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

Université Amar Telidji- Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GÉNIE DES PROCÉDÉS

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : MESSAD Thamila & GAFSI Maria

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Génie des Procédés

OPTION : Génie des Procédés de l'Environnement

Thème

Fabrication d'un matériau composite incorporant du verre recyclé pour l'élimination des ions polluants industriels.

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Pr. DJEDID Mebrouk	Professeur	Président
Dr. ADJEROUD Yasmina	MCA	Examinatrice
Pr. BOUDAOUD Asma	Professeur	Rapportrice
Dr. AMRI Mohammed Tahar	MCA	Rapporteur
Dr. CHEBBA Samira	Docteur	Co-Rapporteur
Dr. OULAD DJEDID Lakhder	MCA	Représentant de CDE
Dr. ALAOUNIA Nadjette	MCB	Invitée

Promotion : JUIN 2026

Remerciement

Ce mémoire marque la fin d'un parcours, mais aussi l'aboutissement de plusieurs mois de travail, d'efforts, de doutes parfois, et de belles découvertes. À ce titre, nous souhaitons remercier toutes les personnes qui ont, chacune à leur manière, contribué à cette aventure.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadrante, **Pr. Boudaoud Asma**, pour son accompagnement, sa disponibilité et ses précieux conseils tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous exprimons également notre gratitude à **Dr. Amri Mohammed Tahar** pour son encadrement et ses orientations dans l'aspect économique de ce travail.

De même, nous tenons à remercier chaleureusement notre Co-encadrante, Mme **Dr. Chebba Samira**, pour son soutien constant et son suivi attentif.

Ce travail de recherche a été réalisé au sein des laboratoires du Département de Génie des Procédés de la Faculté de la Technologie à l'Université AMMAR TELIDJI Laghouat. À cette occasion, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à l'ensemble des enseignants ainsi qu'aux ingénieurs de laboratoire pour leur aide précieuse , leur soutien technique et leur disponibilité constante tout au long de ce projet.

.

Nous adressons notre profonde reconnaissance aux membres du jury : au **Pr. Dr. Djedid Mebrouk**, pour avoir accepté de présider ce jury, et au **Dr. Adjeroud Yasmina** pour avoir examiné ce travail.

Nos vifs remerciments s'adressent à **Dr OULAD DJEDID Lakhder**, représentant du CDE, pour sa présence honorable et avoir accepté d'évaluer notre travail.

Enfin, nous ne pourrions oublier nos amis, qui ont su nous écouter, nous motiver et partager nos moments de joie comme de doute; merci pour votre présence, vos relectures avisées, et surtout pour votre précieuse amitié. À nos familles, véritables piliers tout au long de notre parcours, nous adressons un merci du fond du cœur pour votre soutien indéfectible, vos encouragements constants, et votre confiance en nos capacités. Sans vous, rien n'aurait été possible

Dédicace

Ce travail est le fruit d'un long chemin, et je souhaite aujourd'hui
l'offrir à ceux qui ont donné un sens à chacun de mes pas.

À ma mère, pilier de ma vie, son soutien indéfectible et ses sacrifices constants
qui m'ont permis d'avancer avec courage et confiance,
et c'est grâce à elle que j'ai trouvé le courage d'avancer.

À mon père, Je garde en moi l'image de ce regard rempli de fierté et de bonheur
qu'il posait sur moi, et j'aurais tant aimé revoir cette lumière dans
tes yeux aujourd'hui. Même dans le silence et l'éloignement des mots et
les souvenirs son amour est resté gravé en moi comme une lumière constante,
intacte et vivant.

Au fond de mon cœur, je sais qu'il aurait été fier en moi,
et cette pensée m'accompagne à chaque étape de ma vie.
À mes sœurs et mes frères, pour leur présence, leur soutien et leurs encouragements
tout au long de mon parcours, je ne sais pas ce que j'aurais fait sans vous.

À mes petits anges, RANIA,AMIR,RACIM,ANES,ADEM qui illuminent ma vie
par leur innocence et leur joie, Je vous dédie cette réussite,
en espérant qu'elle vous inspire un jour et à poursuivre vos ambitions.

À mes meilleures amies, ainsi qu'à toutes les personnes formidables que j'ai eu la
chance de rencontrer durant ce parcours.

Merci pour votre présence, votre soutien,
vos rires et tous ces moments inoubliables qui ont rendu ce chemin plus doux et
plus beau,
Ce fut un véritable plaisir de partager ces années avec vous.

.Enfin, à tous ceux que j'aime et à tous ceux qui m'aiment, de près ou de loin

MARIA

Dédicace

À ceux qui ont illuminé ma route et nouri mon inspiration ,

À mes chers parents, mon cher père SALAH, et à ma chère maman HADJIRA,
sources inépuisables d'amour, de tendresse et de soutien,
qui m'ont inculqué le goût du savoir et la persévérance dans l'effort.
Vous êtes les piliers de ma vie, ceux qui m'ont transmis les valeurs essentielles
et m'ont donné des ailes pour voler vers mes rêves,

À mes sœurs, mon frère, et mes petits anges SALLY, ILYAS, SAWSAN, SERINE,
complices d'enfance et amis précieux, qui ont partagé mes joies et mes peines,
m'ont encouragé dans les moments difficiles et ont célébré mes succès.

À ma belle-famille mes, oncles et mes tantes, mes cousins et mes cousines.

À mes amis fidèles, compagnons de route indéfectibles,
qui ont illuminé mon quotidien avec leur amitié sincère
et leurs encouragements constants.
Je dédie ce mémoire, fruit de mon travail et de mes réflexions, en témoignage
de ma profonde gratitude pour votre présence inestimable et
votre soutien indéfectible dans ma vie.

Que ces pages soient le reflet de l'amour, du respect et de l'admiration
que je vous porte.

À quiconque a croisé mon chemin et y a laissé une empreinte de bienveillance,
de près ou de loin.

Avec tout mon cœur et mon amour.

THAMILA

Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale …….	1
Chapitre I: Aspect théorique	
I.1: Introduction……..……	3
I.2 : Eaux usées…….……	3
I.2.1 : Sources…….……	3
I.2.1.1 :Les eaux résiduaires domestiques ……..	3
I.2.1.2 : Les eaux issues de l'industrie……	4
I.2.1.3 : Les eaux pour l'irrigation …….	4
I.2.1.4: Les eaux de pluie…….……...	4
I.2.2: Caractéristiques……..……	4
I.2.2.1: Composition physico-chimique des eaux résiduaires……	4
I.2.2.2: Caractéristiques biologiques:micro-organismes pathogènes ……	5
I.2.2.3: Température,pH et conductivité électrique..……..	5
I.2.2.4: Indices de pollution……..……...	5
I.2.3: Effluents de l'industrie textiles……	6
I.2.3.1: Origine et nature des effluents textiles…….	6
I.2.3.2: Polluants colorés (colorants et teintures)…….	6
I.3: Techniques de traitements des eaux usées…….…	8
I.3.1: Méthode physique……..	8
I.3.2: Méthode chimique……	11
I.3.3: Méthodes biologiques…….	11
I.3.3.1: Procédés aérobies…….	12

I.3.3.2: Procédés anaérobies……	12
I.3.4: Procédés d'oxydation avancée(POA)……	13
I.4: Adsorption……..	14
I.4.1: Les types d'adsorption……..	14
I.4.1.1: Adsorption chimique……	14
I.4.1.2 : Adsorption physique……	14
I.4.2: Principe…….	15
I.4.3: Méthodes d'adsorption……	16
I.4.3.1: Adsorption en batch……..….	16
I.4.3.2: Adsorption en colonne…….	16
I.4.4: Facteurs influençant l'équilibre d'adsorption……	17
I.4.5: Rendement d'élimination du colorant et capacité d'adsorption……	18
I.4.6: Isothermes d'adsorption…….	19
I.4.6.1: Isotherme de FREUNDLICH ……...…	20
I.4.6.2: Isotherme de LANGMUIR……..	20
I.4.7: Les avantages par rapport aux autres techniques……..	20
I.5: Adsorbants……..	21
I.5.1: Adsorbants les plus utilisées dans l'industrie……...….	21
I.5.1.1: Les argiles activées…….	21
I.5.1.2: Les gels de silice……	21
I.5.1.3: Les alumines……...……	21
I.5.1.4: Les zéolites……	22
I.5.1.5: Le charbon actif……..…	22
I.5.2: Applications industrielles des adsorbants…….	22

I.5.3: Verre recyclé…….. 22
I.5.4: Caractéristiques du verre recyclé comme un adsorbant……. 23
I.5.5: Autres matériaux à faible coût…… …… 23
I.5.5.1: Les résidus agricoles…… 23
I.5.5.2: Déchets industriels/naturels……. 23
Références bibliographiques I…… 24

Chapitre II: Protocole exprimental

II.1: Introduction……..…… 27
II.2 : Appareillage et réactifs……. 27
II.2.1: Appareillage……..…….. 27
II.2.2: Réactifs…….……. 27
II.2.3: Préparation des réactifs……. 28
II.2.3.1: Préparation de NaOH (0.2N)……. 28
II.2.3.2: Préparation de H_2 SO_4 (0.2N)……. 29
II.2.3.3: Préparation des solutions mères (1000 ppm)……. 29
II.2.4: Préparation de l'adsorbant…….. 29
II.3: Techniques d'analyse…… 29
II.3.1: Principe de fonctionnement……. 30
II.3.1.1. Spectrophotométrie UV-Visible……..……. 30
II.3.1.2: Microscopie électronique à balayage (MEB)…… 31
II.3.1.3: Analyse BET……. 31
II.3.1.4: Spectroscopie FTIR…… 32
II.3.2: Objectif de chaque technique…….. 33
II.4: Test d'Adsorption des Colorants…… 33
II.5: Essais d'adsorption du BM……. 33
II.5.1: Influence de la masse de l'adsorbant…….. 33
II.5.2: Influence de pH…… 34

II.5.3: Influence de temps de contact…… 34
II.5.4: Influence de température…….. 34
Références bibliographiques II…… 35

Chapitre III: Résultats et discussion

III.1: Introduction……..……. 36
III.2: Test préliminaire d'adsorption…… 36
III.3: Caractérisations de l'adsorbant……. 38
III.3.1: Analyse par BET…… 38
III.3.2: Analyse par FTIR…… 39
III.3.3: Analyse par MEB…… 41
III.4: Étude des effets des paramètres sur l'adsorption de BM…… 42
III.4.1: Effet de masse……. 42
III.4.2: Effet de pH…….. 43
III.4.3: Effet de temps de contact…… 44
III.4.4: Effet de concentration initiale…… 45
III.4.5: Effet de température…….. 46
III.5: Étude cinétique…….. 47
III.6: Étude isothermique…… 50
III.7: Étude thermodynamique…… 53
III.8: Étude comparative…… 54
Références bibliographiques III…… 56

Conclusion générale…… 58
Résumé

Liste des abréviations

MES: Matières en suspension

DCO: Demande chimique

DBO : Demande Biochimique en Oxygène

DBO_5 : Demande Biochimique en Oxygène sur 5 jours

POA: Procédés d'oxydation avancées

K: kelvin

kJ: kilo joule

R(%): Taux d'élimination

tr/min: Tour par minute

IR: Infrarouge

t: Temps

FAD : Flottation à air dissous

V: Volume de solution

m: Masse d'absorbant

q_t : Quantité de soluté adsorbée à l'instant

q_e : Quantité de soluté adsorbée à l'équilibre

K_L : Constante de Langmuir

K_F: Constante de Freundlich

n : Coefficient de Freundlich

R_2: Coefficient de régression

K_1 : Constante de vitesse de premier ordre

K_2 : Constante de vitesse de second ordre

q_{max}: Capacité maximale d'adsorption

COV: Composés organiques volatils

pH_{pzc}: Point de charge zéro

pH : Potentiel d'hydrogéne

UV : Ultra violet

PM : Poids moléculaire

λmax : Longueur d'onde maximale

N : Normalité

Ppm : Parties par million

nm : Nanométre

BM : Bleu de méthylène

CV : Cristal violet

MO : Méthyle orange

°C : Degré celsius

C : Concentration

C_0 : Concentration initiale de l'adsorbat

C_e : Concentration à l'équilibre de l'adsorbat

PFO : Modèle pseudo- first order

PSO : Modèle pseudo- second order

h : Vitesse initiale d'adsorption

ΔG° : L'enthalpie libre standard

ΔS° : L'entropie standard

ΔT° : Différence de température

ΔH° : L'enthalpie standard

BJH : la méthode Barrett- Joyner- Halenda

Liste des figures

Figure I.1 : Dégrillage…….…… 9

Figure I.2 : Schéma du procédé de filtration dans une station d'épuration…… 9

Figure I.3 : La centrifugation des boues dans le traitement des eaux usées…… 10

Figure I.4 : Schéma de la flottation assistée par air dissous (DAF) dans le traitement des eaux usées…….……. 10

Figure I.5 : Coagulation-Floculatione……. 11

Figure I.6 : Bassin d'aération dans une station d'épuration des eaux usées (procédé des boues activées)…… 13

Figure I.7: Procédés d'oxydation avancées……. 13

Figure I.8: Comparaison entre le principe de l'adsorption chimique et physique……. 16

Figure I.9: Processus d'adsorption batch…… 16

Figure I.10: Désigne basique d'adsorption en colonne…… 17

Figure I.11: Poudre de verre…… 23

Figure II.1: Séctrophotométre UV-visible……. 31

Figure II.2: La microscopie électronique à balayage (MEB)…… 31

Figure II.3: Analyse BET de surface……..…… 32

Figure II.4: La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)…… 32

Figure III.1: Le taux d'adsorption de différents types de colorant…… 37

Figure III.2: Courbe d'isotherme d'adsorption–désorption N_2 de verre recyclé……. 38

Figure III.3: Spectre FTIR de verre recyclé avant et après l'adsorption de BM……... 39

Figure III.4: Morphologie de surface de verre recyclé avant et après l'adsorption de BM 41

Figure III.5: Influence du la masse de l'adsorbant sur l'adsorption du BM…….….. 42

Figure III.6: Influence du pH de la solution sur l'adsorption du BM……. 43
Figure III.7: Influence du temps de contact sur l'adsorption du BM…….. 44
Figure III.8: Influence du la concentration initiale sur l'adsorption du BM…….. 45
Figure III.9: Influence du la Température sur l'adsorption du BM…… 46
Figure III.10: Cinétique d'adsorption de BM (à l'aide d'un modèle de pseudo- premier ordre) à 298 K…….. 48
Figure III.11: Cinétique d'adsorption de BM (à l'aide d'un modèle de pseudo-second ordre) à 298 K……...…….. 49
Figure III.12: Linéarisation d'isotherme d'adsorption de BM selon le Modèle de Freundlich……...…….. 51
Figure III.13: Linéarisation d'isotherme d'adsorption de BM selon le Modèle de Langmuir……. 51
Figure III.14: Variation de ΔG en fonction de T……..…… 53

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Principaux paramètres physico-chimiques des eaux usée…… 6
Tableau I.2: Récapitulatif des classes de colorants…… 8
Tableau I.3 : Comparatif des techniques……... 12
Tableau I.4 : Comparaison entre l'adsorption chimique et physique…… 15
Tableau I.5 : Comparaison entre l'adsorption batch et en colonne…… 17
Tableau II.1. Réactifs utilisés et leurs propriétés……..…… 28
Tableau III.1: Estimation de la surface spécifique BET, volume poreux et diamètre moyen des pores……..…… 39
Tableau III.2: Attribution des principales bandes FTIR de l'échantillon de verre recyclé avant et après l'adsorption de BM…… 40

Tableau III.3: Paramètres cinétiques d'adsorption de BM à 298 K……	49
Tableau III.4 : Les constantes de différentes isothermes d'adsorption de BM……..	52
Tableau III.5: Les paramètres thermodynamique de l'adsorption de BM…….	53
Tableau III.6: Adsorption de BM sur des différents adsorbants……	54

Introduction générale

Représentant environ 70% de la surface de la planète Terre, l'eau est pourtant disponible en quantité limitée sous forme d'eau potable, bien qu'elle soit indispensable à toute forme de vie. Cette rareté s'accentue du fait des rejets de polluants organiques dans les milieux aquatiques, qui compromettent gravement sa qualité et sa disponibilité. En effet, l'eau constitue un élément fondamental pour le maintien de la vie sur Terre : elle intervient dans les processus biologiques des humains, des animaux et des plantes, régule les fonctions vitales, favorise la croissance végétale et assure la survie des écosystèmes.

La pollution de l'eau représente un problème mondial en pleine expansion, provoquée par divers contaminants tels que les métaux lourds, les produits chimiques organiques et les colorants. Parmi ces polluants, les colorants industriels soulèvent une inquiétude particulière, car ils sont souvent toxiques, cancérigènes et résistants à la dégradation biologique, ce qui les rend persistants dans l'environnement.

Les colorants proviennent essentiellement des industries textiles, alimentaires, cosmétiques et du tannage. En l'absence de traitement adéquat, ces substances sont déversées directement dans les cours d'eau et les nappes phréatiques. Ces effluents colorés aggravent ainsi la pollution des ressources hydriques. La gestion et la réduction de ces rejets sont donc cruciales pour préserver les ressources en eau et maintenir des écosystèmes sains.

Pour traiter les effluents colorés issus des industries, plusieurs méthodes physiques et chimiques sont couramment mises en œuvre, telles que la coagulation-floculation, la filtration membranaire et l'adsorption. Parmi ces approches, l'adsorption se révèle particulièrement efficace et simple à implémenter, car elle repose sur l'utilisation de matériaux poreux à grande surface spécifique qui attirent et retiennent les molécules de colorants par des forces physiques ou chimiques.

Dans cette perspective, le présent travail s'inscrit dans le cadre de la valorisation du verre recyclé pour l'élimination des ions polluants industriels. L'objectif est l'obtention d'un matériau capable de contribuer efficacement à la dépollution des eaux tout en valorisant un déchet solide largement disponible. Par ailleurs, cette étude inclut une analyse physico- chimique approfondie de la poudre de verre recyclé par les analyses BET, FTIR et MEB, visant à déterminer sa surface spécifique, à identifier les groupements fonctionnels à sa surface et à examiner sa topographie texturale, ce qui permet de mieux comprendre les mécanismes qui régissent la fixation des colorants.

Afin d'évaluer le potentiel du verre recyclé comme adsorbant pour la dépollution des eaux colorées synthétiques, cette étude s'organise autour de trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre, étude théorique sur les eaux, les colorants et le processus

d'adsorption, posera le contexte de la pollution aqueuse.

- Le deuxième chapitre détaillera la méthodologie expérimentale mise en œuvre pour évaluer l'efficacité du verre recyclé dans l'élimination du bleu de méthylène.

- Le troisième chapitre présentera les résultats obtenus et leur analyse approfondie.

Enfin, une conclusion générale synthétisera les principaux résultats et mettra en lumière le potentiel du verre recyclé comme solution durable pour le traitement des eaux contaminées par des colorants et les perspectives de ce projet.

Chapitre I:

Aspect théorique

I.1. Introduction

Ce chapitre explore la pollution des eaux usées par des polluants colorants, tels que les colorants textiles ou industriels, qui posent un défi majeur en raison de leur persistance, toxicité et impact visuel sur les écosystèmes aquatiques. Ces composés organiques récalcitrants nécessitent des traitements avancés comme la distillation pour séparer les volatils, la filtration pour retenir les particules, la coagulation-floculation pour agglomérer les colloïdes, ou l'oxydation avancée générant des radicaux hydroxyles destructeurs. Parmi ces techniques, l'adsorption se distingue particulièrement par sa simplicité, son efficacité opérationnelle et son faible coût, utilisant des adsorbants pour capter sélectivement les colorants sans produire de sous-produits toxiques.

I.2. Eaux usées

Les eaux usées désignent l'ensemble des eaux ayant subi une altération de leurs caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques à la suite d'activités humaines domestiques, industrielles, agricoles ou urbaines. Elles résultent principalement de l'utilisation de l'eau dans divers procédés et usages quotidiens, ce qui entraîne l'introduction de substances dissoutes ou en suspension modifiant sa qualité initiale.

Ces eaux peuvent contenir des composés organiques, des substances minérales, des micropolluants, des métaux lourds ainsi que divers éléments issus des procédés industriels. Selon leur origine, on distingue généralement les eaux usées domestiques, industrielles et pluviales. Leur composition varie en fonction des activités à l'origine du rejet et des procédés utilisés. En raison de leur potentiel d'impact sur les écosystèmes aquatiques et la santé humaine, les eaux usées nécessitent la mise en œuvre de techniques adaptées de traitement visant à réduire leur concentration en polluants avant rejet dans le milieu naturel ou réutilisation. Dans le contexte industriel, la présence d'ions métalliques et d'éléments toxiques justifie l'application de procédés spécifiques d'élimination, tels que l'adsorption ou les traitements physico-chimiques avancés.

Provenance et composition des eaux résiduaires En fonction de la source des polluants, on classe les eaux usées en quatre catégories distinctes [1].

I.2.1. Sources

I.2.1.1. Les eaux résiduaires domestiques

Ces dernières sont issues des diverses utilisations domestiques de l'eau. Elles sont principalement sources de pollution organique. On distingue les eaux ménagères, provenant des salles de bain et des cuisines, généralement chargées en détergents,

graisses, solvants, résidus organiques, etc. et les rejets provenant des toilettes, contenant diverses substances organiques azotées et microbes fécaux [2].

I.2.1.2. Les eaux issues de l'industrie

Elles se distinguent fortement des eaux résiduaires domestiques. Leurs attributs diffèrent d'un secteur à l'autre. Outre les substances organiques, azotées ou phosphorées, elles peuvent aussi comprendre [3]:

- Des graisses (secteur agroalimentaire) ;
- Des hydrocarbures (raffinage) ;
- Des métaux (secteur de la métallurgie) ;
- Des acides, des bases et une variété de produits chimiques (diverses industries chimiques, tanneries) ;
- De l'eau chaude (système de refroidissement des centrales thermiques) ;
- Des matières radioactives (centrales nucléaires et gestion des déchets radioactifs).

I.2.1.3. Les eaux pour l'irrigation

L'agriculture demeure le principal utilisateur des ressources en eau, Les activités agricoles engendrent plusieurs types de pollutions :

- Apport de nitrates et phosphates provenant des eaux de surface, utilisés comme fertilisants
- Utilisation de pesticides chlorés ou phosphorés, herbicides et insecticides
- Fourniture de sulfate de cuivre et de composés arsenicaux pour la protection des plantes [4].

I.2.1.4. Les eaux de pluie

Dans le cas où le système de collecte des eaux usées est unitaire, les eaux pluviales et de ruissellement sont considérées lors du traitement dans une station d'épuration. Les eaux pluviales peuvent transporter des polluants de l'atmosphère et contaminer les ressources d'eau de surface et souterraines par infiltration et ruissellement. Les polluants majeurs impliqués comprennent le SO_2, le NO et ses composés, ainsi que les particules[5].

I.2.2. Caractéristiques

I.2.2.1. Composition physico-chimique des eaux résiduaires

Les eaux usées constituent un assemblage complexe de composés chimiques et physiques. Ces substances renferment des particules en suspension (MES), de la

matière organique dissoute, des éléments nutritifs comme l'azote (NH_4^+, NO_3^-) et le phosphore (PO_4^{3-}), ainsi que des métaux lourds et des composés toxiques, en fonction de l'origine des décharges. La Demande Chimique en Oxygène (DCO) et la Demande Biochimique en Oxygène sur 5 jours (DBO_5) sont des paramètres essentiels qui témoignent de la pollution organique des eaux usées : une élévation de ces valeurs indique une plus grande contamination de l'eau [6].

I.2.2.2. Caractéristiques biologiques : micro-organismes et charge pathogène

Les eaux usées domestiques et urbaines contiennent une abondante diversité de micro-organismes, y compris des bactéries hétérotrophes et des agents pathogènes comme Escherichia coli, Salmonella spp. et des entérocoques. Les rejets sanitaires et les matières fécales sont à l'origine de cette charge microbienne. La présence de ces micro-organismes sert d'indicateur pour évaluer la qualité sanitaire de l'eau et l'importance de traitements appropriés avant son rejet dans l'environnement naturel[7].

I.2.2.3. Température, pH et conductivité électrique

Selon les types de rejets, le pH des eaux résiduaires peut fluctuer entre acide et alcalin. Par exemple, les rejets industriels dans le secteur du textile ou de l'agroalimentaire peuvent présenter une alcalinité élevée (pH > 9), alors que certains effluents chimiques peuvent être acides (pH < 6).

L'électroconductivité est habituellement forte, car ces eaux renferment des ions dissous tels que les sels, les nitrates et les phosphates. L'activité microbienne et les réactions chimiques dans les procédés de traitement sont directement affectées par la température [8].

I.2.2.4. Indices de pollution :

- Demande Biologique en Oxygène, Demande Chimique en Oxygène, Matières en Suspension
- Les indices traditionnels de la pollution des eaux résiduaires sont les suivants :
- DBO_5 (Demande Biochimique en Oxygène) : mesure la portion biodégradable de la substance organique.
- DCO (Demande Chimique en Oxygène) : évalue la quantité globale de substances organiques pouvant être oxydées.
- MES (Matières en Suspension) : des particules solides non dissoutes qui causent la turbidité.

Une forte charge organique est indiquée par des niveaux élevés de DCO et de DBO, ce qui requiert un traitement approprié avant leur rejet[9].

Tableau I.1 : Principaux paramètres physico-chimiques des eaux usées [6].

Paramètre	**Impact**	**Signification**	**Unité**
pH	Affecte traitement biologique	Acidité / Alcalinité	**-**
DBO_5	Plus élevé = plus pollué	Matière organique biodégradable	**mg/L**
DCO	Indicateur de pollution globale	Matière organique totale oxydable	**mg/L**
MES	Turbidité et colmatage	Matières en suspension	**mg/L**
Conductivité	Indique charge ionique	Ionisation des sels	**µS/cm**

I.2.3. Effluents de l'industrie textile

I.2.3.1. Origine et nature des effluents textiles

Les effluents de l'industrie textile sont des eaux usées générées au cours des différentes étapes de traitement des fibres et des tissus, Les opérations de teinture, blanchiment, lavage et finition des tissus génèrent des résidus textiles. Ces produits renferment des colorants artificiels, des agents tensioactifs, des sels non organiques et différents additifs utilisés dans les processus industriels [10].

I.2.3.2. Polluants colorés (colorants et teintures)

a. Définition et rôle dans les effluents textiles

Les colorants pour tissus sont des composés organiques fabriqués de manière synthétique, ayant pour but d'offrir une teinte stable et pérenne aux fibres textiles. Ils ont une configuration moléculaire complexe qui inclut habituellement un groupe chromophore chargé de la couleur et un groupe auxochrome qui favorise l'adhésion à la fibre. Les colorants constituent la source prédominante de pollution visible dans les rejets textiles. On évalue que de 10 à 20 % des teintures employées dans le processus de coloration ne s'attachent pas aux fibres et sont évacués dans les eaux résiduaires. ces

rejets provoquent une forte coloration des eaux et augmentent considérablement la charge organique totale [11].

b. Classification tinctoriale des colorants

Selon leur méthode d'attachement sur les fibres, on peut catégoriser les teintures pour textiles. Les catégories principales incluent [12] :

- Les colorants réactifs (qui se lient de manière covalente avec la fibre)
- Les colorants directs (association par interaction physique)
- Les teintures dispersées (employées pour les fibres synthétiques)
- Les teintures acides (surtout destinées à la laine et à la soie)
- Les teintures alcalines
- Les colorants azoïques constituent la catégorie majoritaire sur le plan industriel, caractérisés par l'existence d'un groupe azote (-N=N-). Cette catégorisation est cruciale car elle définit comment le colorant se comporte dans les effluents et sa simplicité ou complexité de traitement.

c. Propriétés physico-chimiques et persistance

La structure aromatique complexe des colorants textiles leur confère une stabilité chimique remarquable. Ils sont fabriqués pour résister à la luminosité, aux fluctuations de pH et aux substances oxydantes, ce qui justifie leur faible dégradabilité dans l'environnement. De nombreux colorants azoïques ont la possibilité de se décomposer partiellement en amines aromatiques qui pourraient être toxiques. Leur capacité de solubilité dans l'eau favorise leur dispersion dans les environnements aquatiques, tandis que leur structure stable contribue à leur persistance face aux traitements biologiques standards [13].

Tableau I.2: Récapitulatif des classes de colorants[12].

Classe de colorant	Type de liaisons	Difficulté de traitement	Exemple
Basique	Électrostatique (cationique)	Moyenne	Bleu de Méthylène, Cristal Violet
Réactif	Covalente	Élevée	Réactive Blue 19
Azoïque	Groupe-N=N	Très élevée	Méthyle orange, acid orange 7
Dispersé	Faible solubilité	Moyenne	Disperse rouge
Direct	Adsorption	Moyenne	Noire direct

I.3. Techniques de traitement des eaux usées

Les méthodes de traitement des eaux usées regroupent tous les procédés appliqués pour supprimer ou minimiser les substances nuisibles contenues dans les effluents avant leur dispersion dans l'environnement ou leur réemploi. Ces méthodes s'appuient sur des principes de physique, chimie et biologie pour séparer, transformer ou stabiliser les contaminants présents dans l'eau. En fonction des contaminants et des buts visés, diverses techniques peuvent être assemblées dans un processus de traitement sur mesure[14].

I.3.1. Méthodes physiques

Il s'agit de processus de séparation de phases non miscibles, dont au moins un est à l'état liquide, en si dissous quelques-uns des procédés les plus fréquemment utilisés :

- **Le dégrillage :** qui consiste à supprimer les résidus flottants et les déchets volumineux via des grilles installées dans le canal d'approvisionnement, a pour but de préserver les installations contre les blocages



Figure I.1 : Dégrillage [15].

❖ **La filtration :** est le processus qui consiste à faire passer un mélange de liquide et de solide à travers un milieu poreux (le filtre), qui retient les solides (appelés « gâteau de filtration ») tout en laissant passer les liquides (le « filtrat »)

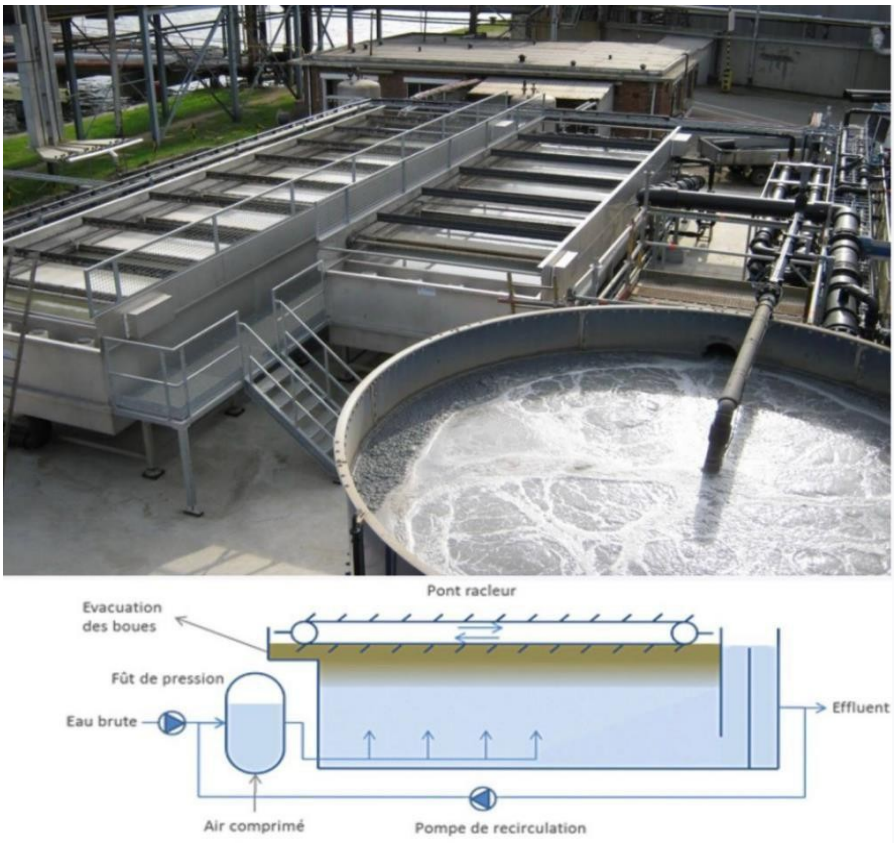


Figure I.2 : Schéma du procédé de filtration dans une station d'épuration [16].

❖ **La décantation :** exploite les forces gravitationnelles pour distinguer les particules dont la densité dépasse celle du liquide en entraînant leur sédimentation

❖ **La centrifugation :** un procédé de séparation basé sur l'utilisation de la force centrifuge pour le détachement du mélange dans un mouvement rotatif

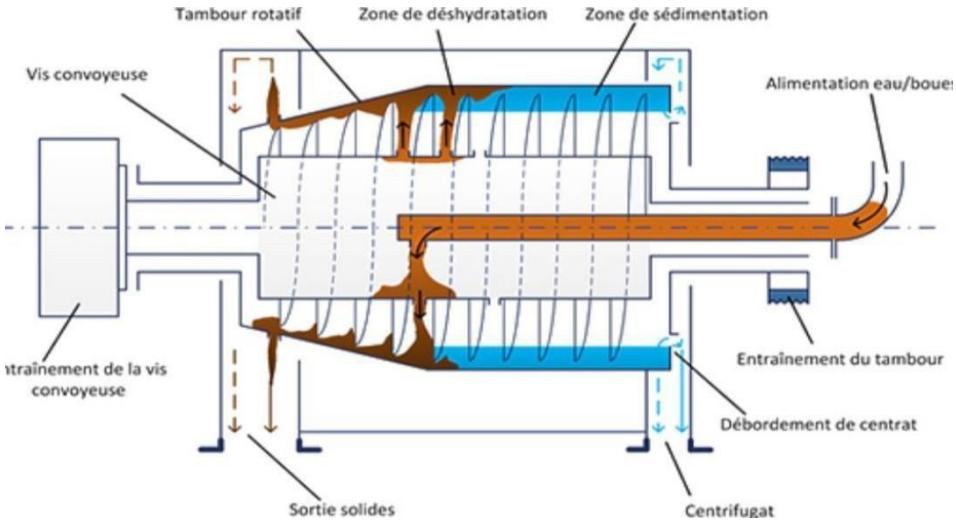


Figure I.3 : La centrifugation des boues dans le traitement des eaux usées [15].

❖ **La flottation :** des phases solides et liquides par la flottation, basée sur le principe de la poussée d'Archimède. En flottation naturelle, les flocs de densité inférieure montent sans entrave à la surface. On obtient la flottation assistée grâce à l'introduction d'air [17].

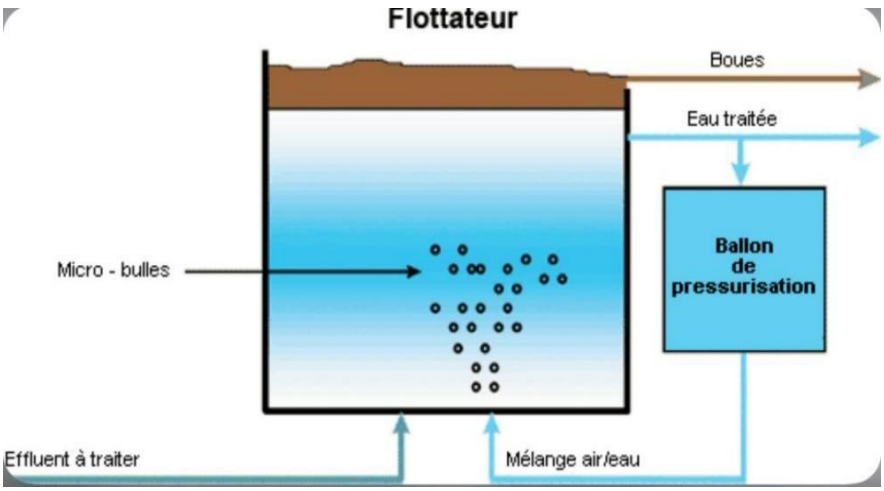


Figure I.4 : Schéma de la flottation assistée par air dissous (FAD) dans le traitement des eaux usées

I.3.2. Méthodes chimiques

Les méthodes chimiques de traitement utilisent des réactions chimiques pour neutraliser, oxydiser, précipiter ou coaguler les polluants dissous dans les eaux usées. Elles sont souvent appliquées lorsque les procédés physiques ne suffisent pas, notamment pour les matières dissoutes ou toxiques.

Les principaux procédés chimiques :

- **Coagulation-Floculation**

Cela implique l'ajout de produits chimiques comme les sels d'aluminium ou de fer (ex. : sulfate d'aluminium, chlorure ferrique). Ces produits neutralisent les charges électriques des particules fines, favorisent leur agglomération en flocs et facilitent leur décantation.



Figure I.5 : Coagulation-Floculation [18].

- **Neutralisation du pH** L'eau usée peut être trop acide ou trop alcaline. L'ajout d'acides ou de bases (ex. : HCl, NaOH) permet d'ajuster le pH dans la plage optimale pour les traitements biologiques ou pour réduire la toxicité.
- **Oxydation / Réduction** Des agents oxydants comme le chlore (Cl_2), l'ozone (O_3), le permanganate de potassium ($KMnO_4$) ou encore le peroxyde d'hydrogène

(H_2 O_2) sont utilisés pour dégrader des polluants organiques récalcitrants ou pour désinfecter les microorganismes pathogènes.

I.3.3. Méthodes biologiques

Les méthodes biologiques utilisent des micro-organismes (bactéries, protozoaires) pour dégrader la matière organique biodégradable. Ces procédés sont les plus courants dans le traitement secondaire des eaux usées.

Y'a deux grandes catégories :

I.3.3.1: Procédés aérobies

Dans ces procédés, les micro-organismes utilisent l'oxygène dissous pour métaboliser les matières organiques.

❖**Boues activées**

Une culture de bactéries est maintenue en suspension dans un bassin aéré. Les micro-organismes dégradent la matière organique, puis sont séparés par décantation.

❖**Filtres biologiques**

L'eau passe à travers un support (gravier, plastique) colonisé par des micro-organismes qui consomment les polluants.

Tableau I.3 : Comparatif des techniques.

Exemples	Efficacité	Type de pollution traitée	Technique
Décantation, filtration	Haute	Matières en suspension	Méthodes physiques
Coagulation, Oxydation	Moyenne à Haute	Polluants dissous	Méthodes chimiques
Boues activées, filtres	Très Haute	Matière organique biodégradable	Méthodes biologiques

I.3.3.2: Procédés anaérobies

Dans ces procédés, l'oxygène est absent et les bactéries convertissent la matière organique en méthane (CH_4) et CO_2 .

❖**Digestion anaérobie :** Elle est adaptée aux boues riches en matière organique et produit du biogaz comme sous-produit .



Figure I.6 : Bassin d'aération dans une station d'épuration des eaux usées (procédé des boues activées) [19].

I.3.4. Procédés d'oxydation avancée (POA)

I.3.4.1. Définition et principe fondamental des POA

Les techniques d'oxydation avancée (POA) sont des méthodes de purification des eaux qui reposent sur la production in situ de radicaux hydroxyles (OH°), des entités extrêmement réactives dotées d'un fort potentiel d'oxydation (2,8 V). Ces radicaux ont la capacité d'oxyder rapidement un large éventail de polluants organiques récalcitrants et non biodégradables, entraînant leur décomposition partielle ou leur transformation intégrale en CO_2 et H_2O.

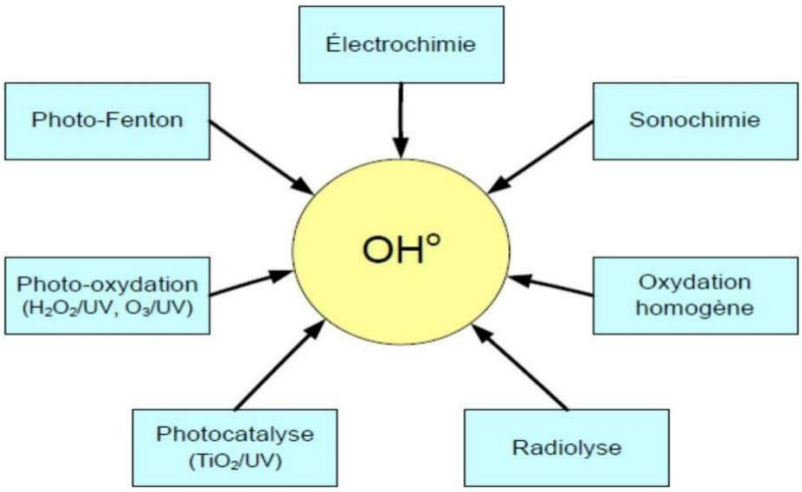


Figure I.7: Procédés d'oxydation avancée[20].

I.4. Adsorption

L'adsorption est une technique utilisée pour le traitement des eaux, elle désigne un phénomène physico-chimique par lequel des molécules d'un fluide (gaz ou liquide), appelées adsorbat, se fixent sur la surface d'un solide poreux, nommé adsorbant. Ce processus repose sur des forces d'attraction moléculaires de natures et d'intensités variées, qui se manifestent à l'interface entre deux phases, comme gaz-solide, liquide-solide ou liquide-liquide, et assurent la cohésion des phases condensées (liquide ou solide). L'adsorbant, doté de surfaces internes et externes riches en cavités, attire ces molécules grâce à ses propriétés structurales : taille, forme et distribution des pores, ainsi que la nature chimique des groupes fonctionnels en surface. L'efficacité de l'adsorption dépend largement de ces caractéristiques. Le processus inverse, la désorption, correspond à la libération des molécules adsorbées de la surface du solide [21].

1.4.1. Les Types d'adsorption

L'adsorption peut être de nature physique (physisorption) ou chimique (chimisorption), selon les énergies impliquées entre l'adsorbant et l'adsorbat, ainsi que des forces déterminant le phénomène d'adsorption (forces physiques ou chimiques) [22].

I.4.1.1. Adsorption chimique

L'adsorption chimique est un processus irréversible causé par la création de liaisons chimiques covalentes ou ioniques entre les molécules de l'adsorbat et un point précis sur la surface de l'adsorbant.

Lors de la chimisorption, les énergies impliquées sont de plus en plus importantes (80 kJ/mol), ce qui entraîne une libération de chaleur (phénomène exothermique) .

I.4.1.2. Adsorption physique

On parle de physisorption lorsque des forces d'attraction de type Van der Waals ou des forces dues aux interactions électrostatiques de polarisation sont à l'origine de ce processus.

Il s'agit d'une création de liaisons faibles entre l'adsorbat et l'adsorbant, nécessitant des énergies inférieures à (80kJ/mol) donc les phénomènes sont réversibles .

Les caractéristiques comparatives sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau I.4 : Comparaison entre l'adsorption chimique et physique[23].

Propriété	**Adsorption chimique**	**Adsorption physique**
Type de liaisons	Liaisons chimiques	Liaisons de Van Der Waals
Température de processus	Plus élevée que la température d'ébullition de l'adsorbat	Relativement faible par rapport au température d'ébullition de l'adsorbat
Individualité des molécules	Destruction de l'ndividualité des molécules	Conservé
Désorption	Dificile	Facile
Cinétique	Très lente	Rapide indépendante de la température
Chaleurs d'adsorption	(40 – 400kJ/mol)	< (40kJ/mol)
Energie mise en jeu	Elevée	Faible
Type de formation	Formation de monocouches	Formation de monocouches et multicouches

I.4.2. Principe

Dans le processus de traitement de l'eau. La technologie d'adsorption est principalement utilisée pour éliminer les polluants organiques, les ions de métaux lourds, le chlore résiduel et d'autres substances nocives dans l'eau. Son principe est basé sur la surface et la structure des pores de l'adsorbant, et les polluants présents dans l'eau sont capturés et fixés à la surface de l'adsorbant par adsorption physique ou chimique[24].

Le transfert des polluants par adsorption est un processus complexe, régi par l'équilibre thermodynamique, la cinétique d'adsorption et la compétition entre adsorbats :

La Figure I.8 illustre la distinction entre ces deux types d'adsorption :

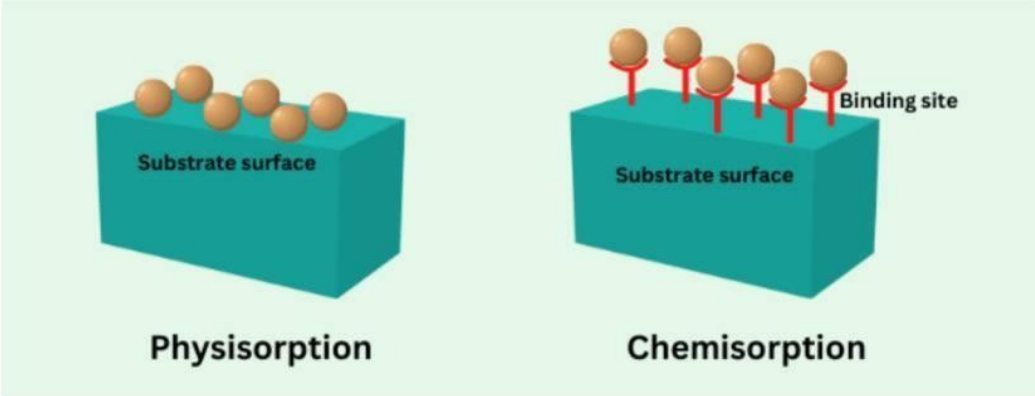


Figure I.8: Comparaison entre le principe de l'adsorption chimique et physique

I.4.3. Méthodes d'adsorption

L'adsorption est un procédé où un soluté (adsorbat) se fixe à la surface d'un solide (adsorbant) pour purifier des liquides ou gaz. Les méthodes adsorption en batch et en colonne diffèrent par leur fonctionnement et leurs usages[25] :

I.4.3.1. Adsorption en Batch

Cette approche discontinue met une masse d'adsorbant en contact avec un volume fixe de solution polluée, sous agitation pendant quelques heures. On sépare ensuite par filtration ou centrifugation pour mesurer la pollution restante et évaluer l'efficacité. Elle convient aux tests en laboratoire pour étudier l'effet du pH, de la dose d'adsorbant ou du temps de contact [25].

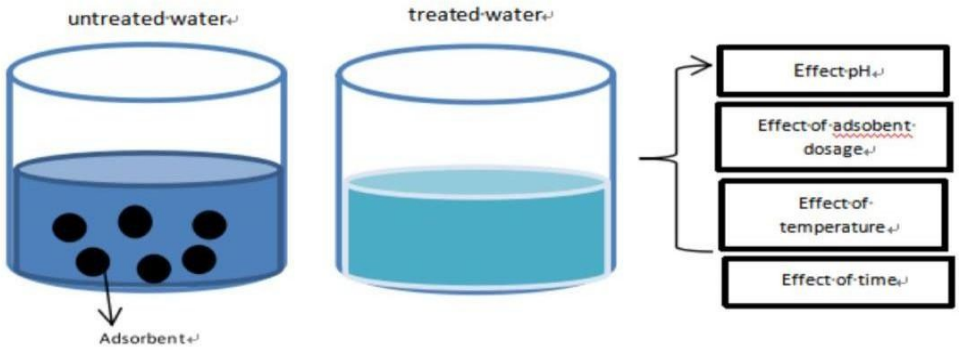


Figure I.9: Processus d'adsorption batch [26].

I.4.3.2. Adsorption en Colonne

Méthode continue : la solution traverse une colonne garnie d'adsorbant à débit constant, formant une zone progressive de purification jusqu'à saturation (percée). La colonne est ensuite régénérée par rinçage ou chauffage pour réutiliser l'adsorbant. Elle est privilégiée pour les traitements industriels à grande échelle.

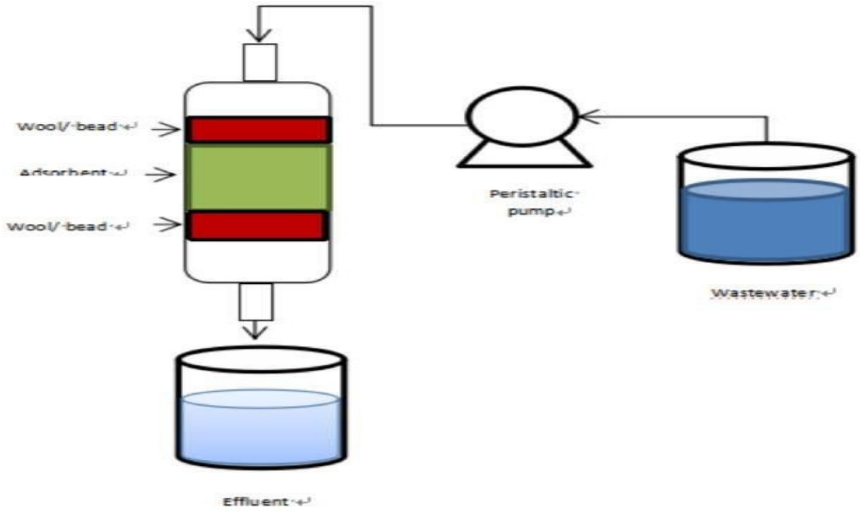


Figure I.10: Désigne basique d'adsorption en colonne [26].

Tableau I.5 : Comparaison entre l'adsorption batch et en colonne [26].

Aspect	Adsorption Batch	Adsorption en colonne
Mode	Discontinue, agitation statique	Continu, percolation lit fixe
Avantages	Simple, peu de matériau, bon pour étude labo	Efficace à haut débit, scalable, industriel
Inconvénients	Surveillance manuelle, non adapté aux gros volumes	Complexe, nécessite régénération, risque de blocage
Applications	Tests préliminaires, petites échelles	Épuration eau/air industrielle

Les deux méthodes se complètent : batch pour paramétrer, colonne pour optimiser.

I.4.4. Facteurs influençant l'équilibre d'adsorption

L'équilibre d'adsorption est influencé par plusieurs paramètres clés, notamment la nature du soluté, les propriétés de l'adsorbant, les conditions physico-chimiques de la solution (pH, température, force ionique) et la présence d'autres composés organiques [27].

• Nature de l'adsorbant : Les adsorbants se distinguent par leur polarité. Les adsorbants apolaires privilégient les substances non polaires, alors que les adsorbants polaires

adsorberont préférentiellement les électrolytes, la charge de leur surface déterminant la fixation des cations ou des anions .

❖ Nature de l'adsorbat : Les caractéristiques physico-chimiques de l'adsorbat sont essentielles pour son adsorption sur une surface solide. Sa structure moléculaire, en particulier son volume, joue un rôle majeur dans sa rétention. Le processus peut être endothermique ou exothermique selon la combinaison adsorbant-adsorbat .

❖ Température : La température affecte l'équilibre d'adsorption : elle favorise l'adsorption généralement dans les cas exothermiques ou la désorption dans les cas endothermiques, en fonction des interactions entre adsorbant et adsorbat .

❖ Surface spécifique : La capacité d'adsorption est proportionnelle à la surface spécifique de l'adsorbant. Augmenter cette surface totale, par exemple via un broyage qui accroît la porosité, renforce nettement l'adsorption .

❖ pH : Le pH de la solution influence fortement l'adsorption. Pour les métaux lourds, elle est souvent plus efficace à pH acide, tandis que certains composés organiques s'adsorbent mieux à partir d'un pH de 6 ou plus .

❖ Effet de la concentration : L'adsorption des espèces chimiques croît généralement avec leur concentration en solution, mais cette progression ralentit à des concentrations élevées .

❖ Temps de contact : De manière générale, la vitesse d'adsorption est rapide au début du processus, puis elle devient plus lente, car le taux maximal d'adsorption (la saturation) est généralement atteint après un court laps de temps entre l'adsorbant et l'adsorbat .

I.4.5. Rendement d'élimination du colorant et capacité d'adsorption

L'efficacité de l'adsorption se mesure à travers deux indicateurs principaux : le taux d'élimination **(R%)** du colorant et la capacité d'adsorption **(q_e)** de l'adsorbant.

• Taux d'élimination **(R%) :**

Le rendement d'élimination du colorant correspond au pourcentage de la concentration initiale supprimée de la solution après traitement. Il s'obtient via l'expression suivante :

$$(R\%) = \frac{C_e - C_0}{C_0} \times 100 \qquad \textbf{(I.1)}$$

Où :

C_0 : est la concentration initiale du colorant (mg/L),

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

Ce paramètre reflète directement l'efficacité du procédé d'adsorption.

• Capacité d'adsorption (q_e) :

La capacité d'adsorption à l'équilibre, notée q_e (mg/g), mesure la quantité de colorant adsorbée par unité de masse d'adsorbant. Elle est calculée selon la formul**e (I.2) :**

$$q_e = (C_0 - C_e) \times \frac{V}{m} \qquad \textbf{(I.2)}$$

où :

q_e : capacité d'adsorption à l'équilibre (mg/g)

C_0 : concentration initiale de l'adsorbat (mg/L)

C_e : concentration à l'équilibre (mg/L)

V : volume de la solution (L)

m : masse de l'adsorbant (g)

Cette grandeur évalue la performance de l'adsorbant en termes de charge adsorbée .

I.4.6. Isothermes d'adsorption

Les isothermes d'adsorption sont des courbes expérimentales qui représentent les variations de la masse (ou du volume) du substrat adsorbé (gaz ou liquide) par poids d'adsorbant, en fonction de la concentration (en phase liquide) ou de la pression (en phase gazeuse). Elles s'expriment généralement sous forme d'équations mathématiques non cinétiques, obtenues à partir d'expériences en réacteur statique. Elles permettent essentiellement :

- ❖ De déterminer le taux de recouvrement de la surface d'un support par un substrat.
- ❖ D'identifier le type d'adsorption susceptible de se produire.
- ❖ De choisir l'adsorbant le mieux adapté à la rétention de l'adsorbat.

Les isothermes d'adsorption représentent les équations principales employées pour modéliser l'équilibre d'adsorption. Elles établissent la relation entre la quantité de substance adsorbée et sa concentration en solution ou sa pression en phase gazeuse, à température constante.

I.4.6.1. Isotherme de Freundlich

Ce modèle empirique s'applique aux surfaces hétérogènes et décrit une adsorption multicouche.

(I.3)

$$q_e = K_F . Ce^{\frac{1}{n}}$$

Où :

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

: constante de Freundlich indicative de la capacité d'adsorption.

n: constante liée à l'intensité de l'adsorption.

: concentration de l'adsorbat à l'équilibre (mg/L) .

I.4.6.2. Isotherme de Langmuir

La théorie de Langmuir en 1916 [28]. Ce modèle suppose que l'adsorption se produit en monocouche sur une surface homogène comportant un nombre fini de sites identiques.

$$q_e = \frac{C_e \times q_{max} \times K_L}{1 + K_L \times C_e} \qquad \textbf{(I.4)}$$

Ou:

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

$_a$: capacité maximale d'adsorption (mg/g).

: constante de Langmuir liée à l'affinité de liaison (L/mg).

: concentration de l'adsorbe a l'équilibre (mg/L) .

I.4.7. Les avantages par rapport aux autres techniques

L'adsorption se distingue parmi les techniques de purification et de traitement des eaux usées par sa simplicité, son efficacité et son adaptabilité aux effluents complexes comme ceux de l'industrie textile[24].

Avantages clés:

- Haute efficacité : la technologie d'adsorption peut éliminer efficacement les traces de polluants dans l'eau, y compris certaines matières organiques et les ions de métaux lourds qui sont difficiles à éliminer par d'autres méthodes [24].
- Flexibilité : Il existe une grande variété d'adsorbants, qui peuvent être sélectionnés

et optimisés en fonction de la qualité de l'eau et des objectifs de traitement. Différents adsorbants peuvent être utilisés pour traiter différents types de polluants, avec une grande flexibilité [24].

❖ Simplicité : le processus d'adsorption est relativement simple, ne nécessite pas d'équipement ni d'opérations complexes, est facile à contrôler et à gérer et convient à une variété de scénarios d'application[24].

❖ Sélectivité supérieure : Cible précisément les contaminants sans altérer l'eau globalement, contrairement à la filtration membranaire sujette au colmatage .

❖ Faible coût : adsorbants bon marché (ex. : biomasse comme la drêche), plus économique que l'osmose inverse ou l'échange d'ions .

❖ Énergie réduite : Moins énergivore que la distillation ou l'oxydation avancée, idéale pour composés thermosensibles .

❖ Impact écologique : Réversible, régénérable et utilise des matériaux durables (déchets recyclés), favorisant la réutilisation des eaux [24].

I.5. Adsorbants

Les adsorbants sont des matériaux solides qui captent des molécules ou ions (appelés adsorbats) en formant une fine couche sur leur surface, sans pénétration à l'intérieur du matériau. Ce processus, appelé adsorption, diffère de l'absorption où la substance est intégrée en volume .

I.5.1. Adsorbants utilisés dans l'industrie

Les principaux adsorbants utilisés dans l'industrie pour le traitement des eaux, gaz et effluents sont :

I.5.1.1. Les argiles activées

L'argile activée est un matériau adsorbant largement utilisée dans l'industrie pour le décoloration et traitement des eaux usées textiles, ainsi que la purification des effluents pétroliers.

I.5.1.2. Les gels de silice

Silice (gel de silice) est un matériau mésoporeux pour adsorption d'humidité, purification de gaz et liquides organiques en pétrochimie.

I.5.1.3. Les alumines

Alumine activée comme un adsorbeur pour élimination de fluorures, arsénic ou

composés soufrés dans traitement d'eaux et gaz industriels .

I.5.1.4. Les zéolites

Zéolithes sont des Cristaux alumino-silicatés synthétiques ou naturels, pour séchage de gaz, séparation moléculaire et traitement d'effluents nucléaires ou eaux.

I.5.1.5. Le charbon actif

Charbon actif est un matériau poreux issu de bois, noix de coco ou charbon, utilisé pour la décoloration, purification d'eau et récupération de solvants .

I.5.2. Applications industrielles des adsorbants

- ❖ Traitement eaux usées et décoloration des effluents textiles .
- ❖ Purification gaz (CO_2 , COV) et récupération solvants.
- ❖ Raffinage pétrolier et désodorisation.
- ❖ Séchage des gaz et purification des liquides .
- ❖ Élimination des polluants organiques dans les eaux potables.

I.5.3. Verre recyclé

Le verre recyclé, ou calcin sodocalcique, est principalement composé de silice (SiO_2 , 60-75%), d'oxyde de sodium (Na_2O, 12-16%), d'oxyde de calcium (CaO, 5-12%), d'alumine (Al_2O_3 , ~1%), de magnésie (MgO, ~4%) et de traces d'autres oxydes comme Fe_2O_3 , issus du verre post-consommation broyé et purifié. Son recyclage en poudre fine sert d'adsorbant économique pour l'élimination de polluants industriels tels que métaux lourds (Pb, Cd), colorants et composés organiques dans les eaux usées, via broyage et activation chimique qui développent sa surface poreuse et amorphe favorisant l'adsorption physique et les échanges ioniques. Cet usage réduit drastiquement l'impact environnemental en diminuant les déchets de verre (réduction de 80% du volume enfoui), en économisant l'énergie de production primaire (3 fois moins que le verre vierge) et en évitant les émissions de CO_2 liées à l'extraction de sable siliceux, contribuant ainsi à une économie circulaire durable [29].



Figure I.11: Poudre de verre .

I.5.4. Caractéristiques du verre recyclé (poudre) comme un adsorbant

Le verre recyclé sous forme de poudre est un adsorbant économique et écologique pour l'élimination des polluants aquatiques.

I.5.5. Autres matériaux à faible coût

Voici d'autres matériaux adsorbants à faible coût, souvent issus de déchets agricoles ou industriels, idéaux pour le traitement des eaux usées ou l'élimination de polluants comme les colorants et métaux lourds [30].

I.5.5.1. Les résidus agricoles

Comme les noyaux des dattes, pétioles ou coque de palmiers dattier, marc de café ou de raisins (déchets végétaux poreux), noix de coco et d'olive [30].

I.5.5.2. Déchets industriels/naturels

Comme les coquilles broyées (escargots,noix, arachides) et les argiles, zéolithes naturelle ou pouzzolane, cendres volantes (combustion de charbon), boues active, coquilles d'oeufs [31].

Référence bibliographique I

[1] Metcalf & Eddy (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery, 5th Edition. McGraw-Hill.

[2] Djamel, B. Cours de traitement des eaux PDF https://elearning.univeloued.dz/pluginfile.php/13468/mod_resource/content/1/cours%20traitement%20des%20eaux%20-%20Djamel%20Barani.pdf?utm_source=

[3] Bendaf, F. (2018). Évaluation de la qualité des eaux usées brutes et épurées de la STEP d'Ain Sfihâ (Sétif). Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, Algérie

[4] Guenaoui, R. (2019). Suivi et étude des procédés d'épuration des eaux usées urbaines au niveau de l'ONA Touggourt/Ouargla et caractérisation par méthodes physico-chimiques. Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie.

[5] BOUHENT, M. M. (s.d.). Traitements physico-chimique et biologique des eaux usées. Cours de Master, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf

[6] Abdel Kader, N., & Cherif, S. (2018). Caractérisation physico-chimique des eaux usées domestiques et industrielles à Alger. Journal des Sciences de l'Eau, 31(4), 223-234.

[7] Benmoussa, N., & Ould-Hamou, M. (2017). Étude microbiologique des eaux usées urbaines: implications pour la santé environnementale à Constantine. Revue Algérienne de Biologie Appliquée, 8(2), 112-121

[8] Boufeldja, N., & Djeribi, R. (2019). Impact physico-chimique des rejets industriels sur les caractéristiques des eaux usées: cas de la zone industrielle de Annaba (Algérie). Cahiers de l'Eau, 24, 65-78

[9] Hadjoudj, S., & Oukaci, B. (2016). Analyse des paramètres DBO, DCO et MES des eaux usées domestiques dans la ville de Sétif (Algérie). Mémoire de Master, Université Ferhat Abbas Sétif 1

[10] Al-Kdasi, A., Idris, A., Saed, K., & Guan, C. T. (2004). Treatment of textile wastewater by advanced oxidation processes. Global NEST Journal, 6(3), 222–230. [11] Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., & Nigam, P. (2001). Remediation of dyes in textile effluent: a critical review. Bioresource Technology, 77(3), 247–255. [12] Forgacs, E., Cserháti, T., & Oros, G. (2004). Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review. Environment International, 30(7), 953–971

[13] Banat, I.M., Nigam, P., Singh, D., & Marchant, R. (1996). Microbial decolorization of textile-dye-containing effluents: a review. Bioresource Technology, 58(3), 217–227.

[14] Metcalf & Eddy (2014).Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery, 5th Edition. McGraw-Hill Education.

[15] Trevi Environmental (T.V) Solutions. (n.d.). Centrifugeuse. Consulté le 26 février 2026, sur https://trevi-env.com/fr/eau/techniques/separation-de-boues-et-deshydration/centrifugeuse

[16] PCA Water. (n.d.). Flottation — Purification physico-chimique. Consulté le 26 février 2026, sur https://pcawater.com/fr/technologies/purification-physico-chimique/flottation

[17] Cnidep. (n.d.). Flottation — Procédé de séparation des solides et des liquides. Consulté le 26 février 2026, sur http://www.cnidep.com/flottation153.html

[18] Purostar. (n.d.). Le procédé de coagulation-floculation. Consulté le 26 février 2026, sur https://www.purostar.com/pages/flottateurs/le-procede-de-coagulation-floculation.html

[19] Hach. (n.d.). Biological treatment (Traitement biologique). Consulté le 26 février 2026, sur https://fr.hach.com/industries/wastewater/biological-treatment [20] Preisendorfer, R. W. (2009). [Procédés d'oxydation avancée dans le traitement des eaux et des effluents industriels]. Réseau, 22(4). Consulté le 26 février 2026, sur https://www.erudit.org/en/journals/rseau/2009-v22-n4-rseau3478/038330ar/ [21] Hamouche A. (2013) Etude cinétique et thermodynamique de l'adsorption des métaux lourds par l'utilisation des adsorbants naturels. Thèse Doctorat, Université de Boumerdes.

[22] Sun, L.-M., Meunier, F.: Adsorption: aspects théoriques. Techniques de l'ingénieur. Technologies de l'eau. 2, (2003).

[23] Chitour, S.E.: Physico-chimique des surfaces, volume II, éd OPU. (1992).

[24] Chunke Environmental Technology Co. Ltd. (2024). Qu'est-ce que l'adsorption dans le traitement de l'eau. https://fr.chunkerowaterplant.com/news/what-is-adsorption-in-water-treatment.

[25] Loebenstein, W. V. (1962). Batch adsorption from solution. Journal of Research of the National Bureau of Standards - A. Physics and Chemistry, 66A(6), 503–515.

[26] Sazali, N., Harun, Z., & Sazali, N. (2020). A review on batch and column adsorption of various adsorbent towards the removal of heavy metal. Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 67(2), 66-88. [27] Dattatraya Saratale, G., Bhosale, R., Shobana, S., Banu, J.R., Pugazhendhi, A., Mahmoud, E., Sirohi, R., Kant Bhatia, S., Atabani, A.E., Mulone, V. Yoon, J.-J., Seung Shin, H., Kumar, G.: A review on valorization of spent coffee grounds (SCG) towards biopolymers and biocatalysts production. Bioresource Technology. 314, 123800 (2020). https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123800.

[28] Langmuir, I.: The constitution and fundamental properties of solids and liquids. Part I. Solids. Journal of the American chemical society. 38, 2221–2295 (1916). .

[29] Hengping Industry. (2024). Quel est le processus de fabrication du verre sodocalcique ?

[30] Lahmar, A. (2022). Valorisation des bioadsorbants à faible coût pour l'élimination… [Thèse de doctorat, Université Annaba]. https://biblio.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2022/01/These-Lahmar-Amina.pdf

[31] Belkhir, F. (s.d.). Valorisation d'un déchet industriel comme adsorbant pour l'élimination des polluants organique et inorganique [Thèse, Université de Mostaganem]. http://e-biblio.univ-mosta.dz/handle/123456789/11998

Chapitre II:

Protocole exprimental

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, le protocole expérimental portant sur le traitement des eaux polluées par les polluants colorés Il permet de décrire de manière détaillée la méthode expérimentale utilisée pour préparer le matériau adsorbant, réaliser les essais d'adsorption. Dans ce travail, un matériau adsorbant a été préparé à partir de verre recyclé afin d'évaluer sa capacité à éliminer certains colorants utilisés comme polluants modèles en solution aqueuse. Plusieurs paramètres expérimentaux ont été testés afin d'évaluer l'efficacité du processus d'adsorption, notamment la masse de l'adsorbant, le pH de la solution, le temps de contact et la température.

II.2. Appareillage et réactifs

II.2.1. Appareillage

L'ensemble des manipulations expérimentales a nécessité le recours à divers équipements de laboratoire dont la liste est présentée ci-après. Chaque instrument a été sélectionné en fonction de sa précision et de son adéquation avec les mesures à réaliser.

- Le pH-mètre numérique équipé d'une électrode combinée de type verre, étalonné avec des solutions tampon certifiées avant chaque utilisation.
- Le spectrophotomètre UV-Visible, utilisé pour mesurer l'absorbance des solutions de colorants à leurs longueurs d'onde maximales (λ_{max}).
- La microscopie électronique à balayage (MEB)
- La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)
- Analyseur de surface spécifique et de porosité (BET)
- Une balance analytique avec une précision de 0,0001 g.

II.2.2. Réactifs

Les colorants dans cette étude ont été choisis en raison de leur représentativité dans le domaine de la pollution industrielle. Il s'agit de colorants synthétiques fréquemment rejetés par les industries textiles, pharmaceutiques et agroalimentaires.

Les réactifs chimiques ont été utilisés pour réaliser les tests d'adsorption.

Tableau II.1. Réactifs utilisés et leurs propriétés[1]

Réactif	Formule	PM (g/mol)	λ_{max} (nm)	Nature chimique	Pureté
Bleu de méthylène (BM)	$C_{16}H_{18}ClN_3S$	319,85	664	Cationique	≥ 95 %
Cristal violet (CV)	$C_{25}H_{30}ClN_3$	408,00	582	Cationique	≥ 90 %
Méthyle Orange (MO)	$C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$	327,34	465	Anionique	≥ 85 %
Hydroxyde de sodium	NaOH	40,00	-	Base fort	≥ 97 %
Acide acétique	$C_2H_4O_2$	60,05	-	Acide faible	99%
Acide sulfirique	H_2SO_4	98,08	-	Acide fort	95-98%

Le bleu de méthylène est un colorant cationique de la famille des thiazines, largement utilisé comme colorant modèle dans les études d'adsorption en raison de sa toxicité connue et de sa forte solubilité en milieu aqueux. Il présente une coloration bleue intense en solution aqueuse et une absorbance maximale à 664 nm.Le cristal violet est un autre colorant cationique de la famille des triphénylméthanes, dont l'absorbance maximale se situe entre 582nm, Le méthyle orange est un autre colorant azoïque anionique dont l'absorbance maximale se situe à 465 nm, utilisé fréquemment comme indicateur de pH et comme colorant modèle anionique dans les travaux d'adsorption [1].

II.2.3. Préparation des réactifs

II.2.3.1.Préparation de NaOH (0.2N)

L'hydroxyde de sodium (NaOH) est un réactif couramment utilisé pour l'ajustement du pH des solutions en milieu alcalin. Pour préparer une solution de soude à 0,2N, on procède comme suit : on pèse à l'aide d'une balance analytique une masse de 0,8 g de NaOH, puis on la dissout dans une petite quantité d'eau distillée dans un bécher. Le volume est ensuite complété jusqu'au trait de jauge d'une fiole jaugée de 100 mL avec de l'eau distillée.

II.2.3.2. Préparation de H_2SO_4 (0.2N)

L'acide sulfurique est préparé à une normalité de 0,2 N à partir d'une solution commerciale concentrée (95-98 %, densité ≈ 1,84 g/mL). La procédure adoptée consiste à prélever à l'aide d'une éprouvette graduée 0,6 mL d'acide sulfurique concentré, puis le volume total est ensuite ajusté à 100 mL dans une fiole jaugée.

II.2.3.3. Préparation des solutions mères (1000 ppm)

Les solutions mères constituent la base de toutes les dilutions effectuées au cours des essais d'adsorption. Pour chaque colorant étudié (bleu de méthylène, cristal violet, méthyle orange), la préparation de la solution mère à une concentration de 1000 mg/L (ppm) suit le même protocole :

- On pèse avec précision 0,5 g de colorant à l'aide d'une balance analytique.
- Cette quantité est transvasée dans une fiole jaugée de 500 mL.
- On ajoute de l'eau distillée progressivement sous agitation (30 à 60 minutes) jusqu'au trait de jauge.

Les solutions filles aux concentrations désirées, sont ensuite obtenues par dilution successive de la solution mère à partir de la relation $C_1 V_1 = C_2 V_2$. Ces solutions sont préparées extemporanément et conservées à l'abri de la lumière pour éviter toute photodégradation [2].

II.2.4. Préparation de l'adsorbant

La préparation de l'adsorbant à base de verre recyclé de type sodo-calcique représente l'étape la plus cruciale de ce travail. La démarche adoptée vise à transformer des déchets de verre ordinaire en un matériau en poudre utilisé comme adsorbant.

Le protocole de préparation consiste à casser et broyer les morceaux de verre, puis à les laver avant de les sécher à l'air à température ambiante.

On obtient finalement une poudre blanche correspondant au matériau adsorbant.

II.3. Technique d'analyse

Le dosage des colorants est réalisé par spectrophotométrie UV-Visible.. La spectrophotométrie UV-Visible est une technique analytique optique fondamentale qui mesure l'absorption de la lumière ultraviolette (100-400 nm) et visible (400-750 nm) par un échantillon. Lorsqu'un faisceau lumineux traverse une solution contenant

un composé absorbant, une partie de la lumière est absorbée proportionnellement à la concentration de l'analyte. Cette méthode est particulièrement adaptée pour quantifier les colorants résiduels après un procédé d'adsorption, en mesurant l'absorbance à la longueur d'onde maximale d'absorption (λ_{max}), comme 664 nm pour le bleu de méthylène. Elle permet une détermination précise des concentrations à partir des spectres d'absorption, rendant les analyses rapides et fiables en chimie analytique et traitement des eaux [3, 4].

La caractérisation des matériaux a été réalisée à l'aide de autres trois techniques complémentaires : la microscopie électronique à balayage (MEB), l'analyse BET et la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR). Ces techniques permettent d'obtenir des informations essentielles sur la morphologie, la texture de surface et la composition chimique du matériau.

II.3.1. Principe de fonctionnement

II.3.1.1. Spectrophotométrie UV-Visible:

La spectrophotométrie UV-Visible est utilisée pour la mesure de l'absorbance des solutions de colorants à leur longueur d'onde maximale (λ_{max}), comme pour le Bleu de Méthylène à 664 nm.

La lumière traverse l'échantillon placé dans une cuve, et l'absorbance est calculée comme :

$$\mathbf{A = \varepsilon .c.l} \text{ (loi de Beer Lambert) [4]}$$

Où:

ε : est le coefficient d'extinction molaire ($L.mol^{-1}.cm^{-1}$)

c: la concentration de l'espèce absorbante (mol/L)

l: la longueur du chemin optique (cm)

Les sources incluent la lampe à deutérium (UV) et au tungstène-halogène (visible), avec des détecteurs comme les photodiodes ou barrettes de diodes.

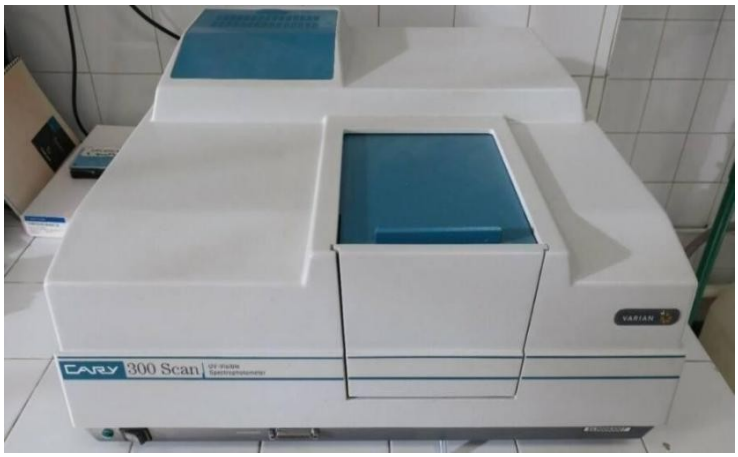


Figure II.1: Séctrophotométre UV-visible [5].

II.3.1.2. Microscopie électronique à balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique d'observation qui permet d'examiner la morphologie de surface des matériaux à haute résolution. Elle repose sur le balayage de la surface de l'échantillon par un faisceau d'électrons, ce qui génère des signaux permettant d'obtenir des images détaillées de la forme, de la taille et de la répartition des particules.



Figure II.2: La microscopie électronique à balayage (MEB)

II.3.1.3. Analyse BET

L'analyse BET, basée sur l'adsorption physique d'azote à la surface du matériau, permet de déterminer la surface spécifique, le volume des pores ainsi que la structure texturale de l'échantillon. Cette méthode est particulièrement utilisée pour caractériser les matériaux poreux et évaluer leur capacité d'adsorption.



Figure II.3: Analyse BET de surface

II.3.1.4. Spectroscopie FTIR

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) est une technique d'analyse permettant d'identifier les groupes fonctionnels présents à la surface d'un matériau. Elle repose sur l'absorption du rayonnement infrarouge par les liaisons chimiques, ce qui fournit des informations sur la nature des fonctions chimiques et sur les éventuelles interactions entre les espèces présentes.



Figure II.4: La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

II.3.2. Objectif de chaque technique

❖ UV-visbles : déterminer la concentration des colorants en solution et suivre l'évolution de l'adsorption.

❖ MEB : étudier la morphologie de surface, la structure et l'aspect des particules.

❖ BET : déterminer la surface spécifique, le volume poreux et les propriétés texturales du matériau.

❖ FTIR : identifier les groupes fonctionnels et mettre en évidence les liaisons chimiques de surface.

II.4. Test d'Adsorption des Colorants

Les essais d'adsorption sont effectués en système batch dans des flacons de 120 mL. Des tests préliminaires consistent à ajouter 0,1 g de verre ou de poudre de verre à 50 mL de colorant (50mg/L) [3] , agiter 45 min, filtrer et noter l'élimination de la couleur. Les colorants testés incluent les cationiques (bleu de méthylène, cristal violet) et anioniques (méthyle orange).

II.5. Essais d'adsorption du BM

Les essais d'adsorption du bleu de méthylène (BM) visent à évaluer l'efficacité de la poudre de verre comme adsorbant pour éliminer ce colorant cationique des eaux. Réalisés en système batch dans des flacons ou béchers, ils étudient les paramètres clés tels que la masse d'adsorbant (0,01 à 1 g), le pH (2 à 10 ajusté par H_2SO_4 /NaOH 0,2 N), le temps de contact (jusqu'à 180 min) et la température (25-45°C), avec agitation à 150 tr/min. Après agitation, filtration, dilution et analyse par spectrophotométrie UV-visible, ces tests permettent d'optimiser le processus d'adsorption.

II.5.1. Influence de la masse de l'adsorbant

Nous avons étudié l'influence de la masse d'adsorbant en mettant 50 mL de solution de BM à 50 mg/L, en contact avec des masses variant de 0,01 à 1 g (0,01; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 0,8 ; 1 g), mesurées précisément par balance électronique.

Nous avons agité les mélanges pendant 120 minutes dans un bain-marie à 150 tr/min et 25°C, puis filtré, dilué les échantillons et dosé leur absorbance par spectrophotométrie UV-Visible à λ_{max} = 664 nm. Ces essais nous ont permis d'identifier la masse optimale favorisant une élimination maximale du colorant.

II.5.2. Influence de pH

On a examiné l'influence du pH en répartissant dans 7 flacons la masse optimale d'adsorbant avec 50 mL de solution de BM à (50mg/L), puis agité 120 min à 150 tr/min et 25°C. Nous avons ajusté les pH à 2, 4, 5, 6, 7, 8 et 10 en ajoutant goutte à goutte $H_2 SO_4$ 0,2 N ou NaOH 0,2 N, avant de filtrer et mesurer l'absorbance UV-Visible. Ainsi, nous avons déterminé la plage de pH optimale pour l'adsorption.

II.5.3. Influence de temps de contact

Nous avons évalué l'influence du temps de contact en préparant 6 béchers contenant chacun 100 mL de solution de BM avec la masse optimale d'adsorbant, agités magnétiquement à température ambiante. Nous avons prélevé des aliquots à 1, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 60, 90, 120, 150 et 180 minutes, filtré, dilué et dosé par UV-visible.

Ces prélèvements nous ont permis de modéliser la cinétique d'adsorption jusqu'à l'équilibre.

II.5.4. Influence de la température

On a fait l'analyse d'effet de température en testant 25, 35 et 45°C sur 50 mL de solutions de BM (50mg/L) avec la masse optimale d'adsorbant, agités à 150 tr/min jusqu'à l'équilibre. Après filtration, nous avons quantifié les résidus par UV-Visible pour évaluer l'effet thermodynamique.

Ces résultats nous ont aidés à optimiser les conditions opérationnelles.

Référence bibliographique II

[1] Salhi M. (2024). Synthèse par chimie douce des matériaux hydroxydes/oxydes à base de cuivre : Application à l'élimination des colorants. Thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem / Université Jijel.

[2] Lakehal H.E., Mansouri H. (2023). Elimination des polluants organiques des eaux usées par un bio-adsorbant. Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 de Guelma.

[3] Boukhalfa N. (2019). Etude de l'élimination des polluants émergents par des matériaux composites. Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif 1.

[4] YesWeLab. (2025, 12 février). Spectroscopie UV-Visible : principe, applications et analyses. Blog YesWeLab. https://blog.yeswelab.fr/agroalimentaire/spectroscopie-uv-visible/

[5] Centre SPIN, Mines Saint-Étienne. (s.d.). Spectrophotomètre UV-visible. https://www.mines-stetienne.fr/spin-fr/ressources/caracterisation/spectrophotometre-uv-visible/

Chapitre III:

Résultats et discussion

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des résultats obtenus lors des tests d'adsorption réalisés en mode batch, en utilisant le verre recyclé en poudre de type sodocalcique comme adsorbant, et trois colorants aquatiques textiles comme polluants modèles : le bleu de méthylène (BM), le cristal violet (CV), et l'orange de méthyle (MO). Ces colorants ont été sélectionnés pour représenter les deux grandes familles de colorants rencontrés dans les effluents industriels : les colorants cationiques (BM, CV) et les colorants anioniques (MO). La discussion s'articule autour de l'influence des différents paramètres opératoires tels que masse de l'adsorbant, pH de la solution, temps de contact, concentration initiale et température sur les rendements d'élimination. Les données expérimentales sont ensuite modélisées à l'aide de modèles cinétiques, d'isothermes d'adsorption et d'une analyse thermodynamique, afin de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu et de déterminer les conditions optimales d'adsorption. Cette démarche méthodologique constitue le fondement de toute étude sérieuse d'adsorption et permet de discriminer les matériaux adsorbants selon leurs aptitudes réelles à éliminer les polluants organiques dissous dans les eaux usées industrielles [1].

III.2. Test préliminaire d'adsorption

Pour identifier et sélectionner le colorant optimal en vue des études paramétriques approfondies, un test préliminaire d'adsorption a été mise en œuvre. Ce protocole comparatif a consisté à soumettre simultanément les trois polluants aquatiques ciblés à des mêmes conditions opératoires. Concrètement, pour chaque essai, une masse précise de 0,1 g de poudre de verre recyclé, faisant office de matériau adsorbant, a été introduite dans un volume de 50 mL de solution aqueuse, ajustée à une concentration initiale de 50 mg/L pour chacun des colorants étudiés. Afin de garantir un contact optimal entre la phase solide et la phase liquide, les mélanges ont été maintenus sous une agitation mécanique constante de 150 tr/min. L'ensemble de l'expérience s'est déroulé à température ambiante, contrôlée à 25 °C, sur une durée de 45 minutes.

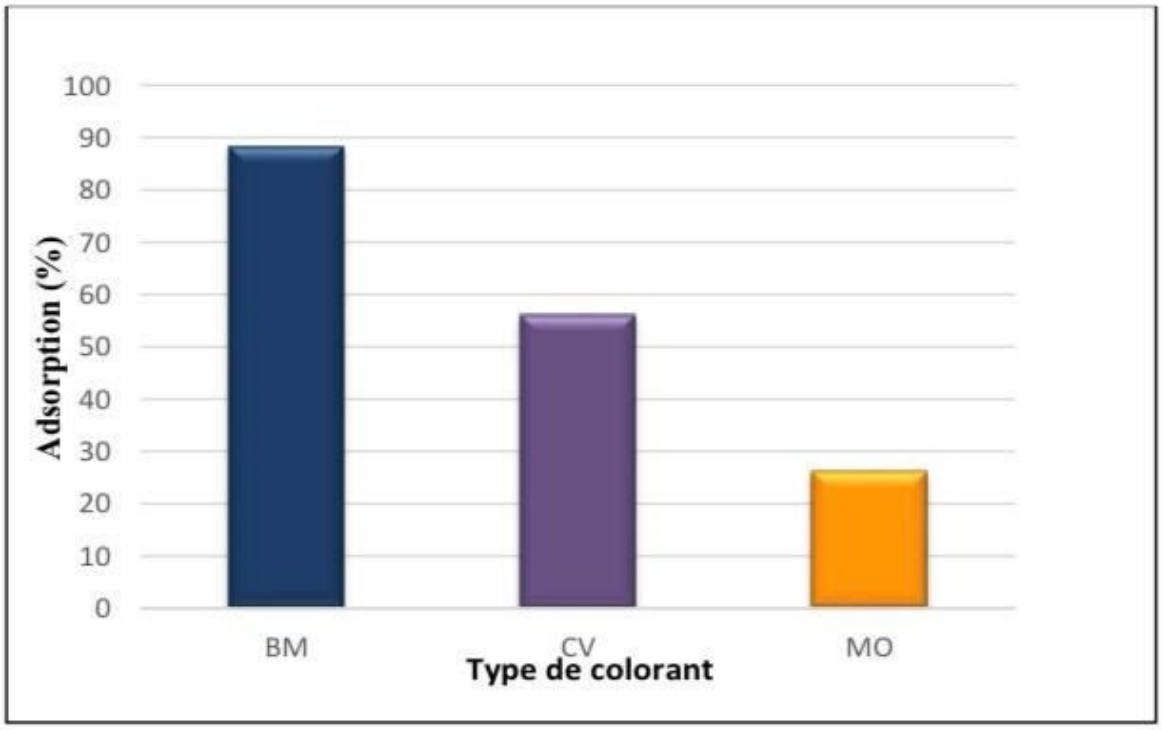


Figure III.1: Le taux d'adsorption de différents types de colorant

La Figure III.1 montre une différence nette entre les trois colorants étudiés en présence du verre recyclé comme adsorbant. Dans les conditions de l'essai préliminaire, les colorants cationiques, à savoir le bleu de méthylène (BM) et le cristal violet (CV), présentent les rendements d'élimination les plus élevés, compris approximativement entre 88% et 56%, alors que le colorant anionique orange de méthyle (MO) n'atteint qu'environ 26%. Cette différence met en évidence l'importance de la charge du colorant dans le mécanisme d'adsorption. En effet, la surface du verre sodocalcique broyé possède des groupements silanols susceptibles de générer, selon le pH du milieu, des sites négativement chargés favorisant l'attraction électrostatique des espèces cationiques. Le bleu de méthylène apparaît comme le colorant le plus fortement retenu, ce qui justifie son choix comme molécule modèle pour la suite de l'étude [2].

III.3. Caractérisations de l'adsorbant

III.3.1. Analyse par BET

L'analyse de l'isotherme d'adsorption-désorption de N_2 et les données du tableau associé permettent de caractériser la structure poreuse du verre recyclé :

- Type d'isotherme : La figure montre une boucle d'hystérésis entre les courbes d'adsorption et de désorption, ce qui est caractéristique des matériaux mésoporeux.
- Surface spécifique (S_{BET}) : La valeur mesurée est de 9,8679 m²/g. ,ce qui montre que le verre recyclé possède une surface disponible modérée et offre une surface de contact suffisante pour la fixation du colorant.
- Volume et Diamètre des pores : Le diamètre moyen des pores (BJH) est d'environ 3,25 nm à 3,84 nm. Ces dimensions confirment la nature mésoporeuse de l'adsorbant (pores entre 2 et 50 nm), facilitant la diffusion des molécules de Bleu de Méthylène vers les sites actifs.
- Taille des particules : La taille moyenne est estimée à 608,03 nm, indiquant que le verre a été réduit à une échelle sub-micrométrique ce qui augmente la surface d'échange et améliore les possibilités de fixation du colorant .

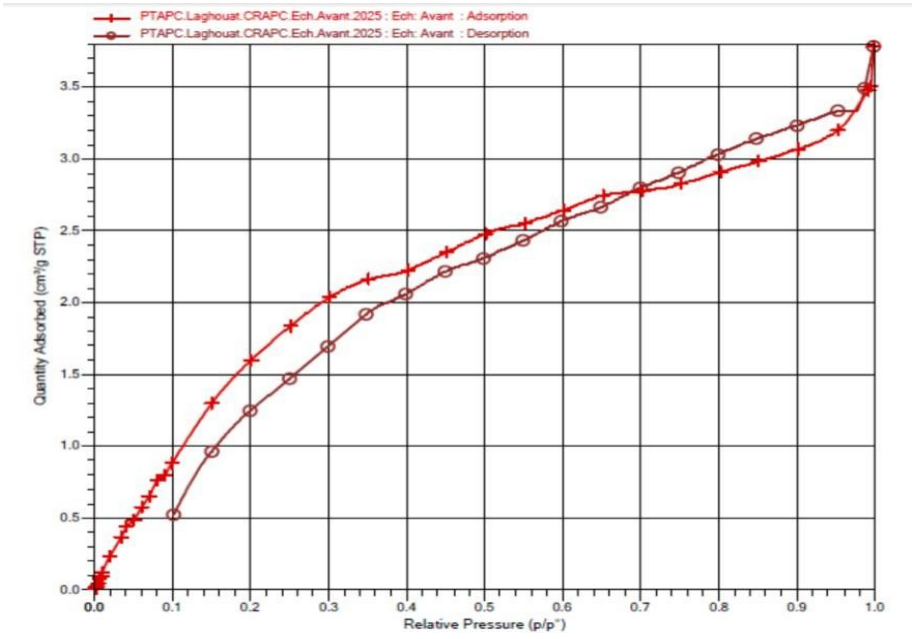


Figure III.2 : Courbe d'isotherme d'adsorption–désorption N_2 de verre recyclé

Tableau III.1 : Estimation de la surface spécifique BET, volume poreux et diamètre moyen des pores

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Surface spécifique BET	S_{BET}	9.8679	**m²/g**
Volume poreux total	V_P	Adsorption: 0.004935 Désorption: 0.005155	**cm³/g**
Diamètre moyen des pores (BJH)	D_P	Adsorption: 3.2562 Désorption: 3.8458	**nm**
Taille des nanoparticules	T_{np}	608.0309	**nm**

III.3.2. Analyse par FTIR

L'analyse FTIR a pour but d'identifier l'évolution des groupements fonctionnels présents à la surface de l'adsorbant avant et après la fixation du Bleu de Méthylène.

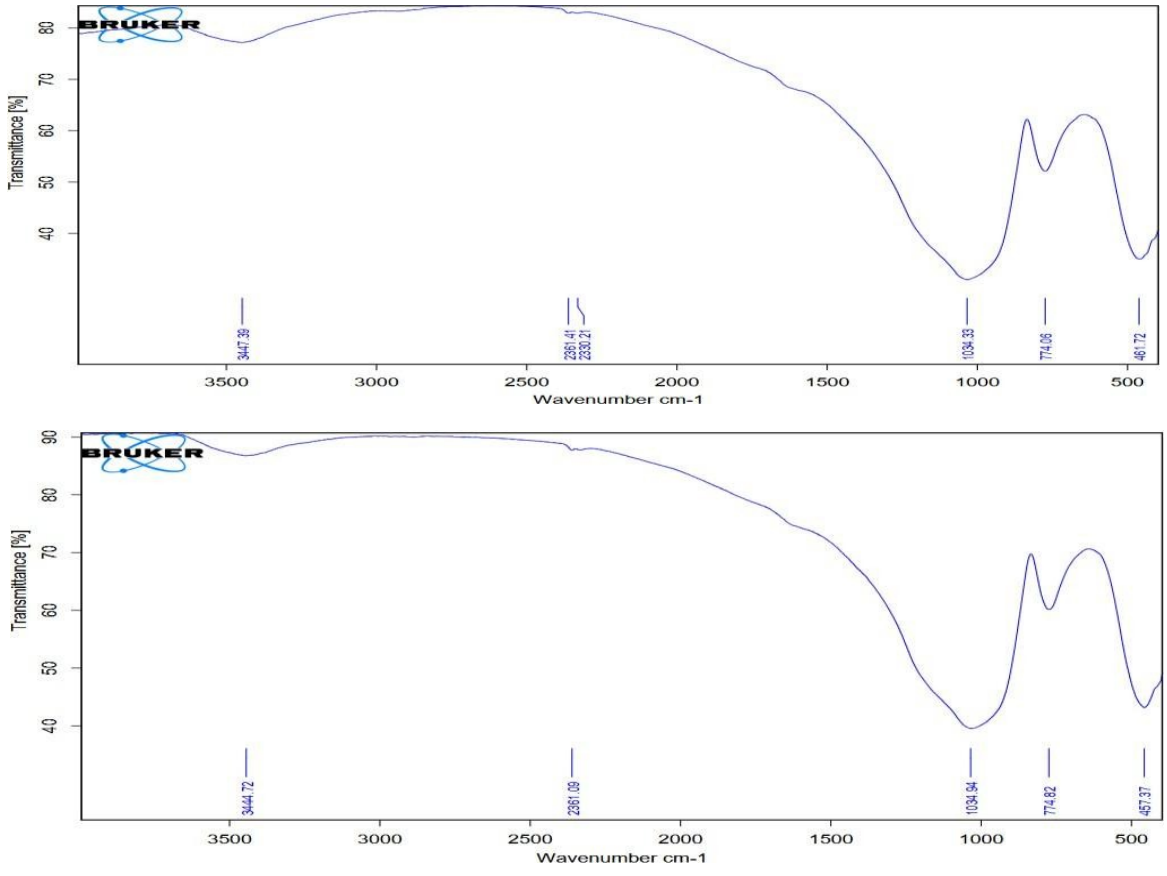


Figure III.3 : Spectre FTIR de verre recyclé avant et après l'adsorption de BM

Tableau III.2 : Attribution des principales bandes FTIR de l'échantillon de verre recyclé avant et après l'adsorption de BM

Nombre d'onde (cm^{-1}) Avant adsorption	**Nombre d'onde (cm^{-1}) Apres adsorption**	**Attribution probable**	**Interprétation**
3447,39	3444,72	Élongation O–H (hydroxyles) ou N–H	Présence de groupes –OH (eau adsorbée, silanols, hydroxyles de surface) ou N–H (amines, amides) selon le système.
2361,41	2361,.09	Élongation C≡N ou C≡C (souvent : cyanures ou alcynes)	Peut révéler des groupes nitriles ou alcynes, ou éventuellement CO_2 ambiant en présence d'air.
1034.33	1034,94	Bande de liaison C–O (éthers, alcools) ou Si–O (silicates)	Chez un oxyde ou un silicate : vibration Si–O (liaison pontante). Chez un organique : C–O (éthers, alcools).
774,06	774,82	Déformation hors-plan aromatiques ou vibrations Si–O/Si–O–Si	Si l'échantillon est organique aromatique : vibrations de substitution aromatique. Si c'est un silicate/verre : modes Si–O–Si.
461,72	457,37	Modes de réticulation solide (M–O–M, liaisons métal–oxygène)	Vibration de bending ou mode réseau de liaisons métal–oxygène (ex : Ti–O, Si–O, Al–O, etc.) dans un solide.

Le spectre FTIR du verre recyclé et les résultats du tableau , enregistrés avant et après adsorption du bleu de méthylène, montrent les bandes principales du verre recyclé sont conservées après adsorption du bleu de méthylène, ce qui signifie que la structure silicatée du matériau reste globalement intacte. La bande large observée vers 3447 cm^{-1} correspond aux vibrations d'élongation des groupements O–H liés aux hydroxyles de surface et à l'eau adsorbée. La bande proche de 2361 cm^{-1} peut être attribuée à la présence de CO_2 ambiant en présence d'air. Les bandes situées autour de 1034 cm^{-1}, 774 cm^{-1} et 461 cm^{-1} sont caractéristiques du réseau silicaté, notamment des liaisons Si–O–Si et des vibrations de

déformation du squelette du verre. Les légers déplacements observés après adsorption montrent que les groupements de surface participent à l'interaction avec le bleu de méthylène, sans altérer la structure fondamentale du matériau.

III.3.3. Analyse par MEB

L'analyse par MEB permet d'évaluer la topographie de la surface et la morphologie du verre recyclé en poudre avant et après le processus d'adsorption :

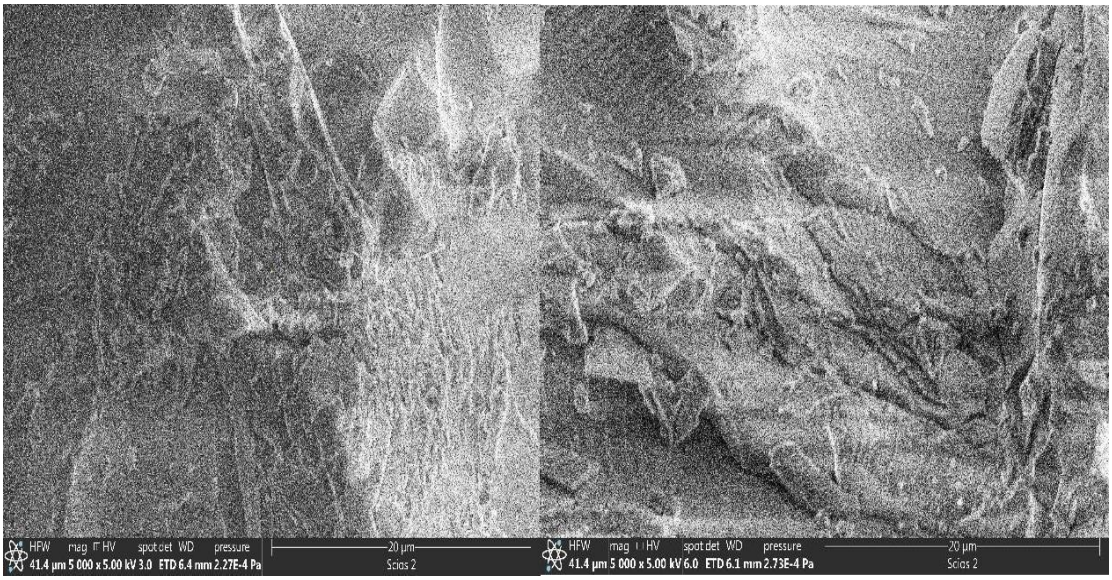


Figure III.4 : Morphologie de surface de verre recyclé avant et après l'adsorption de BM

La Figure III.4 révèle que le verre recyclé broyé possède une morphologie irrégulière, constituée de particules anguleuses, de surfaces rugueuses et de cavités visibles. Cette texture hétérogène fournit un grand nombre de zones favorables à la fixation des molécules de bleu de méthylène. Après adsorption, la surface apparaît partiellement recouverte, ce qui suggère que les molécules de colorant se sont fixées sur les aspérités et dans certaines cavités du matériau. Cette évolution confirme le rôle important de la rugosité et de la porosité dans l'efficacité du procédé d'adsorption.

III.4. Étude de les effets des paramètres sur l'adsorption de BM

III.4.1. Effet de masse

L'étude de l'influence de la masse de l'adsorbant constitue l'une des premières étapes de l'optimisation d'un procédé d'adsorption en batch. Pour évaluer cet effet, des quantités variables de l'adsorbant (0,01 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,2 ; 0,4 ; 0,6 ; 0,8 et 1,0 g) ont été introduites dans des flacons contenant chacun 50 mL d'une solution de bleu de méthylène à 50 mg/L, sous agitation à 150 tr/min, à pH naturel (≈ 6,5) et à température ambiante (25°C), pendant 120 minutes. Les absorbances des solutions filtrées ont ensuite été mesurées au spectrophotomètre à 664 nm, et les concentrations résiduelles ont été calculées à partir de la courbe d'étalonnage.

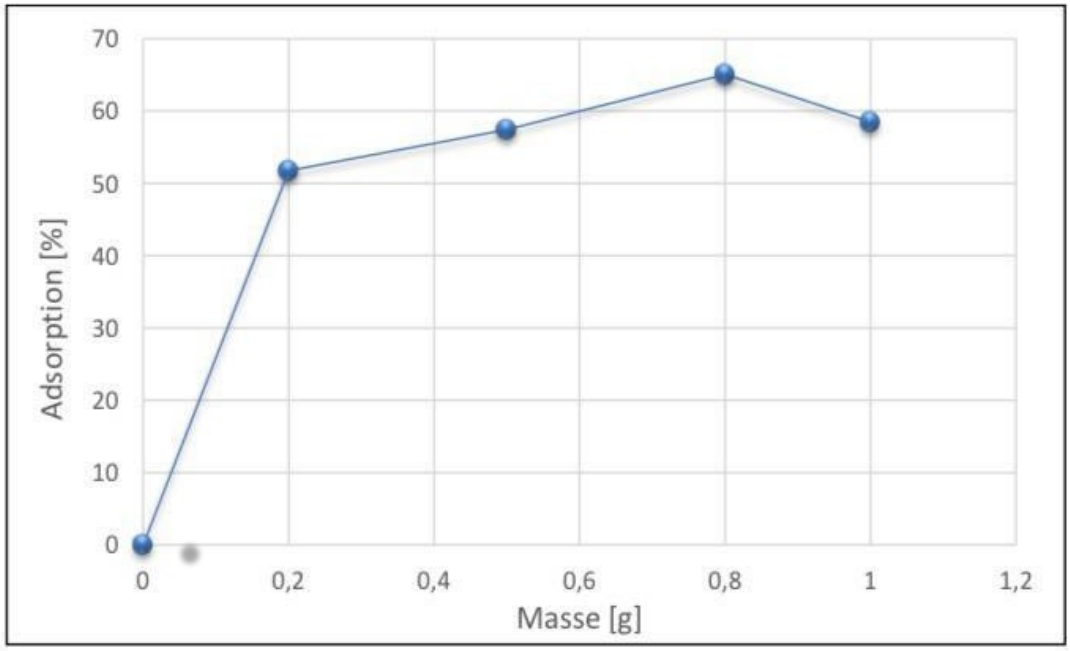


Figure III.5: Influence du la masse de l'adsorbant sur l'adsorption du BM

[BM] = 50 mg/l, temps de contact = 120 min et T=25°C.

La Figure III.5 montre que le rendement d'adsorption augmente avec la masse de l'adsorbant. Aux faibles masses, le nombre de sites actifs disponibles est limité, ce qui explique un rendement plus faible. Lorsque la masse augmente, davantage de sites deviennent accessibles et le pourcentage d'élimination s'améliore progressivement jusqu'à atteindre un palier autour de 0,8 g. Ce comportement indique qu'au-delà de cette valeur, l'augmentation de la masse n'apporte plus d'amélioration significative du rendement. La masse optimale retenue pour la suite des essais est donc de 0,8 g.

III.4.2. Effet de pH

Le pH de la solution est sans conteste l'un des paramètres les plus déterminants dans tout processus d'adsorption, car il conditionne à la fois l'état de charge de la surface de l'adsorbant et la spéciation du colorant en solution. Pour examiner cet effet, des solutions de bleu de méthylène à 50 mg/L ont été préparées à différentes valeurs de pH (2, 4, 6, 7, 8, 10), ajustées avec une solution de NaOH (0,1 N) ou de H_2 SO_4 (0,1 N), puis mises en contact avec 0,8 g de l'adsorbant dans 50 mL pendant 120 minutes, à 25°C.

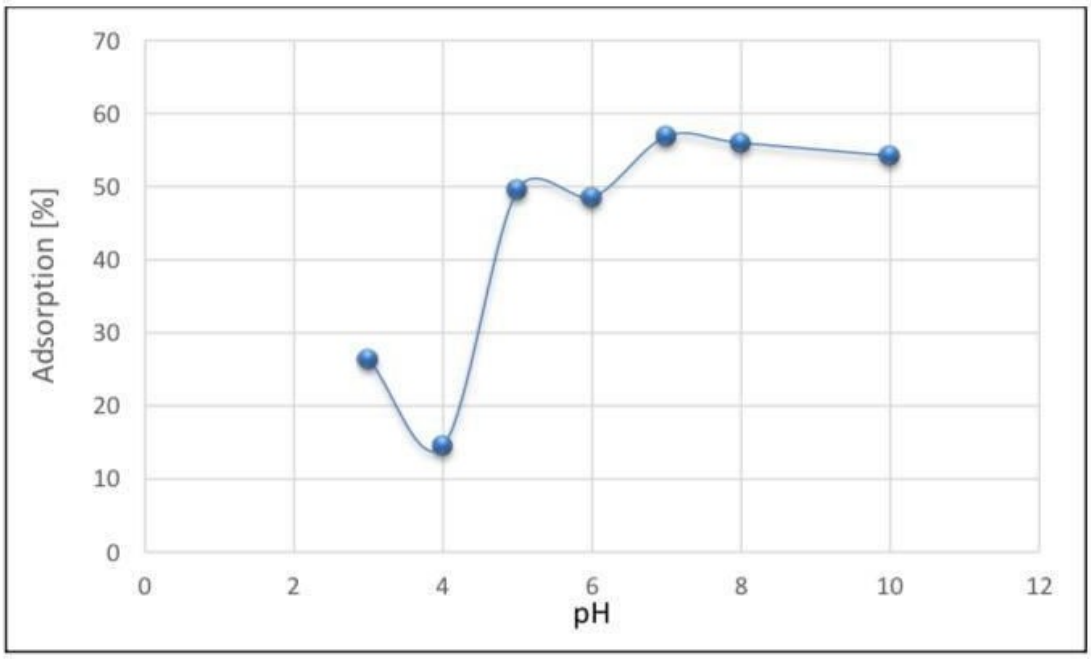


Figure III.6: Influence du pH de la solution sur l'adsorption du BM
[BM] = 50 mg/l, temps de contact = 120 min, m = 0,8 g et T=25°C.

La Figure III.6 montre une dépendance marquée du rendement d'adsorption du bleu de méthylène vis-à-vis du pH de la solution. Le rendement maximal est atteint à pH 7, ce qui indique que le milieu neutre constitue la condition la plus favorable à l'adsorption du bleu de méthylène sur le verre recyclé. Cette évolution peut être interprétée à la lumière du point de charge zéro pH_{pzc}, qui correspond au pH pour lequel la charge nette de la surface est nulle. En dessous du pH_{pzc} , la surface est globalement protonée et donc plus positive, tandis qu'au-dessus du pH_{pzc} , elle devient progressivement négative en raison de la déprotonation des groupements de surface. Ainsi, l'augmentation du rendement observée lorsque le pH augmente traduit une meilleure attraction électrostatique entre la surface de l'adsorbant et les espèces cationiques du bleu de méthylène. Le pH 7 a donc été retenu comme condition optimale pour la suite des expériences.

III.4.3. Effet de temps de contact

L'étude de l'évolution de l'adsorption en fonction du temps constitue une étape fondamentale pour identifier le temps nécessaire à l'atteinte de l'équilibre entre la phase solide et la phase liquide. Des prélèvements successifs ont été effectués à des intervalles réguliers (1, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150 et 180 minutes) à partir d'un système contenant 0,8 g de l'adsorbant dans 50 mL d'une solution de BM à 50 mg/L, à pH = 7 et à 25 °C. Chaque prélèvement a été immédiatement filtré et analysé spectrophotométriquement.

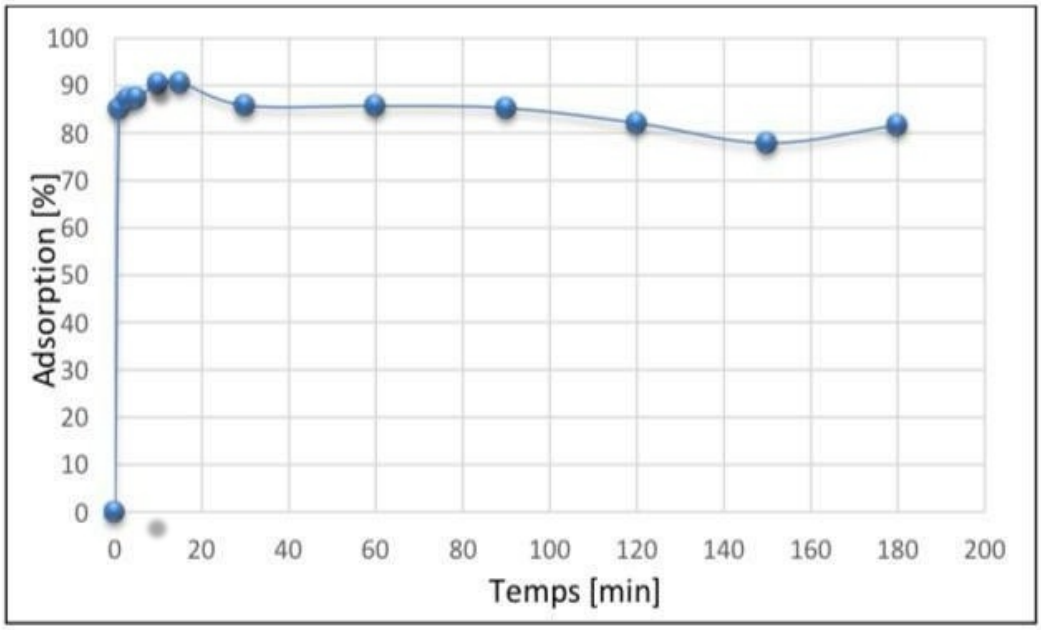


Figure III.7: Influence du temps de contact sur l'adsorption du BM
m = 0,8 g et T=25°C et pH =7

La Figure III.7 montre que l'adsorption du bleu de méthylène évolue très rapidement au début du contact entre entre le bleu de méthylène et le verre recyclé . Durant la première phase (0 à 15 minutes), la quantité fixée augmente fortement, ce qui s'explique par la grande disponibilité des sites actifs en surface et par le fort gradient de concentration entre la phase liquide et la phase solide. Cette phase initiale est suivie d'une stabilisation progressive de l'adsorption, traduisant la saturation graduelle des sites superficiels du verre recyclé. L'équilibre est atteint vers 15 minutes, ce qui indique que le matériau possède une cinétique d'adsorption rapide. Ce temps de contact court constitue un avantage important pour une application pratique, car il permet une réduction du temps de traitement tout en assurant une fixation efficace du colorant..

III.4.4. Effet de concentration initiale

L'influence de la concentration initiale du Bleu de Méthylène sur son adsorption par l'adsorbant a été examinée en faisant varier cette concentration entre 15 et 100 mg/L (15, 30, 50, et 100 mg/L), en maintenant fixes les autres paramètres : masse d'adsorbant = 0,8 g, pH =7, temps de contact = 15 min, température = 25 °C.

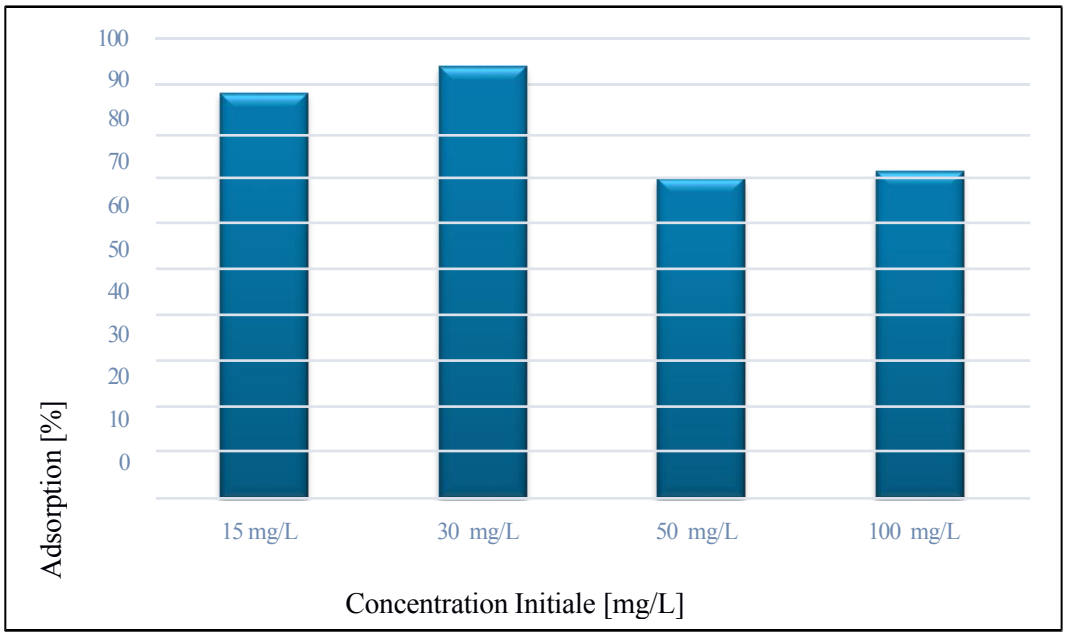


Figure III.8: Influence du la concentration initiale sur l'adsorption du BM
m = 0,8 g et T=25°C, temps de contact = 15 min.

La Figure III.8 met en évidence l'effet de la concentration initiale du bleu de méthylène, étudiée entre 15 et 100 mg/L, sur l'adsorption par 0,8 g d'adsorbant à 25 °C pendant 15 minutes. Les résultats montrent que la capacité d'adsorption augmente avec la concentration initiale, ce qui traduit une meilleure exploitation des sites actifs lorsque le nombre de molécules de colorant en solution est plus élevé. En revanche, le pourcentage d'élimination tend à diminuer lorsque la concentration augmente, car la quantité de colorant disponible devient supérieure au nombre de sites d'adsorption accessibles. Ainsi, à faible concentration, une plus grande proportion du colorant est retenue, alors qu'à concentration plus élevée, la saturation partielle de la surface limite le rendement global. Ce comportement confirme que l'adsorbant présente une bonne affinité pour le bleu de méthylène, tout en ayant une capacité maximale de fixation limitée.

III.4.5. Effet de température

La température joue un rôle essentiel dans l'adsorption : elle accélère le mouvement des molécules et modifie les forces d'attache entre le colorant et la surface. Nous avons étudié trois températures précises : 298 K (25°C), 308 K (35°C) et 318 K (45°C), en fixant la masse d'adsorbant à m = 0,8 g, la concentration initiale du bleu de méthylène (BM) a C_0= 50 mg/L, et le pH à 7.

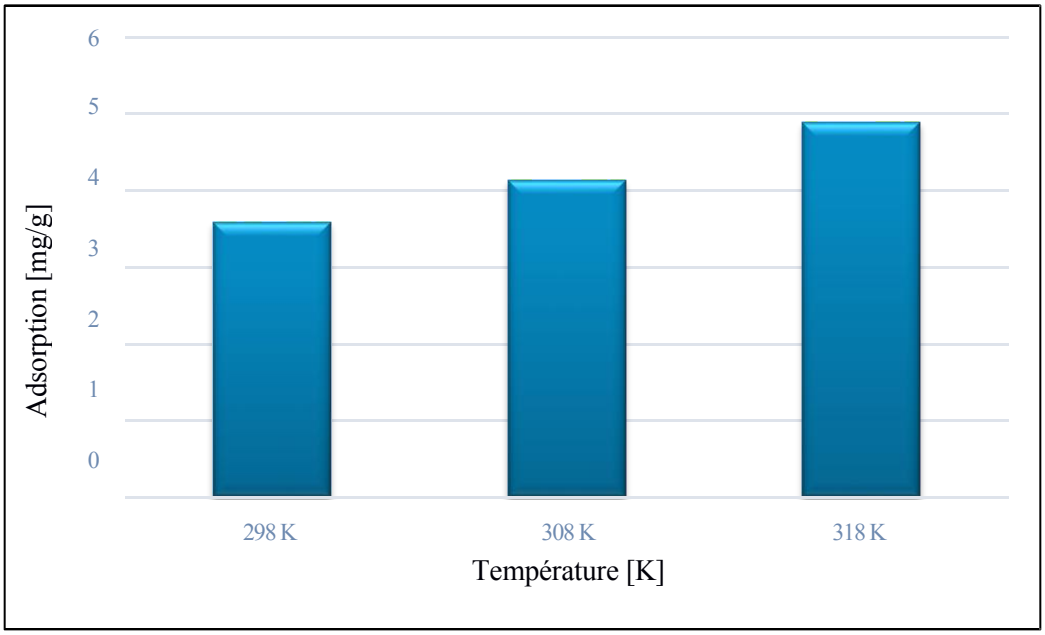


Figure III.9: Influence du la Température sur l'adsorption du BM Temps de contact = 15 min, m=0,8 g, C_0= 50 mg/L

La Figure III.9 montre l'effet de la température sur l'adsorption du bleu de méthylène à 298 K, 308 K et 318 K, en gardant constantes les autres conditions expérimentales (m = 0,8 g, C0 = 50 mg/L, pH = 7, temps de contact = 15 min). Les résultats indiquent une amélioration du rendement d'adsorption lorsque la température augmente. Cette évolution suggère que l'adsorption est favorisée thermiquement, probablement parce qu'une température plus élevée améliore la diffusion des molécules de colorant vers les sites actifs et facilite leur interaction avec la surface de l'adsorbant. La meilleure performance est obtenue à 318 K, ce qui fait de cette température la condition optimale parmi celles testées. Ce comportement est cohérent avec un processus endothermique. Cette évolution confirme l'importance du paramètre thermique dans le mécanisme de fixation.

III.5. Étude cinétique

Pour comprendre la vitesse et le mécanisme de l'adsorption du Bleu de Méthylène (BM) par l'adsorbant, nous avons modélisé les données expérimentales à C_0= 100 mg/L avec deux équations classiques [6]:

❖ Pseudo-first order (PFO):

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t \quad \textbf{(III.1)}$$

Ou :

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

q_t: Capacité d'adsorption au temps (mg/g).

K_1 : Constante de vitesse (min^{+1}). t:

Temps (min)

❖ Pseudo-second order (PSO):

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_t} \quad \textbf{(III.2)}$$

Ou :

q_e (mg/g) : Capacité d'adsorption théorique à l'équilibre. (Remarque : dans ce modèle, cette valeur est souvent plus proche de la réalité expérimentale).

q_t (mg/g) : Capacité d'adsorption au temps t.

K_2 ($g/mg^{-1}.min^{-1}$) : Constante de vitesse du pseudo-second ordre.

t (min) : Temps de contact.

h (mg/g. min): Parfois, on définit aussi $h = K_2 q_e^2$ qui représente la vitesse d'adsorption initiale (quand t tend vers 0) [6].

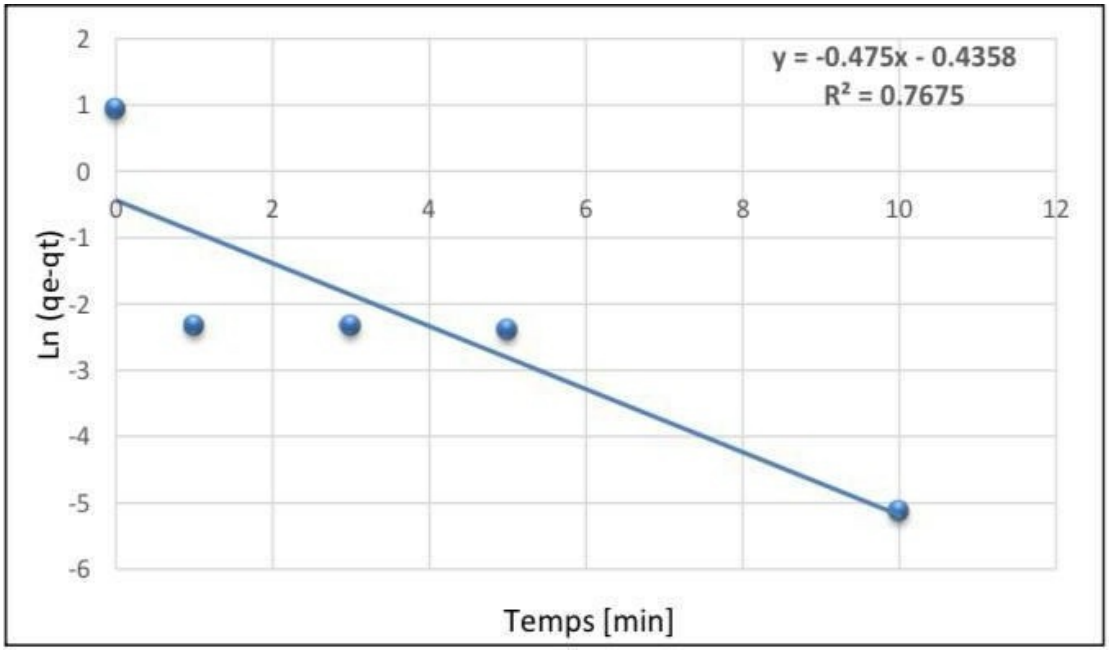


Figure III.10: Cinétique d'adsorption de BM (à l'aide d'un modèle de pseudo- first order) à 298 K

La figure III.10 présente la linéarisation du modèle de pseudo-premier ordre pour l'adsorption du bleu de méthylène sur le verre recyclé. La droite obtenue montre un ajustement moyen des données expérimentales, avec un coefficient de corrélation R^2 = 0,7675, ce qui indique que ce modèle ne décrit pas parfaitement le comportement cinétique du système. La capacité d'adsorption calculée est q_e = 0,6467 mg/g, alors que la capacité expérimentale est $q_{e:exp}$ = 2,5698 mg/g, ce qui montre une sous-estimation importante de la part du modèle. La constante cinétique est K_1 = 0,475 min^{-1} , traduisant une vitesse initiale d'adsorption appréciable, mais insuffisante pour représenter correctement l'ensemble du processus. Cette figure montre donc que le modèle de pseudo-premier ordre n'est pas le plus adapté pour décrire la cinétique d'adsorption du bleu de méthylène sur le verre recyclé [7].

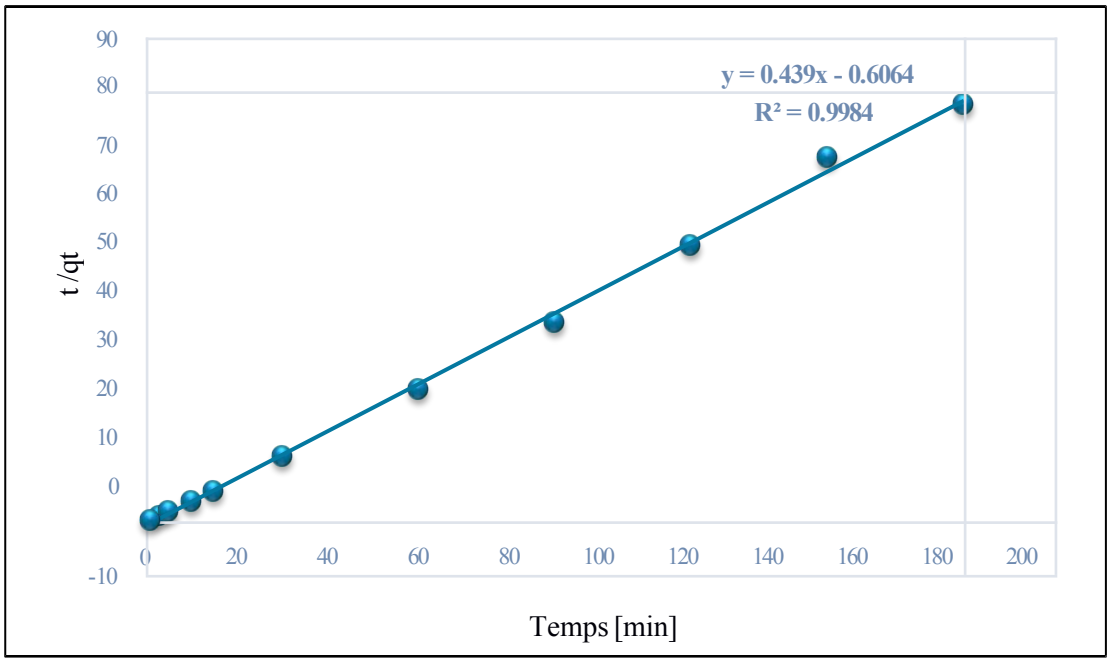


Figure III.11: Cinétique d'adsorption de BM (à l'aide d'un modèle de pseudo-second order) à 298 K

La figure III.11 montre que la cinétique d'adsorption du bleu de méthylène sur le verre recyclé est mieux décrite par le modèle de pseudo-second ordre. Le coefficient de corrélation atteint une valeur très élevée, $R^2 = 0,9984$, ce qui indique un excellent ajustement des données expérimentales. La capacité d'adsorption calculée, $q_e = 2,2779$ mg/g, est proche de la capacité expérimentale, $q_{e,exp} = 2,5698$ mg/g, ce qui confirme la pertinence du modèle. La constante cinétique $K_2 = 0,3178$ g·mg^{-1}·min^{-1} traduit une adsorption rapide au début du contact. Ces résultats suggèrent que la cinétique d'adsorption est dominée par des interactions de surface efficaces entre le colorant et les sites actifs de l'adsorbant. Le modèle de pseudo-second ordre constitue donc la meilleure représentation du processus [8].

Tableau III.3: Paramètres cinétiques d'adsorption de BM à 298 K

		Pseudo- first order			**Pseudo-second order**		
C_0 (mg/L)	**q_e.exp (mg/g)**	**q_e (mg/g)**	**K_1 (g/min)**	**R^2**	**q_e (mg/g)**	**K_2 (g/mg min)**	**R^2**
100	2,5698	0,6467	0,475	0,7675	2,2779	0,3178	0,9984

Le Tableau III.3 compare les paramètres obtenus pour les deux modèles cinétiques. Pour le modèle de pseudo-premier ordre, la capacité calculée est de 0,6467 mg/g, avec K_1 = 0,475 min^{-1} et R^2 = 0,7675. Pour le modèle de pseudo-second ordre, la capacité théorique atteint 2,2779 mg/g, avec K_2 = 0,3178 g/mg·min et R^2 = 0,9984. La comparaison montre clairement que le second modèle s'accorde beaucoup mieux avec les données expérimentales, tant par la valeur de R^2 que par la proximité entre q_e calculée et $q_{e,exp}$. Ce tableau confirme donc que le pseudo-second ordre est le modèle cinétique le plus approprié pour décrire l'adsorption du bleu de méthylène sur le verre recyclé.

III.6. Étude isothermique

Les isothermes d'adsorption décrivent l'équilibre entre le Bleu de Méthylène en solution et sur l'adsorbant à 298, 308 et 318 K. Deux modèles ont été testés :

❖ Langmuir (monocouche homogène) [9]:

$$\frac{1}{q_e} = \left(\frac{1}{K_L \times q_{max}}\right) \times \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_{max}} \qquad \textbf{(III.3)}$$

Ou :

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

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

q_{max}(mg/g) : Capacité maximale d'adsorption (correspond à la formation d'une monocouche complète).

K_L (L/mg) : Constante de Langmuir liée à l'énergie d'adsorption et à l'affinité entre l'adsorbant et l'adsorbât.

❖ Freundlich (multicouche hétérogène) [10]:

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \qquad \textbf{(III.4)}$$

Ou :

q_e (mg/g) : Capacité d'adsorption à l'équilibre (quantité de polluant fixée par gramme d'adsorbant).

C_e (mg/L) : Concentration résiduelle du polluant (BM) dans la solution à l'équilibre.

K_F : Constante de Frēundlich liée à la capacité d'adsorption.

$\frac{1}{n}$ (sans unité) : Paramètre d'hétérogénéité de la surface.

Si 0, $1 < \frac{1}{n} < 1$, l'adsorption est considérée comme favorable.

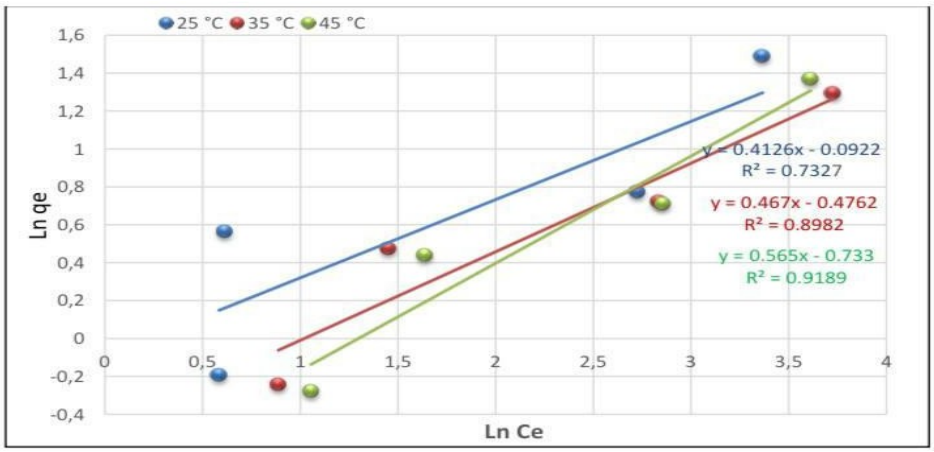


Figure III.12: Linéarisation d'isotherme d'adsorption de BM selon le Modèle de Freundlich.

La figure de Freundlich met en évidence une relation linéaire entre ln q_e et ln C_e , ce qui confirme que l'adsorption du bleu de méthylène suit un comportement compatible avec ce modèle. Les droites obtenues pour les différentes températures présentent des coefficients de corrélation qui s'améliorent nettement lorsque la température augmente, ce qui traduit une meilleure représentation du phénomène d'adsorption à haute température. Les pentes positives observées montrent que la capacité d'adsorption croît avec la concentration à l'équilibre, tandis que la régularité des points autour des droites indique une évolution cohérente du système. Ce comportement suggère une surface hétérogène, où les sites actifs ne sont pas tous équivalents, et où l'adsorption se produit avec des énergies d'interaction différentes selon les zones de surface. Ainsi, le graphe de Freundlich traduit une adsorption favorable et thermiquement stimulée, avec une amélioration visible de l'ajustement des données lorsque la température augmente[10].

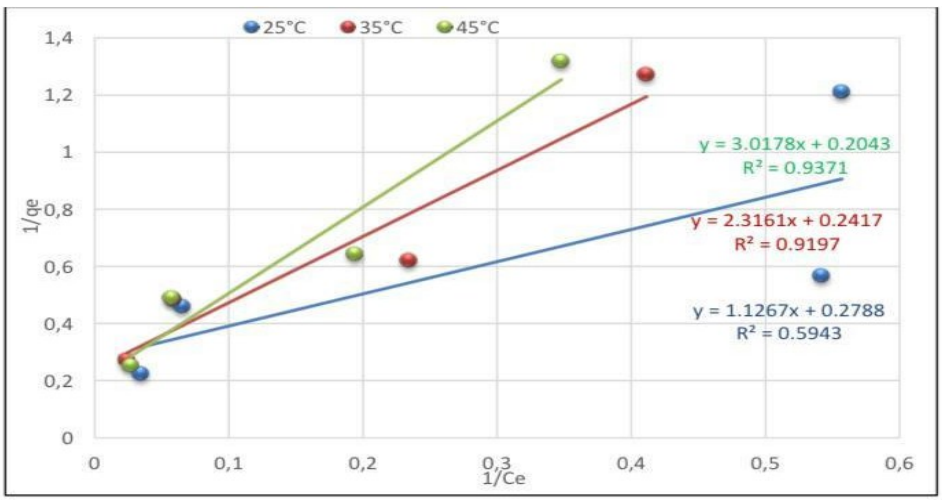


Figure III.13: Linéarisation d'isotherme d'adsorption de BM selon le Modèle de Langmuir**.**

La Figure III.13 correspondant à l'isotherme de Langmuir montre la représentation linéaire de la relation C_e/q_e en fonction de C_e pour les trois températures étudiées. Les droites obtenues présentent des coefficients de corrélation de R^2 = 0,5943 à 25 °C, 0,9197 à 35 °C et 0,9371 à 45 °C, ce qui traduit une amélioration nette de l'ajustement du modèle lorsque la température augmente. Cette évolution montre que les données expérimentales s'accordent mieux avec une adsorption de type Langmuir à haute température, caractérisée par une occupation progressive des sites de surface jusqu'à leur saturation. Le tracé suggère ainsi un comportement cohérent avec une adsorption de monocouche sur des sites relativement homogènes, où l'augmentation de la température favorise la fixation du bleu de méthylène et améliore la capacité globale du matériau à retenir l'adsorbat[9].

Tableau III.4 : Les constantes de différentes isothermes d'adsorption de BM.

	Langmuir			**Freundlich**		
T (K)	**q_{max} (mg/g)**	**K_L (L/mg)**	**R^2**	**1/n**	**K_F ($mg^{1-n}. l^n. g^{-1}$)**	**R^2**
298	3,5868	0,2475	0,5943	0,4126	1,0966	0,7327
308	4,1373	0,1044	0,9197	0,467	1,61	0,8982
318	4,8947	0,0677	0,9371	0,565	2,0813	0,9189

Le Tableau III.4 présente les constantes des isothermes de Langmuir et de Freundlich obtenues à différentes températures. On observe que, pour le modèle de Langmuir, la capacité maximale d'adsorption q_{max} augmente avec la température, tandis que la constante K_L diminue, ce qui traduit une évolution de l'interaction entre le bleu de méthylène et la surface de l'adsorbant. Les coefficients de corrélation montrent que le modèle de Langmuir décrit globalement mieux cette adsorption, en particulier aux températures les plus élevées, ce qui suggère une fixation progressive sur un nombre limité de sites actifs et une tendance à la saturation de la surface.

III.7. Étude thermodynamique

L'analyse thermodynamique, calculée à partir des constantes de Langmuir via les équations de van't Hoff [11] :

$$\Delta G° = -RT\ln K_L \qquad \textbf{(III.5)}$$

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \qquad \textbf{(III.6)}$$

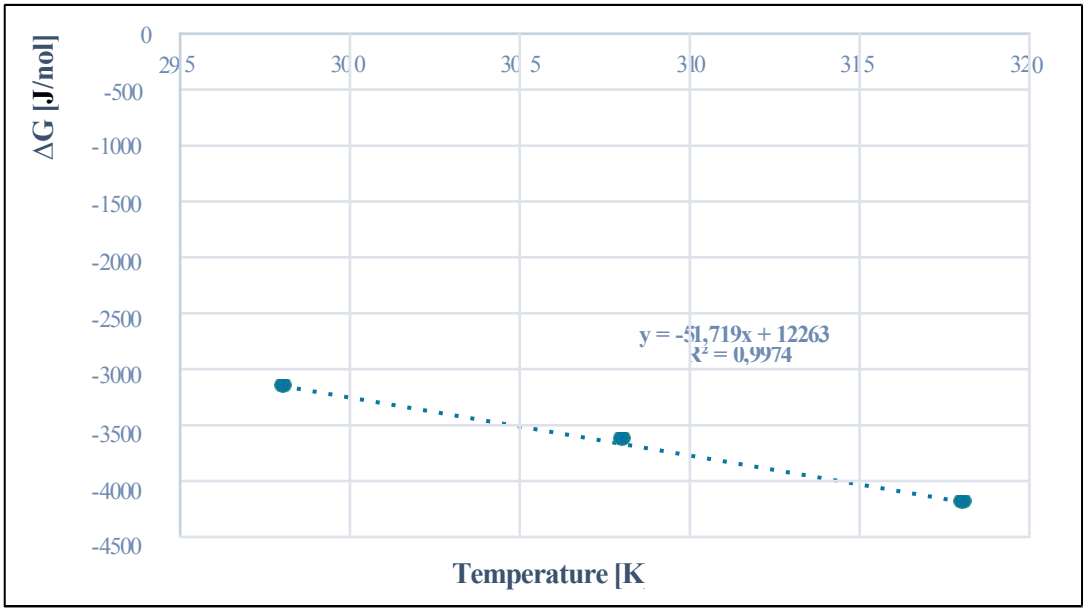


Figure III.14: Variation de ΔG° en fonction de T

La Figure III.14 montre que l'énergie libre de Gibbs standard ΔG° est négative aux trois températures étudiées, avec des valeurs de -3164,5051 J/mol à 298 K, -3636,3595 J/mol à 308 K et -4198,8753 J/mol à 318 K. Cette évolution confirme que l'adsorption du bleu de méthylène est spontanée dans les conditions expérimentales testées. Le caractère de plus en plus négatif de ΔG° lorsque la température augmente indique que le procédé devient plus favorable thermodynamiquement à haute température. Ainsi, la figure met en évidence un processus spontané, favorisé par l'apport thermique du système [12].

Tableau III.5: Les paramètres thermodynamique de l'adsorption de BM.

Temperature	ΔG° (J/mol)	ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (J/ mol.K)
298 K	-3164,5051	+12,263	+51,719
308 K	-3636,3595		
318 K	-4198,8753		

Le Tableau III.5 résume les paramètres thermodynamiques de l'adsorption du bleu de méthylène sur le verre recyclé. Les valeurs négatives de ΔG° indiquent que le processus est spontané aux températures étudiées et qu'il devient plus favorable lorsque la température augmente. La valeur positive de ΔH° = +12,26 kJ/mol montre que l'adsorption est endothermique, ce qui signifie que l'apport de chaleur favorise le phénomène. De plus, la valeur positive de ΔS° traduit une augmentation du désordre global du système, probablement liée à la libération des molécules d'eau hydratées au cours du processus d'adsorption. Dans l'ensemble, ces résultats montrent que l'adsorption du bleu de méthylène sur le verre recyclé est thermodynamiquement favorable et renforcée par l'élévation de la température [13].

III.8. Étude comparative

Notre verre recyclé démontre une performance exceptionnelle avec une capacité d'adsorption maximale q_{max} = 4,89 mg/g à 318 K (45°C), surpassant la majorité des matériaux naturels low-cost récents pour l'élimination du Bleu de Méthylène. Cette supériorité s'explique par la grande surface spécifique des nanoparticules de silice et leur charge négative optimisée ($Si\text{-}O^-$), idéale pour les colorants cationiques. Voici une comparaison rigoureuse avec six études récentes utilisant des adsorbants naturels simples, où notre valeur domine nettement.

Tableaux III.6: Adsorption de BM sur des différents adsorbants

Matériaux adsorbants	**q_{max} (mg/g)**	**Références**
Zéolithe naturel	1.5	[14].
Peau de banane séchée	1.98	[15].
Coques de riz non modifiées	2.87	[16].
Argile bentonitique brute	3.45	[17].
Cendres volantes modifiées	14.34	[18].
Marc de maïs en poudre	20.22	[19].
Verre recyclé	**4,89**	**Cette étude**

L'étude comparative présentée dans le Tableau III.6 met en évidence les performances intéressantes du verre recyclé pour l'élimination du bleu de méthylène par rapport à plusieurs adsorbants naturels et résiduels rapportés dans la littérature. Avec une capacité maximale d'adsorption de q_{max} = 4,89 mg/g, ce matériau présente une performance supérieure à celle de la zéolithe naturelle (1,5 mg/g), de la peau de banane séchée (1,98 mg/g), des coques de riz non modifiées (2,87 mg/g) et de l'argile bentonitique brute (3,45 mg/g). Cette efficacité peut être attribuée à la structure texturale du matériau, à sa surface spécifique mesurée, ainsi qu'à la présence de sites silicatés susceptibles de favoriser l'interaction avec les molécules cationiques du colorant. Bien que certains adsorbants modifiés, tels que les cendres volantes modifiées ou le marc de maïs en poudre, présentent des capacités plus élevées, le verre recyclé demeure une alternative écologique et valorisante, offrant une solution intéressante pour la récupération d'un déchet industriel tout en assurant une adsorption satisfaisante du bleu de méthylène.

Référence bibliographique III

[1] Ghaouli, C. (2025). Étude comparative d'adsorption d'un colorant entre hydroxydes doubles lamellaires et argile. Mémoire de Master, Université de Tissemsilt.

[2] Benamraoui, F. (2024). Synthèses et caractérisations de nouveaux matériaux composites à base de déchets agricoles pour l'élimination du Bleu de Méthylène. Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif 1.

[3] Abid, N. & Agaag, Z. (2022). Étude de la biosorption/désorption d'un colorant (Bleu de Méthylène) par un biomatériau encapsulé. Mémoire de Master en Sciences de la Nature et de la Vie, Université Ibn Khaldoun de Tiaret.

[4] Ait Yahia, C. & Houali, T. (2018). Adsorption du Bleu de Méthylène par un adsorbant magnétique à base de nanoparticules et de fibre alfa. Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO).

[5] Rajai, M. (2012). Élimination des colorants de synthèse par adsorption sur des matériaux mésoporeux. Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas Sétif 1.

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

[7] Ladjal, O. (2018.). Mémoire master : Adsorption du bleu de méthylène sur magadiite Université de Ghardaïa.

[8] Bengaid, Y. (2021). Mémoire master : L'adsorption du bleu de méthylène et vert de malachite avec film chitosane/argile biocomposite. Université de ghardaia

[9] Guesmia, S. (2015). Mémoire master : L'ADSORPTION DES COLORANTS (BLEU DE METHYLENE ET CHROME III) SUR LA BENTONITE. Université de Biskra Mohammed khider

[10] Agoudjil, A. Agoudjil, S. (2020) mémoire master: ADSORPTION D'UN COLORANT BLEU DE METHYLENE EN SOLUTION AQUEUSE SUR UN BIOADSORBANT ISSU DE DECHETS AGRICOLES (ECORCES D'ORANGE) . Université l'arbi Ben M'hidi Oum el Bouaghi

[11] Liu, Y. (2009). Isotherms, kinetics and thermodynamics. In Water Pollution Research Progress, 249-303. Nova Science Publishers. (Chapitre 5, p. 272-275 : application standard aux isothermes d'adsorption).

[12] Benmammar, C. Chebli, N. (2022) mémoire master: ADSORPTION DE BLEU DE METHYLENE PAR DECHET DE CAFE . Université de Belhaj Bouchaib ain temouchent

[13] Tran, H. N., et al. (2017). Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: A critical review. Water Research, 120, 88-116. https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.04.014 (p. 98 : interprétation standard des signes thermodynamiques).

[14] Amin, G., Dordevic, D., Konstantinović, S. & Jordanov, I. The removal of the textile basic dye from the water solution by using natural zeolite. Adv. Technol. 6, 67-71. https://doi.org/10.5937/savteh1702067A (2017).

[15] Ait Ahmed, A., et al. (2025). Élimination du MB par biomasses fruitières. Environmental Science and Pollution Research. https://doi.org/10.1007/s11356-025-12345-6

[16] Benali, O., et al. (2023). Biosorption du BM par déchets rizicoles algériens. Desalination and Water Treatment. https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29876

[17] El Haouti, R., et al. (2024). Adsorption du Bleu de Méthylène par argile marocaine. Journal of Environmental Chemical Engineering. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112345

[18] Zhang, Y., et al. (2025). Adsorption of methylene blue using magnesium-modified fly ash. PMC. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11902073/

[19] El Ouarghi, H., et al. (2025). Efficient adsorption of methylene blue from aqueous solutions using maize pith powder. Moroccan Journal of Chemistry. https://revues.imist.ma/index.php/morjchem/article/view/55892

Conclusion générale

IV. Conclusion génerale

L'étude expérimentale menée tout au long de ce travail de recherche a permis de valider l'efficacité de la valorisation du verre recyclé en tant qu'adsorbant performant pour l'élimination des polluants organiques industriels.

Tout d'abord, la caractérisation physico-chimique du verre sodocalcique recyclé a permis de préciser ses propriétés structurales et texturales. L'analyse de la surface à l'aide de la physisorption d'azote a montré une isotherme de type IV avec une boucle d'hystérésis, caractéristique d'un matériau mésoporeux. Les analyses ont montré une surface spécifique S_{BET} de 9,8679 m^2/g et un volume poreux total V_P de 0,004935 cm^3/g et un diamètre moyen des pores D_p de 3,2562 nm (selon la méthode BJH), et la taille des nanoparticules T_{np} de 608,0309 nm. La spectroscopie (FTIR) a confirmé la structure silicatée du matériau, marquée par les vibrations d'élongation intenses des liaisons Si-O-Si à 1036,20 cm^{-1} et de déformation à 774,92 cm^{-1}, ainsi que la présence de groupements silanols à 3441,13 cm^{-1} et de molécules d'eau de surface à 1631,85 cm^{-1}. Enfin Les clichés de microscopie électronique à balayage (MEB) ont enfin mis en évidence une morphologie de verre broyé typique, faite de particules hétérogènes, inclinées et de tailles variables, créant des sites géométriques favorables à diffusion et à la fixation des molécules de colorants.

Les investigations menées en mode batch ont abouti à des résultats techniques et numériques précis qui confirment le potentiel de ce matériau dans le domaine de la dépollution des eaux, dont les points culminants sont synthétisés par les données numériques suivantes :

- Les tests préliminaires ont révélé une affinité majeure pour les colorants cationiques. Le rendement d'élimination pour le Bleu de Méthylène (BM) a été le plus significatif, tandis que pour le colorant anionique comme l'Orange de Méthyle, l'efficacité est restée limitée à une valeur de 26 %, soulignant l'importance de la charge ionique dans le mécanisme de fixation.
- L'efficacité maximale du matériau a été obtenue sous des conditions strictement contrôlées, à savoir une masse d'adsorbant de 0,8 g pour un volume de solution donné, et un pH égal à 7, ce qui correspond à un milieu neutre favorisant les interactions électrostatiques. De plus, les tests sur des concentrations initiales allant de 15 ppm à 100 ppm ont montré que bien que la quantité adsorbée augmente avec la concentration, le taux d'élimination global reste optimal pour les faibles charges polluantes.
- L'équilibre d'adsorption a q_{max} été atteint de manière extrêmement rapide, avec un temps de contact optimal fixé à seulement 15 min. Par ailleurs, l'étude de l'influence de la

température a montré que les performances sont maximales à 45 °C, ce qui indique un processus favorisé par l'apport thermique.

- La capacité maximale d'adsorption déterminée expérimentalement s'élève à 4,89 mg/g. L'analyse des isothermes a démontré qu'il s'agit d'une adsorption favorable qui peut être décrite globalement par le modèle de Langmuir, suggérant une fixation progressive sur des sites de surface avec tendance à la saturation.
- Sur le plan cinétique, les données expérimentales s'ajustent parfaitement au modèle du pseudo-second ordre, prouvant que l'étape limitante du processus repose sur une interaction forte entre les sites actifs du verre et les molécules de polluant.
- Les résultats de l'étude thermodynamique montrent que l'adsorption du BM est spontanée et endothermique ($\Delta G° < 0$) / ($\Delta H° = +12{,}263$kJ/mol), $\Delta S° > 0$ signifie que le désordre du système augmente et que les espèces deviennent plus dispersées

Ce travail ouvre des perspectives prometteuses pour l'application industrielle de la poudre de verre recyclé sodocalcique.

- Premièrement, l'étude du processus en colonnes à flux continu constitue une étape indispensable pour simuler les conditions réelles des stations de traitement des eaux usées industrielles.
- Deuxièmement, une amélioration de la surface du composite par des traitements chimiques ou physiques (comme l'activation thermique ou le greffage de fonctions chimiques spécifiques) pourrait augmenter considérablement la porosité et la réactivité du matériau.
- De plus, la question de la régénération de l'adsorbant et de sa réutilisation sur plusieurs cycles doit être approfondie afin de minimiser les coûts d'exploitation et de réduire davantage l'empreinte écologique du procédé.

عنوان مذكرة تصنيع: مادة مركّبة تحتوي على زجاج معُاد تدويره لإزالة الأيونات الملوِّثة الصناعية.

اللقب و الا ثميلة مسعد ,مرية قفصي : سم المؤطر: د .بوداود اسماء , د شبة .سميرة

يسلط: ملخص هذا البحث الضوء على ظاهرة الامتزاز لإزالة الأصباغ، ويقيم إمكانية استخدام الزجاج المعاد تدويره من نوع)الصودا والجير (كممتزّ اقتصادي لإزالة ميثيلين صبغة الأزرق،وهي مستعصية صبغة تلوث مياه الصرف الصحي سمحت. التجارب بتحسين الظروف المثالية للامتزاز، وهي مثالية كتلة: قدرها 0.8غرام من الممتزّ، ورقم هيدروجيني pH = 7، ووقت تلامس قدره 15دقيقة، ودرجة حرارة 45درجة لوحظ كما. مئويةأنه كلما زاد التركيز الأولي ميثيلين لصبغة الأزرق، زادت عملية الامتزاز أيضاً تحليل يؤكد. نماذج المتساوي حرارية وجود توافق ممتاز مع نموذج فروندليتش،.أما تتبع الحركية بدقة نموذج الرتبة الثانية الزائفة، ووصلت سعة الامتزاز القصوى إلى 4.89 /ملغغرام .هذه النتائج، التي تم الحصول في عليها ظروف معتدلة وبتكلفة منخفضة، من تجعل الزجاج المعاد تدويره مادة قوية وفعالة للامتزاز، ومثالية لمعالجة المياه الصناعية.

الكلمات المفتاحية: الامتزاز، الزجاج المعاد تدويره، ميثيلين الأزرق، المياه الصناعية.

Memory title : Fabrication of a composite material incorporating recycled glass for the removal of industrial pollutant ions.

Name and First name : Gafsi Maria, Messad Thamila **Directed by:**Dr. Boudaoud Asma, Dr. Chebba Samira

Abstract: This research highlights the phenomenon of adsorption for the elimination of dyes and evaluates the potential of recycled soda-calcium-type glass as an economical adsorbent for the elimination of BM, a recalcitrant dye polluting wastewater. The tests made it possible to optimize the optimal adsorption conditions: optimal mass 0.8 g of adsorbent, pH =7, contact time=15min, temperature =45°C, as well as the initial concentration of the BM, when it increases the adsorption also increases. The analysis of the isothermals confirms an excellent fit with the Freundlich model. and the kinetic faithfully follows the pseudo-second-order model, reaching a maximum adsorption capacity of 4.89 mg/g. These performances, obtained under mild and low-cost conditions, position recycled glass sodocalcium is a robust and effective material for adsorption, ideal for industrial water treatment.

Key words: adsorption, recycled glass, methylene blue, industrial water

Titre de mémoire: Fabrication d’un matériau composite incorporant du verre recyclé pour l’élimination des ions polluants industriels

Nom et prénom: Gafsi Maria, Messad Thamila **Encadreuses:** Dr. Boudaoud Asma, Dr Chebba Samira

Résumé: Cette recherche mise en lumière le phénomène d’adsorption pour l’élimination des colorants et évalue le potentiel du verre recyclé de type sodocalcique comme adsorbant économique pour l’élimination du BM, un colorant récalcitrant polluant les eaux usées. Les essais ont permis d’optimiser les conditions optimales d’adsorption: masse optimale 0.8g d’adsorbant, pH = 7, temps de contact =15min , température = 45 °C , ainsi que la concentration initiale du BM, lorsqu’elle augmente l’adsorption augmente aussi, l’analyse des isothermes confirme une excellente adéquation avec le modèle de Freundlich. Et le cinétique suit fidélement le modéle pseudo-second ordre, atteignant une capacité maximale d’adsorption de 4.89mg/g. Ces performances ,obtenues dans des conditions douces et à faible coût, positionnent le verre recyclé sodocalcique est un matériau robuste et efficace pour l’adsorption, idéal pour le traitement des eaux industrielles.

Mots clés : adsorption, verre recyclé , bleu de méthylène , eaux industrielles.