



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des sciences et de la technologie
Département de chimie industrielle

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie chimique

Réf. :

Présenté et soutenu par :

ZAHRA SAMAH

Le : 3 Juin 2025

Couplage électrocoagulation-adsorption dans l'élimination des colorants synthétiques

Jury :

Pr	Benjaouahdou Chawki	Pr	Université de Biskra	Président
Dr	Chabbi Rachid	MCA	Université de Biskra	Examineur
Pr	Fadel Ammar	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Dr	Bacha Naima	MRA	CRSTRA Biskra	Co-rapporteur

Année universitaire : 2024– 2025

Remerciements

Avant toute chose, nous remercions Dieu Tout-Puissant qui a éclairé notre chemin et nous a donné le courage et la volonté nécessaires pour réaliser ce modeste travail. Nous lui sommes reconnaissants de nous avoir accompagnés tout au long de notre parcours universitaire.

J'adresse mes sincères remerciements à mon encadreur, Pr. Fadel Ammar, pour sa disponibilité constante, sa compétence, sa patience, sa gentillesse, son dévouement, ainsi que ses précieux conseils qui m'ont apporté un grand soutien moral et m'ont guidée durant toute la réalisation de ce mémoire.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à Dr Bacha Naïma, co-encadreur, pour son soutien et ses encouragements, tant de près que de loin.

Je remercie tout particulièrement Pr.Benjaouahdou Chawki, pour avoir accepté de présider le jury de soutenance de ce mémoire. Je lui exprime toute ma reconnaissance pour l'intérêt et l'attention qu'il a portés à mon travail.

Je n'oublie pas de remercier Dr. Chabbi Rachid pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'évaluer ce travail.

Je tiens aussi à remercier Saadaoui Loubna et Zenidi Nesrine pour leur précieuse aide et collaboration.

Enfin, je remercie du fond du cœur toutes les personnes qui m'ont soutenue et aidée, de près ou de loin, dans l'accomplissement de ce travail.

DÉDICACE

Au nom de Dieu, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux.

Louange à Dieu, en tout temps et en toute situation, pour l'abondance de Ses bienfaits, la beauté de Ses dons, et Sa présence constante dans ma vie.

À l'âme de ma chère mère, qui a tant désiré voir ce jour, mais le destin l'a précédée, l'éloignant du moment où le rêve de sa fille s'est réalisé.

À mon cher père, mon pilier et mon soutien constant – que Dieu le protège.

À ceux qui ont partagé avec moi les douceurs et les épreuves de la vie sous un même toit : je pense particulièrement à ma sœur, à mon frère aîné qui a veillé de longues nuits pour m'aider à apprendre, et à mon cher époux, lumière de mes yeux – que Dieu le récompense.

À toute ma famille, petits et grands, et à nos jeunes que j'encourage à poursuivre leur chemin dans la voie du savoir avec détermination et confiance.

À ma tante et à l'épouse de mon oncle, qui ont été un véritable soutien dans ma vie, ainsi qu'à tous mes amis fidèles.

Un salut spécial à ma famille bien-aimée : "Zahra" et "Rizouq".

Je conclus avec les paroles divines, source de lumière et de savoir :

"Lis au nom de ton Seigneur qui a créé..."

Sourate Al- 'Alaq, verset 1

Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction	1
Chapitre I : Généralités sur la pollution de l'eau et les colorants	
I.1 Introduction	3
I.2. Généralités sur la pollution de l'eau	3
I.2.1. Définition de pollution de l'eau	3
I.2.2. Classification de la pollution de l'eau	4
I.2.2.1. Classification selon le type de polluant	4
I.2.2.1.1. Pollution biologique	4
I.2.2.1.2. Pollution physique	4
I.2.2.1.3. Pollution chimique	4
I.2.2.2 Classification selon l'origine de la pollution	5
I.2.2.2.1. Pollution naturelle	5
I.2.2.2.2. Pollution domestique	5
I.2.2.2.3. Pollution industrielle	5
I.2.2.2.4. Pollution agricole	5
I.2.2.3. Conséquences de la pollution des eaux	6
I.2.2.3.1 Conséquences sur la santé humaine.	6
I.2.2.3.2. Conséquences écologiques	6
I.3. Contamination de l'eau par les colorants	6
I.3.1. Définition du colorant	6
I.3.2. Structure chimique des colorants	7
I.3.3. Origine des colorants	7
I.3.3.1. Origines naturelles	7
I.3.3.2. Origines synthétiques	8
I.3.3.4. Origines minérales	8
I.3.4. Classification des colorants	8
I.3.4.1. Classification chimique des colorants	8
I.3.4.2. Classification tinctoriale colorants	10
I.3.5. Utilisation des colorants	12
I.3.6. Impact des colorants sur l'environnement et la sante	13
I.4. Le Bleu de Méthylène	13
I.4.1. Origines du bleu de méthylène	14
I.4.2. Toxicité du bleu de méthylène	14
I.4.3. Préparation du bleu deméthylènes	15
I.5. Conclusion	15
Chapitre II : Techniques d'élimination des colorants avec focus sur l'électrocoagulation et l'adsorption	
II.1. Introduction	16
II.2. Les méthodes conventionnelles de traitement des eaux usées industrielles	16
II.2.1. Le traitement physique	16
II.2.1.1. Filtration	16
II.2.1.2. Décantation	16
II.2.2. Le traitement chimique	17
II.2.2.1. Oxydation chimique	17

II.2.2.2. Précipitation chimique	17
II.2.3. Le traitement biologique	17
II.3. Électrocoagulation	17
II.3.1. Principe du procédé	17
II.3.2. Les électrodes utilisées et leurs réactions	18
II.3.3. Principale loi régissant l'électrocoagulation	19
II.3.3. 1.Loi de Faraday	19
II.3.4. Connexions électriques	21
II.3.4.1. Connexion monopolaire en parallèle	21
II.3.4. 2. Connexion monopolaire en série	21
II.3.4.3. Connexion bipolaire en série	22
II.3.5. Facteurs influençant l'électrocoagulation	22
II.3.5.1 La densité du courant	22
II.3.5.2 La conductivité de l'effluent	22
II.3.5.3 Le pH de l'effluent	23
II.3.5.4. Influence de l'écart entre les électrodes	23
II.3.6. Applications de l'électrocoagulation	23
II.3.7. Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation	24
II.3.7.1. Avantages	24
II.3.7.2. Inconvénients	24
II.4. Adsorption	24
II.4.2. Principale de l'adsorption	24
II.4.3. Types d'adsorption	25
II.4.3.1 Adsorption physique	25
II.4.3.2 Adsorption chimique	25
II.4.4. Mécanismes d'adsorption	26
II.4.5. Equilibre d'adsorption	27
II.4.6. Facteurs influençant l'adsorption	27
II.4.6.1. Le temps d'équilibre	27
II.4.6.2. Concentration	27
II.4.6.3. Température	27
II.4.6.4. Nature de l'adsorbat	27
II.4.6.5. pH de milieux de réaction	28
II.4.7. Classification des isothermes	28
II.4.8.Modélisation des isothermes d'adsorption	29
II.4.8.1 Isotherme de Langmuir	29
II.4.8.2. Isotherme de Freundlich	30
II.4.8.3Modèle de Temkin	31
II.4.9 Applications de l'adsorption	31
II.5. Couplage électrocoagulation /adsorption	32
II .6. Conclusion	33

Chapitre III : Matériels et méthodes expérimentales

III.1. Introduction	34
III.2. Produits et réactifs	34
III.2.1. Préparation des solutions	34
III.2.1.1. Choix du colorant	34
III.2.1.2. Milieux de dilution	35
III.2.2. Produits et réactifs	36
III. 2.2.1. Electrodes utilisées	36
III. 2.2.2. Charbon activé	36

III. 2.2.2. a.Synthèse de biochar à partir de l'écorce de fruits de pin	36
III. 2.2.2.b. Synthèse de charbon activé (CAEFP)	37
III. 2.2.2.c. Caractérisation du charbon activé	38
III. 2.2.2.d.pH de point de charge nulle (pHpzc)	38
III.3. Dispositifs expérimentaux	40
III.3.1. La cellule d'électrocoagulation	40
III.4. Mode opératoire	41
III.4.1. Description des essais d'électrocoagulation	41
III.4.2. Description de l'essai d'adsorption	41
III.4.3. Description des essais de couplage électrocoagulation-adsorption	41
II.5. Conclusion	42
Chapitre IV : Résultats et discussion	
IV.1. Introduction	43
IV.2. Etablissement de la courbe d'étalonnage	43
IV.3. Paramètres réactionnels	44
IV.3.1. Partie électrocoagulation	44
IV.3.1.1. Effet de la concentration initiale	44
IV.3.1.2. Effet de l'intensité du courant	44
IV.3.1.3. Effet de débit de la pompe	45
IV.3.2 Partie adsorption	46
IV. 3.2.1. Effet du temps de contact	46
IV .3.2.2. Effet du pH de la solution de bleu de méthylène	47
IV.3.2.3. Effet de la concentration initiale de bleu de méthylène	48
IV.3.2.4. Effet de la température de la solution	50
IV.3.2.5. Modélisation cinétique de l'adsorption du bleu de méthylène sur biochar activé	51
IV.3.2.6. Détermination des isothermes d'adsorption	52
IV.3.2.7. Étude de l'équilibre thermodynamique	53
IV.3.3. Couplage de l'électrocoagulation et de l'adsorption pour l'élimination du bleu de méthylène	54
IV.4. Conclusion	55
Conclusion générale	56
Références bibliographiques	57
Résumé	

Liste des tableaux

Page

Chapitre I

Tableau I.1 : Principaux groupes chromophores et auxochromes, classés par intensité.	7
Tableau I.2 : classification des colorants chimiques, avec des exemples pour chaque type	8
Tableau I.3 : classification technologique des colorants avec des exemples pour chaque catégorie	11

Chapitre II

Tableau II.1 : différences entre l'adsorption physique et chimique.	25
--	----

Chapitre III

Tableau III.1 : Principales propriétés physico-chimiques du bleu de méthylène	34
Tableau III.2 : Caractéristiques physico-chimiques de l'eau de dilution	35

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Valeurs des coefficients de corrélation des deux modèles	52
Tableau IV.2 : paramètres des isothermes Langmuir et Freundlich.	53
Tableau IV.3 : Résultats de l'étude de l'équilibre thermodynamique	53
Tableau IV.4 : Effet de Couplage de l'électrocoagulation et de l'adsorption pour l'élimination du bleu de méthylène	54

Lite des figures

Page

Chapitre I

Figure I.1: pollution de l'eau	4
Figure I.2: Structure de colorant azoïque	8
Figure I.3: Structure de triphénylméthane	9
Figure I.4 : Structure de colorant anthraquinonique	9
Figure I.5: Structure du carmin d'indigo	9
Figure I.6: Structure du xanthène	9
Figure I.7: Formule chimique des colorants nitrés	10
Figure I.8: Formule chimique de phtalocyanine	10
Figure I.9: Formule chimique de Phenothiazines	10
Figure I.10: Structure du bleu de méthylène	11
Figure I.11: structure de l'Amarante	11
Figure I.12: structure chimique de l'alizarine	11
Figure I.13: Structure chimique des colorants de cuve	12
Figure I.14: Formules chimiques de méthyle orange	12
Figure I.15: Formule chimique de colorants directs	12
Figure I.16: Formule chimique de colorants dispersés	13
Figure I.17 : Blue de Méthylène	14

Chapitre II

Figure II.1: Schéma du principe d'électrocoagulation	18
Figure II.2: Connexions électriques	22
Figure II.3: Schéma du mécanisme de transport d'un adsorbat au sein d'un grain.	26

Figure II.4: Différents formes d'isothermes d'adsorption selon Giles (1960)	29
Figure II.5 : Le processus combiné dans la perspective d'une économie circulaire	33

Chapitre III

Figure III.1: Electrodes utilisés pour l'électrocoagulation	36
Figure III.2 : PH _{pzc} du charbon activé.	38
Figure III.3 : Les étapes de préparation de charbon activé.	39
Figure III.4: Dispositif expérimental	40

Chapitre IV

Figure IV.1 : Courbe d'étalonnage le bleu de méthylène.	43
Figure IV.2 : Effet de la concentration initiale à différentes valeurs (20, 60 et 100 mg/L)	44
Figure IV.3 : Effet de l'intensité du courant (0,55 et 1 A)	44
Figure IV.4 : Effet du débit de la pompe (2, 4.5 et 7 ml/min)	45
Figure IV.5 : Spectres FTIR. du charbon activé avant et après l'adsorption	46
Figure IV.6 : Effet du temps de contact sur la capacité d'adsorption du biochar actif	47
Figure IV.7: Effet du temps de contact sur le rendement d'adsorption du BM sur le charbon activé .	47
Figure IV.8 : Effet du pH sur la capacité d'adsorption du bleu de méthylène sur le charbon activé .	48
Figure IV.9 : Effet du pH sur le rendement d'adsorption du bleu de méthylène sur le charbon activé	48
Figure IV.10 : Effet de la concentration initiale sur la capacité d'adsorption du bleu de méthylène par le charbon activé	49
Figure IV.11 : Effet de la concentration initiale sur la Rendement d'adsorption du	50

bleu de méthylène par le charbon activé .

Figure IV.12 : Effet de température sur la capacité d'adsorption du bleu de méthylène sur le charbon activé .	51
Figure IV.13 : Effet de la température sur le rendement d'adsorption du bleu de méthylène sur le charbon activé préparé.	51
Figure IV.14 : Modèle cinétique pseudo-second ordre pour l'adsorption du bleu de méthylène.	52
Figure IV.15 : Modèle cinétique du pseudo-premier ordre pour l'adsorption du bleu de méthylène	52
Figure IV.16 : présentation du modèle de Langmuir.	53
Figure IV.17 : présentation du modèle de Freundlich	53
Figure IV.18 : Étude de l'équilibre thermodynamique	54
Figure IV.19 : expérience de couplage AD/EC	55
Figure IV.20 : Effet de Couplage de l'électrocoagulation et de l'adsorption pour l'élimination du bleu de méthylène	56

Liste des bréviations

EC : d'électrocoagulation

pH : potentiel hydrogène

AD : adsorption

CO₂ : dioxyde de carbone

BM :bleu de méthylène

(Al³⁺) : l'aluminium

Fe : fer

(Cu²⁺ ou Cu³⁺) : le cuivre

I : intensité de courant imposé (A).

M : poids moléculaire de l'élément considéré (g.mol⁻¹).

F : constante de Faraday (96487 C. mol⁻¹)

n : nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction considérée

m : masse du métal dissous ou de gaz formé (g).

(B.E.T) :Brunauer, Emmett et Teller

θ = taux de recouvrement.

Ce= est la concentration à l'équilibre dans la phase fluide en (mg. L⁻¹).

1/n =l'intensité d'adsorption

kF= est la capacité d'adsorption (L/mg)

R : constante des gaz parfaits (8,314 J.mol⁻¹. K⁻¹).

T : température (K).

KT : constante de Temkin(L.mg⁻¹).

b : l'énergie d'adsorption (en kJ.mol⁻¹).

Au cours des dernières décennies, la pollution de l'eau est devenue l'un des défis environnementaux les plus préoccupants à l'échelle mondiale, en raison de l'intensification des activités industrielles, notamment dans le secteur textile [64]. Les colorants organiques tels que le bleu de méthylène représentent l'un des polluants les plus fréquents dans les eaux usées industrielles, en raison de leur stabilité chimique et de leur résistance à la dégradation, ce qui constitue un danger majeur pour l'environnement et la santé humaine [61].

La technique d'adsorption est considérée comme l'une des méthodes les plus efficaces pour l'élimination des colorants, en raison de sa simplicité, son faible coût et son efficacité [60]. De nombreuses études ont démontré l'efficacité du bicha actif et des adsorbants à faible coût, préparés à partir de déchets agricoles comme la paille de riz [61], les coques d'arachide et les tiges de soja, grâce à leur grande surface spécifique et leur charge négative [65].

Parmi ces adsorbants, on distingue le biochar, préparé par pyrolyse lente de matières végétales, qui se révèle être une solution efficace et respectueuse de l'environnement [65]. Plusieurs recherches ont confirmé son aptitude à éliminer les colorants et les métaux lourds des eaux grâce à sa structure poreuse et sa surface fonctionnelle [66].

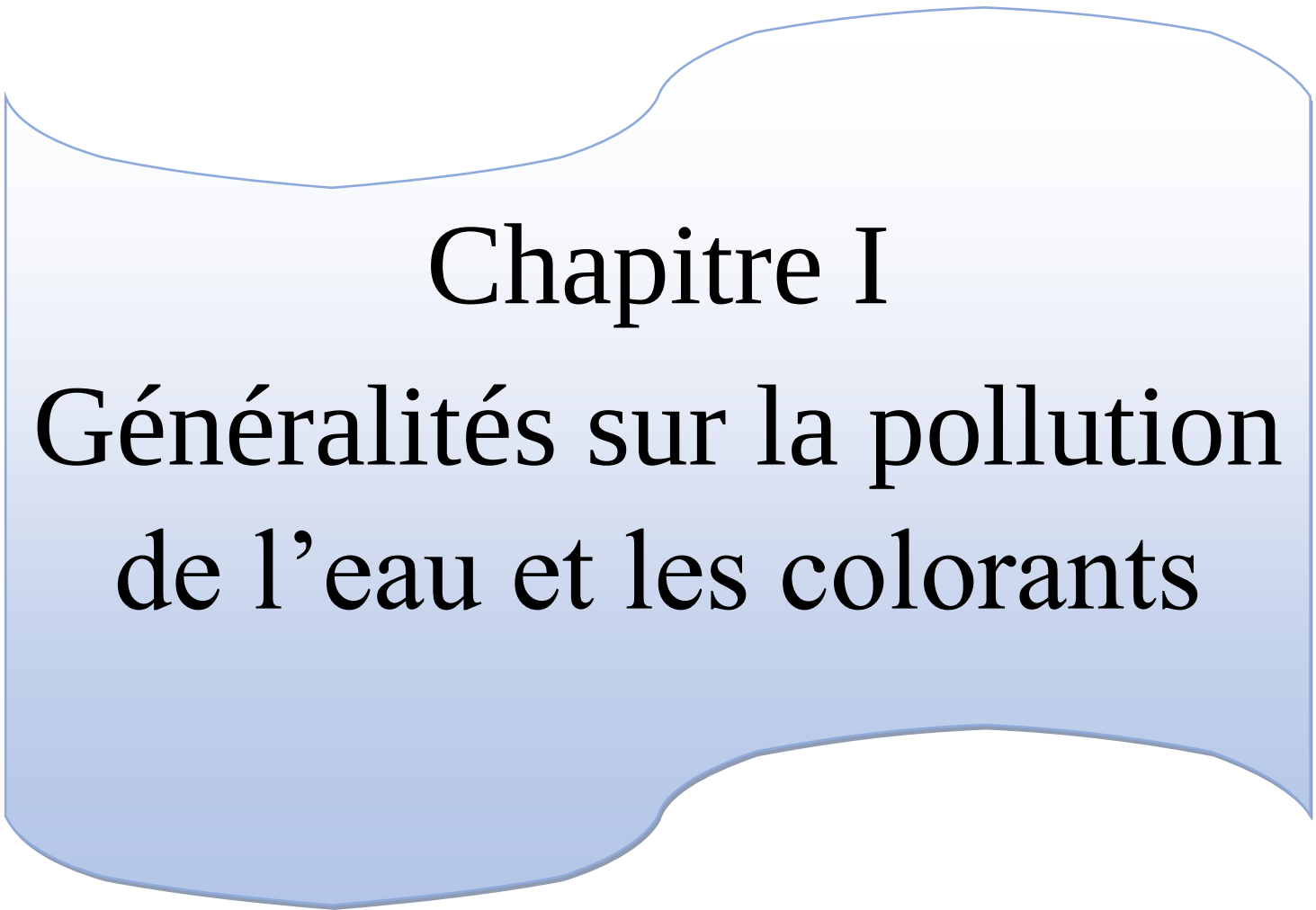
Par ailleurs, la technique de coagulation électrochimique (ou électrocoagulation) a émergé comme une méthode innovante de traitement des eaux, reposant sur la génération d'ions métalliques à partir d'électrodes qui réagissent avec les polluants pour former des précipités [63]. Lorsqu'elle est combinée à l'adsorption, cette approche montre une efficacité remarquable dans l'élimination des colorants [64].

Dans ce contexte, ce travail vise à étudier l'élimination du bleu de méthylène des solutions aqueuses en utilisant l'adsorption sur charbon activé et la coagulation électrochimique, ainsi que l'évaluation de la synergie entre ces deux techniques afin d'optimiser leur performance. Le mémoire est structuré comme suit :

- **Chapitre I :** présente une revue générale sur la pollution de l'eau et les colorants, avec un focus particulier sur le Bleu de Méthylène.
- **Chapitre II :** Passe en revue les méthodes traditionnelles et modernes de traitement des eaux, avec un accent sur l'adsorption et la coagulation électrochimique.

- **Chapitre III** : Matériels et méthodes, y compris la préparation du biochar, les réactifs, et les techniques analytiques.
- **Chapitre IV** : Présente les résultats obtenus durant cette étude ainsi que leurs discussions .

Ce travail s'achève par une conclusion générale.



Chapitre I

Généralités sur la pollution de l'eau et les colorants

I.1.Introduction

L'eau est essentielle à la vie, mais elle est de plus en plus menacée par la pollution due aux activités humaines et industrielles, ce qui représente un danger pour l'environnement et la santé humaine. La pollution de l'eau se divise en plusieurs types, notamment la pollution chimique, causée par le rejet de substances toxiques, la pollution biologique, due aux micro-organismes, et la pollution physique, liée à l'accumulation de déchets solides. Parmi les polluants chimiques les plus courants, on trouve les colorants industriels, largement utilisés dans diverses industries et responsables de la détérioration de la qualité de l'eau et de ses écosystèmes. Des alertes internationales ont été émises sur les dangers menaçant nos systèmes écologiques et nos sociétés, soulignant l'urgence de préserver cette ressource précieuse pour les générations futures[1].

I.2. Généralités sur la pollution de l'eau

I.2.1. Définition de pollution de l'eau

La pollution de l'eau constitue aujourd'hui un enjeu environnemental majeur en raison de ses effets nocifs sur la santé humaine et les écosystèmes. Elle se définit comme toute altération des propriétés de l'eau la rendant impropre ou dangereuse pour les êtres vivants. Lors de son utilisation, l'eau peut être contaminée par diverses substances ou subir des variations de température, perturbant ainsi l'équilibre naturel lorsqu'elle est rejetée dans l'environnement. Les principales causes de cette pollution sont d'origine anthropique, notamment les activités industrielles, urbaines et agricoles, qui libèrent d'importantes quantités de polluants – qu'ils soient chimiques, biologiques ou physiques – dans les milieux aquatiques, engendrant ainsi plusieurs formes de pollution, comme illustré dans **la figure I.1.** [2].



Figure I.1: pollution de l'eau [3]

I.2.2. Classification de la pollution de l'eau

I.2.2.1. Classification selon le type de polluant

Il existe plusieurs manières de classer la pollution. Selon le type de polluant, on peut classer la pollution en trois catégories : pollution biologique, pollution physique et pollution chimique.

I.2.2.1.1. Pollution biologique

Les eaux usées renferment l'ensemble des micro-organismes excrétés avec les matières fécales. Cette flore intestinale normale est souvent accompagnée d'agents pathogènes. Ces micro-organismes se répartissent en quatre grandes catégories, classées selon leur taille croissante : les virus, les bactéries, les protozoaires, et les helminthes[4].

I.2.2.1.2. Pollution physique

La pollution physique englobe deux formes principales : la pollution thermique, résultant d'une élévation de la température de l'eau, ce qui entraîne une baisse de la concentration en oxygène dissous et une diminution de la solubilité des gaz [5].

I.2.2.1.3. Pollution chimique

La pollution chimique de l'eau constitue l'une des formes les plus graves de contamination, causée par l'introduction de substances organiques telles que les pesticides et les colorants, ainsi que de composés minéraux comme les métaux lourds et les nitrates, issus principalement des activités industrielles et agricoles. Cette pollution engendre des déséquilibres écologiques, réduit la teneur en oxygène dissous et favorise la propagation de maladies. Pour en atténuer les effets, il est primordial de mettre en œuvre des technologies de traitement avancées et de renforcer les normes environnementales [6].

I.2.2.2. Classification selon l'origine de la pollution

I.2.2.2.1. Pollution naturelle

La pollution naturelle de l'eau est causée par des facteurs géologiques et climatiques tels que l'activité volcanique, l'érosion, les inondations et la décomposition des êtres vivants. Bien qu'elle soit d'origine naturelle, elle peut entraîner des déséquilibres environnementaux, comme des modifications chimiques de l'eau, la prolifération d'algues toxiques et une baisse du taux d'oxygène, ce qui nécessite parfois des mesures d'atténuation[7].

I.2.2.2.2. Pollution domestique

Le rejet direct des eaux usées domestiques dans le milieu naturel compromet l'équilibre des écosystèmes aquatiques, transformant parfois les rivières en de véritables égouts à ciel ouvert.

Ce type de pollution se manifeste par[8] :

- La présence de micro-organismes fécaux,
- Des concentrations élevées en sels minéraux,
- La présence de détergents,
- Une forte charge en matières organiques.

I.2.2.2.3. Pollution industrielle

L'industrie utilise de grandes quantités d'eau, mais le principal problème réside dans le fait que la majeure partie de cette eau retourne à la nature, polluée, car elle est chargée de déchets, de produits chimiques et de métaux lourds. Plus de 85 % de l'eau consommée par l'industrie est renvoyée à la nature sous forme d'eaux usées[2].

I.2.2.2.4. Pollution agricole

L'agriculture demeure l'une des principales sources de pollution de l'eau. Le ruissellement des engrais, l'utilisation de pesticides et les effluents d'élevage contribuent tous à la pollution des cours d'eau et des eaux souterraines. De fortes concentrations en sels minéraux (azote, phosphate, potassium) proviennent de[9] :

- ✓ Des engrais,
- ✓ Des purins et lisiers (élevage),
- ✓ La présence de produits chimiques de traitement (pesticides, herbicides...).

I.2.2.3. Conséquences de la pollution des eaux

I.2.2.3.1 Conséquences sur la santé humaine :

L'eau contaminée peut contenir des pesticides, des micro-organismes pathogènes (virus, bactéries, parasites), et des éléments toxiques. Ces polluants sont dangereux pour la santé humaine. Lorsque les populations consomment de l'eau polluée, cela a des conséquences graves sur leur santé. Dans les pays pauvres, l'accès à de l'eau potable de qualité est très difficile car les installations de purification de l'eau sont coûteuses. Cela peut entraîner des maladies telles que le choléra, ainsi que certains types de cancers. Par exemple, en Inde, les habitants consomment de l'eau polluée, ce qui mène parfois à des décès [4].

I.2.2.3.2. Conséquences écologiques

La pollution de l'eau perturbe l'équilibre écologique en causant[10] :

- ❖ Une diminution de l'oxygène, entraînant l'asphyxie des organismes aquatiques
- ❖ Une perturbation de la chaîne alimentaire due à l'accumulation de polluants toxiques.
- ❖ La prolifération d'algues toxiques causant la mortalité des poissons.
- ❖ Une perte de biodiversité avec l'extinction de certaines espèces.
- ❖ Des modifications chimiques de l'eau, la rendant impropre à la vie.
- ❖ La destruction des habitats naturels, affectant les récifs coralliens et les rivières.

I.3. Contamination de l'eau par les colorants

I.3.1. Définition du colorant

Les colorants sont des composés chimiques présentant une structure chromophore, responsable de la couleur, ainsi que des groupes fonctionnels leur conférant la capacité d'interagir soit avec les fibres textiles (groupes réactifs), soit avec le milieu solvant (groupes solubilisants ou dispersants). Selon leur nature, les colorants peuvent être solubles ou dispersibles dans un liquide, généralement l'eau. Leur fixation sur un matériau fibreux peut s'effectuer par différents types d'interactions, notamment des liaisons covalentes, ioniques, hydrogène ou par des forces de Van der Waals. Par ailleurs, certains colorants peuvent être incorporés en masse dans des matériaux polymères thermoplastiques, sous forme de pigments intégrés directement dans la matrice polymère au cours de sa synthèse[11].

I.3.2. Structure chimique des colorants

La structure chimique des colorants est fondée sur la présence de groupes chromophores et auxochromes, qui influencent directement l'absorption et la réflexion de la lumière, déterminant ainsi la couleur perçue. Les groupes chromophores, contenant des doubles liaisons conjuguées, sont responsables de l'absorption sélective de la lumière, ce qui donne naissance à la couleur. Quant aux groupes auxochromes, tels que -OH, -NH₂ ou -SO₃H, ils jouent un rôle essentiel en intensifiant la couleur, en augmentant la solubilité du colorant et en favorisant sa fixation sur les matériaux[12].

Tableau I.1 : Principaux groupes chromophores et auxochromes, classés par intensité [13].

Groupement chromophores	Groupement auxochromes
Azo (-N=N-)	Amino (-NH ₂)

Nitroso (-NO ou -N-OH)	Methylamino (-NHCH ₃)
Carbonyl (=C=O)	Diméthylamino (-N(CH ₃) ₂)
Vinyl (-C=C-)	Hydroxyl (-OH)
Nitro (-NO ₂ ou =NO-OH)	Alkoxy (-OR)
Sulfure (>C=S)	Groupements donneurs d'électrons

I.3.3. Origine des colorants minéraux

Les colorants ont diverses origines, mais ils sont principalement dérivés de sources naturelles ou synthétiques. Voici quelques-unes des origines les plus courantes :

I.3.3.1. Origines naturelles

Certains colorants proviennent de sources naturelles variées telles que les plantes, les fruits, les légumes, les insectes ou encore les minéraux. À titre d'exemple, la cochenille permet d'obtenir une teinte rouge, le curcuma fournit une couleur jaune, tandis que la guède est utilisée pour produire des nuances de bleu, parmi d'autres exemples [9].

I.3.3.2. Origines synthétiques

Les colorants alimentaires synthétiques sont classés en fonction de leur structure chimique ainsi que de la nature de leur noyau aromatique. Ces colorants sont fabriqués de manière industrielle par l'homme, et peuvent soit être des reproductions exactes des colorants naturels, soit être des composés inexistants dans la nature. Les producteurs de colorants privilégient généralement l'utilisation de matières premières simples dans leur processus de fabrication [14].

I.3.3.4. Origines minérales

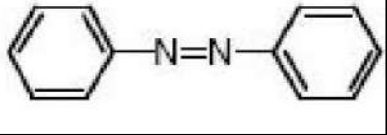
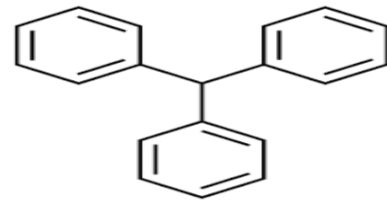
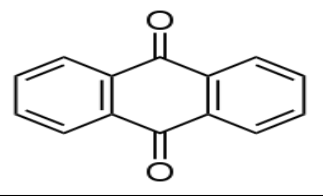
Les couleurs étaient à l'origine exclusivement obtenues à partir de matériaux naturels. Les premiers colorants connus remontent à des sites tels que Lascaux (France) et Altamira (Espagne), datant de la période magdalénienne. Ces pigments étaient principalement minéraux : les oxydes de fer pour les teintes jaunes, ocres et rouges, et les oxydes de manganèse pour les teintes brunes [15].

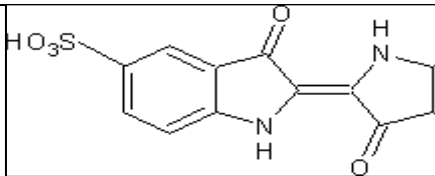
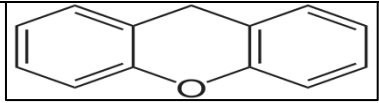
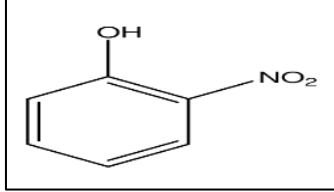
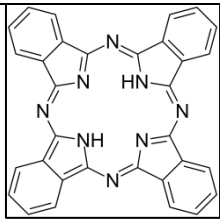
I.3.4. Classification des colorants

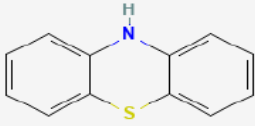
I.3.4.1. Classification chimique des colorants

La classification chimique des colorants est une méthode qui les organise en fonction de leur structure moléculaire, notamment la nature du chromophore, c'est-à-dire le groupe responsable de la couleur. Cette approche permet de comprendre leurs propriétés et leurs applications. Les principales familles de colorants incluent :

Tableau I.2 : classification des colorants chimiques, avec des exemples pour chaque type

Classification Chimique	Exemples de Colorants	Caractéristiques et Applications	Structure chimique des colorants
Colorants azoïques	Orange II, Méthyl Orange	Couleurs vives, bonne stabilité largement utilisée dans les textiles et l'industrie alimentaire[17]	 Figure I.2: Structure de colorant azoïque
Colorants triphénylméthanes	Green, Violet	Couleurs intenses et vives utilisés dans la teinture et les tests biologiques[17]	 Figure I.3: Structure de triphénylméthane
Colorants anthraquinoniques	Alizarin Purprin	Résistants à la lumière, utilisés pour les teintures rouges et bleus[17]	 Figure I.4 : Structure de colorant anthraquinonique

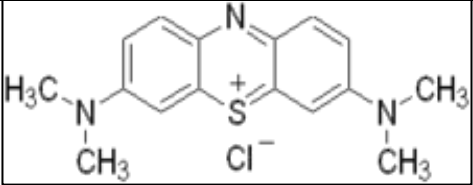
Colorants indigoïdes	Indigo, Tyri n Purpure	Elles portent ce nom parce qu'elles sont dérivées de l'indigo, et sont utilisées dans les produits pharmaceutiques et les diagnostics médicaux.[16]	 Figure I.5: Structure du carmin d'indigo
Colorants xanthènes	Eosine, Rhodamine B	Les composés de la fluorescéine halogénée sont utilisés comme traceurs et colorants dans divers domaines grâce à leur forte fluorescence [16]	 Figure I.6: Structure du xanthène
Colorants nitrés et nitrosé	Acide picrique Nitroso	Utilisés dans l'industrie les explosifs et les chimiques [17]	 Figure I.7: Formule chimique des colorants nitrés
Colorants phtalocyanine	Bleu Phtalocyanine,	Sont des colorants à structure complexe contenant un atome métallique central, obtenus à partir du dicyanobenzène et d'un halogénure métallique[16]	 Figure I.8: Formule chimique de phtalocyanine

Phenothiazines	Bleu de méthylène	Utilisé comme précurseur dans la fabrication de colorants, médicaments antipsychotiques, insecticides, et comme agent stabilisant dans certains polymères[76].	 Figure I.9: Formule chimique de Phenothiazines
-----------------------	-------------------	--	---

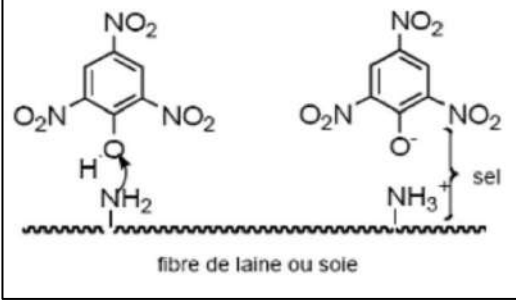
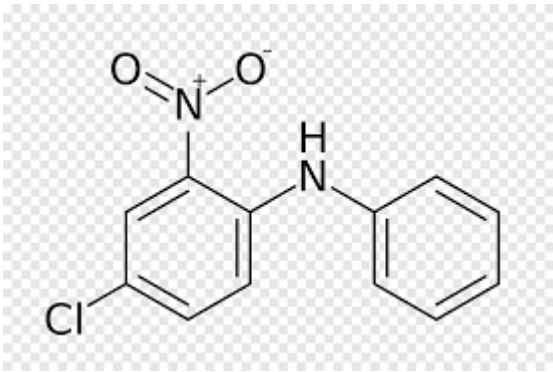
I.3.4.2. Classification tinctoriale des colorants

La classification technologique des colorants est basée sur leur domaine d'application, leur solubilité et leur mode de fixation. Elle est divisée en plusieurs catégories principales :

Tableau I.3 : classification technologique des colorants avec des exemples pour chaque catégorie

Classification tinctoriale	Exemples de Colorants	Caractéristiques et Applications	Structure chimique des colorants
Colorants basiques ou cationiques	Fuchsine basique	Utilisés pour teindre les fibres acryliques, la laine et la soie, nécessitent un milieu acide [18]	 Figure I.10: Structure du bleu de méthylène

Colorants anioniques	Rouge Conge, Orange de méthyle	Possèdent une charge négative utilisés pour teindre les celluloses et les protéines naturelles	Figure I.11: structure de l'Amarante
Colorants à mordant	Alizarine, Violet crésyl	Nécessitent l'utilisation d'agents fixateurs (mordants) comme l'alun ou les sels de chrome améliorer l'adhérence aux tissus	Figure I.12: structure chimique de l'alizarine
Colorants de cuve	Indigo, Anthraquinone	Insolubles dans l'eau, ils sont réduits en une forme soluble lors de la teinture, puis redeviennent insolubles sur les fibres	Figure I.13: Structure chimique des colorants de cuve
Colorants réactifs	Blue réactif 19, Rouge réactif 5	Fixent de façon covalente aux fibres celluloses, assurant une	Figure I.14: Formules chimiques de méthyle orange

		bonne résistance au lavage [19]	
Colorants directs	Brun direct, Jaune direct 86	Le lien entre colorant et matière à teindre est assuré par des liaisons hydrogène et des liaisons de Van der Waals [20]	 Figure I.15: Formule chimique de colorants directs
Colorants dispersés	Jaune dispersé 3, Bleu dispersé	Insolubles dans l'eau utilisés pour teindre le polyester et les fibres synthétique [18]	 Figure I.16: Formule chimique de colorants dispersés

I.3.5. Utilisation des colorants

Les colorants trouvent une large gamme d'applications dans divers secteurs industriels, parmi lesquels on peut citer les principaux suivants[16] :

- ❖ Pigments utilisés dans l'industrie des plastiques.
- ❖ Encres et papiers pour l'imprimerie.
- ❖ Colorants alimentaires dans l'industrie agroalimentaire.
- ❖ Pigments pour peintures, matériaux de construction et céramiques dans le secteur du - bâtiment.

- ❖ Colorants capillaires pour l'industrie cosmétique.
- ❖ Colorants et conservateurs dans l'industrie pharmaceutique.
- ❖ Colorants pour carburants et huiles dans l'industrie automobile, entre autres.
- ❖ Colorants textiles utilisés dans la mode, la décoration, la construction, les transports, ainsi que dans des applications médicales.

I.3.6. Impact des colorants sur l'environnement et la sante

Les colorants sont généralement non biodégradables ou présentent une faible biodégradabilité. Leur présence dans les eaux polluées génère une nuisance visuelle et contribue aux problèmes de pollution, en raison de l'importante quantité d'eaux usées contenant des résidus de colorants. Le déversement de ces eaux usées dans l'environnement constitue une source majeure de pollution, altérant gravement la vie aquatique et représentant ainsi un danger significatif pour les humains et les écosystèmes [21].

L'exposition prolongée des travailleurs aux colorants et pigments peut entraîner divers effets pathologiques. Certaines substances, telles que les amines aromatiques et les sels métalliques, peuvent présenter une toxicité grave. Par inhalation sous forme de poussières ou par contact direct avec la peau, ces colorants et pigments peuvent causer des maladies respiratoires, des cancers des voies urinaires et du poumon, ainsi que des effets délétères sur les globules rouges [22].

I.4.Le Bleu de Méthylène



FigureI.17 : Blue de Méthylène [23]

Cette image montre deux solutions de bleu de méthylène : un verre contenant une solution diluée, et un flacon contenant une solution concentrée. Le bleu de méthylène est couramment utilisé comme colorant modèle dans les expériences d'adsorption, ou comme traceur pour étudier la pollution de l'eau par des contaminants organiques.

I.4.1. Origine du bleu de méthylène

Le bleu de méthylène, également appelé chlorure de méthylthioninium, est un composé organique synthétique faisant partie de la famille des phénothiazines. Il a été synthétisé pour la première fois en 1876 par le chimiste allemand Heinrich Caro. Bien qu'il ait été initialement conçu pour l'industrie textile en tant que colorant, il a rapidement trouvé des applications en biologie et en médecine en raison de ses propriétés chimiques particulières [26].

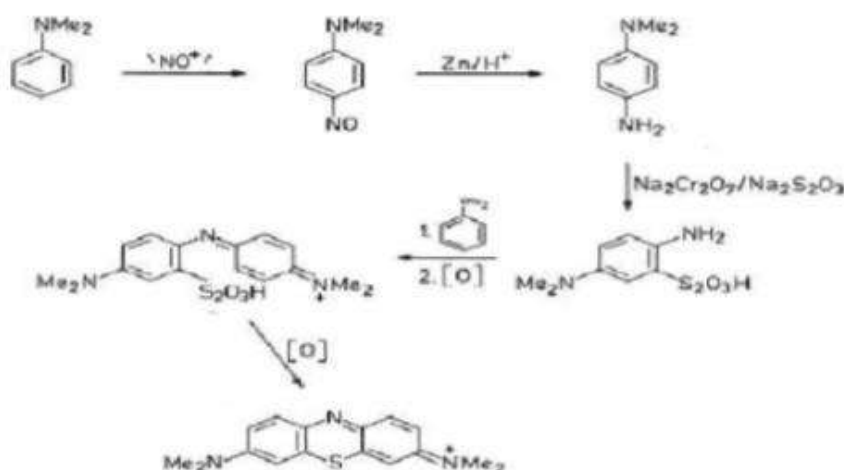
I.4.2. Toxicité du bleu de méthylène

Le bleu de méthylène n'est pas considéré comme extrêmement dangereux, mais il peut avoir des effets néfastes sur les organismes vivants et les milieux aquatiques. Une exposition aiguë à ce produit peut entraîner [27] :

- **Exposition cutanée** : irritation de la peau et lésions oculaires permanentes.
- **Inhalation** : respiration rapide ou difficile, accompagnée d'une augmentation du rythme cardiaque.
- **Ingestion** : irritation du système gastro-intestinal, nausées, transpiration excessive, confusion mentale, cyanose et nécrose des tissus.

I.4.3. Préparation du bleu de méthylène

La préparation du bleu de méthylène est faite suivant le chemin réactionnel ci-dessous :



I.4. Conclusion

Les colorants, en particulier le bleu de méthylène, font partie des micropolluants présents dans les eaux usées industrielles. Bien qu'ils soient souvent détectés à de faibles concentrations, leur persistance et leur toxicité posent un réel risque pour les écosystèmes aquatiques. Leur présence dans l'environnement, notamment en raison des rejets non traités ou partiellement traités, soulève des préoccupations similaires à celles liées aux résidus pharmaceutiques.

Ce chapitre a permis de mettre en évidence l'importance de ces composés dans la pollution des milieux aquatiques, en soulignant leur origine, leur comportement dans l'environnement et leur potentiel écotoxique. Il confirme la nécessité de développer des stratégies de traitement ciblées pour limiter leur dispersion et réduire leur impact sur la qualité de l'eau et la santé environnementale.

Chapitre II

Techniques d'élimination des colorants avec focus sur l'électrocoagulation et l'adsorption

II.1. Introduction

Pour faire face à la pollution de l'eau causée par les colorants industriels tels que le bleu de méthylène, plusieurs méthodes traditionnelles ont été adoptées, comme la précipitation chimique, l'oxydation biologique et la filtration membranaire. Cependant, ces techniques s'avèrent souvent insuffisantes pour éliminer complètement ces polluants. En revanche, des technologies modernes plus efficaces ont émergé, telles que l'adsorption, qui repose sur la capture des molécules polluantes à la surface de matériaux adsorbants, et l'électrocoagulation, qui utilise un courant électrique pour agglomérer et éliminer les contaminants. La combinaison de ces deux techniques constitue une approche efficace pour le traitement des eaux industrielles, contribuant ainsi à l'amélioration de leur qualité et à la réduction de l'impact environnemental de ces polluants [28].

II.2. Les méthodes conventionnelles de traitement des eaux usées industrielles

II.2.1 Le traitement physique

II.2.1.1. *Filtration*

La filtration est un procédé de séparation qui consiste à passer un mélange solide-liquide à travers un matériau poreux (filtre), lequel retient les particules solides tout en permettant le passage du liquide [29].

Il existe des principes et des lois qui régissent le processus de filtration, ainsi que des méthodes de surveillance et de contrôle du procédé, ainsi que différents systèmes de nettoyage. On distingue principalement trois types de filtration : la filtration par tamis, le filtre à brosse et la filtration par d'autres méthodes [30].

II.2.1.2. *Décantation*

La décantation est un procédé qui consiste à laisser un mélange hétérogène reposer pendant un certain temps, permettant aux particules solides en suspension de se déposer au fond du récipient. Le liquide surnageant peut ensuite être versé délicatement dans un autre récipient, obtenant ainsi un mélange presque homogène. Pour accélérer le processus de sédimentation, on peut recourir à l'utilisation d'une centrifugeuse, étant donné que la sédimentation naturelle est un processus relativement lent [31].

II.2.2 Le traitement chimique

II.2.2.1. Oxydation chimique

Le principe de base de cette méthode repose sur l'oxydation des substances organiques :

- ❖ Elle est couramment utilisée pour traiter la Demande Chimique en Oxygène (DCO), permettant ainsi l'élimination des substances organiques qui sont difficiles à biodégrader, voire non biodégradables.
- ❖ Ce procédé est également très efficace pour la désinfection et la désodorisation des eaux recyclées, améliorant leur qualité pour une réutilisation sécurisée [32].

II.2.2.2. Précipitation chimique

Dans le traitement des eaux, les précipitations chimiques (autres que celles de coagulation-floculation) sont principalement employées pour éliminer, par insolubilisation, un ou plusieurs composés minéraux qui entravent l'utilisation de l'eau [33].

Le processus débute par l'ajout de flocculants, comme le polychlorure d'aluminium (PACl) et l'hydroxyde de sodium (NaOH), dans l'eau brute. Cela permet la formation de floccs qui capturent les polluants en suspension dans l'eau. Le PACl est conservé dans un réservoir où il tend à cristalliser progressivement au fil du temps [34].

II.2.3. Le traitement biologique

Le traitement par boues activées, également connu sous ce nom, est un procédé de purification inspiré des mécanismes naturels. Son principe repose sur l'utilisation de bactéries vivantes, qui assimilent les polluants (comme les matières organiques, par exemple), contribuant ainsi à la purification des eaux usées [35].

II.3. Electrocoagulation

II.3.1. Principe du procédé

Le procédé d'électrocoagulation repose sur l'utilisation d'anodes solubles. Il consiste à appliquer un courant (ou un potentiel) entre deux électrodes (en fer ou en aluminium) immergées dans un électrolyte situé dans un réacteur. Cela génère in situ des ions (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+}) qui peuvent former un coagulant en solution et provoquer la coagulation-floculation des polluants à éliminer. Le champ électrique créé induit un mouvement d'ions et de particules chargées, facilitant ainsi l'agglomération des matières en suspension sous forme de floccs, qui

seront ensuite éliminés par un procédé physique classique tel que la décantation, la flottation ou la filtration [36].

La coagulation est un processus visant à déstabiliser les particules colloïdales en suspension en neutralisant la charge négative à la surface de ces particules, responsable de leur force de répulsion. Cela se fait par l'ajout de cations générés par le matériau de l'anode et par les produits issus de leur hydrolyse. Les particules déstabilisées s'adsorbent sur des précipités tels que $M(OH)_3$ et s'agglomèrent, formant ainsi des flocs, ce qui constitue le processus de floculation [37].

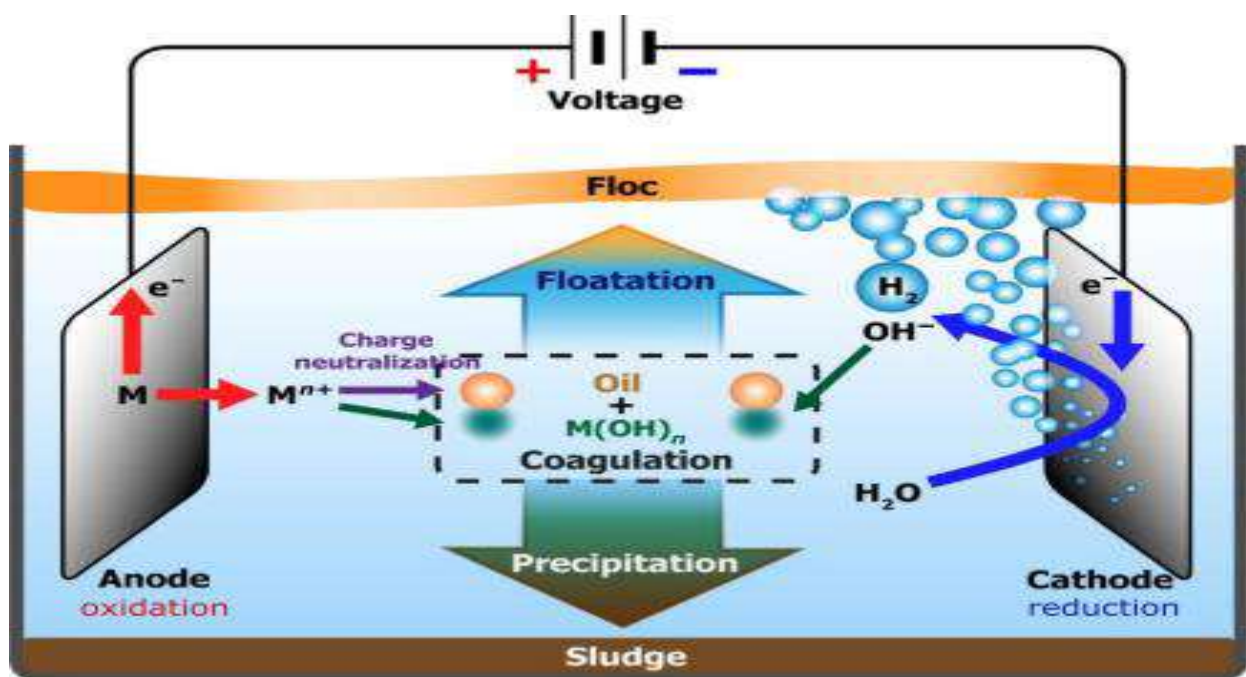


Figure II.1: Schéma du principe d'électrocoagulation [38]

II.3.2. Les électrodes utilisées et leurs réactions

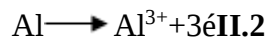
Les électrodes les plus fréquemment utilisées dans le processus d'électrocoagulation sont en aluminium ou en fer, car elles présentent des formes ioniques trivalentes. Les réactions principales qui se produisent à ces électrodes sont les suivantes.

- *A l'anode*

On a l'oxydation du métal qui va passer de l'état solide à l'état ionique selon la réaction :

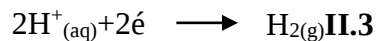


L'aluminium se dissout suivant la réaction [39]:

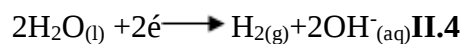


- **A la Cathode**

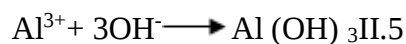
Près de la cathode, la réduction du solvant (l'eau) entraîne la formation de gaz d'hydrogène, dont l'émission favorise la flottation des particules floculées. Dans des conditions acides, la réduction de l'eau se produit de la manière suivante :



Sous conditions basiques, elle prend la forme suivante :



L'ion Al^{3+} réagit avec l'eau en attirant les ions OH^- pour former des complexes anioniques, cationiques ou neutres selon la réaction suivante [40] :



Les hydroxydes métalliques coagulés formés présentent une plus grande capacité à adsorber sélectivement les particules et les substances toxiques, permettant ainsi la formation de flocs ou agrégats plus volumineux. Ces derniers peuvent soit se déposer au fond, soit flotter à la surface, en générant des bulles de gaz hydrogène au niveau de la cathode. Plusieurs types d'électrodes peuvent être utilisés, telles que le fer (Fe), l'aluminium (Al^{3+}), le cuivre (Cu^{2+} ou Cu^{3+}). Bien que des réactions similaires se produisent avec chacune de ces électrodes, la structure de l'hydroxyde métallique formé et sa capacité à adsorber les polluants dépendront de la charge et de la taille des ions métalliques impliqués [41].

II.3.3. Principales lois régissant l'électrocoagulation

II.3.3.1. Loi de Faraday

Si l'on considère que les seules réactions chimiques se déroulant dans le réacteur d'électrocoagulation sont :

- ✓ À l'anode : L'oxydation du métal.
- ✓ À la cathode : La réduction de l'eau.

Il est possible de déterminer la masse de métal dissous pendant une durée d'électrolyse. A un courant I , en utilisant la loi de Faraday :

$$m = \frac{I.E.M}{nF} \quad \text{II.6}$$

Avec :

- m : masse du métal dissous ou de gaz formé (g).
- I : intensité de courant imposé (A).
- M : poids moléculaire de l'élément considéré (g.mol⁻¹).
- F : constante de Faraday (96487 C. mol⁻¹)
- n : nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction considérée[42]

La loi de Faraday s'applique à toutes les réactions électrochimiques, mais la quantité des ions métalliques électrogénérés dépend du nombre d'électrodes et du mode de configuration des électrodes. Pour une connexion bipolaire en série, la masse du métal dissous à l'anode d'après la loi de Faraday est donnée par la relation suivante [43] :

$$m = \frac{I.E.M}{nF} (P - 1) \quad \text{II.7}$$

P = Nombre des électrodes dans le réacteur

La concentration en ion aluminium (en g.L⁻¹) est donc :

$$C = \frac{m_{théorique}}{V} = \frac{I.E.M}{nF} (P - 1) \quad \text{II.8}$$

V : Volume utile du réacteur

À partir de cette loi, il est possible d'estimer théoriquement la masse d'électrode consommée par électrolyse et d'en déduire le rendement anodique (Anode).

$$R_{anode} = \frac{masse_{expérimentalement\ dissoute}(g)}{masse_{théoriquement\ donnée\ par\ la\ loi\ de\ Faraday}(g)} \times 100 \quad \text{II.9}$$

Au niveau de la cathode, et en l'absence d'autres réactions de réduction, la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau suit également la deuxième loi de Faraday ; de même, le rendement cathodique peut être exprimé par la relation suivante :

$$R_{cathode} = \frac{masse_{expérimentale\ formée}(g)}{masse_{théorique\ donnée\ par\ la\ loi\ de\ Faraday}(g)} \times 100 \quad \text{II.10}$$

II.3.4. Connexions électriques

II.3.4.1. Connexion monopolaire en série

Dans une configuration où des électrodes monopolaire sont placées en série, des électrodes sacrificielles sont utilisées, non pas connectées directement à une anode et une cathode externe, mais reliées entre elles par paires (l'une jouant le rôle d'anode et l'autre de cathode), comme illustré dans la **figure II.2(a)**. Dans un montage en série, pour maintenir la même intensité de courant, une différence de potentiel plus élevée est nécessaire, car les cellules connectées en série présentent une résistance électrique plus importante. Toutefois, le même courant traverse l'ensemble des électrodes [44].

II.3.4. 2. Connexion monopolaire en parallèle

Dans la configuration monopolaire, les anodes et les cathodes sont arrangées successivement, les anodes étant connectées à la borne positive du générateur et les cathodes à la borne négative. Ainsi, chaque électrode reçoit la même valeur de tension, tandis que l'intensité totale du courant se répartit entre elles. Ce type de connexion est le plus simple et le plus fréquemment utilisé dans les systèmes de traitement électrochimique. Comme illustré dans la **figure II.2(b)**, le dispositif représente une cellule d'électrocoagulation simple composée d'une paire d'anodes et d'une paire de cathodes disposées en parallèle [45].

II.3.4.3. Connexion bipolaire

Dans ce cas, les électrodes sacrificielles sont placées entre deux électrodes parallèles sans aucune connexion électrique directe, comme le montre la **figure II.2(c)**. Seules deux électrodes monopolaires sont connectées à la source de courant, sans interconnexion entre les électrodes sacrificielles. Lorsque le courant traverse les deux électrodes connectées, les faces non chargées des plaques conductrices deviennent chargées, portant alors une charge opposée à celle de la face parallèle adjacente ; les électrodes sacrificielles sont ainsi qualifiées d'électrodes bipolaires [44].

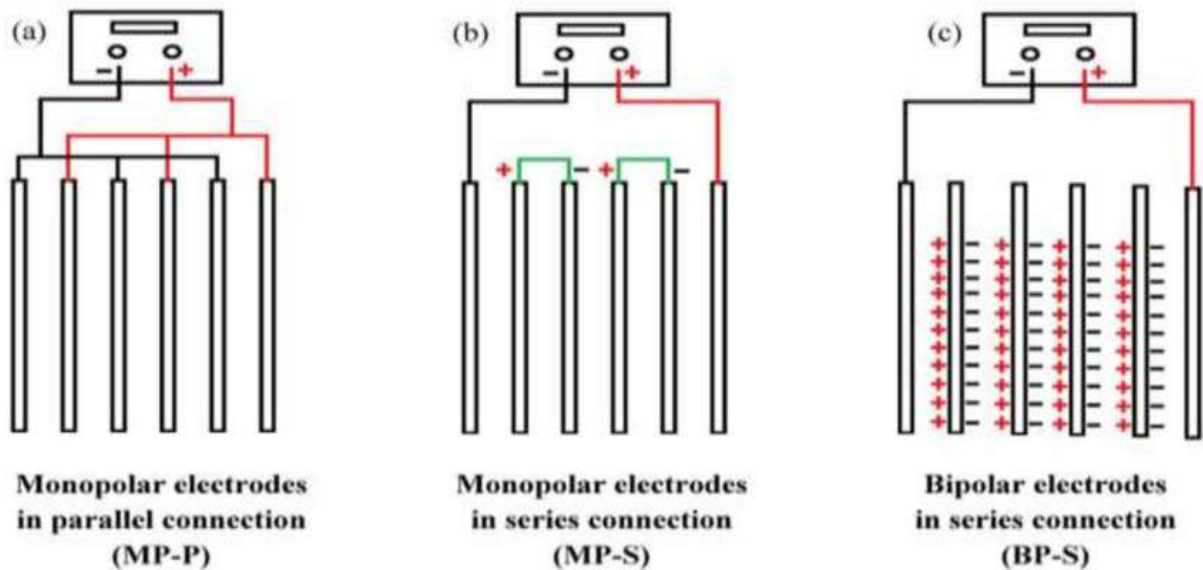


Figure II.2: Connexions électriques [46]

II.3.5. Facteurs influençant l'électrocoagulation

II.3.5.1. La densité du courant

La densité de courant est un paramètre essentiel dans l'électrocoagulation, car c'est le seul paramètre qui peut être contrôlé directement. La densité de courant influence directement le dosage du coagulant et le taux de formation des bulles. Les densités de courant élevées sont recherchées pour les procédés de séparation impliquant des cellules de flottation ou des réservoirs de lavage larges, tandis que les densités de courant faibles sont plus adaptées à l'électrocoagulation [42].

II.3.5.2. La conductivité de solution

La conductivité du milieu est un facteur clé permettant un bon transfert ionique dans l'effluent. Elle fait partie des éléments qui sont étroitement liés à d'autres facteurs influents. La conductivité de la solution affecte l'efficacité du courant, la tension et la consommation d'énergie électrique dans une cellule électrolytique. La conductivité du milieu doit être suffisamment élevée pour garantir un bon transfert ionique dans l'effluent à traiter. L'augmentation de la conductivité permet d'optimiser la consommation d'énergie et de réduire le temps de traitement [45].

II.3.5.3. Le pH de l'effluent

Le pH est un facteur important influençant la performance du processus d'électrocoagulation. Le pH du milieu varie au cours du processus, comme l'ont également observé d'autres chercheurs. Ce changement dépend du type de matériau des électrodes et du pH initial [42].

II.3.5.4. Influence de l'écart entre les électrodes

La distance inter-électrode est un paramètre pouvant influencer la qualité du traitement des eaux brutes. Cette distance peut varier selon le type d'eau à traiter et surtout selon sa conductivité. De plus, la distance entre les électrodes ne doit également tenir compte de l'encrassement possible et de facilité à nettoyer le système. Étant donné que la chute ohmique (liée à la résistance électrique) est directement liée à la distance inter électrodes, l'augmentation ou la réduction de cette distance peut influencer les performances du traitement. En effet, pour un courant électrique constant, l'augmentation de l'écart entre les deux électrodes cause une augmentation de la consommation énergétique et de la température du milieu, ce qui peut modifier l'efficacité du traitement [45].

II.3.6. Applications de l'électrocoagulation

L'électrocoagulation s'est avérée efficace pour traiter une large gamme de types d'eaux et de contaminants [47] :

- ✚ **Eaux usées industrielles** : Particulièrement utile pour le traitement des eaux usées provenant d'industries telles que le textile, le pétrole et la transformation alimentaire.
- ✚ **Traitement de l'eau municipale** : Peut être utilisée pour éliminer la turbidité, la couleur et les micro-organismes des approvisionnements en eau potable.
- ✚ **Effluents miniers** : Efficace pour traiter le drainage minier acide et éliminer les métaux lourds des eaux usées minières.
- ✚ **Ruissellement agricole** : Capable d'éliminer les pesticides, les engrais et les sédiments des eaux usées agricoles.
- ✚ **Eau produite dans l'industrie pétrolière et gazière** : Peut traiter l'eau produite lors de l'extraction du pétrole et du gaz, en éliminant les hydrocarbures et les solides dissous.
- ✚ **Lixiviat de décharge** : Efficace pour traiter l'eau contaminée des décharges, en éliminant les polluants organiques et inorganiques.

II.3.7. Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation**II.3.7.1. Avantages :**

- ✚ L'EC nécessite un équipement simple et une méthode opératoire très flexible et facile à utiliser.
- ✚ Les bulles d'air produites peuvent entraîner les polluants à la surface de la solution à traiter, où elles peuvent être facilement concentrées, rassemblées et éliminées.
- ✚ L'EC permet de réduire de manière significative de nombreuses pollutions et composés dissous tels que la DCO, les MES, les métaux lourds, les nitrites, les sulfures, les cyanures, les sulfites, les chromates et les ions fluorures.
- ✚ L'utilisation de l'EC permet de réduire le temps de traitement ; cette technique permet également un gain important en compacité des installations et une possibilité d'automatisation.
- ✚ La technique d'EC peut être utilisée en combinaison avec d'autres techniques de traitement.

II.3.7.2. Inconvénients

- ✚ Les électrodes "sacrifiables" sont dissoutes dans l'eau usée par effet d'oxydation, ce qui nécessite un remplacement régulier de ces électrodes.
- ✚ Un film imperméable d'oxyde peut se former sur la cathode, ce qui conduit à une perte d'efficacité de l'unité d'EC.
- ✚ La technique d'EC nécessite que la suspension d'eau usée traitée ait une conductivité élevée [48].

II.4. Adsorption**II.4.2. Principe de l'adsorption**

L'adsorption est un procédé de traitement efficace pour éliminer une grande variété de composés toxiques de notre environnement. Elle est principalement utilisée pour le traitement de l'eau et de l'air. Au cours de ce processus, les molécules d'un fluide (qu'il soit gaz ou liquide), appelées adsorbats, se fixent sur la surface d'un solide, appelé adsorbant. Ce procédé décrit la capacité de certains matériaux à fixer des molécules (gaz, ions métalliques, molécules organiques, etc.) à leur surface de manière plus ou moins réversible. Ainsi, un transfert de matière se produit de la phase aqueuse ou gazeuse vers la surface solide. Le solide acquiert alors des propriétés superficielles (hydrophobie ou hydrophilie) qui peuvent affecter

l'état d'équilibre du milieu (dispersion, floculation). La nature des liaisons formées et la quantité d'énergie dégagée lors de la rétention d'une molécule à la surface d'un solide permettent de distinguer deux types d'adsorption [49].

II.4.3. Types d'adsorption

Il existe deux types d'adsorption :

- Adsorption physique (physisorption)
- Adsorption chimique (chimisorption)

II.4.3.1. Adsorption physique ou physisorption

Également appelée physisorption, elle est principalement due aux liaisons de Van der Waals, qui se forment lorsque les forces d'interaction moléculaire entre un solide et un gaz deviennent supérieures aux forces qui lient les molécules de gaz entre elles. La chaleur libérée (phénomène exothermique) est de l'ordre de 1 à 10 Kcal/mol.

Les forces de physisorption se divisent en deux types [4] :

- Les forces de dispersion (Van der Waals)
- Les forces polaires résultant de la présence d'un champ électrique dans les micropores

II.4.3.2. Adsorption chimique ou chimisorption

La chimisorption se caractérise par un processus irréversible résultant d'une liaison chimique covalente robuste entre les atomes de surface du solide et les molécules adsorbées. Ce type d'adsorption implique des forces d'attraction considérables, générant des chaleurs d'adsorption élevées qui peuvent atteindre des niveaux proches des énergies de liaison chimique covalente, typiquement entre 20 et 80 Kcal/mol[9].

Tableau II.1: différences entre l'adsorption physique et chimique [50].

Propriétés	Adsorption physique	Adsorption chimique
Types de liaison	Liaison de Van Der Waals	Liaison chimique
Températures du processus	Relativement faible comparée à la température d'ébullition de l'adsorbat	Plus élevée que la température d'ébullition de l'adsorbat
Individualité des molécules	L'individualité des molécules est conservée	Destruction de l'individualité des molécules

Désorption	Facile	Difficile
Cinétique	Rapide, indépendante de la Température	Très lente
Chaleur d'adsorption	Faibles	Elevées
Type de formation	Formation en multicouches et monocouche	Formation en monocouche

III.4.4. Mécanismes d'adsorption

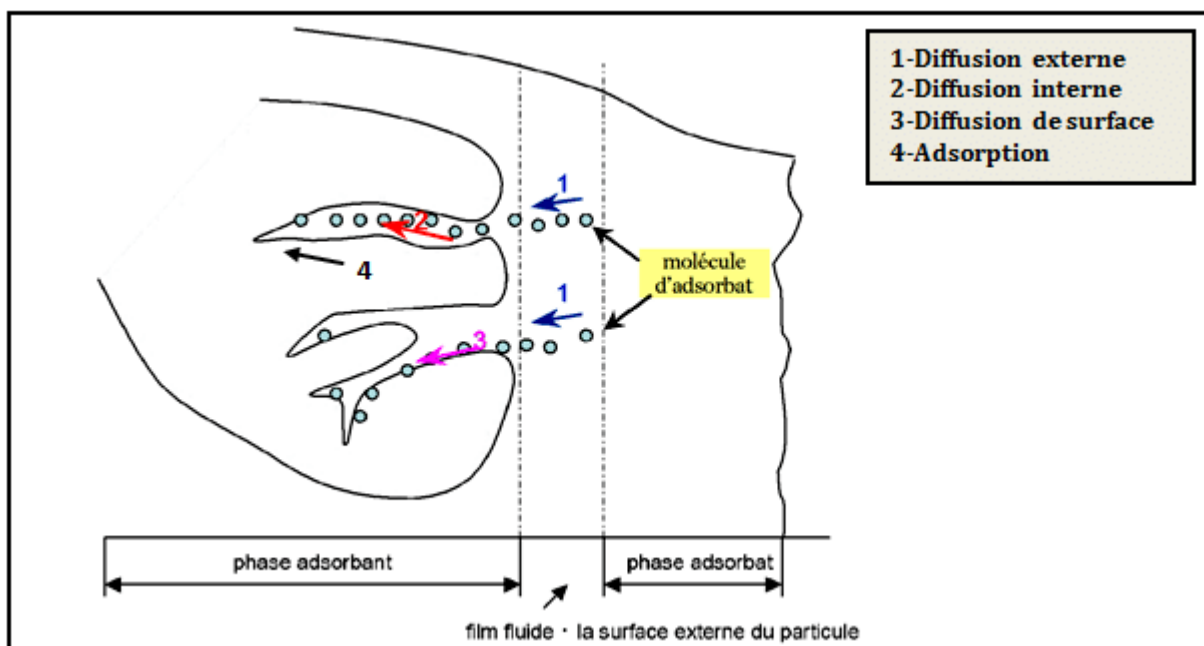


Figure II.3: Schéma du mécanisme de transport d'un adsorbat au sein d'un grain [51].

Le mécanisme d'adsorption peut être décomposé en plusieurs étapes comme illustré dans la figure II.2[52] :

- **Première étape (diffusion externe) :** Le transfert des molécules de soluté de la phase liquide externe vers la phase liquide liée à la particule solide (par diffusion et convection).
- **Deuxième étape (diffusion interne) :** Le transfert du soluté à travers le film liquide vers la surface externe de l'adsorbant.
- **Troisième étape :** La diffusion de l'adsorbat à l'intérieur de la particule de l'adsorbant sous l'effet du gradient de concentration.

- **Quatrième étape :** L'adsorption dans un micropore.

II.4.5. Equilibre d'adsorption

Tous les systèmes adsorbant/adsorbat ne se comportent pas de la même manière. Les phénomènes d'adsorption sont souvent étudiés en fonction de leur comportement à l'équilibre isotherme. Les courbes isothermes décrivent la relation existante à l'équilibre d'adsorption entre la quantité adsorbée et la concentration résiduelle du soluté dans un solvant donné à une température constante[53].

II.4.6. Facteurs influençant l'adsorption

II.4.6.1. Le temps d'équilibre

Le temps d'équilibre est l'un des facteurs les plus importants de point de vue économique pour les systèmes de traitement des eaux polluées[54].

II.4.6.2. Concentration

Pour de faibles concentrations de produit dissous, on observe généralement que le taux d'adsorption en fonction de la concentration de la substance dissoute suit la loi de Freundlich. Cette loi ne s'applique plus à des concentrations élevées, et on remarque alors qu'avec l'augmentation de la concentration, l'adsorption atteint un maximum, puis diminue pour devenir négative [55].

II.4.6.3. Température

Les processus d'adsorption ne sont pas compliqués par des réactions chimiques et sont toujours accompagnés d'une libération de chaleur (phénomène exothermique). Ainsi, avec l'augmentation de la température, le phénomène de désorption devient dominant. En revanche, pour une adsorption activée (chimisorption), l'équilibre d'adsorption n'est pas rapidement atteint, et l'augmentation de la température favorise l'adsorption[56].

II.4.6.4. Nature de l'adsorbant

Les adsorbants peuvent être classés en :

- **Adsorbants apolaires :** qui ont une affinité plus grande pour les substances non polaires (par exemple, le charbon, le graphite, le talc, etc.).

- **Adsorbants polaires** : qui adsorbent les électrolytes, dans ce cas, l'adsorption est sélective. Ainsi, selon la charge de la surface de l'adsorbant, les cations ou les anions seront fixés. Parmi ces adsorbants polaires, on cite le silicagel et diverses argiles[57].

II.4.6.5. *pH du milieu de réaction*

Le pH est un facteur important dans toute étude chimique, telle que l'étude cinétique de l'adsorption, car il peut affecter à la fois la structure des adsorbants et le mécanisme d'adsorption [56].

II.4.7. Classification des isothermes

L'évolution des quantités adsorbées en fonction de la concentration à l'équilibre varie selon la nature structurale des solides. Ainsi, en 1974, Giles et al. ont proposé une classification des isothermes d'adsorption en solution aqueuse. Quatre classes principales appelées S, L, H, C, basées sur la forme de la partie initiale de l'isotherme, ont été répertoriées (figure II.6)[52].

- ✚ **La forme "L"** : appelée « Langmuir », correspondrait plutôt aux faibles concentrations en soluté dans l'eau. L'isotherme est convexe, ce qui suggère une saturation progressive du solide. Lorsque C_e tend vers zéro, la pente de l'isotherme reste constante.
- ✚ **La forme "H"** : dite « haute affinité », est un cas particulier de la forme "L", où la pente initiale est très élevée. Cela se produit lorsque le soluté présente une forte affinité pour le solide.
- ✚ **La forme "S"** : appelée « sigmoïdale », présente un point d'inflexion révélant la présence d'au moins deux mécanismes d'adsorption. Cela se produit, par exemple, lorsque la première couche de soluté est adsorbée, puis lorsque l'adsorption de couches supplémentaires devient plus favorable.
- ✚ **La forme "C"** : appelée « partition constante », est une droite passant par zéro, ce qui signifie que le rapport q_e/C_e (appelé coefficient de distribution K_d) reste constant. Ce phénomène est souvent observé lors de l'adsorption sur les argiles.

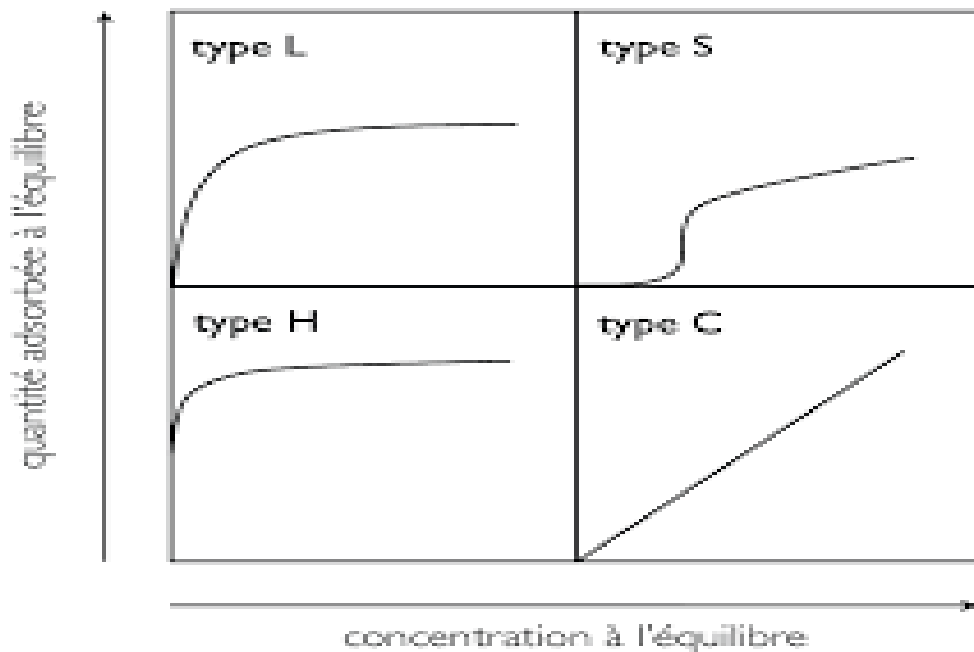


Figure II.4: Différents formes d'isothermes d'adsorption selon Giles (1960) [58]

II.4.8. Modélisation des isothermes d'adsorption

L'isotherme d'adsorption représente la quantité de matière adsorbée sur un solide en fonction de la concentration de la solution à l'équilibre, à température constante. Plusieurs modèles peuvent être utilisés pour décrire ces isothermes d'adsorption, tels que ceux de Brunauer, Emmett et Teller (B.E.T), d'Elovitch, de Temkin, de Kislev, de Langmuir et de Freundlich. Parmi ces modèles, ceux de Langmuir et de Freundlich sont les plus couramment utilisés dans la littérature[59].

II.4.8.1. Isotherme de Langmuir

Le modèle de Langmuir reste, à ce jour, l'un des modèles les plus simples pour décrire la physisorption et la chimisorption. Ce modèle repose sur les hypothèses suivantes :

- Chaque molécule adsorbée occupe un site d'adsorption bien défini.
- Un site ne peut contenir qu'une seule particule adsorbable, formant ainsi une monocouche sur la surface.
- Tous les sites sont énergétiquement équivalents.
- Il n'y a aucune interaction entre deux particules adsorbées sur des sites voisins.

Avec :

$$\theta = \frac{Q_e}{Q_m} = \frac{K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad \text{II.11}$$

- θ = taux de recouvrement.
- q_e = est la quantité adsorbée par masse d'adsorbant à l'équilibre en (mg.g⁻¹d'adsorbant).
- C_e = est la concentration à l'équilibre dans la phase fluide en (mg. L⁻¹).
- K_L = est une constante qui décrit l'énergie d'adsorption, c'est la constante de Langmuir (L.mg⁻¹). Elle dépend de la température et donne une indication sur l'affinité del'adsorbat pour l'adsorbant : plus elle est élevée plus l'affinité est forte.
- $q_{\max}$ est la quantité maximale pouvant être adsorbée sur une masse donnée de solide etsignifie une occupation totale des sites d'adsorption (mg.g⁻¹d'adsorbant)[59].

Il existe plusieurs formes de l'isotherme de Langmuir. Parmi les cinq formes décrites dans la littérature (comme celles mentionnées par Hamdaoui et Naffrechoux, 2007a), deux sont particulièrement courantes.

$$\frac{1}{Q_e} = \frac{1}{Q_m} + \frac{1}{Q_m C_e K_L} \quad (\text{Langmuir I})$$

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{Q_{\max}} C_e + \frac{1}{Q_{\max} K_L} \quad (\text{Langmuir II})$$

Il est à noter que K_L est fréquemment désigné sous les symboles « b » ou « L », et que certains auteurs définissent le rapport R_L (équation 14) comme une grandeur sans dimension, qui indique que l'adsorption devient d'autant plus favorable que R_L tend vers zéro ($R_L \rightarrow 0$), et d'autant plus défavorable que R_L approche d'un ($R_L \rightarrow 1$)[52].

$$R_L = \frac{1}{Q_m C_e C_0} \quad \text{II.12}$$

II.4.8.2. Isotherme de Freundlich

L'isotherme de Freundlich est utilisée pour décrire les processus d'adsorption sur des surfaces hétérogènes. Elle fournit une relation qui permet de caractériser l'hétérogénéité de la surface et la distribution exponentielle des sites actifs ainsi que de leurs énergies. La forme linéaire de l'isotherme de Freundlich est exprimée comme suit[9] :

$$\log q_e = \log K_F \frac{1}{n} \log C_e \quad \text{II.13}$$

Avec :

- k_F est la capacité d'adsorption (L/mg)
- $1/n$ = l'intensité d'adsorption ; elle indique également la distribution relative de l'énergie et l'hétérogénéité des sites d'adsorption.

II.4.8.3. Modèle de Temkin

Le modèle de Temkin suppose que la chaleur d'adsorption, en raison des interactions avec l'adsorbat, diminue de manière linéaire à mesure que la surface de l'adsorbant se sature.

Le modèle de Temkin est exprimé par l'équation [59] :

$$q_e = R_T \ln(K_T C_e) \quad \text{II.14}$$

$$\text{Avec : } B_T = \frac{R_T}{b} \quad \text{II.15}$$

- R : constante des gaz parfaits (8,314 J.mol⁻¹. K⁻¹).
- T : température (K).
- K_T : constante de Temkin (L.mg⁻¹).
- b : l'énergie d'adsorption (en kJ.mol⁻¹).

II.4.9. Applications de l'adsorption

Les nombreuses applications techniques de l'adsorption découlent de trois caractéristiques principales qui la distinguent des autres méthodes de séparation, à savoir [49] :

- ✚ La capacité à retenir des particules très fines, comme les colloïdes.
- ✚ La capacité à retenir des composants à des concentrations très faibles, tels que les impuretés ou les molécules et ions métalliques, qui peuvent donner aux produits des couleurs, des odeurs ou des saveurs désagréables, voire une toxicité.
- ✚ La sélectivité de l'adsorbant envers certains composants d'un mélange.

Parmi les applications de l'adsorption, on retrouve :

- ✚ Le séchage, la purification et la désodorisation des gaz.
- ✚ La purification des liquides, notamment le traitement des eaux potables.
- ✚ L'élimination des polluants dans les eaux usées industrielles ou alimentaires.
- ✚ La récupération du dioxyde de carbone (CO₂) à partir des fumées industrielles.

II.5. Couplage électrocoagulation /adsorption

Les procédés d'électrocoagulation (EC) et d'adsorption (AD) ont démontré une efficacité notable dans le traitement de divers types d'eaux usées. Pris séparément, chacun présente des avantages spécifiques mais aussi certaines limitations. Leur combinaison vise à exploiter leurs points forts respectifs tout en atténuant leurs faiblesses.

L'étape d'électrocoagulation permet de réduire la charge polluante initiale et la teneur en matières en suspension. Cette réduction profite au procédé d'adsorption en limitant le risque de colmatage et en retardant la saturation de l'adsorbant. Étant donné qu'un adsorbant perd progressivement en capacité au fil des cycles adsorption/régénération, prolonger sa durée d'utilisation améliore la viabilité du procédé AD.

De plus, l'usage du procédé d'adsorption comme étape de post-traitement contribue à abaisser les besoins énergétiques globaux du système. En réduisant les exigences de purification par EC, la tension et le courant requis diminuent, ce qui rend l'ensemble du processus plus économe en énergie.

Cette approche est particulièrement adaptée aux effluents complexes contenant plusieurs types de polluants. L'efficacité de l'élimination variant selon les substances et les procédés, leur combinaison permet d'atteindre de meilleures performances globales.

L'intégration des procédés EC et AD relève également des principes d'intensification des procédés, avec des gains notables en termes de compacité, de mobilité, et de consommation énergétique. Cela se traduit par une réduction des coûts d'exploitation, ce qui est déterminant pour les petites structures industrielles.

Enfin, la diversité des combinaisons d'électrodes et d'adsorbants déjà testées élargit le champ d'application du procédé hybride, renforçant sa capacité à s'adapter à des problématiques spécifiques de traitement des polluants.

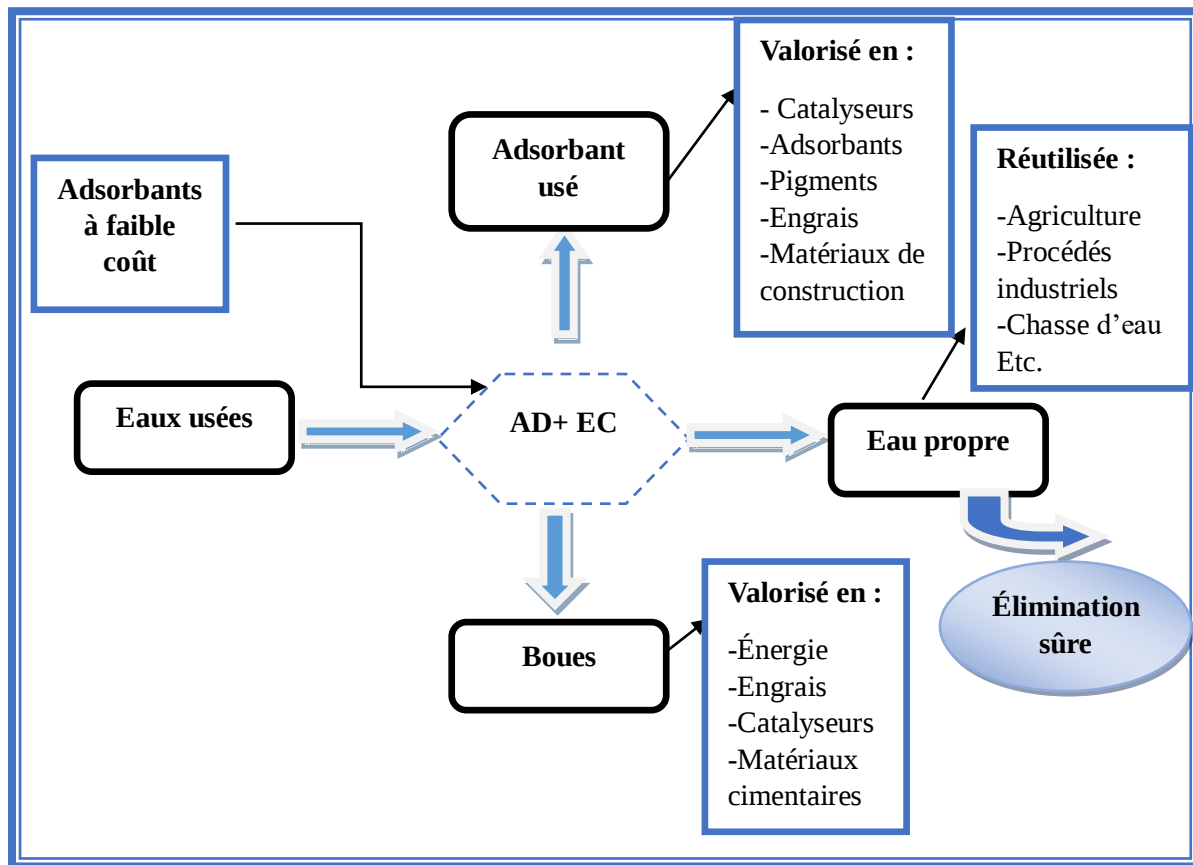


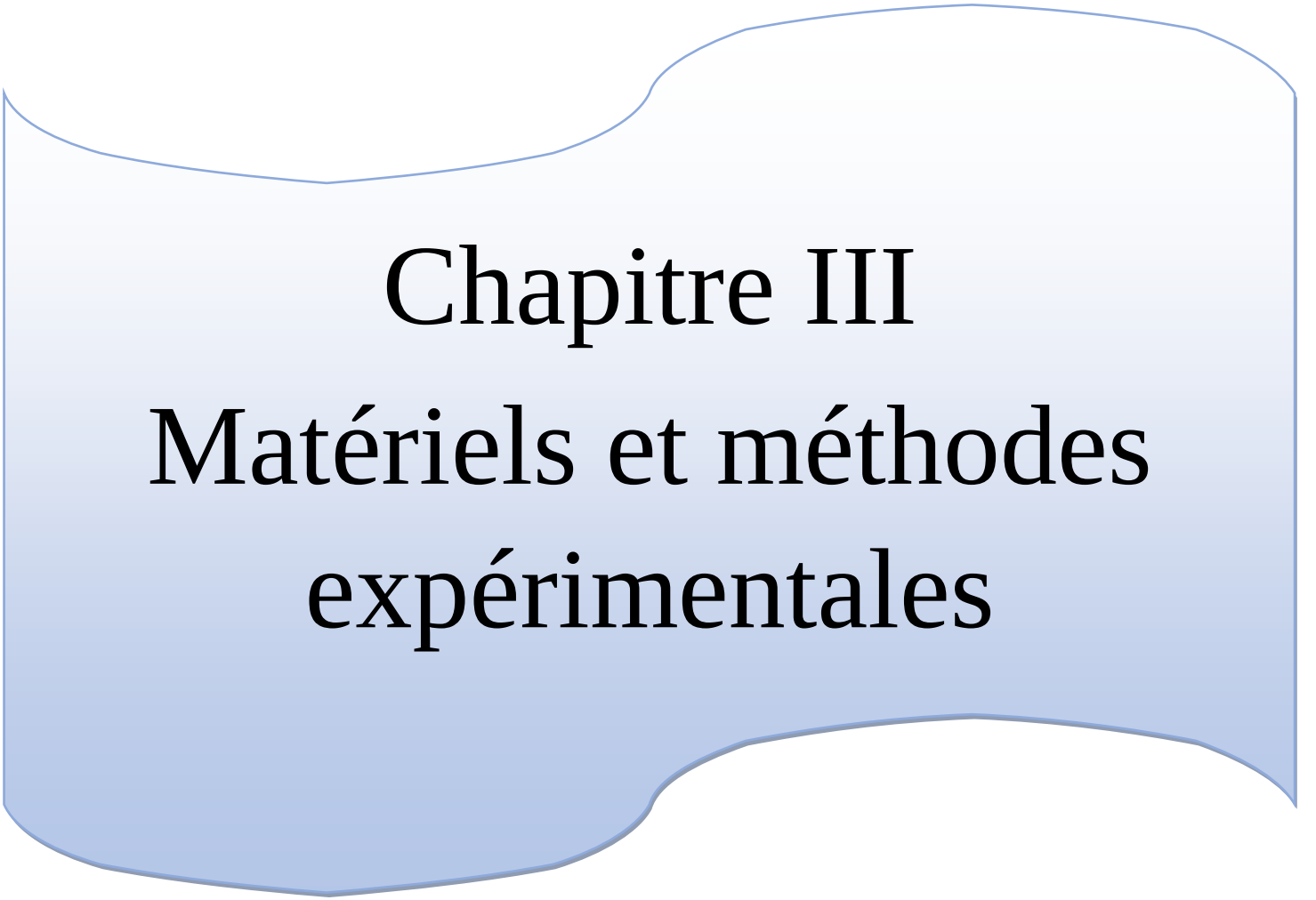
Figure II.5: Le processus combiné dans la perspective d'une économie circulaire

II.6. Conclusion

Ce chapitre a présenté les principales techniques de traitement des eaux usées industrielles, avec un focus sur l'électrocoagulation, l'adsorption et leur couplage. Chaque procédé se distingue par ses atouts en matière d'efficacité, de mise en œuvre et de coût.

L'association des deux méthodes permet d'améliorer les performances globales, de compenser les limites propres à chaque technologie, et de répondre aux exigences actuelles en termes de durabilité, d'adaptabilité et de maîtrise des coûts.

Le couplage EC–AD apparaît ainsi comme une option technique pertinente pour le traitement avancé des effluents industriels.



Chapitre III

Matériels et méthodes expérimentales

III. 1 Introduction

Ce chapitre décrit en détail les protocoles expérimentaux appliqués dans le cadre de cette étude.

Le colorant utilisé pour les essais, ainsi que le milieu de dilution, sont d'abord présentés. Les procédures expérimentales mises en œuvre pour les traitements par électrocoagulation et par adsorption sont ensuite exposées séparément.

Les essais de traitement du bleu de méthylène par couplage électrocoagulation–adsorption sont également décrits, avec l'intégration de charbon activé en tant qu'adsorbant. La méthodologie adoptée pour évaluer l'efficacité de cette combinaison est spécifiée. Les propriétés physico-chimiques du charbon activé employé sont aussi détaillées.

L'ensemble des expériences a été réalisé au sein du laboratoire « Qualité des eaux » du Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides (CRSTRA) à Biskra.

III. 2. Préparation des réactifs

III.2.1. Préparation des solutions

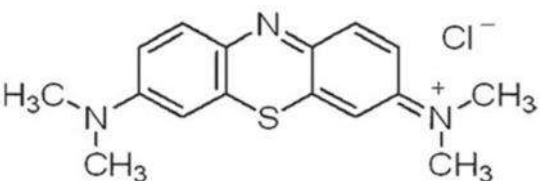
Nous avons préparé une solution mère de 500 mg/l de ce composé testé. Celle-ci a servi d'une part, dans la préparation des solutions étalons et d'autre part lors des essais en solutions synthétiques.

III.2.1.1.Choix du colorant

Le choix du composé organique a été orienté sur un colorant susceptible d'avoir des effets toxiques aussi bien sur l'homme que sur l'environnement. Lors de notre étude, nous avons testé le bleu de méthylène. Les principales caractéristiques du composé choisissent récapitulées dans le tableau(III. 1)

Tableau III.1 : Principales propriétés physico-chimiques du bleu de méthylène [24 ,25]

Nom chimique	Chlorure de 3 ,7bis(diméthylamino)phénazathio
Formule moléculaire	$C_{16}H_{18}ClN_3S$

Formule chimique	
Masse molaire	319,85g /mol
Densité	1,19g /cm ³ à 20°C
Poin de fusion	Se décompose au-delà de 190°C
Solubilité dans l'eau	40g/L à 20°C
Couleur	Blue foncé
Odeur	Presque inodore

III.2.1.2 Milieux de dilution

Tous les essais ont été conduits sur des solutions préparées par dissolution du bleu de méthylène dans l'eau de robinet du laboratoire du CRSTRA provient du forage Boukhalfa situé à El Alia. Les principales caractéristiques physico-chimiques de cette eau sont récapitulées dans le tableau (III.2).

Tableau III.2 : Caractéristiques physico-chimiques de l'eau de dilution

Paramètres	Unité	Valeurs
T	°C	17.7
pH	-	7.91 ± 0.07
Conductivité	µs/cm à 20°C	5570 ± 80
TH	°F	128 ± 0.85
Ca ²⁺	mg/l	232 ± 13.86
Mg ²⁺	mg/l	168 ± 27.68
Na ⁺	mg/l	642.50 ± 51.88
K ⁺	mg/l	12.09 ± 0.56
TAC	mg/l	390.40 ± 24.40
Cl ⁻	mg/l	1205.30 ± 35.45
SO ₄ ²⁻	mg/l	988.47 ± 8.14
NO ₃ ⁻	mg/l	27.86

Salinité	mg/l	2.3
----------	------	-----

III.2.2. Produits et réactifs

III. 2.2 .1. Electrodes utilisés

Les électrodes utilisées dans cette étude sont des plaques d'aluminium d'une pureté d'environ 99 %. Il s'agit de deux plaques rectangulaires parallèles, de dimensions 400 mm × 450 mm × 1 mm, avec une surface immergée de 18 cm² chacune. De nombreux chercheurs soulignent l'influence du matériau des électrodes sur le processus, l'aluminium et le fer étant les plus couramment utilisés en raison de leur faible coût, de leur disponibilité et de leur efficacité. La figure (III.1) illustre les électrodes employées dans cette étude.



Figure III.1: Electrodes utilisés pour l'électrocoagulation.

III. 2.2.2. Charbon activé

III. 2.2.2. a.Synthèse de biochar à partir de l'écorce de fruits de pin.

Les écorces de fruits de pin(EFP) ont été collectées à la région de Souk Hras, en Algérie. Elles ont été lavées à l'eau du robinet jusqu'à leur propreté, trempées dans de l'eau distillée pour éliminer les impuretés restantes, puis séchées à l'air libre. Le matériau a été broyé, séché au four à 105°C pendant 24 heures, puis tamisé pour obtenir des particules (< 250µm). La carbonisation a été réalisée à 700 °C pendant deux heures en conditions de faible teneur en

oxygène. Le biochar obtenu a été immergé dans une solution de HCl 0,1 N pour éliminer les minéraux résiduels. Il a ensuite été abondamment rincé à l'eau distillée jusqu'à ce que le filtrat atteigne un pH proche de la neutralité (6-7). Enfin, le biochar a été séché à des températures comprises entre 105 et 110 °C pendant 24 heures, ce qui a permis de préparer le charbon actif pour les expériences d'adsorption.

III. 2.2.2.b. Synthèse de charbon activé (CAEFP)

La préparation de CA à partir de l'écorce des fruits de pin (**EFP**) a suivi un processus en deux étapes, impliquant un prétraitement chimique et une activation thermique (**Figure III.3**). Cette méthode a été sélectionnée pour son efficacité à produire des charbons à grande surface spécifique et à porosité développée, essentielle à une adsorption efficace [72,73].

La procédure d'activation chimique impliquait l'imprégnation séparée de la poudre de (**EFP**) préparée avec du (KMnO_4 , $C = 0.5M$), pour nos besoins, nous avons utilisé (8g du charbon + 8mg de KMnO_4).

L'imprégnation a été réalisée à température ambiante sous agitation constante afin d'assurer une répartition uniforme des agents d'activation dans la matrice de biomasse.

Après imprégnation, le mélange a été séché à l'étuve à 100 °C pendant 24 h. Cette étape de séchage est cruciale pour initier les réactions chimiques entre les agents d'activation et les composants organiques de la biomasse, conduisant à la formation de réticulations et au développement d'une structure poreuse [73,74].

L'étape finale d'activation consistait à chauffer le charbon prétraité dans un four à moufle à 550 °C pendant 3 h sous atmosphère restreinte en oxygène. Cette température et cette durée ont été optimisées pour maximiser le développement de la porosité tout en minimisant la combustion excessive de carbone [75]. Après activation thermique, le matériau obtenu a été refroidi à température ambiante. Le charbon actif a ensuite été soumis à un lavage minutieux à l'eau chaude déionisée afin d'éliminer les résidus chimiques et les sous-produits d'activation. Le lavage s'est poursuivi jusqu'à ce que le pH du filtrat atteigne la neutralité.

Le charbon actif lavé a été séché pendant une nuit à 105 °C, refroidi dans un dessiccateur et stocké dans des récipients hermétiques pour une utilisation ultérieure.

III. 2.2.2.c. Caractérisation du charbon activé

Une caractérisation complète du (CAEFP) préparé a été réalisée afin d'étudier ses propriétés structurales, texturales et morphologiques. La présence et la nature des fonctionnalités chimiques de l'adsorbant synthétisé ont été identifiées par analyse IR Interferogram, réalisée à l'aide d'un équipement spectrophotomètre à faisceau interne. Les échantillons ont été scannés dans la plage de 400 à 4 000 cm^{-1} .

III. 2.2.2.d. pH de point de charge nulle (pHpzc)

Le pH au point de charge nulle (pHpzc) est la valeur de pH à laquelle la charge nette à la surface d'un adsorbant est nulle. Ce paramètre joue un rôle crucial dans les processus d'adsorption, particulièrement lorsque les mécanismes impliquent des interactions électrostatiques. Le pHpzc correspond ainsi au pH où les charges de surface générées par les ions H_3O^+ et OH^- s'équilibrent et s'annulent.

L'essai a été réalisé comme suit une solution de 0,01M de NaCl est mise dans des béchers de 30 ml auxquels on fait varier le pH initial de 2 à 11 en utilisant HCl (0,1N) et NaOH (0,1N). Ensuite, on rajoute à chaque béchers 30 mg de charbon tout en fixant le temps d'agitation à 24 heures, Après agitation et le pH final du filtrat de chaque échantillon a été mesuré avec un pH-mètre. La (Figure III.2), présentent les résultats de pH du point charge zéro de l'adsorbant.

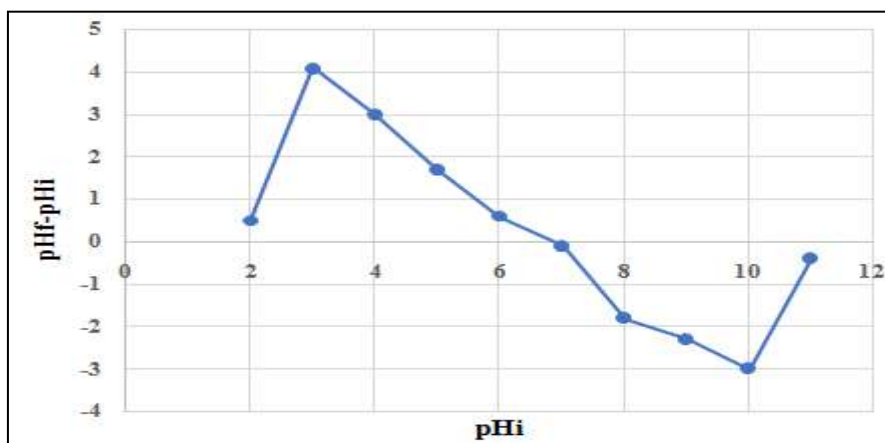


Figure III.2 : PH_{pzc} du charbon activé.

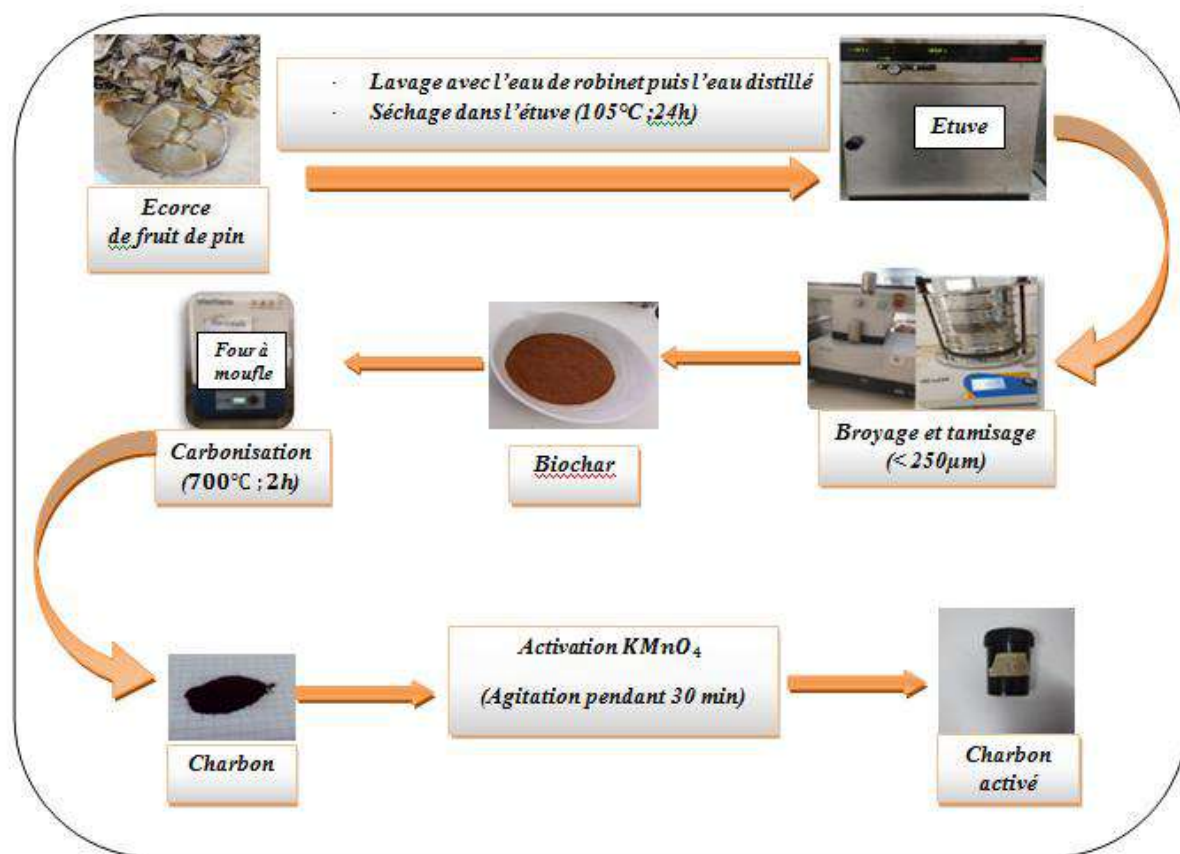


Figure III.3 : Les étapes de préparation de charbon activé.

III.3. Dispositifs expérimentaux

III.3.1. La cellule d'électrocoagulation

Le dispositif expérimental comprend une pompe, un générateur de courant continu et un réacteur en verre (bécher) de 2000 ml, comme illustré aux (figures III.4.) Deux électrodes en aluminium, identiques, sont placées verticalement et parallèlement dans la cellule. Elles servent respectivement d'anode et de cathode.

Chaque électrode présente une surface émergée de 16 cm². Leur forme plane facilite le montage et le nettoyage. La solution synthétique de diclofénac est homogénéisée à l'aide d'un agitateur magnétique équipé d'une barre aimantée assurant un brassage constant. La tension appliquée aux bornes des électrodes est régulée par le générateur de courant continu.

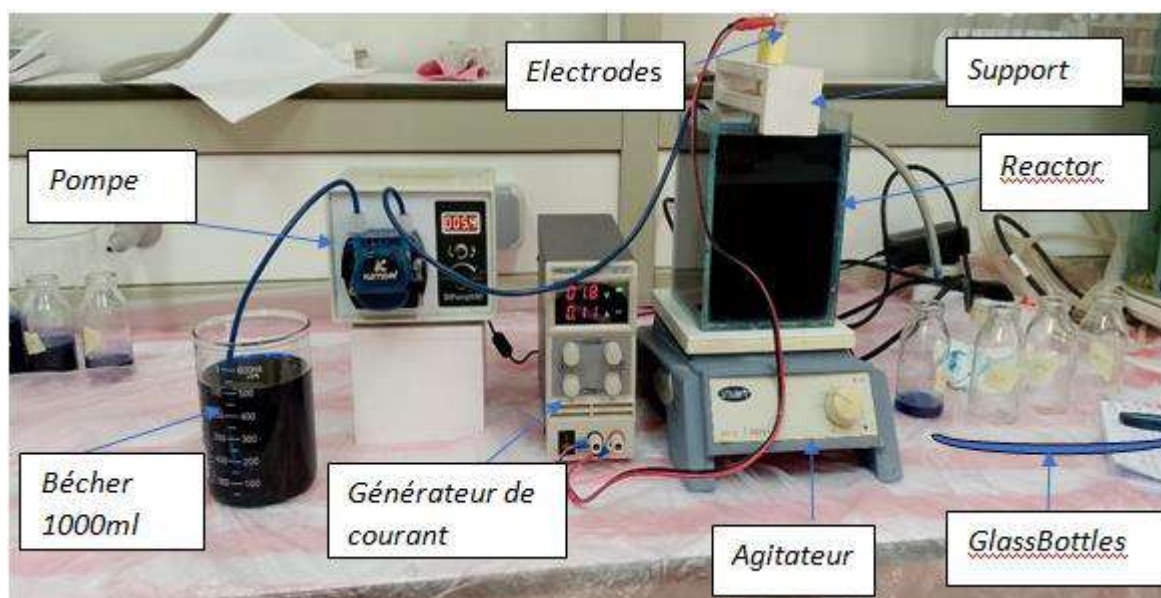


Figure III.4: Dispositif expérimenta

III.4. Mode opératoire

III.4.1. Description des essais d'électrocoagulation

La solution est d'abord versée dans le réacteur, puis un barreau magnétique est introduit et l'agitation est lancée à 300 tr/min à l'aide d'un agitateur. Les électrodes sont fixées sur leur support, la continuité du courant est vérifiée, puis les électrodes, espacées de 2,5 cm, sont immergées dans la solution. La pompe et le générateur de courant sont activés simultanément, reliés par des fils électriques. Des échantillons sont prélevés à intervalles réguliers à l'aide d'une pipette. Le taux d'élimination des composés organiques est ensuite évalué en calculant

$$\text{le rendement selon la formule suivante : } R\% = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \times 100 \quad \text{III.1}$$

C_0 et C_f représentent respectivement les concentrations initiales et finales en diclofénac exprimées en mg/l.

III.4.2. Description des essais d'adsorption

Après avoir terminé les essais d'électrocoagulation et déterminé les rendements, les conditions optimales ont été retenues pour les combiner avec une étape d'adsorption. Une dose de 30 mg/L de charbon activé a été ajoutée à 30ml de solution de bleu de méthylène, suivie d'une agitation pendant 1 heure. La solution a ensuite été filtrée à l'aide d'un papier filtre, puis soumise au traitement par électrocoagulation.

III.4.3. Description des essais de couplage électrocoagulation-adsorption

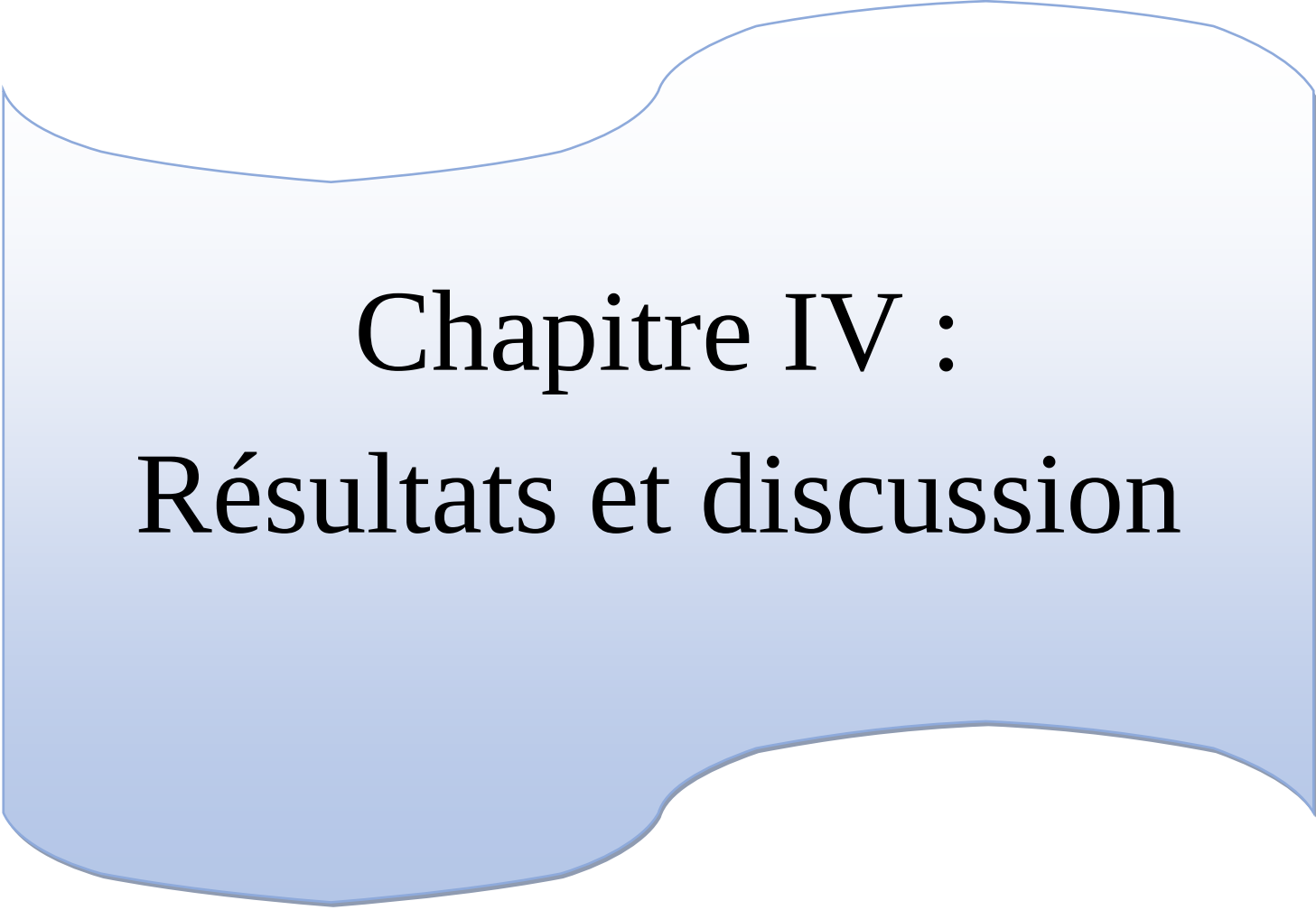
Pour évaluer l'effet du couplage électrocoagulation-adsorption sur l'élimination du bleu de méthylène, une étape d'adsorption a été réalisée sur la solution traitée par électrocoagulation, en utilisant les conditions optimales déterminées lors des essais précédents (20 mg/L, 1A ; 4.5mL/min). Après l'adsorption, la solution a été filtrée à l'aide d'un papier filtre.

III.5. Conclusion

Ce chapitre a présenté l'ensemble des méthodes expérimentales et les étapes mises en œuvre lors des travaux réalisés en laboratoire.

Il a détaillé la préparation des réactifs, ainsi que les techniques analytiques utilisées au cours des essais. Les conditions opératoires appliquées aux procédés d'électrocoagulation (EC) et d'adsorption ont été définies avec précision, servant de cadre aux différentes manipulations expérimentales.

Enfin, les essais de traitement combiné électrocoagulation–adsorption ont été décrits. Ces tests ont été menés en s'appuyant sur les conditions optimales identifiées précédemment, dans le but d'évaluer l'efficacité du couplage pour l'élimination du bleu de méthylène.



Chapitre IV : Résultats et discussion

IV. 1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats obtenus ainsi que les interprétations tirées des expériences précédentes, où différents paramètres ont été modifiés, tels que le temps, l'intensité du courant, le débit de la pompe et la concentration dans le processus d'électrocoagulation (EC). Pour le processus d'adsorption, nous avons étudié l'effet du temps de contact, de la concentration, de la température et du pH. Ensuite, nous avons combiné les deux procédés (électrocoagulation et adsorption) en fixant l'intensité du courant, la concentration et le débit de la pompe pour évaluer leur efficacité conjointe dans l'élimination du composé bleu de méthylène.

IV.2. Etablissement de la courbe d'étalonnage

Pour établir la courbe d'étalonnage du composé bleu de méthylène, les valeurs d'absorbance ont été mesurées pour une série de solutions étalons avec des concentrations comprises entre 0 et 30 mg/L, à une longueur d'onde maximale ($\lambda_{\max}$) de 665 nm. La figure IV.1 ci-dessous montre la relation entre l'absorbance et la concentration ($A = f(C)$).

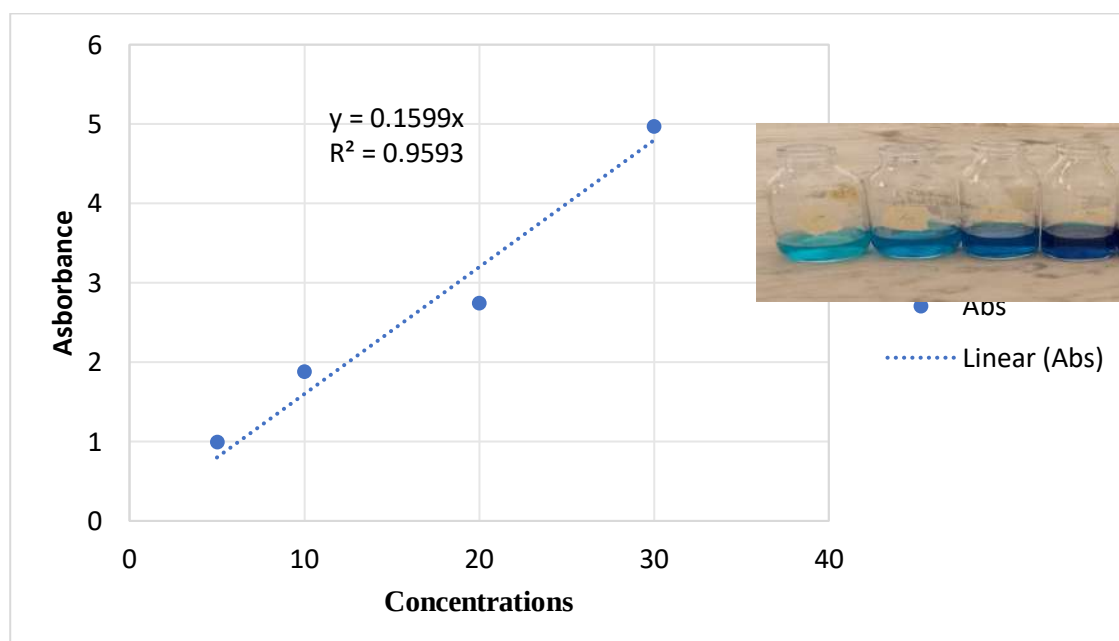


Figure IV.1 : Courbe d'étalonnage le bleu de méthylène.

IV.3. Paramètres réactionnels

IV.3.1. Partie électrocoagulation

IV.3.1.1 Effet de la concentration initiale

L'effet de la concentration initiale à différentes valeurs (20 / 60 / 100mg/l) ont été étudiés et en fixant le débit, l'intensité du courant ($Q = 4.5 \text{ ml/mn}$, $i = 0,55 \text{ A}$) et le temps de l'électrocoagulation (40 mn), les résultats sont démontrés dans la figure (IV.2).

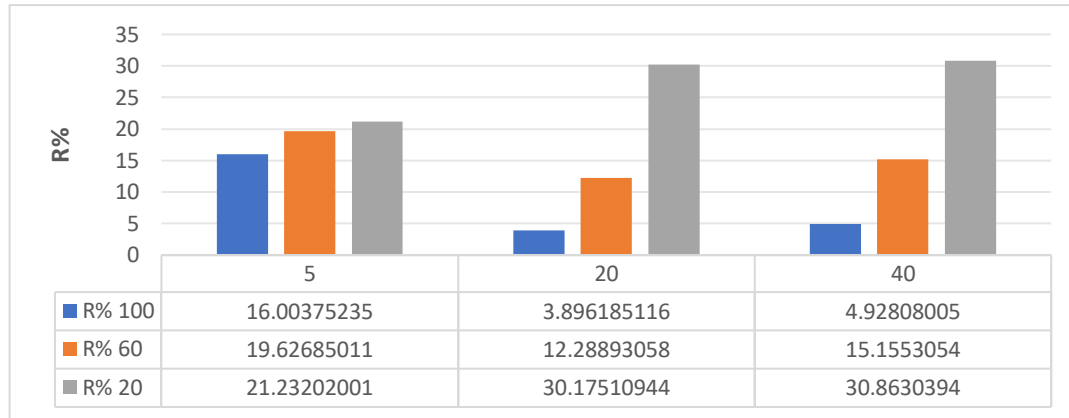


Figure IV.2 : Effet de la concentration initiale à différentes valeurs (20, 60 et 100 mg/L)

IV.3.1.2. Effet de l'intensité du courant

L'effet de l'intensité du courant à différentes valeurs (0.55 / 1A) ont été étudiés et en fixant le débit ($Q = 4.5 \text{ ml/mn}$), concentration initiale (20 mg/l) et le temps de l'électrocoagulation (40 mn) les résultats sont démontrée dans la figure (IV.3).

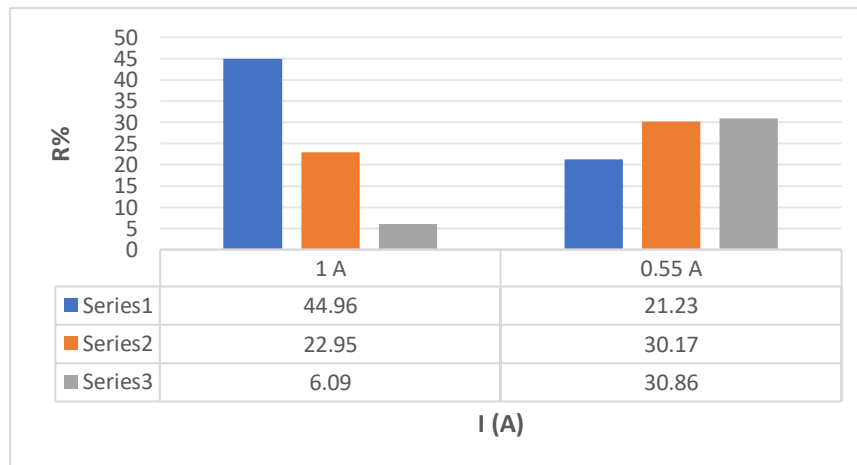


Figure IV.3 : Effet de l'intensité du courant (0,55 et 1 A)

IV.3.1.1 Effet de débit de la pompe :

L'effet de débit de la pompe à différentes valeurs (4.5/7 ml/mn) ont été étudiés et en fixant la concentration initiale ($C_0 = 20 \text{ mg/l}$), l'intensité i du courant ($i = 0.55 \text{ A}$) et le temps de l'électrocoagulation (40 mn), les résultats sont démontrée dans la figure (IV.4).

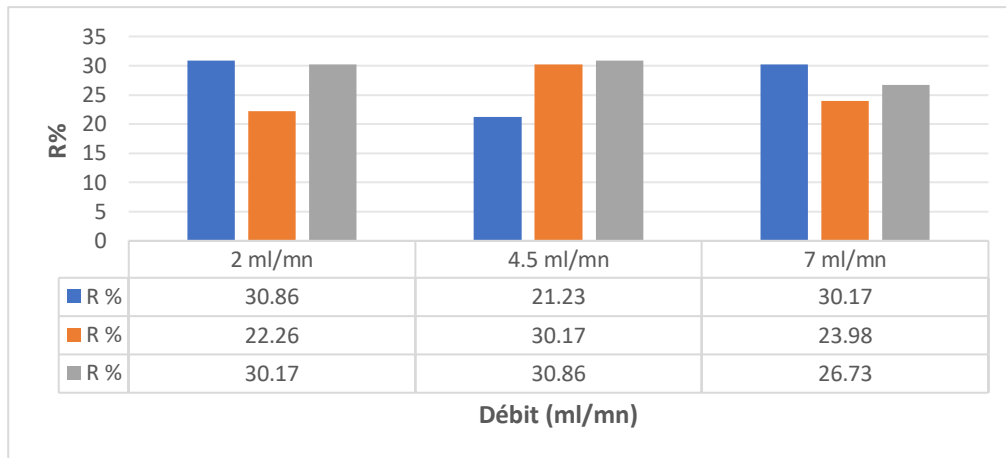


Figure IV.4 : Effet du débit de la pompe (2, 4.5 et 7 ml/min)

- ✓ Les résultats de cette étude ont montré une corrélation significative entre l'intensité du courant électrique, le débit de la solution et la concentration initiale du bleu de méthylène, lors de l'utilisation d'électrodes en aluminium dans le procédé d'électrocoagulation.
- ✓ Les expériences ont révélé que les meilleures performances d'élimination ont été obtenues avec une intensité de courant de 1 ampère, un débit de 2 ml/min et une concentration initiale de 20 mg/L.
- ✓ Un débit de 2 ml/min s'est avéré efficace pour optimiser le processus, en assurant un équilibre adéquat entre le temps de contact des particules polluantes et la production des réactifs électrochimiques nécessaires à la coagulation.
- ✓ En ce qui concerne la concentration initiale, celle de 20 mg/L a permis d'obtenir un rendement supérieur par rapport aux concentrations de 60 et 100 mg/L, indiquant qu'une concentration trop élevée pourrait réduire l'efficacité du traitement.
- ✓ Par ailleurs, une intensité de courant de 1 ampère s'est révélée optimale pour permettre une coagulation efficace, en fournissant suffisamment d'énergie électrique sans entraîner une consommation excessive.
- ✓ Ainsi, les conditions opératoires optimales pour le procédé d'électrocoagulation dans cette étude sont : une intensité de 1 A, un débit de 2 ml/min, et une concentration

initiale de 20 mg/L. L'interaction entre ces paramètres a significativement contribué à améliorer l'efficacité de l'élimination du bleu de méthylène de l'eau.

- ✓ L'inconvénient majeur dans l'application de l'électrocoagulation dans l'élimination des colorants reste le colmatage de la surface des électrodes par le colorant et ceci influence sur le déroulement du processus au cours du temps.

IV.3.2. Partie adsorption

IV.3.2.a. Caractérisation de l'adsorbant

Les spectres FT-IR de charbon activé ont été pris avant et après l'adsorption de B M pour vérifier l'implication possible de l'adsorption de BM (Figure IV.5).

Avant l'adsorption, les bandes apparaissant à 1587.88 cm^{-1} et 3466.73 ont été attribuées à l'étirement C-H, à l'étirement OH, respectivement.

Un pic net observé à 691.5 cm^{-1} est lié aux modes de vibration C-H des anneaux aromatiques.

Après l'adsorption, la caractérisation de l'adsorbant révèle que de nouvelles bandes sont apparues, d'autres sont restées et d'autres encore ont été déplacées après la sorption de MB.

Un pic net observé à 870.75 cm^{-1} est lié aux modes de vibration C-H des anneaux aromatiques.

Les bandes C-O à 1144.28 cm^{-1} et C=O à 1578.88 sont apparues après l'adsorption de BM sur le charbon activé.

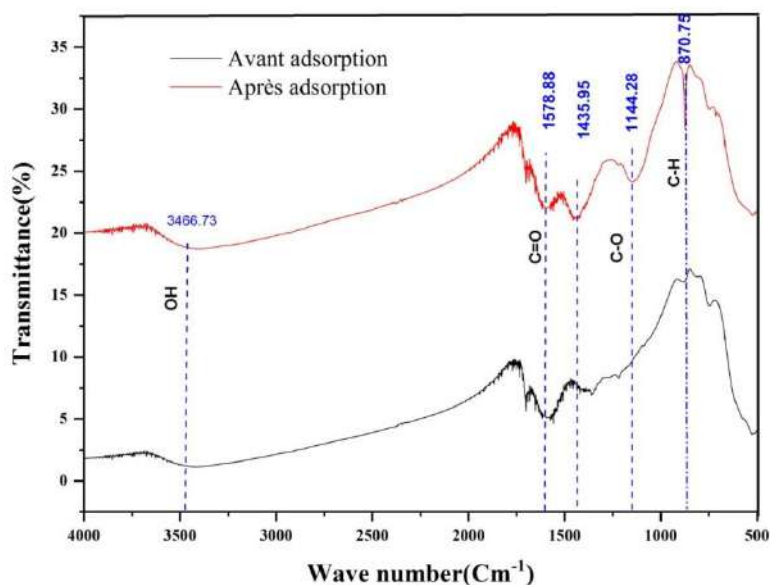


Figure IV.5 : Spectres FTIR. du charbon activé avant et après l'adsorption

IV. 3.2.1. Effet du temps de contact

Nous avons mis en contact des solutions de 30 ml de bleu de méthylène, avec une concentration en adsorbat de 30 mg/l, à un pH de 8,02 à une température de $T = 25^{\circ}\text{C}$, sous une vitesse d'agitation de $V = 550 \text{ tr/min}$, pendant des intervalles de temps différents (0, 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180 minutes).

Les résultats sont illustrés dans les deux figures IV.5 et IV.6 suivantes.

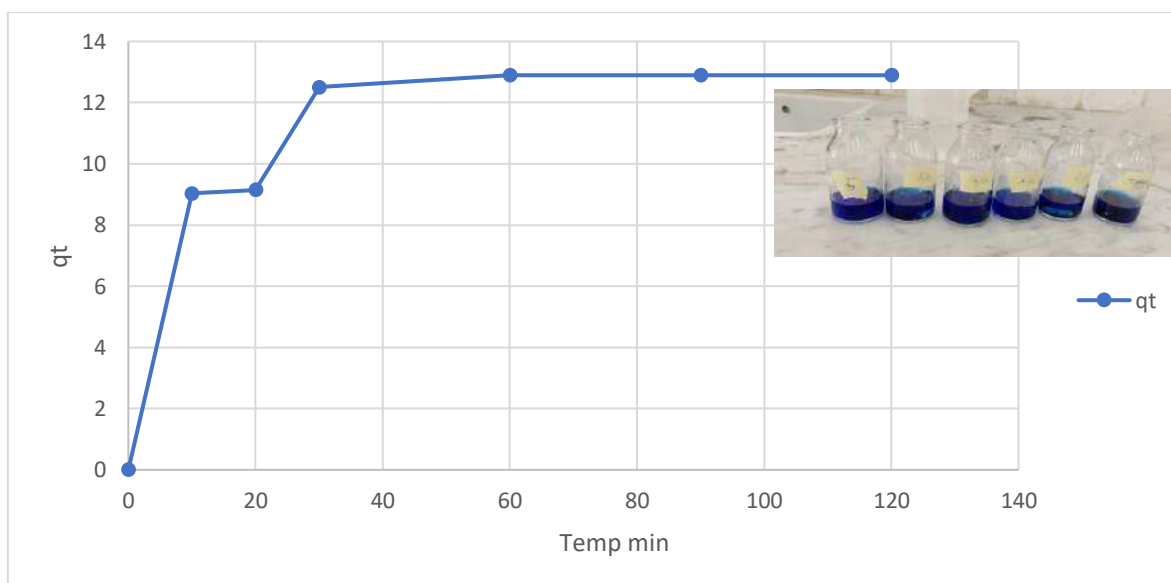


Figure IV.6 : Effet du temps de contact sur la capacité d'adsorption du charbon activé

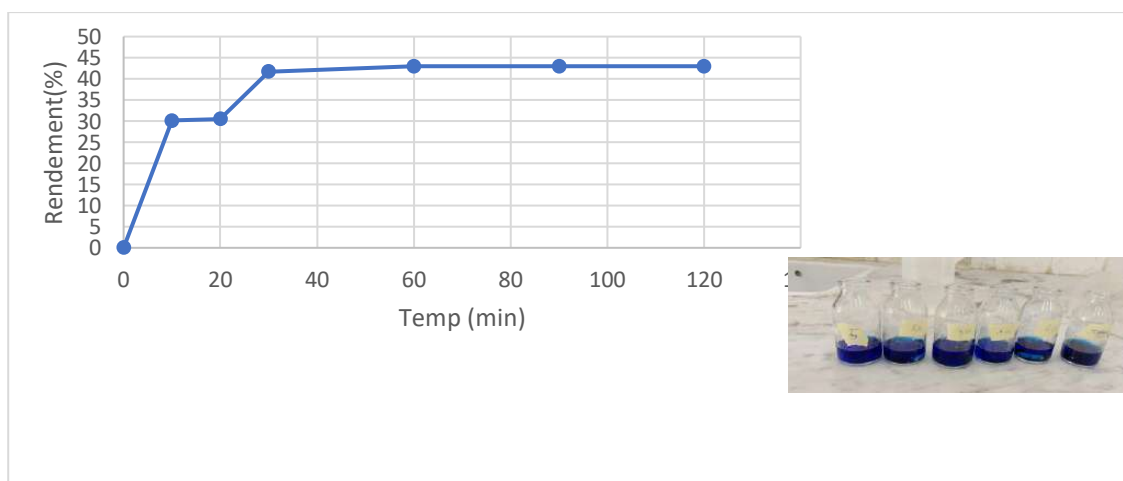


Figure IV.7: Effet du temps de contact sur le rendement d'adsorption du BM sur le charbon activé.

- Les figures (IV.5 et IV.6) montrent une augmentation rapide du rendement d'élimination et de la quantité d'adsorbat de bleu de méthylène après 20 minutes d'agitation, suivie d'une stabilisation lorsque les sites actifs de l'adsorbant sont saturés.

VI .3.2.2 Effet du pH de la solution de bleu de méthylène

✚ L'effet du pH sur le processus d'adsorption a été étudié dans des milieux ayant différentes valeurs de pH (2, 4, 6, 8, 10, 12), en ajustant les solutions aux valeurs souhaitées à l'aide de HCl et NaOH à une concentration de 0,01 mol/L. Les autres paramètres ont été maintenus constants : la concentration initiale du bleu de méthylène est de 30 mg/L, la masse de l'adsorbant est de 30 mg, le temps de contact est d'une heure, et la vitesse d'agitation est de 550 tr/min. Les figures (IV.7 et IV.8) illustrent l'effet du pH de la solution sur l'efficacité d'élimination (R) et la capacité d'adsorption (qt) du bleu de méthylène par le biochar.

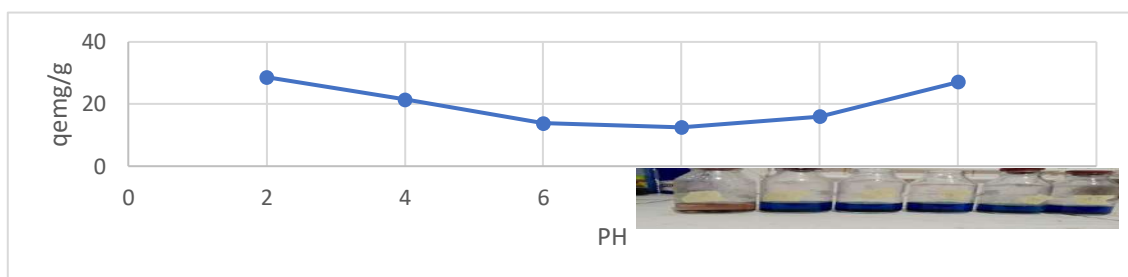


Figure IV.8 : Effet du pH sur la capacité d'adsorption du bleu de méthylène sur le charbon activé préparé.

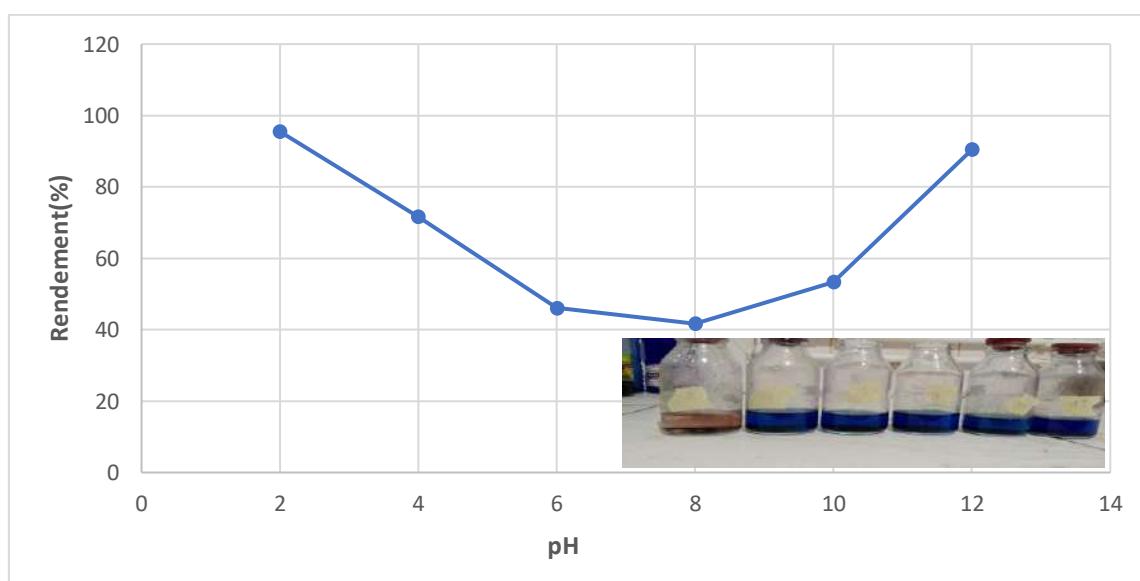


Figure IV.9: Effet du pH sur le rendement d'adsorption du bleu de méthylène sur le charbon activé

On observe que :

- **Les valeurs maximales de R et q_t** sont obtenues aux pH 2 et 12, indiquant une adsorption efficace dans les milieux très acides et très basiques.
- **Les valeurs minimales** apparaissent autour de pH 6 à 8, ce qui montre une diminution de l'efficacité d'élimination et de la quantité adsorbée dans les conditions proches de la neutralité.

IV.3.2.3. Effet de la concentration initiale de bleu de méthylène

L'effet de la concentration initiale de la solution de bleu de méthylène a été étudié en utilisant du biochar préparé, en faisant varier la concentration initiale du bleu de méthylène aux valeurs suivantes : (5, 10, 20, 30, 50, 90, 110 mg/L), avec 30 mg de matériau adsorbant utiliser dans les solutions. L'expérience a été réalisée avec un temps de contact d'une heure, un pH = 8, une vitesse d'agitation de 550 tours/minute, une température de 24°C. Les résultats sont illustrés dans les deux figures IV.9 et IV.10 suivantes.

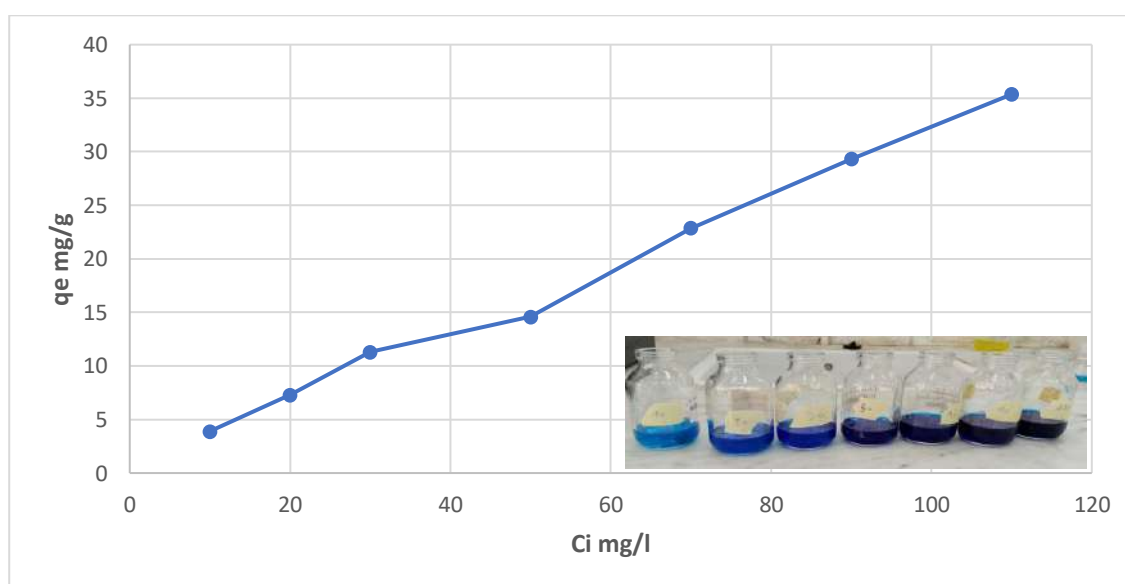


Figure IV.10: Effet de la concentration initiale sur la capacité d'adsorption du bleu de méthylène par le charbon activé

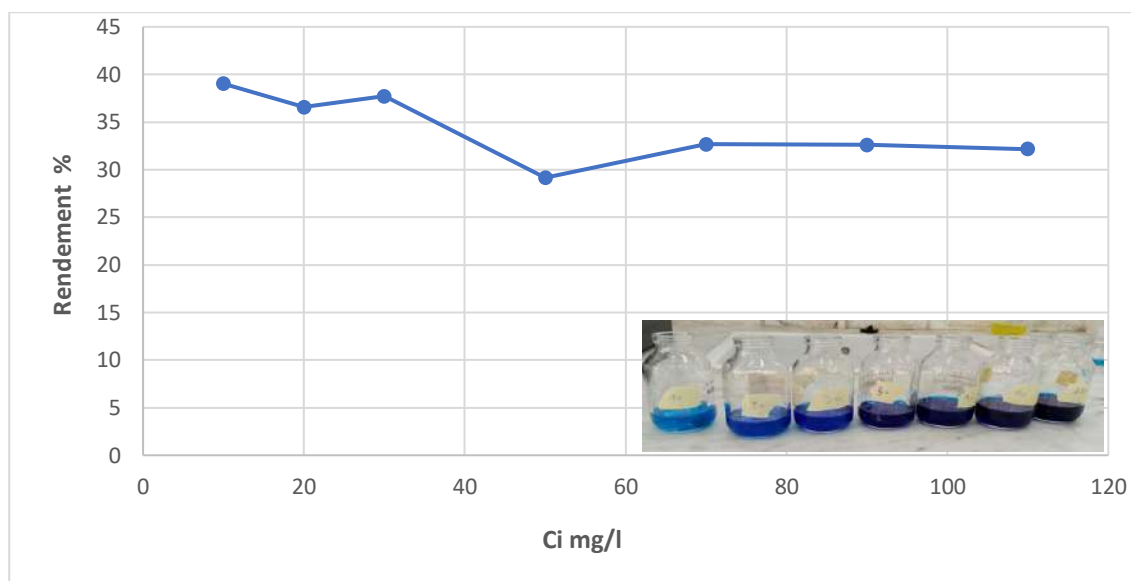


Figure IV.11: Effet de la concentration initiale sur la Rendement d'adsorption du bleu de méthylène par le charbon activé

- ❖ L'analyse montre que la meilleure efficacité d'élimination du bleu de méthylène par adsorption a été enregistrée à une faible concentration initiale (20 mg/L), où les sites actifs à la surface du biochar sont plus aptes à capturer le polluant. Avec l'augmentation de la concentration, le pourcentage d'élimination (R%) diminue en raison de la saturation de ces sites, bien que la quantité adsorbée (q_e) continue d'augmenter en raison de la plus grande disponibilité du polluant.

VI.3.2.4 Effet de la température de la solution

Nous avons réalisé ces expériences à différentes températures (25, 30, 40, 50) °C, en utilisant une concentration initiale $C_0 = 30$ mg/L, une quantité d'adsorbant de 30 mg, un temps d'agitation d'une heure, un pH de 8,02 et une vitesse d'agitation de 550 tours par minute.

Les résultats sont illustrés dans les deux figures IV.11 et IV.12 suivantes.

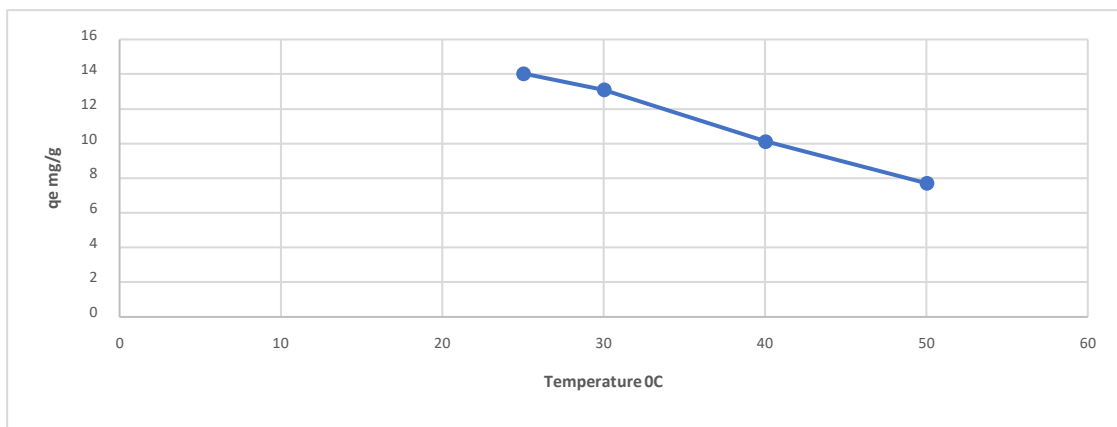


Figure IV.12: Effet de température sur la capacité d'adsorption du bleu de méthylène sur le Charbon activé préparé.

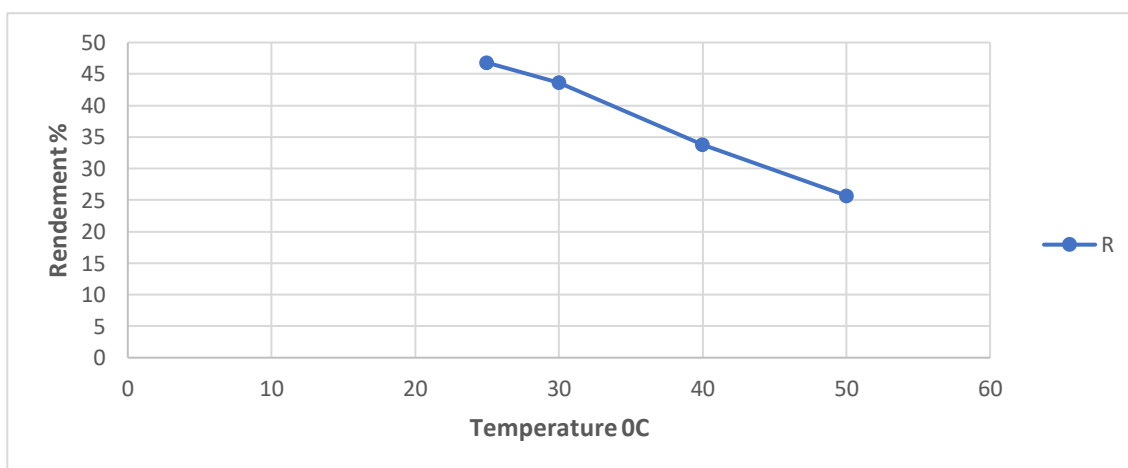


Figure IV.13: Effet de la température sur le rendement d'adsorption du bleu de méthylène sur le charbon activé préparé.

- ❖ Les figures IV11 et IV12 montrent que la capacité d'adsorption d'équilibre (q_e) et le pourcentage d'élimination (R%) du bleu de méthylène diminuent progressivement avec l'augmentation de la température de 25 à 50 degrés Celsius. Cette diminution est attribuée à la nature exothermique du processus d'adsorption, où l'augmentation de la température réduit la fixation des molécules de polluant à la surface du biochar, ce qui affecte négativement l'efficacité de l'adsorption. Par conséquent, on peut conclure que l'utilisation de températures plus basses lors de l'opération améliore l'efficacité de l'élimination du polluant de la solution.

IV. 3.2.5 Modélisation cinétique de l'adsorption du bleu de méthylène sur biocharactivé

La cinétique de l'adsorption du bleu de méthylène sur biocharactivé est démontrée par les deux modèles connus pseudo-second ordre et pseudo-premier ordre .

1. Modèle cinétique pseudo-second ordre

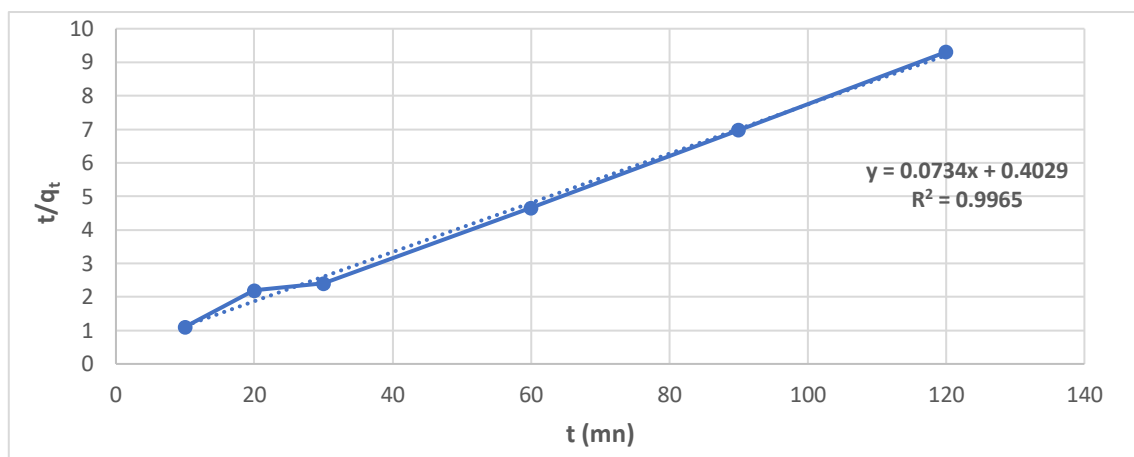


Figure IV.14 : Modèle cinétique pseudo-second ordre pour l'adsorption du bleu de méthylène.

2. Modèle cinétique du pseudopremier ordre

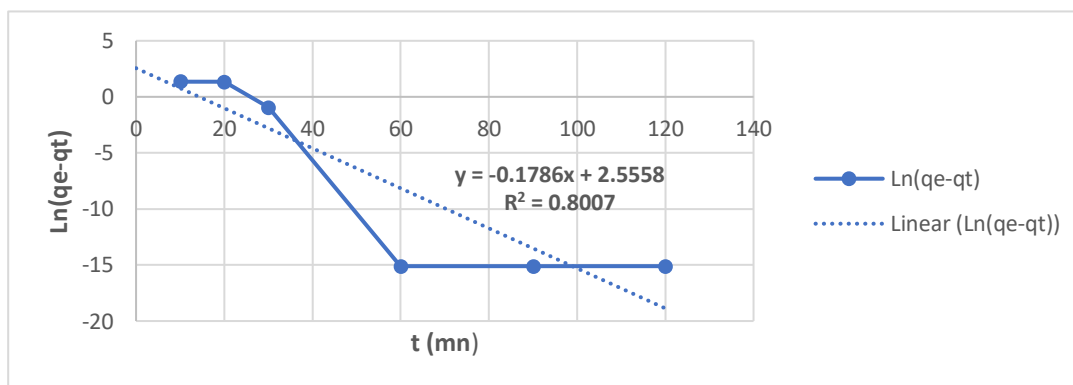


Figure IV.15 : Modèle cinétique du pseudo-premier ordre pour l'adsorption du bleu de méthylène

Tableau IV.1 : Valeurs des coefficients de corrélation des deux modèles

Modèle cinétique du pseudo-premier ordre			Modèle cinétique pseudo-second ordre		
q _e (mg/g)	K ₁	R ²	Q _e (mg/g)	K ₂	R ²
12 ,92	0,178	0,8007	13,62	0,0134	0 ,9965

✚ Les résultats du tableau IV.1 ont montré que le modèle cinétique du pseudo-second ordre est le plus approprié pour décrire l'adsorption du bleu de méthylène, avec un coefficient de corrélation élevé ($R^2 = 0,9965$) et une valeur de q_e proche de la valeur expérimentale. Cela indique que l'adsorption dépend principalement de la concentration du composé adsorbé.

IV3.2.6. Détermination des isothermes d'adsorption

Les isothermes correspondant aux modèles sélectionnés pour présenter les résultats expérimentaux sont illustrées dans les figures et le tableau ci-dessous :

1- Loi de Langmuir :

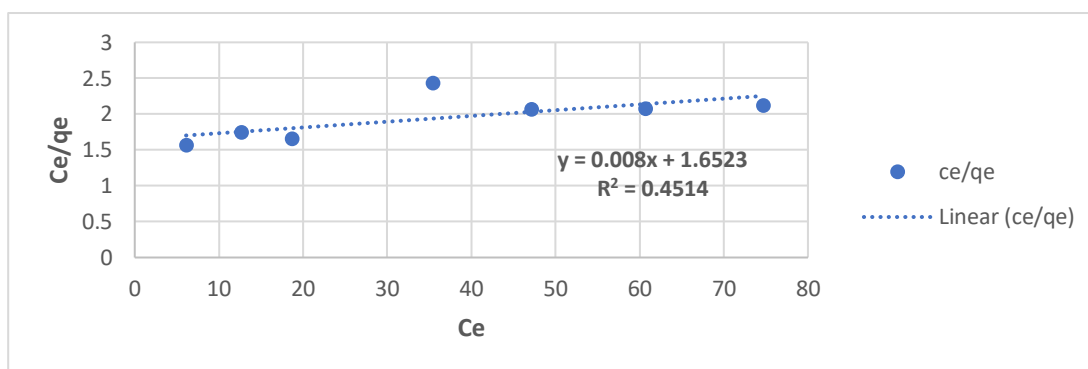


Figure IV.16: présentation du modèle de Langmuir.

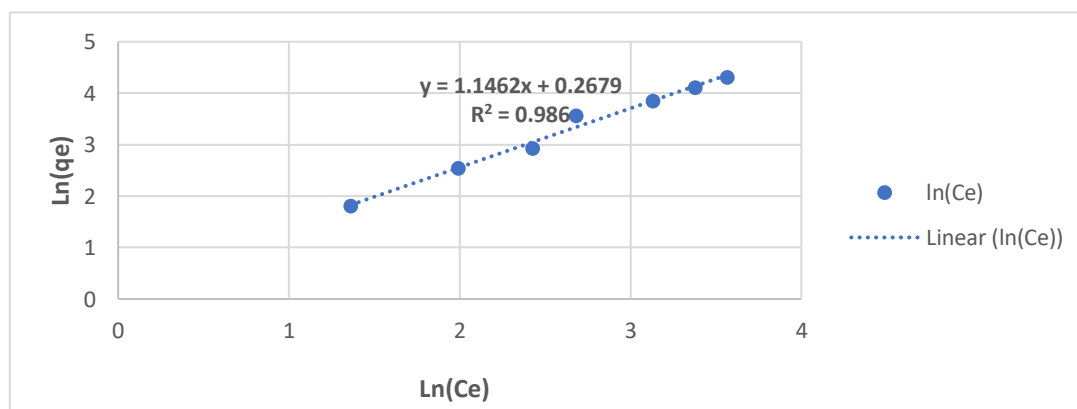


Figure IV.17 : présentation du modèle de Freundlich

Tableau IV.2 : paramètres des isothermes Langmuir et Freundlich.

Loi de Langmuir	Loi de Freundlich
-----------------	-------------------

Q	K	R ²	n	K	R ²
125	0,0048	0,4514	0.8724	0,7282	0.986

- ❖ Les résultats indiquent que le modèle de Freundlich convient mieux aux données d'adsorption, avec un coefficient de corrélation élevé ($R^2 = 0,986$), tandis que le modèle de Langmuir montre une moins bonne adéquation ($R^2 = 0,4514$).

IV.3.2.7 Étude de l'équilibre thermodynamique

L'équilibre thermodynamique a été étudié à travers des expériences réalisées à différentes températures, dans le but d'évaluer l'effet de la chaleur sur le comportement de l'adsorption. Les résultats ont été exploités graphiquement, comme illustré dans la figure ci-dessous.

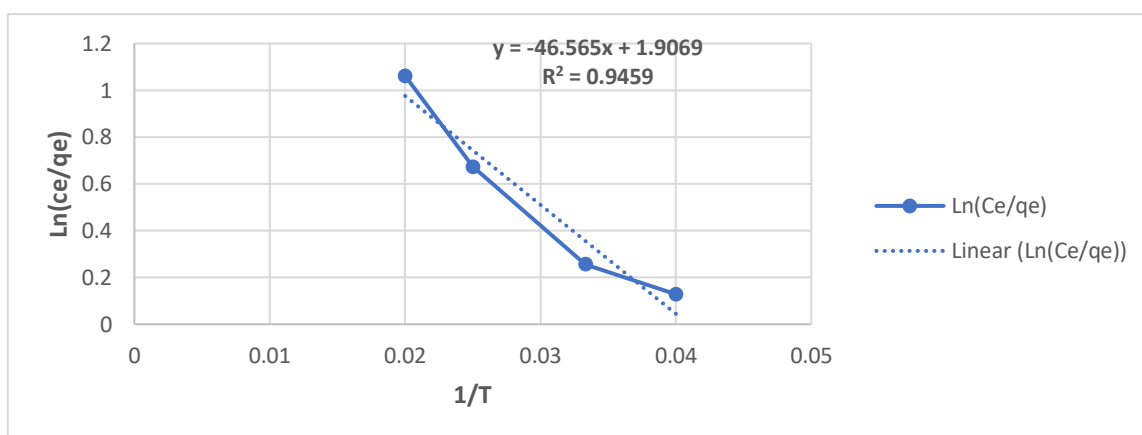


Figure IV.18 : Étude de l'équilibre thermodynamique

Tableau IV.3: Résultats de l'étude de l'équilibre thermodynamique

Thermodynamicequilibrium		
ΔH	ΔS	R^2
-387,15	15,84	0,9459

- ✓ Les résultats mentionnés dans ce tableau IV.3 indiquent que le processus d'adsorption est exothermique ($\Delta H < 0$) et spontané, avec une augmentation du désordre à la surface ($\Delta S > 0$). De plus, la valeur élevée du coefficient de corrélation ($R^2 = 0,9459$) confirme la bonne concordance des données avec le modèle thermodynamique utilisé.

IV.3.3 Couplage de l'électrocoagulation et de l'adsorption pour l'élimination du bleu de méthylène

Pour étudier l'effet du couplage des processus d'adsorption et d'électrocoagulation en vue d'obtenir un meilleur rendement dans l'élimination du bleu de méthylène, 2 litres de solution de bleu de méthylène ont été introduits dans le réacteur, avec l'ajout de 2 grammes de biochar

préparé. Par ailleurs, 1 gramme de biochar actif a été ajouté à un bécher contenant 1 litre de la même solution. Après avoir réalisé simultanément les deux opérations d'adsorption et d'électrocoagulation, comme illustré dans la figure IV.18, la solution obtenue a été filtrée sous des conditions opératoires spécifiques : intensité de courant de 1 ampère, débit de 2 ml/min, concentration initiale de 20 mg/L, température de 25°C, et agitation continue du bécher et du réacteur à une vitesse de 550 tours par minute ($V = 550 \text{ tr/min}$).

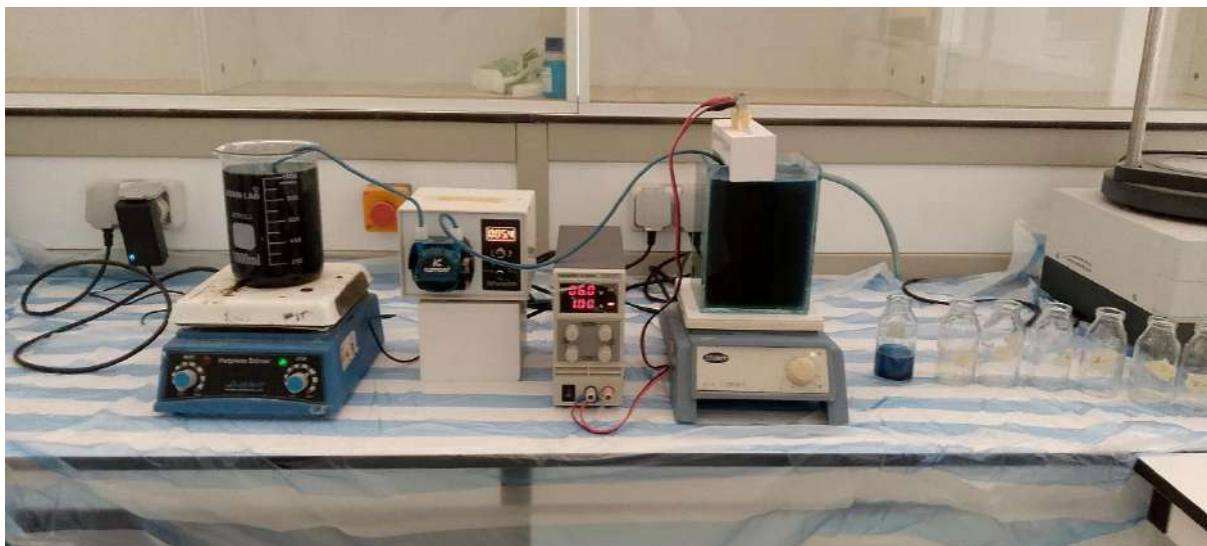


Figure IV.19 : expérience de couplage AD/EC

Le tableau et la figure ci- dessous montrent l'amélioration du rendement d'élimination du BM par le couplage adsorption/électrocoagulation.

Tableau IV.4. Effet de Couplage de l'électrocoagulation et de l'adsorption pour l'élimination du bleu de méthylène

Temp	5	10	20	40	60	80	100	120	140	160	180
C _f	15.95	12.24	14.99	14.51	13.41	10.45	11.41	9.56	8.94	8.39	7.29
R%	20.20	38.77	25.77	27.42	32.92	47.71	42.90	52.18	55.28	58.03	63.53

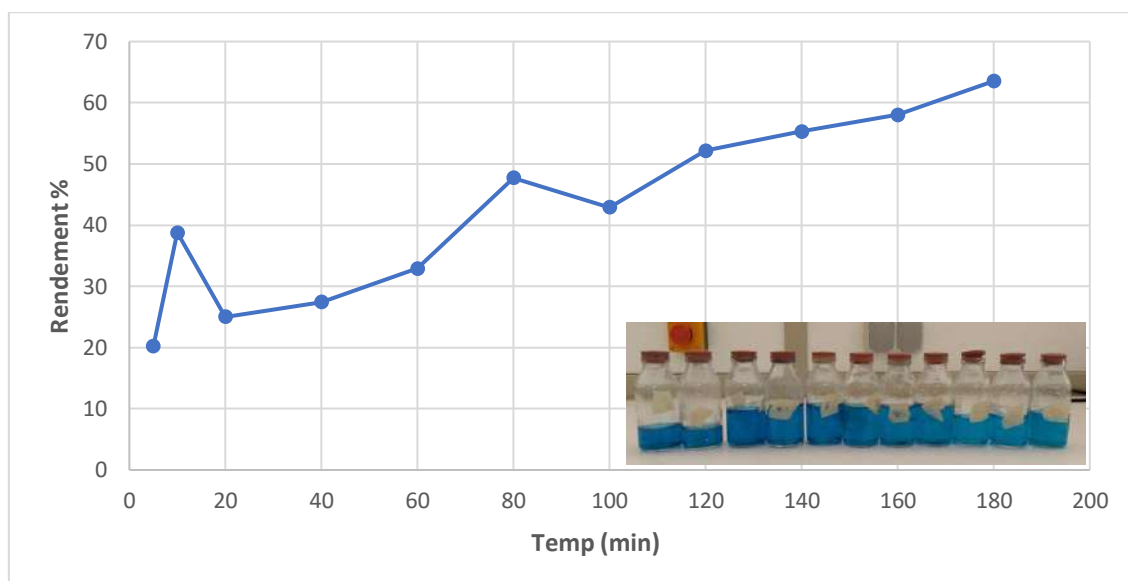


Figure IV.20: Effet de Couplage de l'électrocoagulation et de l'adsorption pour l'élimination du bleu de méthylène

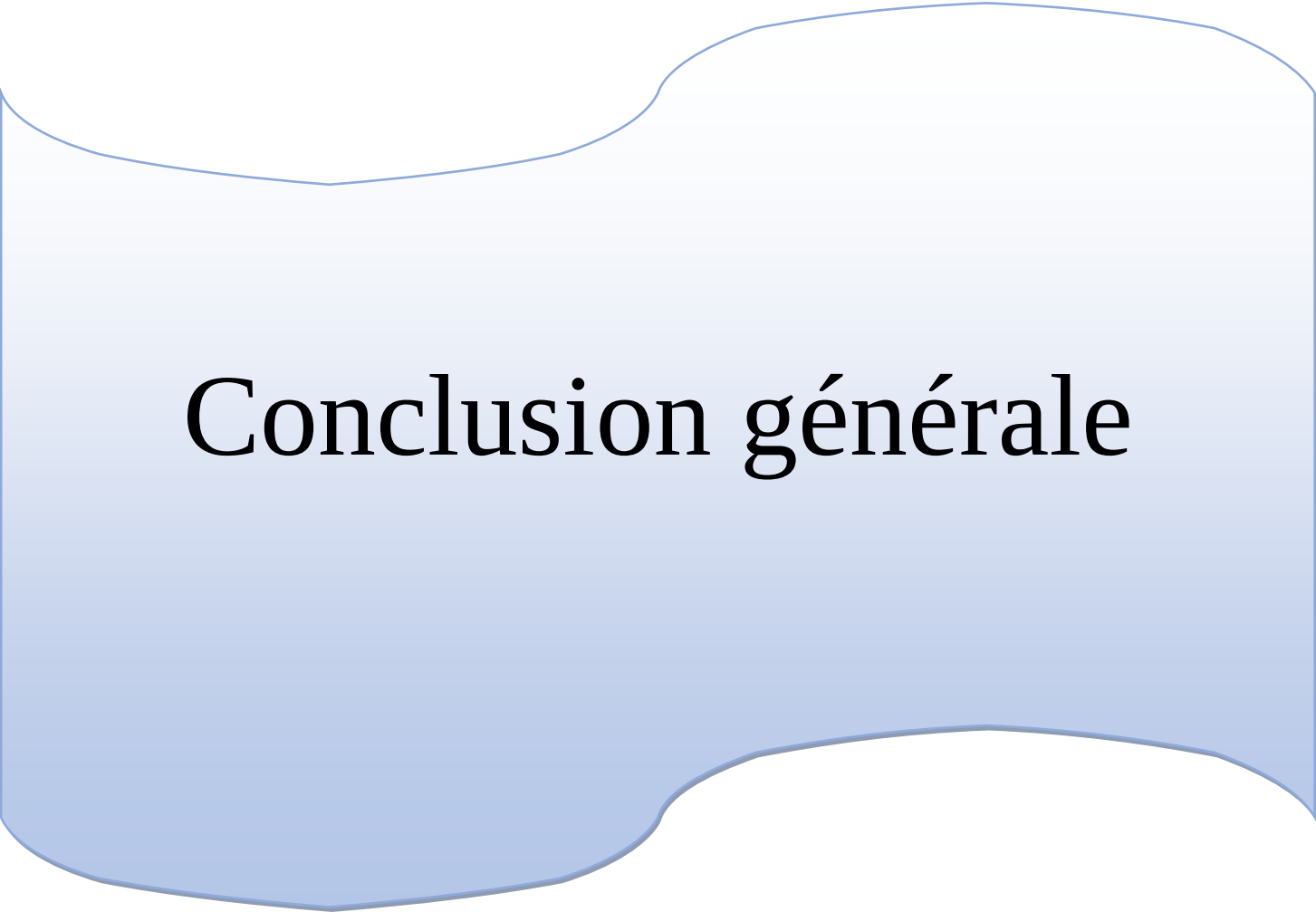
- Les résultats de l'étude du couplage entre l'adsorption et l'électrocoagulation ont montré une légère amélioration du rendement, atteignant 63,53 %. Cela indique que la combinaison des deux procédés permet une élimination plus efficace du bleu de méthylène par rapport à leur utilisation séparée.

IV.4. Conclusion

Dans cette étude, trois techniques ont été évaluées pour l'élimination du bleu de méthylène : l'électrocoagulation, l'adsorption sur biochar, ainsi que le couplage de ces deux méthodes.

- ✓ Les résultats ont révélé que l'électrocoagulation, appliquée à une concentration initiale de 20 mg/L, a permis d'atteindre un rendement maximal de 30 %, tandis que l'adsorption seule n'a permis d'obtenir qu'un rendement de 41 %.
- ✓ En revanche, le couplage des deux procédés a significativement amélioré l'efficacité du traitement, atteignant un rendement de 63 %.

Ce résultat met en évidence un effet synergique entre les deux techniques, ce qui renforce leur efficacité combinée et en fait une solution plus performante pour le traitement des eaux contaminées par des colorants organiques tels que le bleu de méthylène.



Conclusion générale

Cette étude vise à traiter les eaux polluées par le colorant bleu de méthylène en évaluant l'efficacité de trois techniques différentes : l'électrocoagulation utilisant des électrodes en aluminium, l'adsorption sur biochar, et la combinaison des deux méthodes.

Dans la première partie, l'influence de plusieurs facteurs tels que l'intensité du courant, le débit du liquide, et la concentration initiale du colorant sur l'efficacité de l'électrocoagulation a été analysée. Les résultats ont montré que les meilleures conditions étaient un courant de 1 ampère, un débit de 2 ml/min, et une concentration de 20 mg/L, avec un taux d'élimination atteignant 30%. Il a également été observé que le colmatage des électrodes dû à l'accumulation du colorant constitue un obstacle majeur à cette technique.

Dans la deuxième partie, l'effet de facteurs influençant l'adsorption, tels que le temps de contact, la concentration initiale, la température et le pH, a été étudié. La meilleure élimination du colorant a été obtenue à pH 2 et 12, avec une concentration de 20 mg/L, tandis que l'efficacité diminuait en milieu neutre. Les résultats ont également indiqué qu'une augmentation de la température réduisait l'efficacité de l'adsorption, suggérant que le processus est exothermique. La cinétique a bien suivi un modèle cinétique pseudo-second ordre, et l'isotherme de Freundlich s'est révélée la plus adaptée pour décrire l'adsorption.

Enfin, la combinaison de l'électrocoagulation et de l'adsorption a montré une amélioration notable de l'efficacité d'élimination du colorant, avec un taux d'élimination atteignant 63,5%, indiquant un effet synergique entre les deux méthodes.

- [1] ALI H. (2010). Biodégradation of Synthetic Dyes—A Review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 213(1), 251-273.
- [2] LOUAFI K. CHRFI S (2021). / Impact de la pollution des eaux l'environnement /mémoire de master/Département de biologie appliquée/ (2021)
- [3] <https://www.genspark.ai/spark/comprendre-la-pollution-de-l-eau/b7130b84-2ce2-465a-9deb-b9878fd27e48>
- [4] BETTAYEB. (2022) A/Élimination d'un colorant cationique (GV) par adsorption sur un biochar synthétisé à partir des noyaux de Lilas perse/Mémoire de master/Spécialité : Génie des procédés de l'environnement/Université Mohamed Khider de Biskra
- [5] <https://fac.umc.edu.dz/snv/faculte/becol/2019/Chap%204%20La%20pollution%20de%20l%27EAU.pdf>
- [6] SCHWARZENBACH, R. P., EGLI, T., HOFSTETTER, T. B., VON GUNTEN, U., & WEHRLI, B. (2010). Global water pollution and human health. *Annual review of environment and resources*, 35(1), 109-136.
- [7] MEYBECK M. (2003). Global analysis of river systems: from Earth system controls to Anthropocene syndromes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 358(1440), 1935-1955.
- [8] MEZIANI IBTISSEM, H. B. (2015). Contribution à l'étude de la qualité physico-chimique de l'eau de la moyenne Seybouse
- [9] BENREIALA W. TALEB AHMED K. (2024). Étude de la sélectivité de différents matériaux adsorbants vis-à-vis l'élimination de Rhodamine B : Une approche comparative/ mémoire de master/ Spécialité : Génie des procédés de l'environnement
- [10] MEYBECK, M. (2003). Global analysis of river systems: from Earth system controls to Anthropocene syndromes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 358(1440), 1935-1955.
- [11] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/sciences-fondamentales-th8/constantes-chimiques-des-solvants-et-produits-42337210/colorants-pour-les-matieres-textiles-k350/definition-et-proprietes-k350v2niv10001.html>
- [12] CHRISTIE, R. M. (2001). *Colour Chemistry: The Design and Synthesis of Organic Dyes and Pigments*. The Royal Society of Chemistry.

- [13] http://dspace.univtlemcen.dz/bitstream/112/24986/1/Preparation_et_caracterisation_de_composite_argile_modifiee_biopolymeres_application_a_l_adsorption_des_colorants.pdf
- [14] BENDAIA.M.(2021).Décontamination de colorants alimentaires de l'eau par électrocoagulation et adsorption/doctorat/Chimie analytique et environnement/2021
- [15] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/colorants/>
- [16] HOURI.R, KEBAILI .M ,MOGDAD.S. (2020) .Elaboration d'un biofiltre pour la dépollution des eaux contaminées par des colorants/ master /Sciences et Génie de l'Environnement/
- [17] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Colorant>
- [18] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/colorants/5-classification-des-colorants/>
- [19]<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/sciences-fondamentales-th8/constantes-chimiques-des-solvants-et-produits-42337210/colorants-pour-les-materiaux-textiles-k350/types-de-colorants-textiles-k350v2niv10003.html>
- [20] <https://tice.acmontpellier.fr/ABCDORGA/Famille3/TEINTURES.htm#trois>
- [21] FERNANE G.(2017)Toxicité des colorants et différentes techniques de traitement des effluents/master/Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles/Génie Chimique ;
- [22]<https://www.officiel-prevention.com/dossier/protections-collectives-organisation-ergonomie/risque-chimique-2/la-prevention-des-risques-chimiques-des-colorants-et-pigments>
- [23] <https://www.allodocteurs.fr/utiliser-le-bleu-de-methylene-comme-remede-quels-sont-les-risques-39031.html>
- [24] https://www.carlroth.com/downloads/sdb/fr/9/SDB_9953_CH_FR.pdf
- [25] https://fr.wikipedia.org/wiki/Bleu_de_m%C3%A9thyl%C3%A8ne
- [26] https://fr.wikipedia.org/wiki/Bleu_de_méthylène
- [27] BOUDEMA.S, BEN SADIA. F (2023). Élimination du bleu de méthylène en milieu aqueux par un système d'oxydation avancée : étude cinétique/ master/Génie pétrochimique/ UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA /
- [28] <https://www.ajol.info/index.php/ijbcs/article/view/209187/197223>

- [29] <https://www.suezwaterhandbook.fr/eau-et-generalites/processus-elementaires-du-genie-physico-chimique-en-traitement-de-l-eau/filtration>
- [30] <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/traitement-eau-adoucisseur/filtration-purification-traitement-eau/>
- [31] <https://www.assistancescolaire.com/eleve/5e/physique-chimie/reviser-une-notion/5pea18>
- [32] <https://www.dlk.ch/index.php/fr/industrie/traitement-des-eaux-residuaires/abaissement-de-la-dco/traitement-par-oxydation-chimique>
- [33] <https://www.suezwaterhandbook.fr/eau-et-generalites/processus-elementaires-du-genie-physico-chimique-en-traitement-de-l-eau/precipitations-chimiques>
- [34] <https://www.vaisala.com/fr/chemical-industry-solutions/chemicals-allied-products/pure-water-treatment-chemical-precipitation>
- [35] <https://fr.airliquide.com/solutions/traitement-des-eaux/comment-se-fait-le-traitement-des-eaux-usees>
- [36] BENDAIA M.(2021)Décontamination de colorants alimentaires de l'eau par électrocoagulation et adsorption. Thèse de doctorat. Chimie analytique et environnement UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA. 2021
- [37] BESSIOUD S. (2010)Traitement d'une eau de surface par electrocoagulation Génie des procédés. Université 08 mai 1945 Guelma.MAGISTER.
- [38] <https://www.sciencedirect.com>
- [39] HAÏE.DEGHICHEA. (2016) Étude de l'électrocoagulation des deux polluants en système binaire. Master en génie des procédés. Université de blida 1.
- [40] LEMLIKCHI W.(2012)élimination de la pollution des eaux industrielles par différents procédés d'oxydation et de Co-précipitation, Thèse de doctorat, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI TIZI OUZOU
- [41] www.elsevier.com/locate/envres
- [42] BENMENNI F. (2016) étude de l'électrocoagulation de deux colorants (vert de méthyle et jaune basique 28) en mélange binaire. Génie des Procédés .Mémoire de master 2. Universitesaaddahlab de blida.

- [43] BASSALA H. D.(2020)Conception et élaboration d'un réacteur d'électrocoagulation : Application au traitement des eaux de rejet industriel/ Thèse de doctorat/ REPUBLIQUE DU CAMEROUN UNIVERSITE DE YAOUNDE I FACULTE DES SCIENCES DEPARTEMENT DE CHIMIE INORGANIQUE
- [44] ANNANE O.(2008).Amélioration de la technique de défluoruration par le nouveau procédé d'électrocoagulation bipolaire. Chimie de l'Environnement. Mémoire de Magister. Université mouloud mammeri de tizi-ouzou.
- [45] BELOUDAH M.(2020). Etude des propriétés de l'électrocoagulation d'un acide organique /Université Mohamed Khider – Biskra /Mémoire de Master2 /Spécialité : Hydraulique urbaineThème
- [46]https://www.researchgate.net/figure/Arrangements-of-electrodes-in-EC-cells-a-monopolar-electrodes-in-parallel-connection_fig2_364952497
- [47]<https://fr.genesiswatertech.com/article-de-ce-blog/électrocoagulation-l%27avenir-de-la-technologie-de-traitement-de-l%27eau/>
- [48] BENDAIA M.(2021). Décontamination de colorants alimentaires de l'eau par électrocoagulation et adsorption. Thèse de doctorat. Chimie analytique et environnement UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA. L'utilisation de l'électricité peut revenir chère voir difficile dans certaines régions.
- [49] KHAIZAR A. (2022)Elimination d'un colorant cationique par adsorption sur charbon synthétisé à partir d'un déchet animal/ Génie chimique/ Université Mohamed Khider de Biskra/ MÉMOIRE DE MASTER
- [50]<https://www.univ-usto.dz/faculte/fac-chimie/wp-content/uploads/2022/04/Procedes-dadsorption-ADSORPTION.ppt-2022-PARTIE-1.pdf>
- [51]https://www.researchgate.net/figure/Mecanisme-du-transfert-dun-adsorbat-vers-le-site-dadsorption-au-sein-dun-grain_fig5_330825106
- [52] BEN SACI A., ZEID M S .(2022).Etude thermodynamique et cinétique de l'adsorption du quelque colorant sur charbon actif/ Génie Chimique. / Université KASDI-MERBAH Ouargla
- [53] AGA S. (2015) .Etude cinétique et thermodynamique de l'adsorption de quelques colorants textiles par des résidus issus de l'industrie

agroalimentaire/MEMOIREMAGISTER/Génie Chimique /UNIVERSITE FERHAT ABBAS SETIF-1-/

[54] HAMDOUD A. SALHI A. /Etude bibliographique sur l'adsorption de quelques colorants par des bio-adsorbant/ Mémoire MASTER/ Génie des Procédés de l'Environnement/ Université KASDI-MERBAH Ouargla/2020

[55] BELAYACHIA.(2016).Elimination d'un colorant anionique par Adsorption, électrocoagulation, Fenton / doctorat/ spécialiste : chimie/ université Abdelhamid ibn badis, Mostaganem

[56] BENYABA A,ALIOUA M.(2019).Adsorption isotherme et thermodynamique du colorant organique (Rhodamine B) / Mémoire MASTER / CHIMIE DE L'ENVIRONNEMENT/ UNIVERSITE AHMED DRAIA D'ADRAR

[57] MEFTAH L.,SAHNOUN K. ,SAKHRI S.(2019). Exploitation des propriétés adsorbantes de la vermiculite dans le domaine de traitement des eaux/ Mémoire MASTER/chimie d'environnement /UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

[58] <https://www.researchgate.net/figure>

[59] HIBACHE I (2016).Etude de l'élimination compétitive de deux composés phénoliques sur un bioadsorbant/ mémoire de master /Génie de l'Environnement/Ecole Nationale polytechnique

[60] ANIRUDHAN, T. S., &SREEKUMARI, S. S. (2009). Adsorption of phenol from aqueous solutions using activated carbon derived from coconut coir pith: Kinetic and equilibrium studies. Desalination, 249(3), 838–846.

[61] ABDELWAHAB, O., & AMIN, N. K. (2013). Adsorption of methylene blue from aqueous solutions using rice husk activated carbon. Journal of Environmental Management, 114, 133–139.

[62] ALTENOR, S., CARENE, B., EMMANUEL, E., LAMBERT, J., EHRHARDT, J. J., & GASPARD, S. (2009). Adsorption studies of methylene blue and phenol onto vetiver roots activated carbon prepared by chemical activation. Journal of Hazardous Materials, 165(1–3), 1029–1039.

- [63] HAN, R., ZOU, W., ZHANG, Z., SHI, J., & YANG, J. (2007). Removal of copper (II) and lead (II) from aqueous solution by manganese oxide coated sand: II. Kinetics study and equilibrium isotherm analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 137(1), 480–488.
- [64] FENG, N., GUO, X., LIANG, S., ZHU, Y., & LIU, J. (2015). Adsorption of methylene blue onto a low-cost adsorbent from aqueous solution: Kinetic and thermodynamic studies. *Journal of Environmental Sciences*, 27, 112–119.
- [65] XU, X., GAO, B., TAN, X., ZHANG, X., YUE, Q., WANG, Y., & LI, Q. (2017). Removal of copper, zinc and cadmium from aqueous solutions by three modified biochars derived from rice straw. *Bioresource Technology*, 219, 548–556.
- [66] CHENG, Q., WANG, J., & WANG, X. (2016). Removal of methylene blue from aqueous solution using m
- [67] LIU, N. & WU, Y. (2019). "Removal of methylene blue by electrocoagulation: a study of the effect of operational parameters and mechanism." *Ionics*, 25(8), 3953–3960.
- [68] ASSEMIAN, A. S., KOUASSI, K. E., ADOUBY, K., DROGUI, P., & BOA, D. (2018). "Removal of Methylene Blue in aqueous solutions by Electrocoagulation process: Adsorption, Kinetics studies. " *European Journal of Chemistry*, 9(4), 311–316.
- [69] KHANITCHAIDECHA, W., DANG, T. T. T., THRERUJIRAPAPONG, T., & NAKARUK, A. (2020). "Effect of Dye and NaCl Concentrations on Methylene Blue Dye Removal by Electrocoagulation." *Naresuan University Engineering Journal*, 15(1), 1–5.
- [70] HASNAOUI, A., CHIKHI, M., BALASKA, F., SERAGHNI, W., BOUSSEMGHOUNE, M., & DIZGE, N. (2024). "Electrocoagulation employing recycled aluminum electrodes for methylene blue remediation." *Desalination and Water Treatment*, 319, 100453.
- [71] <https://www.univ-usto.dz/faculte/fac-chimie/wp-content/uploads/2022/04/Procedes-dadsorption-ADSORPTION.ppt-2022-PARTIE-1.pdf>
- [72]. HABIBI, N.; ROUHI, P.; RAMAVANDI, B. (2017) .Synthesis of adsorbent from *Tamarix hispida* and modified by lanthanum metal for fluoride ions removal from wastewater: Adsorbent characteristics and real wastewater treatment data. *Data Br.* 13, 749–754.
- [73]. TANG, X.; SHEN, L.; LIU, S.; GAO, J. (2021). Effective removal of the herbicide glyphosate by the kelp *Saccharina japonica* female gametophytes from saline waters and its mechanism elucidation. *Chemosphere* 274, 129826.

- [74]. Al-Jaf, H.; Alazawii, A.; Al-Shujairi, S.; Saad, N.(2021).Adsorption of glyphosate from aqueous solution by using modified corn cob and rice husk as adsorbents. AIP Conf. Proc., 2331, 050024.
- [75]. LESCANO, T.Z.; ROMERO, P.E.; MONZÓN, A.R. (2021).Evaluation of the adsorption efficiency of glyphosate onto the chitin-polymer composite derived from shrimp shells. J. Environ. Chem. Eng. 9, 105935.
- [75]. Pramanik, B.K.; Rahman, A.; Asce, M.(2022) Degradation of glyphosate: A review of environmental fate, microbial mechanisms, and available treatment options. J. Environ. Eng.148, 03121001.
- [76] <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Phenothiazine#section=2D-Structure>

Résumé

La contamination des eaux par les colorants , notamment le bleu de méthylène , constitue un problème environnemental majeur.

Ce travail vise à évaluer l'efficacité d'un procédé couplé électrocoagulation–adsorption pour éliminer le bleu de méthylène des eaux usées. L'électrocoagulation, utilisant des électrodes en aluminium, permet la formation de coagulants in situ, tandis que l'adsorption assure une élimination complémentaire grâce à l'utilisation de charbon active préparé à partir d'écorce de fruit de pin. Les expériences menées ont permis d'optimiser les conditions opératoires (pH, intensité de courant, temps de traitement,). Les résultats obtenus montrent que le couplage des deux procédés permet d'atteindre un taux d'élimination du bleu de méthylène de 63.53 %, démontrant ainsi l'intérêt de cette approche intégrée pour le traitement avancé des eaux contaminées.

Mots-clés: Bleu de méthylène, Electrocoagulation, Adsorption, Traitement des eaux, Micropolluants.

Abstract

Water contamination by dyes, particularly methylene blue, is a major environmental problem.

The aim of this work is to evaluate the effectiveness of a coupled electrocoagulation-adsorption process for removing methylene blue from wastewater. Electrocoagulation, using aluminum electrodes, enables the formation of coagulants in situ, while adsorption ensures complementary elimination through the use of activated carbon prepared from pine fruit bark. The experiments carried out enabled us to optimize the operating conditions (pH, current intensity, treatment time, etc.). The results show that coupling the two processes achieves a methylene blue removal rate of 63.53%, demonstrating the value of this integrated approach for the advanced treatment of contaminated water.

Key-words: Methylene blue, Electrocoagulation, Adsorption, Water treatment, Micropollutants.

ملخص

يمثل تلوث المياه بالأصباع، وخاصة الميثيلين الأزرق، مشكلة بيئية كبيرة.

والهدف من هذه الدراسة هو تقييم فعالية عملية التختير الكهربائي والامتزاز المشترك للتخلص من الميثيلين الأزرق من مياه الصرف الصحي. تتيج عملية التختير الكهربائي، باستخدام أقطاب الألومنيوم، تكوين مواد التختير في الموقع، بينما يوفر الامتزاز إزالة إضافية من خلال استخدام الكربون المنشط المحضر من لحاء فاكهة الصنوبر. مكّنت التجارب التي أجريت من تحسين ظروف التشغيل (الأس الهيدروجيني، وشدة التيار، ووقت المعالجة، وما إلى ذلك). أظهرت النتائج أن الجمع بين العمليتين أدى إلى معدل إزالة الميثيلين الأزرق بنسبة 63.53%، مما يدل على قيمة هذا النهج المتكامل للمعالجة المتقدمة للمياه الملوثة.

الكلمات الرئيسية: الميثيلين الأزرق، التختير الكهربائي، الامتزاز، معالجة المياه، الملوثات الدقيقة.