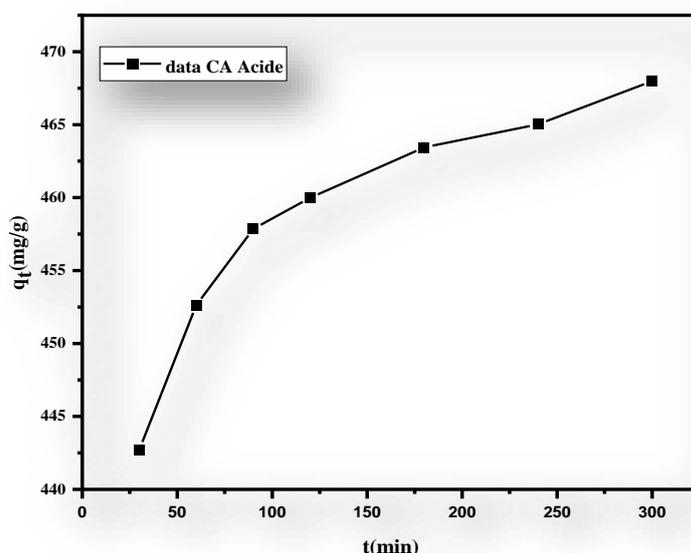


Figure. 41 : La cinétique d'adsorption de VM sur le CA Acide.

Cette courbe représente la cinétique d'adsorption du VM sur le charbon actif traité par acide et montre clairement que l'augmentation du temps de contact entraîne une amélioration de

l'élimination du colorant par l'adsorbant. Nous avons également remarqué que cette courbe n'a pas la forme d'une courbe de saturation et que l'adsorption se produit un peu rapidement le début du processus et elle devient de plus en plus lente au cours du temps d'agitation pour atteindre l'équilibre.

VIII.2.6.1. La modélisation des cinétiques d'adsorption (Ordre cinétique de l'adsorption) :

La littérature décrit divers modèles pour rendre compte des cinétiques d'adsorption. La valeur du coefficient de détermination linéaire R^2 et les quantités théoriques adsorbées calculées, $Q_{e,the}$ sont utilisées pour déterminer leur validité. Le modèle de diffusion intra-articulaire, le modèle d'Elovich, le modèle du pseudo premier ordre et le modèle du deuxième ordre sont les plus couramment utilisés.

VIII.2.6.1.a. Le modèle du pseudo-premier ordre :

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

$$q_t = q_e(1 - e^{-K_1 t}) \quad (20)$$

Le graphique linéaire ($\log(q_e - q_t)$) en fonction de t représenté sur la **Figure .42**, a permis d'obtenir paramètres du taux d'adsorption (K_1) et coefficients de détermination. Les valeurs de q_e et K_1 peuvent être déterminées à partir de la pente et de l'interception.

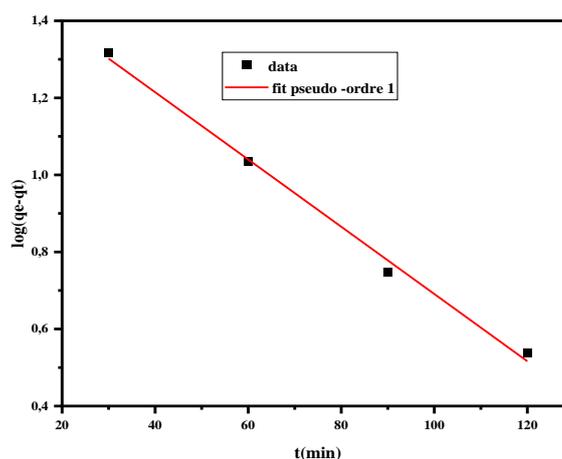


Figure.42 : Cinétique d'adsorption de pseudo premier-ordre de VM.

VIII.2.6.1.b. Le modèle de pseudo-deuxième ordre :

L'équation suivant représenter le modèle cinétique du deuxième ordre, après intégration entre $t = 0$ et t , d'une part, et $qt = 0$ et qt , on obtient la forme linéaire et non linéaire :

$$\begin{aligned} (t/q_t) &= \left(1/K_2q_e^2\right) + (1/q_e)t \\ q_t &= \left(K_2q_e^2t/1 + K_2q_e t\right) \end{aligned} \quad (21)$$

La figure .43 affiche les graphiques des relations linéaires de t/q_t en fonction de t pour l'adsorption de Vert de Malachite sur le charbon actif **CAAcide**. K_2 et q_e ont été calculés respectivement à partir de la pente et de l'ordonnée à l'origine de ces graphes.

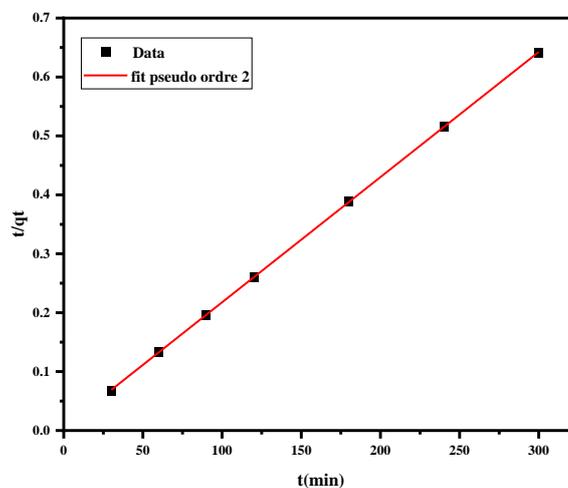


Figure.43 : La cinétique d'adsorption du modèle de pseudo deuxième-ordre de VM.

VIII.2.6.1.c.Le modèle d'Elovich :

L'équation d'Elovich est une équation cinétique couramment utilisée pour décrire la cinétique d'adsorption des solutés sur les surfaces des matériaux adsorbants. Cette équation suppose que la vitesse d'adsorption diminue avec le temps et est basée sur l'idée que le processus d'adsorption est associé à des sites actifs qui deviennent progressivement saturés au cours du temps. La forme linéaire et non linéaire de cette équation :

$$q_t = \left(1/b\right)\ln(t + t_0) - \left(1/b\right)\ln t_0 \quad (22)$$

Elle dépend des coefficients d'Elovich α et β , qui représentent respectivement la vitesse initiale d'adsorption ($\text{mg.g}^{-1}.\text{min}^{-1}$) et la constante de désorption (g.mg^{-1}). Les coefficients d'Elovich ont été calculés en fonction de $\mathbf{Ln(t)}$ à partir des graphes de \mathbf{qt} .

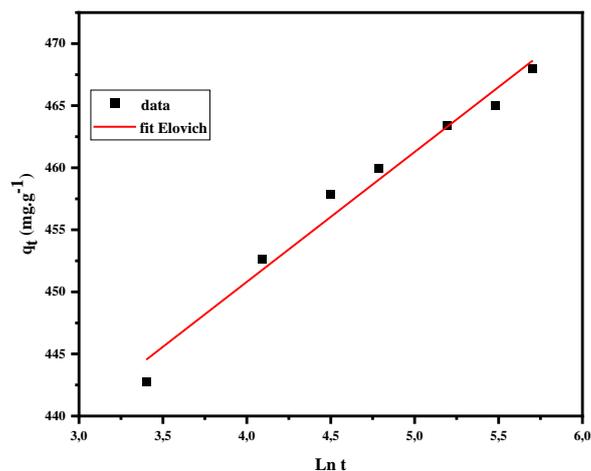


Figure. 44 : Cinétiques d’adsorption par le modèle d’Elovich de VM.

La **Figure 44** montre la représentation linéaire de l’équation d’Elovich pour la cinétique d’adsorption du vert de malachite sur le charbon actif étudié.

VIII.2.6.1.d. Modèle de diffusion intra-particulaire :

Pour le modèle de diffusion intra-particulaire, utilisons la relation cinétique suivante :

$$q_t = K_d^{0.5}t + C \quad (23)$$

qt La quantité de colorant adsorbées à l’instant t.

K_d La constante de vitesse de diffusion intra-particulaire.

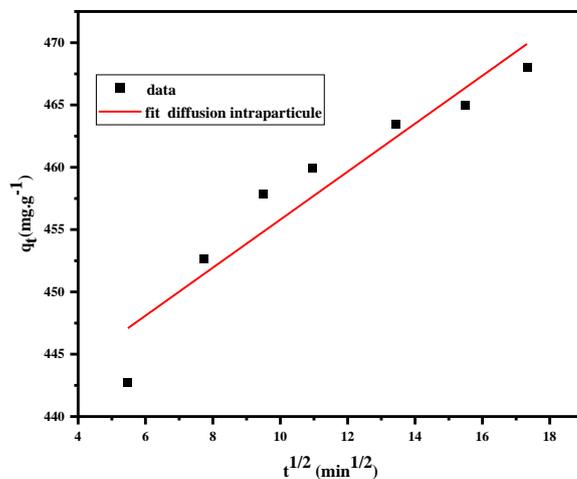


Figure.45 : La cinétique d'adsorption Modèle de diffusion intra-particulaire de vert de malachite VM.

VIII.2.7. Comparaison des modèles cinétiques :

Tableau.6 : Les Paramètres cinétiques de l'adsorption du vert de malachite.

Concentration initial de VM 500 mg.L ⁻¹ , Q _{exp} = 463,441516 (mg/g)							
Pseudo Premier ordre				Pseudo second ordre			
Q _{e, the} (mg/g)	K ₁ (min ⁻¹)	R ²		Q _{e, the} (mg/g)	K ₂ (g/mg.min)	R ²	h(mg/g.min)
36,62857	-0,02011	0,9925		21,71861	0,410058	0,99997	193,4236
Diffusion intraparticulaire				Elovich			
K _{dif} (mg/g min ^{1/2})	I (mg/g)	R ²	Q _{e, the} (mg/g)	α (mg/g min)	β (g/mg)	R ²	Q _{e, the} (mg/g)
1,92582	436,5404	0,887	462,378	0,09557689 3	9,88138E+17	0,97234	463,2890

D'après les résultats obtenus via les **Figures 41-45**, regroupés dans le **tableau .6** et en se basant sur les valeurs du coefficient de déterminations R², et la comparaison des résultats de *Q_{e,exp}* et *Q_{e,the}* on constate que le modèle Elovich décrit parfaitement la cinétique d'adsorption du vert de malachite sur le charbon actif par rapport au autre modèle, avec un coefficient de corrélation R² = 0,97234 et une quantité théorique adsorbée calculée *Q_{e,the}* = 463,2890 (mg/g) similaire de celle de l'expérience.

Donc, à partir de ce résultat, on peut considérer que le système adsorbat-adsorbant est hautement hétérogène.

VIII.2.8. Isothermes d'adsorption du vert de malachite VM :

Dans cette étude, de même que pour les cinétiques d'adsorption, les isothermes d'adsorption ont été obtenues en suivant le même mode opératoire présenté précédemment (protocole en batch), avec les conditions expérimentales suivantes :

L'effet de la concentration initiale de vert de malachite VM sur la quantité adsorbée (mg.g⁻¹) par le charbon actif a été étudié dans une gamme de concentrations initiales entre 25 et 800

mg.L⁻¹ à température ambiante pour une quantité de charbon actif de 25 mg dans 25 mL de solution de colorant à un pH égal à 3.15 et une durée de 24 heures de contact du charbon actif-colorant (VM) pour assurer l'équilibre d'adsorption. (**Figure 46**)

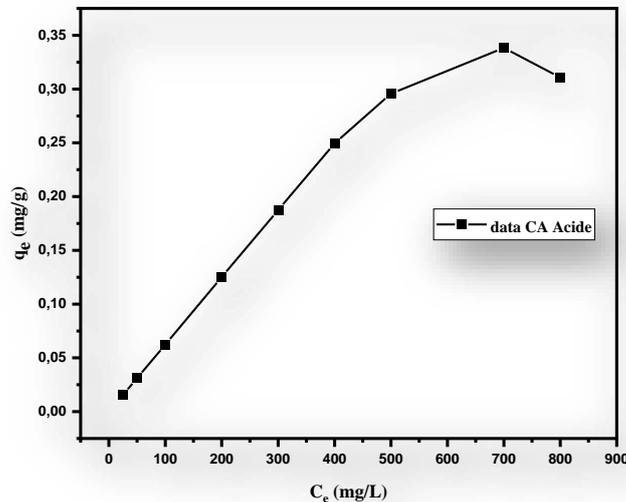


Figure.46 : Isothermes d'adsorption de VM sur le charbon actif **CA Acide** à 25° C.

La **Figure 46** illustre l'évolution de la quantité adsorbée en fonction de la concentration à l'équilibre ($q_e = f(C_e)$). Les résultats obtenus indiquent que l'isotherme d'adsorption est en forme de **L** selon la classification de GILES. (12)

A partir de la **Figure 46**, l'allure de courbe nous permet de constater que l'équilibre est atteint pour de fortes concentrations (500 mg/L), en outre la quantité adsorbée croît avec l'augmentation de la concentration, cette croissance se justifie par l'évolution du gradient de concentration qui stimule la diffusion des molécules vers les pores de l'adsorbant.

VIII.2.8.1.La modélisation des isothermes d'adsorption :

Les isothermes d'adsorption de catégorie **L** peuvent être interprétées à l'aide des modèles de Langmuir et de Freundlich. En conséquence, nous allons utiliser ces modèles pour analyser nos expériences d'adsorption.

Le degré d'adéquation des modèles théoriques aux résultats expérimentaux a été déterminé en se basant sur le coefficient de corrélation (R^2).

VIII.2.8.1.a. Modèles de Langmuir :

VIII.2.8.1.a.1. Modèles de Langmuir I :

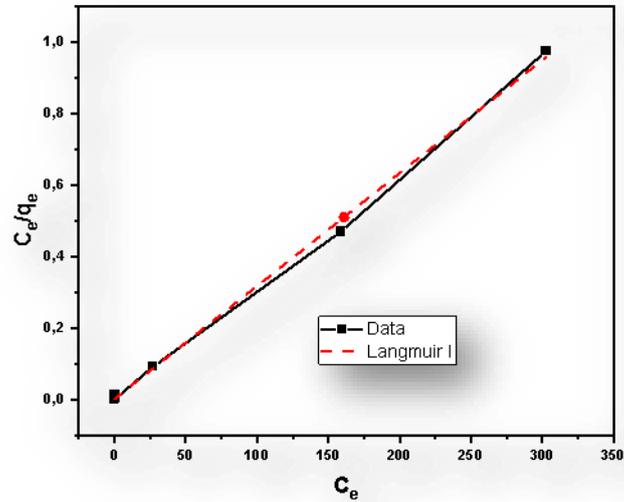


Figure.47 : Isothermes d'adsorption de modèles de Langmuir I de vert de malachite VM.

VIII.2.8.1.a.2. Modèles de Langmuir II :

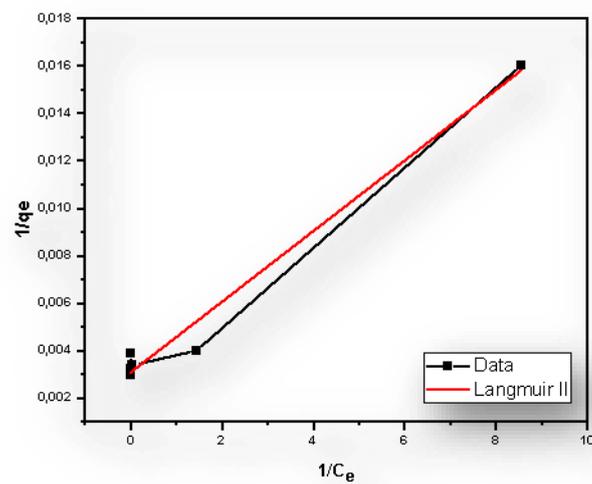


Figure.48 : Isothermes d'adsorption de modèles de Langmuir II de vert de malachite VM.

Tableau.7 : Les Paramètres de Modèles de Langmuir de l'adsorption du vert de malachite.

Langmuir I			Langmuir II		
R ²	K _L	Q _m	R ²	K _L	Q _m
0,997	2,358209	746,2687	0,9782	4,6041E-06	323,624595

A partir des résultats de la modélisation des isothermes d'adsorption présentés dans le **Tableau.7**, on observe que le modèle de Langmuir I décrit mieux nos résultats expérimentaux de l'adsorption du VM sur le charbon actif préparé avec un coefficient de corrélation $R^2=0,997$, donc ce modèle est le plus adapté.

A vertical bar on the left side of the page with a gradient from green at the top to blue at the bottom.

Conclusion

Conclusion générale :

L'étude effectuée dans ce présent travail s'inscrit dans le cadre général de la dépollution des eaux usées contaminées par les rejets des colorants.

Cette étude a pour but d'évaluer l'efficacité du charbon actif issu du luffa (*Luffa cylindrica*) pour la décoloration des effluents industriels. Elle examine les caractéristiques d'adsorption du charbon de luffa et sa capacité à éliminer différents polluants colorants, comme le vert de malachite, des eaux contaminées.

Les résultats d'analyses physico-chimiques telles que la spectroscopie infrarouge (IRTF), la diffraction des rayons X (DRX), (ATG) et l'effet de pH de point de charge nulle pH_{PZC} montrent que le charbon activé par le H_3PO_4 a un comportement très acide, avec une valeur de pH_{pcz} de 3,2 et que pour le charbon traité par le Na_2CO_3 a un comportement légèrement acide, avec des valeurs de pH_{pcz} de 5,6 et 6,7, Les analyses supplémentaires effectuées afin d'étudier les qualités et la performances du charbon actif telles que l'indice d'iode et du bleu de méthylène ont montré que les charbons activés par le H_3PO_4 et le Na_2CO_3 possèdent une porosité mésopores.

Les résultats de l'étude de l'effet de pH, montrent que l'adsorption du colorant VM par le charbon activé par acide (**CA Acide**) est indépendante de l'acidité et la basicité du milieu, une élimination maximale de l'ordre de 99 mg/g. on peut remarquer aussi que le pH de milieu à un effet légèrement significatif sur les performances d'adsorption du charbon activé par sel (**CA Sel**) avec le VM et le maximum est obtenu pour des $pH \geq 3,15$.

L'étude de l'effet de la masse du charbon actif sur l'adsorption du VM, montre que ; plus la masse du charbon actif est petite, plus la quantité d'adsorption est grande.

Les cinétiques d'adsorption montrent clairement que l'augmentation du temps de contact entraîne une amélioration de l'élimination du colorant par l'adsorbant.

La modélisation des cinétiques d'adsorption révèle que le modèle Elovich décrit parfaitement la cinétique d'adsorption du vert de malachite sur le charbon actif par rapport au autre modèle. Donc, à partir de ce résultat, on peut considérer que le système adsorbat-adsorbant est hautement hétérogène.

L'étude de l'effet de concentration initiale du colorant du vert de malachite VM permet de constater que l'équilibre est atteint pour de fortes concentrations (500 mg/L), en outre la quantité adsorbée croît avec l'augmentation de la concentration, cette croissance se justifie par

l'évolution du gradient de concentration qui stimule la diffusion des molécules vers les pores de l'adsorbant.

A partir des résultats de la modélisation des isothermes d'absorption on observe que le modèle de Langmuir I décrit mieux nos résultats expérimentaux de l'adsorption du VM sur le charbon actif préparé avec un coefficient de corrélation $R^2=0,997$, donc ce modèle est le plus adapté.

Avec ces résultats obtenus pour le charbon actif que nous avons préparés, cependant, ce n'était pas très bien comme prévu, car ces matériaux possèdent des capacités d'adsorption médiocre et cela peut être dû à la faible quantité d'imprégnation (30%), il est recommandé à l'avenir d'augmenter le taux d'imprégnation pour les rendre parfaitement adaptés à une application dans le traitement des eaux, notamment pour décolorer les effluents issus de l'industrie

