

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Chadli Bendjedid El-Tarf
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie des Procédés



Mémoire de Master Professionnel

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Dessalement et Traitement des Eaux

Thème :

ELIMINATION DE COLORANT PAR COAGULATION FLOCCULATION- ADSORPTION

Présenté par :

- GHERS FAYCAL

Soutenue le : 29/06/2025 devant le jury composé de :

<u>Jury de Soutenance</u>		<u>grade</u>	
Dr : B. Idir Soufiane	Président	MCB	Univ. El-Tarf
Dr : O. Abdelali	Encadreur	MCB	Univ. El-Tarf
Dr : A. adel	Co-Encadreur	MCA	Univ. El-Tarf
Dr : H. Abdelmadjid	Examineur	MCB	Univ. El-Tarf

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions dieu le tout puissant, notre créateur de nos avoir donné la force, la volonté et le courage afin d'accomplir ce modeste travail.

Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur Dr. OUCHENE Abdelali, cou encadreur Dr. AITBARA Adel pour ses conseils et ses dirigés à la fin de ce travail. Et grand remerciement les Jury de Soutenance Dr : B. Idir Soufiane et Dr : H. Abdelmadjid

Je veux remercier l'équipe de laboratoire, qui nous a fourni tous les matériels et les produits chimiques nécessaires à notre travail.

Nous tenons également à remercier les membres de jury pour l'honneur qu'ils nos ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.

Finalement, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos familles qui Nous ont toujours soutenues et à tout ce qui participe de réaliser ce projet de fin d'études. Ainsi que l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation.

& Fayçal ghers

Dédicace

Je dédie ce modeste mémoire aux êtres les plus chers au monde, à qui je témoigne mon amour et mon affection pour leur encouragement, leur compréhension et leur patience, qui m'ont su me comprendre et m'ont poussé à apprendre, c'est de vous dont je parle mes très chers parents.

À Mon père

À ma mère

À ma chère épouse, pour sa patience, sa compréhension et sa présence rassurante à chaque étape de ce parcours.

À mes enfants bien-aimés, source de joie, d'inspiration et de motivation.

À ma famille, qui a toujours cru en moi.

À tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont soutenu durant cette aventure.

& Fayçal ghers

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Partie bibliographique

Introduction1

I Généralités sur les eaux.

I.1. Origine de l'eau.....2

I.2. L'eau dans le monde2

I.3.Ressources hydriques naturelles.....3

1.3.1. Eaux superficielles.....3

1.3.2. Eaux souterraines.....3

1.3.3. Dessalement de l'eau de mer.....4

I.4. Les utilisations de l'eau4

I.4.1. L'eau d'irrigation.....4

I.4.2 L'eau potable5

I.4.3. L'eau pour la production d'énergie5

I.5. Paramètres de caractérisation des eaux5

1.5.1. Paramètre organoleptique.....5

1.5.1.1. Odeur et gout.....5

1.5.1.2. Couleur.....6

1.5.2. Paramètre physico-chimique.....6

1.5.2.1. La conductivité6

1.5.2.2. La température.....	6
1.5.2.3. Le potentiel d'Hydrogène (pH).....	6
1.5.2.4. Les chlorures.....	7
1.5.2.5. Les sulfates.....	7
1.5.2.6. Les Gaz dissous	7
1.5.2.7. La dureté de l'eau (TH).....	8
1.5.2.8. L'alcalinité.....	9
Titre alcalimétrique (TA).....	9
Titre alcalimétrique complet (TAC).....	9
1.5.2.9. Turbidité.....	9
1.5.3. Paramètres microbiologiques.....	10

II Généralités sur les Colorant

II.1 Historique des colorants	11
II.2. Définition des colorants.....	11
II.83. Classification des colorants.....	11
II.3.1. Origine naturelle.....	11
II.3.2. Origine synthétique.....	11
II.3.2.1. Les colorants solubles dans l'eau.....	12
✓ Les colorants Acid.....	12
✓ Les colorants directs ou substant.....	12
✓ Les colorants mordonnables	13
✓ Les colorants basiques.....	13

✓ Les colorants métallifères	14
II.3.2.2. Les colorants insolubles dans l'eau.....	14
Les colorants de cuve	15
B) Les colorants azoïques	15
C) Les colorants formés par oxydation.....	15
D) Les colorants dispersés.....	15
E) Les colorants réactifs	16
II.3.2.3. Les colorants pigmentaires.....	16
II.4 Domaine d'application des Colorants.....	16
II.5. Source de colorant SIN 124.....	17
II.5.1. Réglementation.....	17
II.5.2. Impacts du colorant SIN 124 (Ponceau 4R) sur l'environnement et la santé	17
II.5.2.1 Impact environnemental	17
II.5.2.2. Effets sur la santé humaine.....	18
II.6 CONCLUSION.....	18

III Procède de traitement

Introduction	20
III.1. Prétraitements.....	21
III.1.1 Dégrillage et tamisage.....	21
III.1.2 Le dessablage.....	21

III.1.3. Déshuilage – Dégraissage.....	22
III.2. Traitement biologique.....	23
III.3 Les procédés d’oxydation avancée.....	23
III.4. Traitements physico-chimiques.....	23
III.4.1 Procédés membranaires	24
III.4.2 Echange d’ions	24
III.4.3 Coagulation-floculation.....	24
III.4.3.1 Coagulation de la couleur.....	25
III.4.3.2 Déstabilisation des colloïdes.....	25
III.4.3.3 Le processus de coagulation.....	25
III.4.3.4 Facteurs influençant la coagulation-floculation.....	25
B) Influence de la dose de coagulant.....	26
c) Influence de la turbidité.....	27
III.5 Définition du procédé d’adsorption.....	27
III.5.1 Différents types d’adsorption.....	28
III.5.1.1 Physisorption.....	28
III.5.1.2 L’adsorption chimique (ou chimisorption)	28
III.5.2. Le mécanisme d’adsorption d’un colorant.....	28
III.5.3 Facteurs influençant l’adsorption.....	29
✓ La nature de l’adsorbant	29
✓ La nature de l’adsorbat	29

✓ Les conditions opératoires.....	29
III.5.4 Différents types d'adsorbants.....	30
III.5.4.1 Charbons actifs.....	30
III.5.4.2 Zéolithes.....	30
III.5.5 Classification des isothermes d'adsorption.....	30
III.5.5.1. Classe L.....	30
III.5.5.2. Classe S.....	31
III.5.5.3. Classe H.....	31
III.5.5.4. Classe C.....	31
Conclusion.....	31

Partie expérimentale

IV Matériels et Méthodes

IV.1. Matériels et Méthodes.....	35
IV.1.1. Données sur le colorant utilisé (E124).....	35
IV.1.2. Préparation des solutions et analyses du colorant.....	36
IV.1.3. Nature des adsorbants utilisés.....	37
IV.1.4. Préparation de charbon actif (CAPF).....	37
IV.1.4.1. Activation avec l'acide phosphorique.....	38
IV.1.4.2. Activation thermique (Calcination).....	38
IV.1.4.3. Broyage des charbons (CAPF).....	38

IV.1.5. Équipement et conditions opératoires du traitement par coagulation floculation-Adsorption.....	39
IV.2. Résultats et discussion.....	40
IV.2.1. Données analytiques sur le colorant étudié (E124).....	40
IV.2.2. Etablissement de la courbe d'étalonnage du colorant étudié.....	42
IV.2.3. Résultats d'élimination du colorant par Coagulation floculation – Effet de la masse de coagulant.....	43
IV.2.4. Résultats d'élimination du colorant par Coagulation floculation – Effet de Ph.....	45
IV.2.5. Résultats d'élimination du colorant par Adsorption – Effet de masse d'adsorbant.....	46
IV.2.6. Résultats d'élimination du colorant par couplage coagulation floculation-adsorption.....	48
Conclusion générale.....	51
Références bibliographiques.....	52

Liste des tableaux.

Tableau N°	Titre de tableau	Page
I.1	Dérivés des coagulant utilisée (sels d'aluminium et de fer)	27
IV.2	Quelques données sur le colorant étudié (E124).	36
IV.3	Quelques caractéristiques du colorant étudié	42

Liste des figures.

Figure N°	Titre de figure	Page
I.1	Le cycle des gaz dissous	8
II.2	Structure de rouge Congo	12
II.3	La structure de rouge Janus et l'orangé II	13
II.4	La structure d'Alizarine	13
II.5	La structure de gris Irgalane BL	14
II.6	La structure d'Indigo	15
II.7	Structure du rouge de phénol.	16
II.8	Structure du Ponceau 4R	17

Liste des tableaux et des figures

III.1	Technique de sédimentation combinant la coagulation et la floculation	25
III.2	Quelques termes de base utilisés dans la technologie de l'adsorption	27
IV.1	Photo de fèves (gauche) et composition moyenne pour 100g des fèves (droite)	38
IV.2		41
IV.3	Spectre d'absorbance du colorant étudié	42
IV.4	Essais de stabilité ou de conservation des colorants dans le temps	43
IV.5	Courbe d'étalonnage du colorant étudié	44
IV.6	Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différentes masse de coagulants ($T = 24^{\circ}\text{C} \pm 1$; Agitation = 200rpm, temps de contact = 30 min ; pH initial = 6.1, concentration initiale en colorant = 50 mg/l ; floculant SP6)	45
IV.7	: Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différents valeurs de pH ($T = 24^{\circ}\text{C} \pm 1$; Agitation = 200 rpm, temps de contact = 30 min ;	46
IV.8	Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différentes masses de l'adsorbant ($T \sim 24^{\circ}\text{C}$; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; concentration initiale de colorant = 50 mg/l ; Adsorbant (A : CAPP ; B : CPF)).	48
IV.9	: Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps à différentes	50
IV.10	Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps à	50

Liste des abréviations

Liste des abréviations

DCO	Demande chimique en oxygène
DBO	Demande biochimique en oxygène
PH	Pouvoir hydrogène
T	Température
Mg/L	Milligramme par litre
$A/2(SO_4)_3$	Sulfate d'aluminium
Alc :	Alcalinité
(E124) di-sulfonate	sel trisodique 2-hydroxy-1-(4-sulfonate-1-naphtylazo)6,8naphtalène
(CAC)	charbon actif commercial
(CAPF)	charbon élaboré à partir de pelures de fèves
(PF)	pelures de fèves
(H_3PO_4)	acide phosphorique
M	mètre
M3	mètre cube
Mg	milligramme
Mg/l	milligramme par litre
%	pourcentage
UCV	Unité de Couleur Vraie
(NaOH)	d'hydroxyde de sodium

INTRODUCTION

GENERALE

L'eau est une ressource vitale et irremplaçable pour l'ensemble des êtres vivants. Elle joue un rôle fondamental dans les activités domestiques, industrielles et agricoles. Cependant, avec l'industrialisation croissante et l'expansion des secteurs tels que le textile, l'agroalimentaire et la chimie, les rejets d'eaux usées polluées se sont multipliés, posant un sérieux problème environnemental. Parmi les polluants les plus préoccupants figurent les colorants synthétiques, largement utilisés pour leurs propriétés tinctoriales, mais qui présentent une grande stabilité chimique et une résistance aux traitements biologiques classiques.

Les colorants azoïques, et notamment le Ponceau 4R (SIN 124), sont fréquemment utilisés dans l'industrie alimentaire et textile. Ce type de colorant, en plus de son impact visuel sur les milieux aquatiques, peut engendrer des effets toxiques, allergènes ou cancérogènes sur les organismes vivants. La présence de ces composés dans les eaux usées rend leur traitement indispensable avant tout rejet dans le milieu naturel.

Face à cette problématique, plusieurs techniques de traitement ont été développées, allant des procédés physiques et chimiques aux méthodes biologiques. Parmi ces techniques, la coagulation-floculation et l'adsorption se distinguent par leur efficacité et leur simplicité de mise en œuvre. Le couplage de ces deux procédés offre une synergie intéressante pour améliorer les rendements d'élimination, notamment pour les effluents fortement colorés et chargés en matières organiques.

Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique environnementale et scientifique. Il vise à étudier l'élimination du colorant SIN 124 (Ponceau 4R) par un procédé combiné de coagulation-floculation et d'adsorption. L'objectif principal est d'optimiser les conditions opératoires de chaque étape afin d'atteindre une efficacité maximale du traitement. Pour ce faire, des matériaux naturels ou modifiés seront étudiés comme coagulants/floculants et adsorbants.

Ce travail s'articulera autour de plusieurs axes : une revue bibliographique sur les colorants et les techniques de traitement, une description des matériaux utilisés, une

Parties

Bibliographique

I.1. Origine de l'eau

Parmi toutes les planètes connues, la nôtre est unique, car c'est la seule à avoir de l'eau qui couvre 70% du globe. Il y a 4,5 milliards d'années, la terre s'est formée et constituait alors une masse plutôt inhospitalière.

Grâce à l'eau, la terre est passée d'un astre hostile à la planète bleue que nous connaissons aujourd'hui, mais qu'elle est la provenance de cette eau sur terre ?

Comment sommes-nous passés d'une planète où la vie était jadis impossible à une terre d'accueil pour toutes formes de vie ? On sait beaucoup de chose sur elle, sauf d'où elle provient réellement. Comprendre l'origine de l'eau est l'une des grandes énigmes de la science. Et c'est une tâche colossale, car il faut remonter à plus de 4 milliards d'années dans l'histoire du système solaire.

Aujourd'hui encore, les scientifiques ne sont pas unanimes quant à l'origine de la présence d'eau sur terre. Cette question fondamentale fut à l'origine de l'élaboration de nombreuses hypothèses quant à son origine. Il y a 4,6 milliards d'années, notre Soleil est une étoile qui vient de naître, entouré d'un immense disque de gaz et de poussières. Pendant des millions d'années, il s'est condensé pour former les planètes. L'une des pistes envisagées est que l'eau aurait été apportée par des comètes venues des confins les plus froids du système solaire et composé essentiellement de glace.

I.2. L'eau dans le monde

L'eau couvre environ 70% de la planète, c'est-à-dire environ 1.4 milliards de km³. C'est pour cela qu'on donne souvent à la terre le nom de planète bleue. Dans toute cette eau, 97.2% est de l'eau salée et seulement 2.8% est de l'eau douce.

Les 2.8 % d'eau douce se répartissent de la façon suivante : 2.15% de glace polaire, 0.63% d'eaux souterraines, 0.02% d'eaux de surface (lacs, fleuves, rivières...) et 0.001% d'eau atmosphérique. [1]

La majorité de l'eau douce est sous forme de glace polaire qui est inutilisable. Il ne reste donc que environ 1/4 de l'eau douce pour que tous les habitants de la planète bleue puissent assouvir leurs besoins, c'est donc très peu. Heureusement, cette eau se renouvelle assez rapidement : cela prend en moyenne 16 jours pour une rivière et 17 ans pour un lac. Cependant, il faut veiller à maintenir cette eau douce propre pour que la pollution ne détruise pas cette très petite partie d'eau utilisable par les hommes.

I.3. Ressources hydriques naturelles

Trois types de sources d'eau sont utilisés par l'homme pour d'une part, satisfaire ses propres besoins en eau de consommation, d'autre part, répondre aux besoins industriels et agricoles. Les sources d'eaux concernent :

- ✓ Les eaux superficielles ou de surface (de rivières, de fleuves et de lacs...);
- ✓ Les eaux souterraines ;
- ✓ Les eaux de dessalement de l'eau de mer.

1.3.1. Eaux superficielles

Ce type des eaux englobe toutes les eaux circulantes ou stockées à la surface des continents (rivières, lacs, étangs, barrages,). La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par ces eaux durant leurs parcours dans l'ensemble des bassins versants. Ces eaux sont le siège, dans la plupart des cas, d'un développement d'une vie microbienne à cause des déchets rejetés dedans et de l'importante surface de contact avec le milieu extérieur. C'est à cause de ça que ces eaux sont rarement potables sans aucun traitement.

1.3.2. Eaux souterraines

Les eaux qui ne sont ni ré-évaporées, ni retournées à la mer par ruissellement s'infiltrent dans le sol et le sous-sol et s'y accumulent pour constituer les eaux souterraines. La pénétration et la rétention des eaux dans le sol dépendent des caractéristiques des terrains en cause et notamment de leur structure qui peut permettre la formation de réservoirs aquifères appelés nappes (zone de terrain poreux et perméable formant roche-magasin limitée à la partie inférieure par une roche imperméable formant le fond du réservoir).

Les eaux souterraines ont des propriétés étroitement liées à leur origine géologique, c'est-à-dire déterminées par la nature et la structure des terrains. A tout instant, l'eau est au contact avec le sol dans lequel elle stagne ou circule : il s'établit un équilibre entre la composition du terrain et celle de l'eau. Ainsi, les eaux circulant dans un sous-sol sablonneux ou granitique, sont acides et peu minéralisées. Par opposition, les eaux circulant dans les sols calcaires auront une forte minéralisation avec une composition bicarbonatée calcique.

Dans la plupart des cas, l'eau souterraine ne contient pas d'oxygène dissous. Des substances indésirables peuvent également s'y trouver, comme le gaz carbonique, le fer, le manganèse, mais si une nappe est polluée, il est difficile de récupérer sa pureté originelle : les

polluants sont en effet non seulement présents dans l'eau, mais également fixés et absorbés sur les roches et les minéraux du sous-sol. [2]

I.3.3. Dessalement de l'eau de mer

L'eau de la mer est une source inépuisable d'eau, les techniques de dessalement sont très coûteuses et nécessitent un know-how adapté à leur exploitation : actuellement elles sont réservées à des utilisations industrielles, mais constitueront cependant la solution d'avenir au vu de l'épuisement des ressources naturelles et du développement des technologies de dessalement des eaux. [3]

I.4. Utilisation de l'eau

L'eau est essentielle à la survie de tout être vivant et elle est une composante importante d'innombrables activités humaines. Elle alimente la flore, la faune, les ruisseaux, les forêts et les terres humides de notre pays. L'eau, par ses propriétés uniques (solvant, ...), se retrouve au cœur de la plupart des activités industrielles et industrielles. On l'utilise à tous les niveaux de la production d'énergie (énergie hydroélectrique, ...), dans l'industrie de transformation (industrie papetière, industrie alimentaire, ...), dans les loisirs (sports nautiques, ...) ainsi que dans toutes les activités de nettoyage.

L'eau est principalement utilisée à des fins :

- ✓ D'eau domestique, d'eau agricole, d'eau industrielle.

I.4.1. L'eau d'irrigation

L'agriculture est, de loin, l'industrie ayant la plus grande consommation d'eau. L'irrigation des régions agricoles représente 70% de l'eau utilisée dans le monde entier. Dans plusieurs pays en voie de développement, l'irrigation représente jusqu'à 95% de toutes les utilisations d'eau, et joue un rôle important dans la production de nourriture et la sécurité alimentaire. Les futures stratégies de développement agricole de la plupart de ces pays dépendent de la possibilité de maintenir, d'améliorer et d'étendre l'agriculture irriguée. [4]

I.4.2. Eau potable

Les eaux de consommation encore appelées eaux potables peuvent se présenter sous deux formes : l'eau du robinet et les eaux minérales. Une eau liquide est dite potable lorsqu'elle présente certaine caractéristique concentration en chlorures, pH, température pour la rendant propre à la consommation humaine. Les standards de référence dans ce domaine diffèrent selon les époques, les pays et, dans certains pays, selon l'autorité

responsable de la définition¹. Le concept de « potabilité » varie à travers le monde, fruit d'un contexte historique, scientifique et culturel local. Il détermine la question de l'accès à l'eau, puisqu'une eau de bonne qualité est essentielle au développement économique et humain. [5]

I.4.3. L'eau pour la production d'énergie

Un côté, la production d'énergie nécessite, à des degrés divers, des quantités parfois significatives d'eau, que ce soit pour la génération d'électricité, pour la croissance de sources d'énergie organiques (bois, agro carburants), pour le nettoyage, pour le refroidissement... C'est vrai, à l'évidence, des barrages hydroélectriques, mais cela l'est aussi des centrales produisant de l'électricité à partir de sources fossiles ou au moyen de la technologie nucléaire. Et c'est également le cas pour certaines énergies renouvelables, et surtout pour des sources d'énergie « vertes » mises en avant comme alternatives potentielles aux hydrocarbures, comme les agros carburants ou la biomasse. De l'autre côté, par voie de conséquence, la production d'énergie dépend de l'eau, et peut se trouver fragilisée dans un contexte de dérèglement climatique qui rend l'eau toujours plus rare dans certaines régions, et toujours plus abondante dans d'autres.

C'est pour souligner cette étroite interdépendance que l'on parle souvent aujourd'hui de « nexus eau-énergie » (*water Energy nexus* en anglais) : toute politique énergétique qui ne prendrait pas en compte adéquatement l'enjeu de l'eau est vouée à l'échec, particulièrement si l'on se porte à l'échelle globale. Et inversement. [6]

I.5. Paramètres de caractérisation des eaux

I.5.1. Paramètre organoleptique

I.5.1.1. Odeur et goût

L'odeur peut être définie comme étant l'ensemble des sensations perçues par l'organe olfactif en flairant certaines substances volatiles. Le goût est défini comme l'ensemble des sensations gustatives, olfactives et de sensibilité chimique commune perçue lorsque l'aliment ou la boisson est dans la bouche ces deux paramètres sont regroupés et font appel aux mêmes types de traitement (adsorption, oxydation, filtration...). La saveur et l'odeur anormales sont causées par la présence dans l'eau des matières organiques dissoutes provenant de la décomposition des matières organiques végétales, de résidus agricoles, de rejets urbains ou industriels et les métabolites de certains microorganismes vivant dans l'eau comme certaines

algues ou champignons microscopiques, et aussi certains sels minéraux donnent des goûts particuliers à l'eau.

1.5.1.2. Couleur

La couleur vraie après filtration est due à la présence de matières organiques dissoutes, de fer ferrique précipité à l'état d'hydroxyde colloïdal, de fer ferreux lié à des complexes organiques et de divers colloïdes. Il n'existe pas de lien entre la couleur et la concentration en matières organiques. Ce paramètre est mesuré par comparaison à une solution de référence (Platine cobalt)

1.5.2. Paramètres physico-chimiques

1.5.2.1. Conductivité

La conductivité électrique d'une eau est liée à la présence des ions en solution et en relation directe avec la salinité de l'eau. La conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm² de surface et distante l'une de l'autre d'1 cm, Elle est l'inverse de la résistivité

1.5.2.2. Température

Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision, en effet celle-ci joue un rôle dans la solubilité des sels et des gaz, dans la dissociation des sels dissous, donc sur la conductivité électrique et dans la détermination du pH. Une température élevée favorise la croissance des microorganismes et peut accentuer le goût, l'odeur, la couleur et aggraver les problèmes de corrosion

1.5.2.3. Potentiel Hydrogène (pH)

Le pH une échelle logarithmique qui varie de 0 à 14, il mesure l'activité des ions H⁺ contenu dans une eau, il traduit l'acidité, l'alcalinité ou la neutralité d'une eau. Le pH est l'un des paramètres important car il joue un rôle primordial dans les processus de traitement tel que : chloration, floculation, l'adoucissement

1.5.2.4. Les chlorures

Les chlorures existent dans les eaux a des concentrations variables il peut avoir plusieurs origines :

- ✓ Percolation à travers des terrains sales.
- ✓ Infiltration d'eau marine dans les nappes phréatiques.

✓ Activité humaine et industrielle

Une présence excessive de chlorure dans l'eau, la rend corrosive pour les réseaux de la distribution et nocives pour les plantes. Une forte fluctuation des chlorures dans le temps peut être considérée comme un indice de pollution.

Les chlorures sont dosés en milieux neutres par une solution titrée de nitrate d'argent, en présence de chromates de potassium [7].

1.5.2.5. Les sulfates

Les sulfates (SO_4^{2-}) peuvent être trouvés dans presque toutes les eaux naturelles. L'origine de la plupart des composés sulfates est l'oxydation des minerais de sulfites, la présence de schistes, ou de déchets industriels. Le sulfate est un des éléments majeurs des composés dissouts dans l'eau de pluie. Des concentrations importantes en sulfate dans l'eau que nous buvons peut avoir un effet laxatif important combiné avec le calcium et le magnésium, les deux composés majeurs de la dureté de l'eau. Le sulfate peut être attaqué par une bactérie qui le réduit en sulfure d'hydrogène (H_2S).

1.5.2.6. Les gaz dissous

L'eau a la capacité de dissoudre certains gaz comme l'oxygène et le gaz carbonique. Une chance, car leur présence dans les milieux aquatiques a permis à la vie de prospérer. Les poissons, comme les humains, respirent et ont donc besoin d'oxygène pour vivre. Le phytoplancton et les algues ont en plus besoin de gaz carbonique pour élaborer leurs tissus végétaux par photosynthèse.

L'oxygène est en outre indispensable à l'épuration des milieux aquatiques. Il permet en effet aux bactéries aérobies présentes dans les écosystèmes aquatiques de dégrader les matières organiques biodégradables. Cette dégradation se fait de manière progressive. Elle conduit d'abord à la formation de composés organiques plus simples dont certains sont parfois difficilement biodégradables. Un tel processus peut donc être long. Mais lorsqu'il est complet, il donne des substances minérales simples : du gaz carbonique, de l'eau et de l'ammoniac soluble dans l'eau. On peut le symboliser de la manière suivante :

détritus organiques + bactéries + oxygène \rightarrow gaz carbonique + eau + ammoniac + énergie

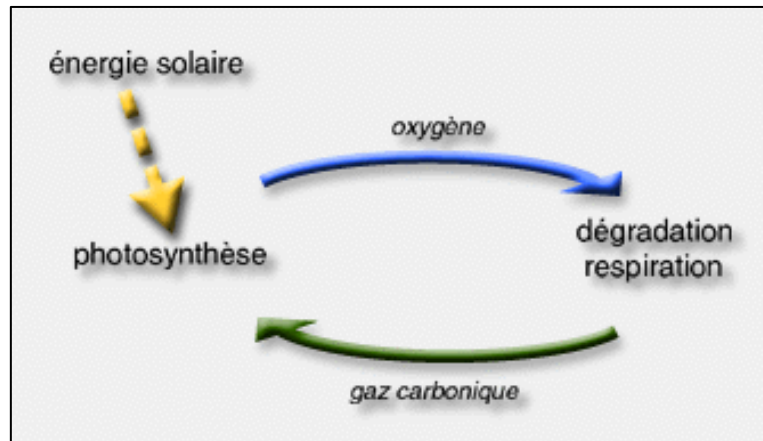


Figure I.1: Le cycle des gaz dissous

1.5.2.7. La dureté de l'eau (TH)

Une eau est dite dure quand elle contient une forte proportion d'ions calcium et magnésium ; cela se traduit par une eau qui mousse difficilement en présence de savon, d'autre façon c'est la teneur de l'eau en sels de chaux et sels de magnésie qui détermine sa dureté ou sa douceur, en langage courant la teneur en calcaire. Pour mesurer la dureté (le titre hydrométrique) on va utiliser le degré de dureté qui correspond à une concentration de carbonate de calcium (CaCO_3) en mg par Litre (mg/l) ou une concentration de chaux (CaCO). 0 pour une eau d'une pureté absolue théorique à 60 pour une eau impropre à l'usage même industriel.

Une eau douce D.H. 5 à moyenne D.H. 15 peut être utilisée pour l'arrosage et le bassinage des plantes. L'eau adoucie par les sels n'est supportée par aucune plante, elle est juste bonne pour le jardin. Si l'on ne possède pas d'eau de pluie en quantité suffisante, l'eau du robinet est en définitive la plus pratique. Mais elle contient du chlore qui est relativement mal supporté par les plantes. On a donc intérêt à récolter l'eau le soir, la laisser reposer toute la nuit, le chlore se sera dégradé pendant ce laps de temps.

La dureté de l'eau se situe idéalement entre 10°F et 20°F. Une valeur trop faible entraîne la corrosion, une valeur trop élevée, ce qui est le plus fréquent, entraîne l'entartrage si le pH est trop élevé. Il faudra alors surveiller attentivement la valeur du pH

1.5.2.8. L'alcalinité

L'alcalinité est une mesure de la capacité de votre eau à résister à des changements du pH, qui tendrait à rendre l'eau plus acide. Le pH est une valeur donnée pour indiquer le degré d'acidité ou de basicité d'une substance. Une alcalinité équilibrée est importante pour notre

eau. Au Canada, le domaine recommandé d'alcalinité est 80-120 ppm ou parties par million. Si les niveaux sont plus élevés ou inférieurs à ceci, il peut y avoir des problèmes de qualité de l'eau. Le niveau d'alcalinité est très souvent examiné avec le niveau de pH afin d'avoir une bonne idée de la qualité de l'eau. On distingue deux titres d'alcalinité :

A) Titre alcalimétrique (TA)

Permet de connaître la teneur en hydroxydes (OH^-), la moitié de la teneur en carbonates (CO_3^{2-}) est un tiers environ des phosphates présents. Ce titre se mesure en degrés français ($^\circ\text{f}$) : 1°f équivaut à 3,4 mg/L d'ion hydroxyde (OH^-) ou à 6 mg/L d'ion carbonate.

B) Titre alcalimétrique complet (TAC)

Correspond à la teneur en ions (OH^-), (CO_3^{2-}), (HCO_3^-). Pour des pH inférieurs à 8,3 la teneur en ions (OH^-), (CO_3^{2-}) est négligeable (TA=0), dans ce cas la mesure du TAC correspond au dosage des bicarbonates seul. Les bicarbonates sont dosés par un acide fort en présence d'un indicateur coloré.

1.5.2.9. Turbidité

Une eau turbide traduit un aspect trouble et qui correspond à la présence de matières en suspension dans l'eau. Les origines sont diverses, pollution de la ressource en eau lors des inondations, ou par corrosion dans les réseaux de conduite des eaux. Les matières en suspension sont d'origines minérales, organiques et microbiologiques. Elles englobent des argiles, des limons, des sables, des microparticules et des microorganismes.

La variation de turbidité doit être prise très au sérieux. Elle indique la présence possible d'éléments pathogènes dans les eaux de surface ou dans le réseau. La turbidité perturbe le fonctionnement des unités de désinfection et le réseau de distribution [8].

1.5.3. Paramètres microbiologiques

Le paramètre microbiologique se rapporte aux paramètres qui ont pour objet la recherche, la détermination, voire le dénombrement d'êtres microscopiques présents dans l'eau. Cette catégorie de paramètre est également étendue par convention à des êtres vivants assimilés aux organismes microscopiques comme les parasites, certaines mousses ou champignons...

Les micro-organismes rencontrés dans l'eau captés dans la nature sont de trois types. [9]

1.5.3.1. Germes typiquement aquatiques

Les germes typiquement aquatiques sont des algues microscopiques et des bactéries, les bactéries appartiennent le plus souvent aux genres *Vibrio*, *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Chromobacterium*, *Coynebacterium* [9].

Ces bactéries ont un métabolisme parfaitement adapté aux conditions de bases températures et aux concentrations en différents éléments minéraux ou organiques [10].

1.5.3.2. Germes telluriques

Ces germes rencontrés dans l'eau sont des bactéries sporulées telles que : *Bacillus*, *Clostridium*, le genre *Streptomyces* et quelque fois des spores fongiques [9]. Elles ont des propriétés d'adaptation ou de résistance qui leur permettent de survivre et même de se développer dans le milieu aquatique [10].

1.5.3.3. Les germes de pollution humaine ou animale

Ce sont des germes souvent pathogènes et essentiellement d'origine intestinale, il s'agit d'entérobactéries (*Escherichia coli*, *Salmonella*, *Shigella*), de streptocoques fécaux, de *clostridium perfringens* et de *vibrio cholerae*. On peut également rencontrer dans l'eau des parasites (Kystes d'amibes) et des virus (Poliomyélite, hépatites virales [9]).

II.1. Historique des colorants

L'homme a mis des couleurs dans sa vie dès les débuts de son aventure : peintures rupestres d'Altamira et de Lascaux, céramiques mésopotamiennes, vêtements des tombes égyptiennes, décors corporels des populations primitives, etc. Il a d'abord utilisé les pigments des « terres colorées », puis ceux des fibres végétales et animales. Nous vivons dans un monde où tout est coloré, nos vêtements, nos aliments nos produits cosmétiques, pharmaceutiques, etc., cela grâce aux colorants. Ces derniers sont de plus en plus synthétiques, en raison de la facilité et de la rapidité leur synthèse et production, ainsi que la diversité de leurs couleurs si on les compare aux colorants naturels [11].

L'industrie des colorants constitue aujourd'hui un domaine capital de la chimie. Les colorants sont employés pour l'impression et la teinture des fibres textiles, des papiers, des cuirs, des fourrures, des bois, des matières plastiques et des élastomères [11]. Ils servent aussi à préparer des peintures, des encres d'imprimerie, des vernis et, comme additifs, à colorer des produits alimentaires et pharmaceutiques. Ils sont utilisés dans l'industrie des cosmétiques, la coloration des métaux, la photographie, le domaine de la biologie [11]. On distingue deux grandes familles de colorants : les colorants naturels (extraits de matières minérales ou organiques) et ceux issus de la synthèse chimique [11].

II.2. Définition des colorants

Les colorants sont définis comme étant des produits capables de teindre une substance d'une manière durable. Ils consistent en un assemblage de groupements chromophores (groupes aromatiques conjugués, comportant des doublets non liants ou des complexes de métaux de transition), auxochromes et des structures aromatiques conjuguées. Ces groupements se caractérisent par leur capacité à absorber certains rayonnements lumineux dans le spectre visible (de 380 à 780 nm).

II.3. Classification des colorants [12]

Les colorants sont classés en fonction de leurs origines.

II.3.1. Origine naturelle

Végétale : indigo, garance, safran, orseille, cachou, curcuma, pastel, noix de galle, gaude,

Animale : cochenille, kernès, pourpre, ...

Minérale : oxyde de fer, bleu de Prusse, graphite, ... [12]

II.3.2. Origine synthétique

La classification chimique des colorants se base sur la structure de leurs molécules et en particulier sur la nature des groupes actifs qu'elles comportent. Le composé coloré doit en outre pouvoir se fixer sur la fibre et, une fois fixé, y rester en résistant au lavage. Ce sont alors les propriétés tinctoriales des différents textiles qui conduisent à choisir telle ou telle classe de colorants. Ainsi, on distingue trois types de colorants [12].

II.3.2.1. Les colorants solubles dans l'eau

A) Les colorants acides

Les colorants acides ou anioniques : Très solubles dans l'eau grâce à leurs groupes sulfonate ou carboxylate, ils sont ainsi dénommés parce qu'ils permettent de teindre les fibres animales (laine et soie) et quelques fibres acryliques modifiées (nylon, polyamide) en bain légèrement acide. L'affinité colorant - fibre est le résultat de liaisons ioniques entre la partie acide sulfonique du colorant et les groupes amino des fibres textiles [11].

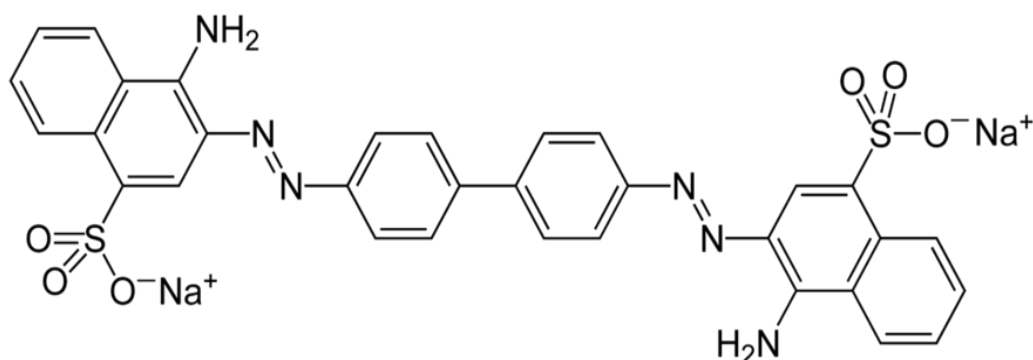


Figure II.2 : Structure de rouge Congo [11]

B) Les colorants directs ou substantifs

Les colorants directs ou substantifs : Ce sont des colorants acides comme ceux du groupe précédent, contrairement à ces derniers, ils n'adhèrent pas chimiquement mais physiquement à la fibre. Ainsi, ils peuvent teindre directement le coton, le lin, la viscose, la laine et la soie. Cette possibilité de teindre simultanément les fibres végétales et animales est précieuse car elle permet de les utiliser sur les tissus mixtes. Malheureusement, ces colorants ne sont pas toujours très solidement fixés sur le coton, pour résoudre ce problème, un traitement de solidification est nécessaire. Comme exemples, on peut citer le rouge Janus et l'orangé II dont les structures sont les suivantes [13]

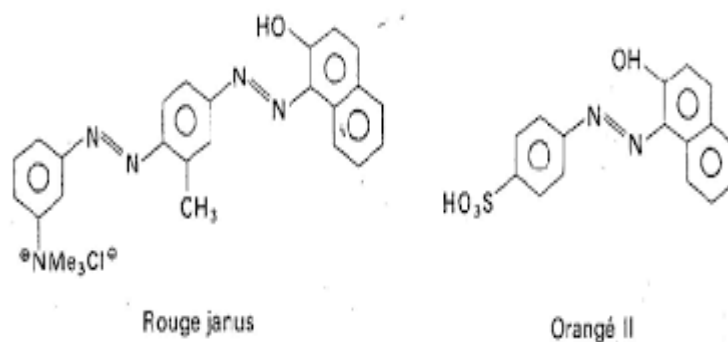


Figure II.3: La structure de rouge Janus et l'orangé II [13]

C) Les colorants mordancibles

On aide souvent la fixation du colorant en le complexant avec un cation comme Al^{3+} , Cr^{3+} , qui sert de liant avec la fibre. Les hydroxydes métalliques correspondant sont appelés Mordants, d'où le nom de colorants mordancibles. On cherche à former des chélates. A titre D'exemple, on peut citer le cas de l'alizarine dont la structure est la suivante :

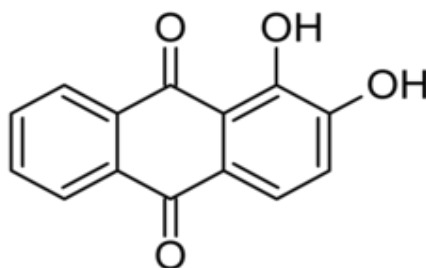


Figure II.4 : La structure d'Alizarine [14]

Les colorants « au chrome » constituent une famille particulière des colorants mordancibles, ce type de colorants présente la propriété particulière de se combiner avec le chrome pour former des laques insolubles. Du fait que certaines fibres : laine, soie, ont la propriété de retenir énergétiquement le chrome, on obtient par ce moyen des teintures très solides. La fixation initiale de chrome se nomme « mordantage » [14].

D) Les colorants basiques

Les colorants basiques ou cationiques : classe des colorants porteurs d'ions positifs et reconnus pour leurs nuances brillantes. Les colorants basiques se composent de grosses molécules et ce sont des sels solubles dans l'eau. Ils ont une affinité directe pour la laine et la soie et peuvent être utilisés sur le coton. La solidité des colorants basiques sources fibres est très faible. Ces colorants ont bénéficié d'un regain d'intérêt avec l'apparition des fibres acryliques, sur lesquelles ils permettent des nuances très vives et résistantes [15].

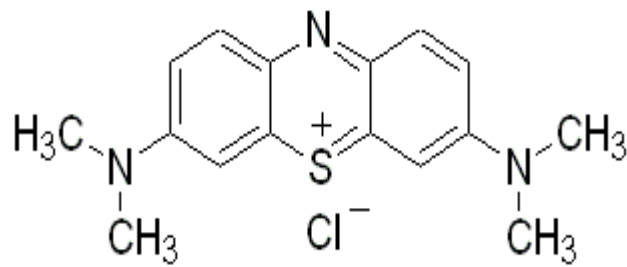


Figure II.5 : Bleu de méthylène [15]

E) Les colorants métallifères

Les colorants métallifères sont des complexes forts contenant un atome métallique (Cr, Ni, Co). L'atome métallique peut être associé :

- à une molécule de colorant (complexe métallifère 1/1) tel que le bleu acide 158.
 - ou à deux molécules de colorant (complexe métallifère 1/2) tel que le noir acide 60.
- Les colorants métallifères sont généralement des colorants azoïques mais aussi des phtalocyanines. Ces colorants permettent de teindre la laine, la soie, le polyamide en nuances très solides [14].

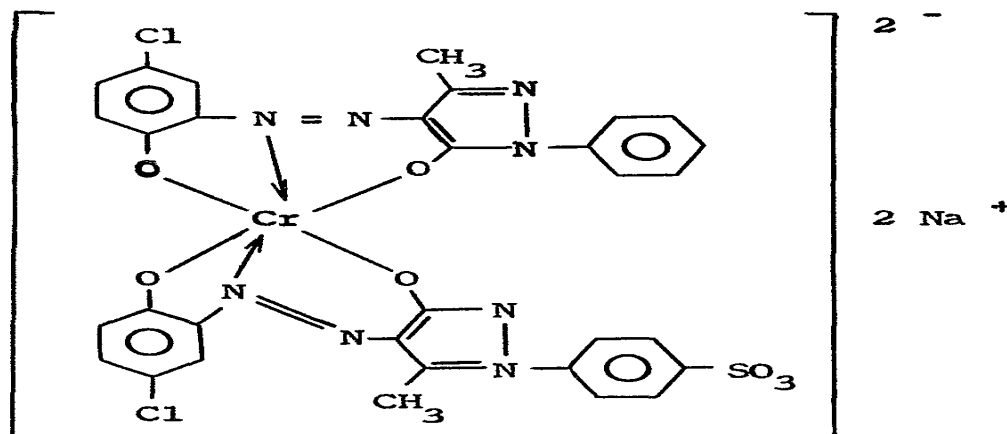


Figure II.6 : La structure de gris Irgalane BL

II.3.2.2. Les colorants insolubles dans l'eau

Dans le but d'effectuer la teinture sur les fibres d'acétates de cellulose, il a donc des colorants solubles dans des milieux autres que l'eau, car la molécule d'acétate est assez hydrophobe. [14]

A) Les colorants de cuve

Les colorants de cuve sont des colorants insolubles dans l'eau, appliqués sur la fibre après transformation par réduction alcaline en leuco dérivés. La teinture se termine par la réoxydation in situ du colorant sous sa forme insoluble initiale. Réputés pour leur bonne

résistance aux agents de dégradation (lavage, rayons solaires), les colorants de cuve sont largement utilisés sur le coton, le lin, la rayonne et autres fibres cellulosiques, à l'image de l'indigo pour la teinture des articles jean ou denim. [15]

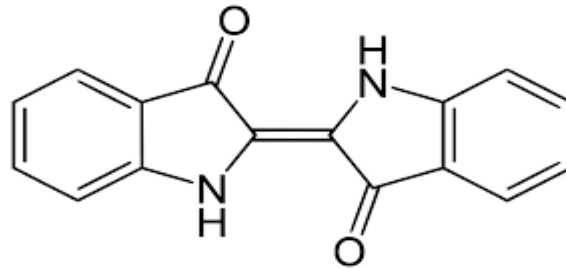


Figure II.7 : La structure d'Indigo

B) Les colorants azoïques

Les colorants développés ou azoïques insolubles, appelés aussi colorants au naphthol, sont formés directement sur la fibre. Au cours d'une première étape, le support textile est imprégné d'une solution de naphthol ou copulant. Les précurseurs de la molécule suffisamment petite pour diffuser dans les pores et les fibres sont ensuite traités avec une solution de sel dediazonium qui, par réaction de copulation, entraîne le développement immédiat du colorant azoïque. Puisque le composé phénolique est dissous dans une solution basique, ces colorants ne sont utilisés que sur les fibres cellulosiques bien que d'autres fibres soient susceptibles d'être teintées en modifiant le procédé [15].

C) Les colorants formés par oxydation

Certains corps tels que l'aniline, peuvent être absorbés directement ou après mordantage des fibres végétales ou animales, et donner après oxydation (traitement à l'eau oxygénée par exemple) des produits qu'ioniques colorés. Le plu d'aniline » [12].

D) Les colorants dispersés

Colorants à complexe métallifère type 1/2 deuxième génération des colorants acides traités avec des métaux de mordantage tels que le chrome. Ce type de colorant teint les fibres beaucoup plus solidement que les colorants acides courants. Ils sont appliqués en milieu légèrement acide, soit en pH 4,5 à 5. [12]

E) Les colorants réactifs

C'est la plus récente classe de colorants. Elle résulte de la découverte de produits intermédiaires obtenus au cours de la synthèse de certains colorants, susceptibles de former des combinaisons stables avec la cellulose et pouvant être utilisés comme matières colorantes.

C'est le fait de réagir avec la matière constituée de la fibre qui les a fait nommer « colorants réactifs » [13].

II.3.2.3. Les colorants pigmentaires

Ce sont des composés insolubles dans tous les solvants usuels. A la différence des produits précédents, ils ne sont plus absorbés sur les fibres, mais en quelques sortes appliqués sur leur surface. La liaison pigment exemple : une résine synthétique. Ces pigments peuvent également être dimasse. La coloration qui est en somme intégrée dans la fibre.[13]

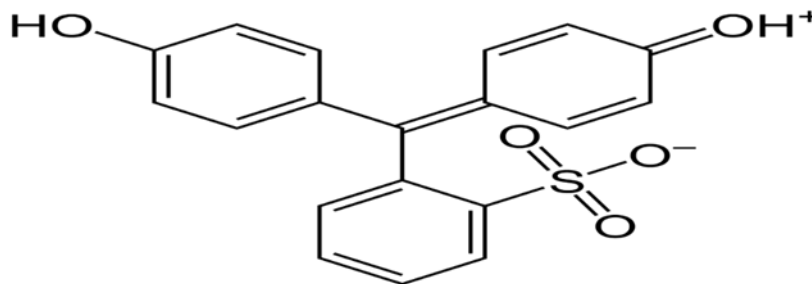


Figure II.8 : structure du rouge de phénol.

II.4 Domaine d'application des Colorants

Les colorants présentent de nombreuses applications dans différents domaines, dont voici quelques-unes essentielles Teinture et impression sur fibre et tissus de tous genres [16].

- Dans l'industrie de matières plastiques (pigments).
- Dans l'industrie du bâtiment : peintures (pigments).
- Dans l'industrie pharmaceutique (colorants).
- Dans l'industrie des cosmétiques.
- Dans l'industrie agroalimentaire (colorants alimentaires).
- Dans diverses industries utilisées pour des carburants et des huiles.
- Dans l'imprimerie (encre, papier).

II.5. Source de colorant SIN 124

Le Ponceau 4R est un additif alimentaire portant le code E124. Il est utilisé comme colorant alimentaire. Ce colorant est fabriqué de façon artificielle avec des substances d'origines pétrochimiques. Il est de couleur rouge très brillant. Il fait partie de la famille des colorants dits azoïques comme la tartrazine (E102) ou le jaune orangé S (E110).[17]

II.5.1. Réglementation

Ce colorant alimentaire est considéré comme cancérigène et est interdit aux États-Unis (depuis 1977), en Norvège et en Suède.

Le parlement européen a décidé que tout aliment contenant du E124 doit comporter la mention particulière "Peut avoir des effets indésirables sur l'activité et l'attention chez les enfants" [17]

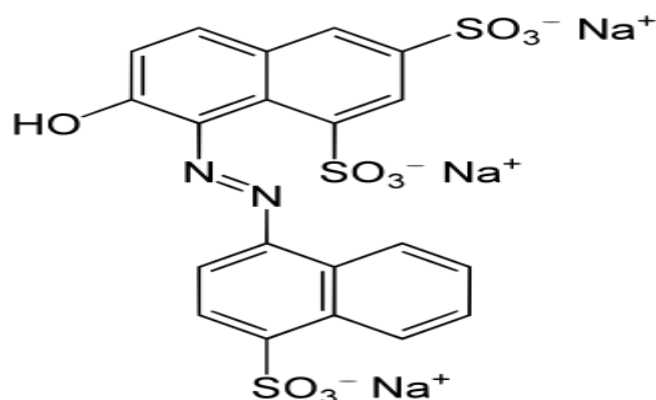


Figure II.9 Structure du Ponceau 4R [18]

II.5.2. Impacts du colorant SIN 124 (Ponceau 4R) sur l'environnement et la santé

Le colorant SIN 124, également connu sous le nom de Ponceau 4R, est un colorant azoïque rouge largement utilisé dans les industries alimentaires, pharmaceutiques et cosmétiques. Cependant, son usage est controversé en raison de ses effets potentiels sur la santé et l'environnement [17].

II.5.2.1 Impact environnemental

Le Ponceau 4R est faiblement biodégradable et peut persister dans les milieux aquatiques, affectant négativement la faune et la flore. Des études ont montré qu'il peut réduire l'oxygène dissous dans l'eau, inhiber la photosynthèse des plantes aquatiques et affecter la reproduction des espèces aquatiques. Il est également résistant aux procédés d'oxydation traditionnels, ce qui complique son élimination [17].

II.5.2.2. Effets sur la santé humaine

Des recherches ont associé l'ingestion répétée de Ponceau 4R à divers effets néfastes sur la santé. Chez les enfants, ce colorant peut provoquer de l'hyperactivité, des troubles de l'attention et des réactions allergiques, notamment des éruptions cutanées et de l'asthme. Il est également suspecté d'être cancérigène en raison de sa structure azoïque qui peut être métabolisée en amines aromatiques dans l'organisme [17]

L'Autorité Européenne de Sécurité des Aliments (EFSA) a fixé une dose journalière admissible (DJA) de 0,7 mg/kg de poids corporel, mais son utilisation est interdite dans certains pays non-européens à cause de ses risques potentiels. Compte tenu de ces dangers, il est crucial de mettre en œuvre des procédés efficaces pour éliminer le SIN 124 des eaux usées industrielles, notamment via des procédés de coagulation-floculation couplés à l'adsorption. [17]

II.6. CONCLUSION

Les colorants de synthèse sont de plus en plus utilisés dans les industries en raison de leur facilité de synthèse, de leur rapidité de production et de leur variété de couleurs si on les compare aux colorants naturels. La diversité structurale des colorants synthétiques est due à la fois à la diversité des groupements chromosphériques qui les composent (groupements azoïque, anthraquinone, triarylmethane et phtalocyanine) et à la diversité des technologies d'application (coloration réactive, directe, dispersée ou de cuve). Le secteur des colorants constitue une véritable industrie qui est impliquée dans un grand éventail de domaines : industrie textile, imprimerie, industrie pharmaceutique, cosmétique et agro-alimentaire. [18]

L'industrie des colorants constitue aujourd'hui un secteur important de la chimie :

La production mondiale est estimée à plus de 800 000 tonnes par an dont 140 000 sont perdues dans les effluents au cours des différentes étapes d'application et de confection. [18]

III.1 Introduction

Les colorants synthétiques sont largement utilisés dans de nombreuses industries, notamment les secteurs textile, alimentaire, pharmaceutique, cosmétique et papetier. On estime que plus de 10 000 types de colorants sont disponibles sur le marché, et environ 700 000 tonnes sont produites chaque année dans le monde [19]. Une proportion importante de ces substances est rejetée dans les eaux usées, en raison des pertes inévitables lors des procédés industriels, en particulier dans le secteur textile, où jusqu'à 20 % des colorants utilisés peuvent être évacués dans les effluents [20].

Ces rejets représentent une menace sérieuse pour l'environnement aquatique et la santé humaine. Les colorants sont souvent stables, résistants à la lumière, à la chaleur, aux agents oxydants et aux microorganismes, ce qui rend leur dégradation naturelle difficile [21]. De plus, certains colorants et leurs produits de dégradation peuvent être toxiques, mutagènes ou cancérigènes [22]. Leur présence dans les milieux aquatiques nuit également à la pénétration de la lumière, perturbant ainsi la photosynthèse et les chaînes trophiques [23].

Face à ces enjeux, la mise en place de traitements efficaces pour éliminer ou réduire les colorants dans les eaux usées est devenue une priorité environnementale. Bien que les procédés biologiques conventionnels soient adaptés à la dégradation de nombreuses substances organiques, ils se révèlent souvent inefficaces pour les colorants récalcitrants [24]. C'est pourquoi des procédés physico-chimiques comme la coagulation-floculation et l'adsorption ont été développés et sont de plus en plus étudiés.

La coagulation-floculation est un procédé couramment utilisé dans le traitement de l'eau, qui consiste à ajouter des coagulants pour neutraliser les charges des particules colloïdales, facilitant ainsi leur agrégation et leur élimination [25]. L'adsorption, quant à elle, repose sur la fixation des molécules de colorant à la surface d'un matériau solide, généralement un adsorbant à grande surface spécifique, tel que le charbon actif ou des biomatériaux modifiés [26].

Ces deux techniques présentent des avantages complémentaires, et leur couplage apparaît comme une stratégie prometteuse pour améliorer l'efficacité globale du traitement tout en réduisant les coûts et la consommation de réactifs. Cette étude s'inscrit dans cette perspective et se propose d'analyser les performances de l'association coagulation-floculation – adsorption dans l'élimination du colorant Ponceau 4R (SIN 124), un colorant azoïque largement utilisé mais présentant une toxicité potentielle.

III.2. Prétraitements

Les prétraitements permettent de débarrasser les fractions grossières contenues dans les eaux usées, afin de ne pas perturber le traitement et d'éviter le colmatage des installations.

Le prétraitement ne concerne que les effluents hétérogènes comprenant des composés solides (particules solides, colloïdales ou dispersées) ou des liquides non miscibles. Les méthodes utilisées sont mécaniques, physiques ou chimiques. Ils font appel :

- à des procédés mécaniques, comme des grilles ou des tamis, pour éliminer des grosses Particules transportées par les eaux ;
- à des procédés physiques, comme des phénomènes de décantation pour éliminer les sables, ou de flottation pour éliminer les graisses (matières grasses)

III.2.1 Dégrillage et tamisage

Le dégrillage est réalisé par le passage des eaux usées à travers les grilles pour retenir les polluants les plus grossiers, dont l'espacement est déterminé en fonction de la nature de l'effluent). On distingue l'écartement des barreaux comme suit :

- Le dégrillage fin pour un écartement de 3 à 10 mm,
- Le dégrillage moyen pour un écartement de 10 à 25 mm,
- Le pré-dégrillage pour un écartement de 50 à 100 mm).

La grille doit être calculée de telle façon que la vitesse de passage de l'eau soit suffisante pour appliquer les matières sur les barreaux, sans pour autant créer une perte de charge importante.

La quantité de déchets retenus sur une grille dépend largement de l'espacement entre barreaux. On peut en première approximation estimer à 5 à 10 dm³ de déchets/habitant et par an pour un espacement entre barreaux allant de 15 à 25 mm. Le tamisage c'est un grillage posse consiste à filtrer les eaux brutes sur toile Laurent, il existe un macro-tamisage (mailles supérieures à 0.3 mm) et un micro-tamisage (mailles inférieures à 100 μ). Le macro-tamisage destiné à retenir les matières en suspension, les débris végétaux, les herbes, les insectes etc. [27].

III.2.2 Le dessablage

Est une étape du prétraitement qui vise à éliminer les matières minérales lourdes telles que le sable, les graviers, les coquillages ou les fragments de verre présents dans l'eau brute. Ces particules, souvent denses et abrasives, peuvent endommager les équipements

mécaniques, provoquer l'encrassement des canalisations ou altérer les performances des procédés biologiques en aval.

Le dessablage repose sur la différence de vitesse de décantation entre les particules minérales et les matières organiques plus légères. Il se réalise dans des canaux à écoulement lent ou des dessableurs à circulation forcée, où le sable se dépose au fond tandis que l'eau continue son écoulement [27].

III.2.3. Déshuilage – Dégraissage

Le déshuilage-dégraissage est une étape du prétraitement des eaux usées qui permet d'éliminer les substances flottantes peu denses, principalement les huiles, graisses et mousses. Ces matières proviennent généralement des effluents domestiques (cuisine, lavage), industriels (agroalimentaire, mécanique) ou des eaux de ruissellement. Ce traitement repose sur la flottabilité naturelle des graisses et huiles, qui ont une densité inférieure à celle de l'eau. Les particules montent à la surface dans des bassins calmes appelés dégraisseurs ou déshuileurs, où elles sont ensuite raclées mécaniquement ou aspirées [27].

III.3 Traitement biologique

L'épuration biologique a également pour objectif de dégrader les polluants organiques dissous contenue dans les eaux usées. Grâce à l'action des micro-organismes capables de les consommer. Le traitement par voie biologique dont la pollution organique dissoute constitue le mode de traitement secondaire des effluents urbains et de certaines eaux usées industrielles le plus couramment utilisé en raison de son efficacité et de sa relative universalité. Ce processus existe spontanément dans les milieux naturels tels que les eaux superficielles suffisamment aérées.

Une multitude d'organismes est associée à cette dégradation selon différents cycles de transformation, parmi ces organismes, on cite les bactéries, les protozoaires. Des algues, des champignons, les bactéries hétérotrophes contaminant banalement les eaux usées. Leur développement sous forme de culture libre ou fixée va permettre l'oxydation biologique des matières organiques qui constituent la pollution soluble. Trois types de système d'épuration peuvent être décrits : les étangs d'oxydation ou de stabilisation (ou lagunes d'eaux douces), les systèmes à biomasse fixée (lits bactériens, bio-disques, lits fluidisés), les systèmes à biomasse floculée (boues activées). Ils sont généralement choisis en fonction des caractéristiques et du volume des effluents à traiter et en accord avec les normes de rejet à atteindre. L'élimination de l'azote se réalise en deux étapes :

- En présence d'air, des bactéries transforment l'azote ammoniacal en nitrates ;
- En absence d'air, d'autres bactéries transforment les nitrates en azote gazeux.

La voie biologique constitue, en raison de son efficacité et de sa rusticité, le mode le plus utilisé d'épuration secondaire des eaux résiduaires urbaines et de certaines eaux industrielles [27].

III.4 Les procédés d'oxydation avancée

Des méthodes chimiques, et plus récemment électrochimiques, ont été proposées pour, soit transformer les polluants organiques en composés moins toxiques qui pourront par la suite subir un traitement biologique, soit minéraliser totalement ces polluants. Il s'agit, la plupart du temps, des procédés d'oxydation avancée (AOPs pour Advanced Oxidation Process).

La particularité de ces procédés tient à la génération dans le milieu aqueux d'entités très réactives et très oxydantes, les radicaux hydroxyles OH^\cdot . En effet, le radical OH^\cdot ($E^\circ = 2,8$ V/ESH à 25°C) est un oxydant plus puissant que le peroxyde d'hydrogène H_2O_2 ($E^\circ = 1,77$ V/ESH à 25 °C) ou l'ozone O_3 ($E^\circ = 2,07$ V/ESH à 25 °C). Le tableau I-5 résume les potentiels d'oxydation des oxydants couramment utilisés en milieu aqueux. Ces valeurs montrent que le radical hydroxyle est l'espèce chimique ayant le pouvoir d'oxydation le plus élevé des oxydants chimiques utilisés en milieu aqueux. Il est d'ailleurs l'espèce chimique la plus oxydante, après le fluor ($E^\circ = 3,03$ V/ESH à 25 °C) [28].

III.5 Traitements physico-chimiques

Le traitement physico-chimique est le traitement mieux adapté à la variation saisonnière de la charge polluante ou à l'existence de matières toxiques. En général, c'est une séparation physique, liquide-solide dont l'objectif est de retenir le maximum de matières en suspension présentes dans les eaux usées.

L'élimination complémentaire de la pollution particulière, colloïdale ou finement dispersée, peut être obtenue moyennant l'utilisation de réactifs chimiques lors d'un traitement par voie physico-chimique qui implique la mise en œuvre d'une coagulation-floculation en amont d'une séparation solide-liquide par décantation ou flottation.

Certains types de stations ne comportent pas de traitement primaire, le traitement peut porter sur un ou plusieurs procédés associés. Parmi ces procédés on peut citer : La coagulation-floculation la décantation la flottation la filtration, l'adsorption, la centrifugation, l'électrocoagulation, les procédés d'oxydation avancés [29].

III.5.1 Procédés membranaires

Les procédés membranaires sont des techniques de séparation par perméation à travers une membrane, sous l'action d'un gradient de pression. La séparation se fait en fonction des tailles moléculaires des composés, mais aussi de leur forme, leur structure, leur polarisabilité, leur solubilité, de la présence de Co-solubilité de matériau et de la configuration de la membrane, des paramètres opératoires, etc.

Les techniques membranaires regroupent la microfiltration (MF), l'ultrafiltration (UF), la nanofiltration (NF), et l'osmose inverse (OI). Leurs actions se différencient par la taille des pores de la membrane qui est de l'ordre de 0.1 à 10 micromètres pour la microfiltration, 10 nanomètres à 1 micromètre pour l'ultrafiltration, quelques nanomètres pour la nanofiltration et une structure dense. Ces techniques de filtration sont utilisées pour récupérer et réutiliser une eau [29].

III.5.2 Echange d'ions

L'échange d'ions est le procédé au moyen duquel les ions d'une certaine charge (positive ou négative) contenue dans une solution sont éliminés et remplacés par une quantité équivalente d'autres ions de même charge émis par un solide (l'échangeur d'ions). Ainsi, les métaux précieux ou nobles, tel que l'argent ou le cuivre et les substances nocives, comme le cyanure, peuvent être récupérés et remplacés par d'autres ions sans valeur ou moins nocif [29].

III.5.3 Coagulation-floculation

La coagulation et la floculation sont largement appliquées dans le prétraitement de clarification des eaux (potable ou usées). Le dispositif global de la coagulation floculation consiste dans un premier temps, en l'ajout d'un sel appelé « coagulant » celui-ci déstabilise les colloïdes qui peuvent se regrouper sous forme de floc. Ensuite les floes formés décantent, permettant la séparation des agrégats. Les propriétés des particules en suspension, (colloïdes), ainsi que les conditions physicochimiques du procédé influencent son efficacité [27].

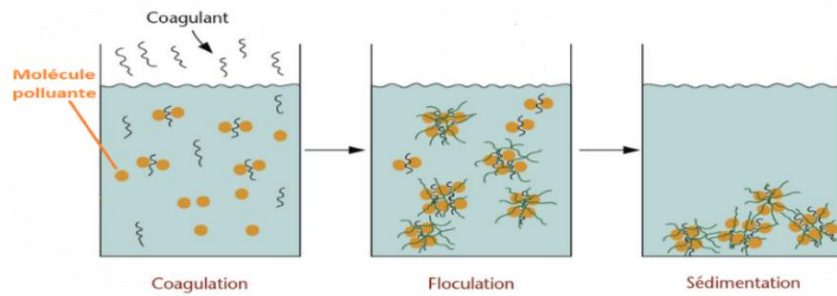


Figure III.1 technique de sédimentation combinant la coagulation et la floculation

III.5.3.1 Coagulation de la couleur

Les particules responsables de la couleur sont de natures organiques, hydrophiles, petites et chargées négativement. Les mécanismes qui permettent l'élimination de la couleur ne sont pas les mêmes que ceux utilisés pour celle de la turbidité.

La quantité de coagulant requise est fonction de la couleur initiale : pour un pH optimal, la couleur résiduelle décroît proportionnellement avec l'augmentation de la quantité de coagulant utilisée. Le pH optimal pour l'élimination de la couleur varie entre 4 et 6, alors que le pH optimal pour celle de la turbidité varie entre 6,5 et 7,5. Le pH optimal pour l'élimination de la couleur étant faible, on doit dans certains cas le relever avant la filtration, afin de faire précipiter les composés de fer et d'aluminium, qui sont solubles à des pH faibles [27].

III.5.3.2 Déstabilisation des colloïdes

Pour déstabiliser les particules colloïdales, on peut en outre les emprisonner dans une particule de floc, lorsqu'on ajoute en quantité suffisante des coagulants, habituellement des sels de métaux trivalents, $Al_2(SO_4)_3$ ou $FeCl_3$.

Les interactions de quelques espèces coagulantes avec une particule colloïdale sont purement électrostatiques. De ce fait, la déstabilisation par les contre-dons est accomplie par compression de la double couche diffuse entourant la particule [27].

III.5.3.3 Le processus de coagulation

Lors du processus complexe de coagulation, il s'agit de déstabiliser les particules colloïdales et à provoquer leur agglutination pour en faire des flocons qui se prêtent à la sédimentation.

Pour vaincre l'énergie d'interaction entre les particules colloïdales, il existe deux possibilités :

La diminution du potentiel zêta, en ajoutant des réactifs minéraux contenant des cations multivalents qui seront adsorbés au niveau de la surface colloïdale. Il va y avoir donc une neutralisation de charge électrique, appelée généralement coagulation ; l'utilisation, comme réactif de floculation, des polymères organiques qui permettent de rassembler les colloïdes non seulement par réduction de charge électrique, mais également par des effets de pontage entre colloïdes.

Ces réactifs macromoléculaires agissent à la manière d'un filet dans lequel sont emprisonnées les particules. C'est, en général, à cette forme de déstabilisation qu'on réserve le terme floculation, le terme coagulation étant employé essentiellement pour caractériser une déstabilisation des particules colloïdales par réduction de charge [30].

III.5.3.4 Facteurs influençant la coagulation-floculation

A) Influence du pH

Le pH a une influence primordiale sur la coagulation. Il est d'ailleurs important de remarquer que l'ajout d'un coagulant modifie souvent le pH de l'eau. Cette variation est à prendre en compte afin de ne pas sortir de la plage optimale de précipitation du coagulant. La plage du pH optimal est la plage à l'intérieur de laquelle la coagulation a lieu suffisamment rapidement. En effet, une coagulation réalisée à un pH non optimal peut entraîner une augmentation significative du temps de coagulation. En général, le temps de coagulation est compris entre 15 secondes et 3 minutes. Le pH a également une influence sur l'élimination des matières organiques [31].

B) Influence de la dose de coagulant

La dose de réactif est un paramètre à prendre en compte. Le coagulant qui est habituellement fortement acide a tendance à abaisser le pH de l'eau. Pour se placer au pH optimal, il est possible d'ajouter un acide ou une base. Une dose de coagulant excessive entraîne une restalinisation des particules et une augmentation du coût d'exploitation, tandis qu'un dosage insuffisant conduit à une qualité de l'eau traitée insuffisante. La quantité de réactifs ne peut se déterminer facilement. Pratiquement, la dose optimale de coagulant peut être déterminée soit par l'emploi de la mesure du potentiel zêta (nécessite un matériel très coûteux), soit par un test au laboratoire, connu sous le nom de "Jar-Test" [31].

C) Influence de la turbidité

La turbidité est, elle aussi, un paramètre influant sur le bon fonctionnement du procédé de coagulation. Dans une certaine plage de turbidité, l'augmentation de la concentration en

particules doit être suivie d'une augmentation de la dose de coagulant. La turbidité des eaux de surface est en grand partie due à la présence de particules de glaise dont le diamètre varie de 0.2 à 5.0 μm . Il s'agit donc de grosses particules colloïdales qui peuvent se déposer [31].

Tableau III.1 : Dérivés des coagulant utilisée (sels d'aluminium et de fer)

Sels d'aluminium	Formule chimique	Sels de fer	Formule chimique
Sulfate d'aluminium	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	Chlorure ferrique	FeCl_3
Chlorure d'aluminium	AlCl_3	Sulfate ferrique	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$
Aluminate de sodium	NaAlO_2	Sulfate ferreux	FeSO_4

III.6 Définition du procédé d'adsorption

L'adsorption est le procédé le plus utilisé dans le traitement de l'eau. C'est un phénomène physico-chimique qui définit la propriété d'un matériau particulier (adsorbant) à fixer des ions ou des molécules (gaz, métaux, molécules organiques, etc.) à sa surface (adsorbat) de manière plus ou moins réversible. Au cours de ce processus, des substances issues de la phase aqueuse ou gazeuse migrent vers la surface solide. La technique repose à la fois sur ces propriétés d'interface et d'adsorbat. En général, l'adsorption est un phénomène exothermique qui accompagne le dégagement de chaleur et peut conduire à un échauffement des solides [31].

Le phénomène inverse, dans lequel des molécules adsorbées sur une surface se séparent de la surface, notamment sous l'effet d'une augmentation de température ou d'une diminution de pression, est appelé désorption [16]. Ce phénomène peut être illustré à l'aide du schéma de la figure III.2.

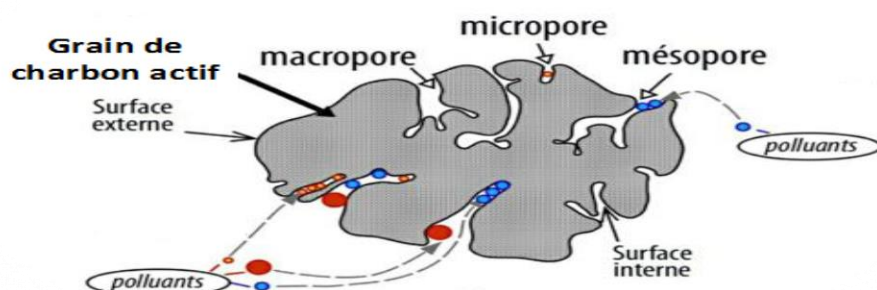


Figure III.2: Quelques termes de base utilisés dans la technologie de l'adsorption

III.6.1 Différents types d'adsorption

III.6.1.1 Physisorption

La physisorption ou adsorption physique est un processus caractérisé par des énergies relativement peu importantes (force de Van Der Waals) entre la matrice solide et le substrat. C'est aussi un processus réversible qui ne s'accompagne d'aucune modification de la molécule adsorbée (son identité est conservée), qui se produit aux basses températures et pour des énergies de l'ordre de 10 Kcal/mole tout au plus. Cependant MATSON et MARK préfèrent utiliser le terme d'adsorption non spécifique qui est due aux forces de Van Der Waals (attraction) Elle intervient essentiellement entre la surface carbonée du support et le soluté [16].

III.6.1.2 L'adsorption chimique (ou chimisorption)

La chimisorption est un phénomène d'adsorption qui met en jeu une ou plusieurs liaisons chimiques covalentes ou ioniques entre l'adsorbat et l'adsorbant. La chimisorption est généralement irréversible, produisant une modification des molécules adsorbées. Ces dernières ne peuvent pas être accumulées sur plus d'une monocouche. Par ce type d'adsorption, les molécules directement liées au solide. La chaleur d'adsorption, relativement élevée est comprise entre 20 et 200 Kcal/mol [12].

III.6.2 mécanisme d'adsorption d'un colorant

L'adsorption est un processus, largement répandu pour l'élimination d'un colorant a également une applicabilité large dans le traitement des eaux résiduaires.

La séparation par adsorption est basée sur une adsorption sélective (thermodynamique et /ou cinétique) des polluants (appelés adsorbat) par un adsorbant, grâce à des interactions spécifiques entre la surface du matériau et les produits adsorbés : c'est un simple transfert de masse à partir de la phase liquide vers la surface du solide, ce processus s'opère en plusieurs étapes.[32]

- ✓ **Diffusion externe** : correspond au transfert du soluté (un colorant) du sein de la solution à la surface externe des grains. Le transfert de la matière externe dépend des conditions hydrodynamiques de l'écoulement d'un fluide dans un lit adsorbant.
- ✓ **Diffusion interne** : les particules de fluide pénètrent à l'intérieur des pores. Elle dépend de la concentration du soluté. Diffusion de la surface au contact des sites actifs, elle correspond à la fixation des molécules sur la surface des pores .

- ✓ **La diffusion de l'adsorbat** à l'intérieur de la particule de l'adsorbant sous l'effet du gradient de concentration. La molécule adsorbat peut diffuser d'un site d'adsorption à un autre soit à l'état libre (après désorption) dans la phase liquide intra particulaire (migration caractérisée par un coefficient de diffusion D_f), soit à l'état adsorbé, d'un site d'adsorption vers un site adjacent (migration de surface caractérisée par un coefficient de diffusion D_S) [12].
- ✓ **Diffusion de surface** : elle correspond à la fixation des molécules sur la surface des pores. Cette diffusion de surface englobe deux phénomènes, l'adsorption et la réaction chimique.

III.6.3 Facteurs influençant l'adsorption [33]

Dans le cas de l'adsorption en phase liquide, un grand nombre de facteurs est susceptible d'avoir une influence sur le processus d'adsorption, parmi eux on distingue les facteurs liés à :

A) La nature de l'adsorbant

- Surface spécifique.
- La densité et la nature des groupes fonctionnels qui se trouve à sa surface.
- La distribution de la taille des pores.
- Le taux de cendres.

B) La nature de l'adsorbat

- Sa masse moléculaire.
- Sa polarité : un soluté polaire aura plus d'affinité pour un solvant ou pour l'adsorbant polaire. Il faut que l'adsorbant et l'adsorbât soient de polarité voisine.
- Sa solubilité : Plus la solubilité est grande, plus faible sera l'adsorption.
- La taille des molécules.
- La nature des groupements fonctionnels (acides ou basiques).

C) Les conditions opératoires

- La concentration en adsorbant et en adsorbat.
- La température de la solution l'adsorption physique s'effectue à des basses Températures (phénomène exothermique), alors que l'adsorption chimique demande des températures plus élevées (phénomènes endothermique).
- La présence d'espèces compétitives pour les mêmes sites d'adsorption (cas des

mélanges).

- Le pH du milieu : influence sur l'ionisation des fonctions de surface, et par suite sur la charge globale de l'adsorbant.
- Le temps de contacts entre l'adsorbant et l'adsorbé.
- La vitesse d'agitation

III.6.4 Différents types d'adsorbants.

Le choix de l'adsorbant adéquat pour effectuer une séparation de gaz dépend de la structure interne des adsorbants. La différence de structure, donc des propriétés adsorbantes est simplement liée à la nature de l'adsorbant et à la différence de la méthode de préparation [34].

III.6.4.1 Charbons actifs.

Le charbon actif, obtenu par décomposition pyrolytique de bois, noix de coco, charbon, lignite, tourbe et généralement tout composé organique est historiquement le premier matériau à avoir été utilisé. Son activation peut se faire selon les procédés suivants :

-l'activation physique, qui suit deux phases : la carbonisation à des températures relativement modérées (400 à 500°C) dont le but est d'éliminer des composés organiques dans la structure du charbon, puis, l'activation poussée par traitement à la vapeur d'eau ou au dioxyde de carbone à 800°C conduisant à l'ouverture des pores et à l'obtention d'une très grande surface spécifique (entre 500 et 3000 m².g⁻¹).

- l'activation chimique consistant à imprégner le charbon par des corps tels que ZnCl₂ ou H₃PO₄, et à calciner le mélange. Le mécanisme d'activation des pores est assez mal connu.

-La structure interne du composé ainsi obtenu est constituée d'un assemblage aléatoire de cristallites élémentaires de graphite. L'espace entre ces cristallites constitue la microporosité du charbon, et l'aspect aléatoire de la distribution de taille de pores rend la sélectivité du matériau très faible [34].

III.6.4.2 Zéolithes.

L'origine du terme zéolithe remonte au milieu du XVIII^{ème} siècle (1756), époque à laquelle le minéralogiste suédois A. F. Cronstedt remarqua que certains minéraux semblaient fondre et bouillir lorsqu'ils étaient fortement chauffés. Il désigna ces minéraux sous le nom de zéolithes dérivé des mots grecs : zien (bouillir) et lithos (pierre).

Le nom de zéolithes est lui-même dérivé de la capacité de conserver les molécules d'eau bien au-delà de la température d'ébullition : quand les molécules d'eau sont libérées de cages

de zéolithes, leur température est largement supérieure à 100°C, ainsi, le cristal semble bouillir⁵⁴. La première étude remonte à 1840, lorsque Damour étudia la réversibilité de l'hydratation de ces minéraux. En 1852, Way montra la possibilité d'échange de ces substances, et, dans les années 1920-1925 de nombreuses études sur les propriétés de sorption sont réalisées. Ainsi, Mc Bain a été amené à comparer les zéolithes à de véritables tamis moléculaires. Depuis leur développement et leur introduction dans l'industrie dans les années 1950, ces adsorbants ont été utilisés aussi bien pour le séchage que pour la purification de liquides et de gaz.

Ils ont par ailleurs rendu possible le développement de procédés de séparation utilisés dans le but de récupérer des paraffines normales d'hydrocarbures à chaînes ramifiées ou cycliques. Correctement modifiés, ces matériaux ont également des propriétés catalytiques⁵⁵ qui dépendent de trois éléments :

- la structure cristalline régulière et la taille homogène des pores qui ne permet qu'aux molécules en-dessous d'une certaine taille de réagir, d'où le nom de "tamis moléculaires".
- la présence des groupes acides forts d'origine a protonique qui peut initier la formation de carbocations,
- la présence d'un champ électrostatique au voisinage des cations qui peut conférer une activité aux réactifs. L'activité catalytique peut donc être modulée par la nature du cation choisi. La formule brute des zéolithes les plus connues est la suivante [34] : $\text{Na Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 4,5 \text{H}_2\text{O}$

III.6.5 Classification des isothermes d'adsorption

Expérimentalement, on distingue quatre classes principales nommées : L (Langmuir), S (Sigmoide), H (Haute affinité) et C (partition Constante). Le solvant s'adsorbe sur les mêmes sites que le soluté. Ceci implique l'existence d'une compétition d'adsorption entre le solvant et le soluté. Le nombre de sites susceptibles d'accueillir les molécules de soluté a la surface du solide diminue quand la quantité adsorbée augmente.

De l'orientation des molécules à la surface, on peut citer le cas où les molécules sont adsorbées verticalement ou horizontalement sur la surface. Enfin, les interactions attractives ou répulsives entre les molécules adsorbées se manifestent d'une façon notable dans le phénomène d'adsorption [16].

III.6.5.1. Classe L

Les isothermes de classe L présentent, à faible concentration en solution, une concavité tournée vers le bas qui traduit une diminution des sites libres au fur et à mesure de la progression de l'adsorption. Ce phénomène se produit lorsque les forces d'attraction entre les molécules adsorbées sont faibles.

Elle est souvent observée quand les molécules sont adsorbées horizontalement, ce qui minimise leur attraction latérale. Elle peut également apparaître quand les molécules sont adsorbées verticalement et lorsque la compétition d'adsorption entre le solvant et le soluté est faible. Dans ce cas, l'adsorption des molécules isolées est assez forte pour rendre négligeable les interactions latérales [12].

III.6.5.2. Classe S

Les isothermes de cette classe présentent, à faible concentration, une concavité tournée vers le haut. Les molécules adsorbées favorisent l'adsorption ultérieure d'autres molécules (adsorption coopérative). Ceci est dû aux molécules qui s'attirent par des forces de Van Der Waals, et se regroupent en îlots dans lesquels elles se tassent les unes contre les autres [12].

III.6.5.3. Classe H

La partie initiale de l'isotherme est presque verticale, la quantité adsorbée apparaît importante à concentration quasiment nulle du soluté dans la solution. Ce phénomène se produit lorsque les interactions entre les molécules adsorbées et la surface du solide sont très fortes. L'isotherme de classe H est aussi observée lors de l'adsorption de micelles ou de polymères formées à partir des molécules de soluté

III.6.5.4. Classe C

Les isothermes de cette classe se caractérisent par une partition constante entre la solution et le substrat jusqu'à un palier. La linéarité montre que le nombre de sites libres reste constant au cours de l'adsorption. Ceci signifie que les sites sont créés au cours de l'adsorption. Ce qui implique que les isothermes de cette classe sont obtenues quand les molécules de soluté sont préalablement par le solvant [12].

III.7 Conclusion

Le traitement des eaux usées contenant des colorants constitue un enjeu environnemental crucial, en raison de la résistance de nombreux colorants synthétiques à la biodégradation, de leur toxicité potentielle et de leur persistance dans l'environnement aquatique. Les principaux procédés physico-chimiques étudiés, tels que la coagulation-

floculation, l'adsorption, les procédés membranaires, les traitements d'oxydation avancée et les procédés biologiques, présentent chacun des avantages et des limites en fonction de la nature de l'effluent et des objectifs du traitement.

La coagulation-floculation est une méthode simple et économique, efficace pour la réduction de la turbidité et la décoloration partielle des eaux, mais elle génère des boues qu'il faut traiter [35]. L'adsorption, notamment sur charbon actif ou biosorbants, offre une excellente capacité d'élimination des colorants même à faible concentration, bien qu'elle puisse devenir coûteuse en raison du besoin de régénération du support [36]. Quant aux procédés d'oxydation avancée (AOP), ils sont très performants mais nécessitent une maîtrise technologique et énergétique importante [37].

Dans cette optique, les études récentes privilégient de plus en plus le couplage de procédés (par exemple : coagulation-floculation suivie d'adsorption ou d'une AOP) afin de compenser les limitations de chaque méthode prise individuellement [38]. Ces combinaisons permettent une efficacité accrue, une réduction de la charge polluante globale, et souvent une diminution des coûts de traitement à long terme.

Ainsi, une bonne compréhension des caractéristiques des colorants et des conditions opérationnelles est indispensable pour choisir ou concevoir un schéma de traitement optimal. Ce chapitre met en lumière l'importance d'adopter une approche intégrée et flexible pour répondre aux exigences croissantes de la protection de l'environnement et de la réutilisation des eaux traitées dans un contexte industriel.

Parties Expérimentale

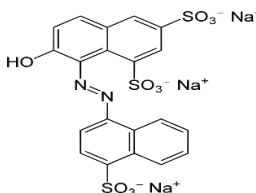
IV.1. Matériels et Méthodes

IV.1.1. Données sur le colorant utilisé (E124)

Ce colorant fait partie des colorants synthétiques azoïques. C'est le sel trisodique 2-hydroxy-1-(4-sulfonate-1-naphtylazo) -6,8-naphtalène di-sulfonate. Sa formule chimique est : $C_{20}H_{11}N_2O_{10}S_3Na_3$ et son poids moléculaire (PM) = 604.47 g/mol. Il se présente sous forme de poudre rouge vif inodore et largement utilisé dans l'industrie alimentaire, cosmétique et pharmaceutique.

Le Ponceau 4R présente un pH légèrement acide (~6) et se dissout facilement dans l'eau, ce qui permet son utilisation dans divers produits aqueux tels que les boissons, les confiseries ou les médicaments liquides. C'est un colorant sulfoné, dont la forte solubilité dans l'eau est due à la présence de groupes sulfonates ($-SO_3^-$). En revanche, il est peu ou pas soluble dans les solvants organiques comme l'éthanol ou les huiles. Le Ponceau 4R est stable dans une gamme de pH comprise entre 3 et 7, mais devient instable en milieu basique, ce qui peut entraîner sa dégradation. Il est classé parmi les colorants anioniques, en raison de ses fonctions sulfonates. En cas de chaleur excessive ou en présence d'agents oxydants puissants, il peut se décomposer et libérer des composés azotés ou soufrés. Il est donc incompatible avec les agents réducteurs forts et les conditions fortement basiques, bien qu'il reste globalement peu réactif dans des conditions normales d'utilisation [38].

Tableau IV.1 : Quelques données sur le colorant étudié (E124).

Ponceau 4R	
Nom UICPA	Acide 1-(4-sulfo-1-naphtylazo) -2-naphtol-6,8-disulfonique, sel trisodique
Apparence	Poudre fine ou granulés de couleur rouge
Formule brute	$C_{20}H_{11}N_2O_{10}S_3Na_3$
Masse molaire	604.47 g/mol
T° fusion	>300 °C
Stabilité	Relativement stable à la lumière, à la chaleur et aux acides
Solubilité	Très soluble dans l'eau (> 10 g/L à température ambiante)

Le colorant E124 (Ponceau 4R) est sensible à plusieurs facteurs physico-chimiques qui influencent sa stabilité, notamment le pH, la température, la lumière et certains agents chimiques. Il est stable en milieu légèrement acide à neutre (pH 3 à 7), mais se dégrade en milieu basique, où sa structure azoïque peut se rompre, entraînant une perte de couleur. À haute température, surtout au-delà de 100 °C, il peut également se décomposer, en particulier si le pH est élevé. Une exposition prolongée à la lumière, notamment aux UV, ou à des agents oxydants peut accélérer cette dégradation. En revanche, à température ambiante, à l'abri de la lumière et dans un pH contrôlé, le E124 reste relativement stable.

Sous certaines conditions, le colorant E124 peut subir des transformations chimiques qui conduisent à la formation de composés de plus faible poids moléculaire ou à des altérations de sa couleur. Ces modifications résultent généralement d'une rupture de la structure azoïque ou de réarrangements internes de la molécule. La présence de certains acides organiques (comme l'acide citrique) ou d'ions inorganiques (tels que le fer ou le cuivre) peut accélérer ces processus de dégradation en agissant comme catalyseurs ou en modifiant l'équilibre ionique du milieu. Ces interactions peuvent affaiblir la stabilité du colorant, altérant ainsi ses propriétés chromatiques et sa fonctionnalité dans les formulations [39].

La plupart des colorants sont généralement peu ou non biodégradables, ce qui complique leur élimination dans l'environnement. Pour y remédier, diverses méthodes ont été développées, incluant des traitements physiques et chimiques tels que l'ozonation [40], [41], la coagulation-floculation [42], ou encore l'adsorption sur charbon actif [43]. Par ailleurs, plusieurs chercheurs [44-46] ont mis au point des techniques de photocatalyse, bien que ces méthodes soient souvent coûteuses en raison de l'utilisation de catalyseurs onéreux.

Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi d'éliminer le colorant E124 (rouge cochenille A ; PONCEAU 4R) en utilisant un système combiné de coagulation floculation et d'adsorption (CF/adsorption), afin d'optimiser l'efficacité du traitement tout en limitant les coûts.

IV.1.2. Préparation des solutions et analyses du colorant

Un colorant alimentaire commercial, désigné par le code E124, a été utilisé dans cette étude. De couleur rouge vif, il est largement utilisé (seul ou en combinaison avec d'autres colorants) dans la coloration de produits dans l'industrie de la confiserie, production de boissons, de glaces, de tartes, des desserts et des fruits en conserve, entre autres.

Dans un objectif d'optimisation expérimentale, une solution du colorant a été préparée à une concentration initiale de $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ dans de l'eau de robinet. Le spectre d'absorption dans le domaine du visible a été enregistré à l'aide d'un spectrophotomètre Jenway 7315. Le pH de la solution a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre Hanna 211 Micro processor, tandis que la conductivité électrique a été déterminée à l'aide d'un conductivimètre Hanna EC215. Enfin, la turbidité de la solution colorée a été mesurée à l'aide d'un turbidimètre Phywe System GMBH 2100N (Allemagne).

IV.1.3. Nature des adsorbants utilisés.

Dans cette étude, deux types de charbons ont été utilisés comme matériaux adsorbants. Le premier est un charbon actif commercial (CAC) en poudre, fourni par la société Riedel-de-Haën. Le deuxième type est un charbon élaboré à partir de pelures de fèves (CAPF), provenant de *Vicia faba*, une plante annuelle de la famille des Fabaceae, communément cultivée pour ses graines (figure IV.1). Ce charbon constitue un matériau biosourcé, issu de la valorisation de déchets agroalimentaires, s'inscrivant dans une démarche de traitement durable.

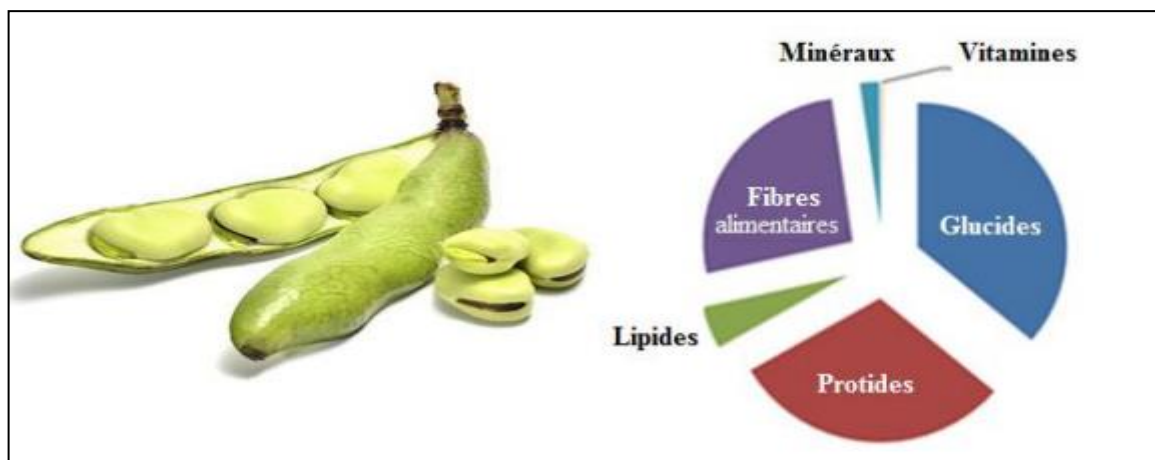


Figure IV.1 : Photo de fèves (gauche) et composition moyenne pour 100g des fèves (droite)

IV.1.4. Préparation de charbon actif (CAPF)

Après séparation des graines de pois et de fèves de leurs pelures, ces dernières ont été soumises à un séchage initial à l'air libre, sous exposition directe au soleil pendant plusieurs jours, afin de réduire leur teneur en humidité. Les pelures de fèves (PF) ont ensuite été broyées et tamisées afin d'obtenir une poudre homogène. Ce matériau a ensuite été lavé à plusieurs reprises avec de l'eau distillée chaude, jusqu'à ce que le liquide de rinçage devienne clair, garantissant l'élimination des impuretés solubles. Après cette étape de purification, les échantillons ont été séchés dans une étuve à $60 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant 48 heures, puis broyés une

seconde fois pour affiner la granulométrie et obtenir une poudre homogène utilisable pour les expériences d'adsorption.

Dans la littérature, plusieurs méthodes de préparation des charbons actifs sont rapportées, notamment les procédés physiques et chimiques. La synthèse de charbons actifs à partir de résidus agricoles par activation chimique a fait l'objet de nombreuses recherches. Les études menées par [47, 48] ont porté sur la préparation de charbons actifs à partir de pelures de fèves (CAPF), dans le but de produire des matériaux adsorbants efficaces pour le traitement des eaux. Pour ce faire, l'acide phosphorique (H_3PO_4) a été utilisé comme agent d'activation chimique, en raison de son efficacité à développer la porosité du matériau et à améliorer ses propriétés adsorbants.

IV.1.4.1. Activation avec l'acide phosphorique

Parmi les différents agents chimiques d'activation, l'acide phosphorique (H_3PO_4) est l'un des plus couramment utilisés pour la production de charbons actifs, en raison de son efficacité à développer une structure poreuse adaptée à l'adsorption [49, 50]. Dans cette étude, 10 g de l'échantillon brut (pelures de fèves PF) ont été imprégnés avec une solution d'acide phosphorique à une concentration de 3 M. Les mélanges ont été soumis à une agitation constante à 250 rpm pendant 10 heures, puis transférés dans une étuve à 110 °C pendant 24 heures afin de favoriser l'imprégnation chimique et la pré-activation des matériaux.

IV.1.4.2. Activation thermique (Calcination)

Les échantillons imprégnés ont été placés dans un four de calcination, avec une vitesse de montée en température de 10 °C/min, puis maintenus à 450 °C pendant 1 heure. Les produits obtenus après calcination, à savoir les charbons actifs issus des pelures de pelures de fèves (CAPF), ont été ensuite lavés avec une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) à 1 M afin de neutraliser les résidus acides et éliminer les impuretés. Un rinçage répété à l'eau distillée a été effectué jusqu'à ce que le pH du filtrat atteigne environ 6,5. Enfin, les charbons activés ont été séchés dans une étuve à 110 °C pendant 24 heures [51].

IV.1.4.3. Broyage des charbons (CAPF)

Le broyage des charbons en poudre constitue l'étape finale avant leur utilisation comme adsorbants pour l'élimination du colorant ciblé. Cette étape est cruciale dans la préparation des matériaux, car elle permet d'homogénéiser les échantillons, de réduire la taille des particules et d'augmenter la surface spécifique, améliorant ainsi les performances d'adsorption. À cet effet, une masse précise de chaque échantillon post-calcination a été

placée dans une jarre contenant plusieurs billes, en respectant un ratio billes/poudre de 4:1. Le broyage a été réalisé à une vitesse de rotation de 350 tours par minute pendant une durée d'une heure.

IV.1.5. Équipement et conditions opératoires du traitement par coagulation floculation-Adsorption.

Le montage expérimental du système combiné de coagulation floculation-adsorption (CF/Adsorption), présenté en figure IV.2 et photo IV.1, comprend une cellule en verre (bécher) dans laquelle circule la solution contenant le colorant à traiter et la quantité du charbon préparée à ajouter (système statique). Ce montage se caractérise par une mise en œuvre simple et une utilisation aisée. Les cations Al^{3+} sont libérés en solution grâce à l'ajout d'un sel de sulfate d'aluminium d'une pureté supérieure à 97 %. Les quantités de ce sel sont optimisées afin d'éviter toute variation indésirable du pH.

Plusieurs paramètres ont été étudiés : la quantité de coagulant et le pH du milieu pour les essais de coagulation-floculation ; la quantité d'adsorbant et le pH du milieu pour l'adsorption. Dans le cas du traitement combiné, la masse de coagulant et celle de l'adsorbant ont été évaluées, en tenant également compte de l'effet de l'agitation et de la variation de la concentration initiale du colorant, à partir d'une solution synthétique de colorant en poudre à $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. La solution a été constamment agitée à l'aide d'un agitateur magnétique afin de réduire la surtension dans le bécher. Des prélèvements ont été réalisés toutes les trois/cinq minutes pendant toute la durée de l'expérience. Chaque échantillon prélevé a été filtré à l'aide de filtres spécifiques permettant d'éliminer tous les floccs formés, garantissant ainsi des mesures d'absorbance précises. Par ailleurs, le pH de la solution a été contrôlé ponctuellement tout au long du processus. Le taux de réduction de la coloration en fin d'expérience est calculé selon l'équation (IV.1) suivante :

$$TR(\%) = [(Abs_0 - Abs_{final})/Abs_0] * 100\% \text{ (IV.1) } \dots\dots\dots (\text{Eq : IV.1})$$

$Abs_0 - Abs_{final}$: Absorbance successivement avant et après EF/EC

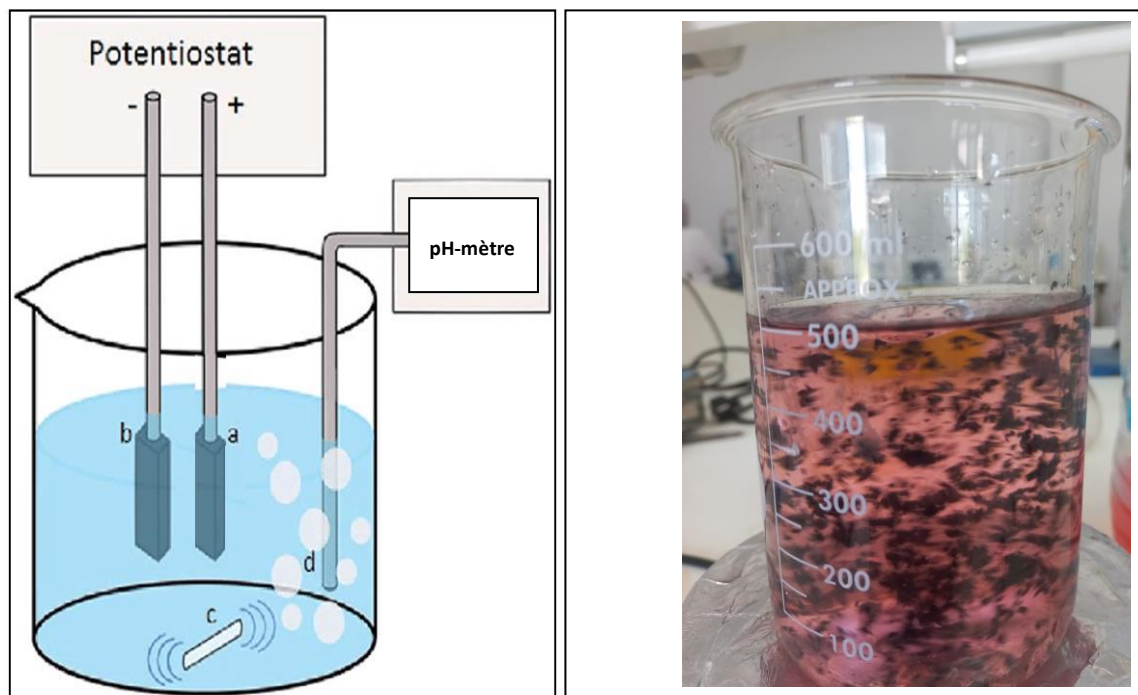


Figure IV.2 : Montage expérimental d'CF/Adsorption

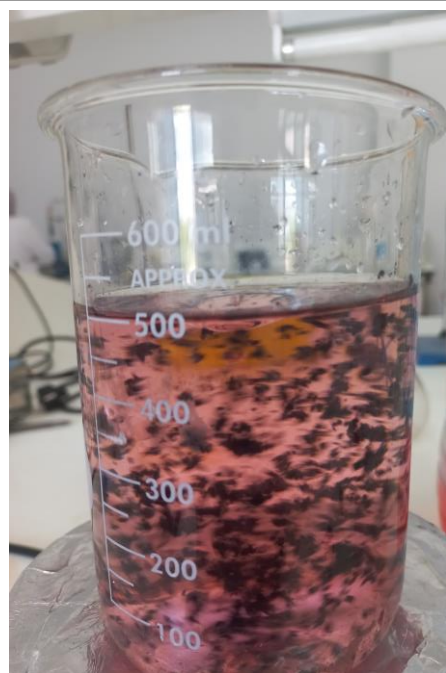


Photo III.1 : Montage expérimental

IV.2. Résultats et discussion

IV.2.1. Données analytiques sur le colorant étudié (E124)

Comme indiqué précédemment, un colorant a fait l'objet d'une étude dont les caractéristiques physico-chimiques sont résumées dans le tableau IV.2. À la concentration utilisée de $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, le colorant présente une absorption maximale bien définie, identifiable par une valeur de λ_{max} (en nm), illustrée par le spectre d'absorption visible en figure IV.4. En l'absence de structure chimique de référence précise et au vu des valeurs de pH mesurées, les valeurs de turbidité restent faibles, similaires à celles observées dans l'eau potable. De même, la conductivité des solutions préparées ne s'écarte pas significativement de celle des eaux potables, ce qui confirme leur faible teneur en ions dissous.

Des tests de stabilité dans le temps ont été menés sur une solution de colorant à $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, conservée dans un flacon ambré à l'abri de la lumière, avec une ouverture tous les trois jours pour mesurer l'absorbance. Les résultats indiquent une bonne stabilité du colorant : aucune variation significative de l'absorbance initiale ni du pH n'a été constatée sur une période de 21 jours (voir **figure IV.3**). En revanche, lorsque l'échantillon était exposé à la lumière, de légères fluctuations de l'absorbance et du pH ont été observées, suggérant une sensibilité modérée à l'éclairement.

Tableau IV.2 : Quelques caractéristiques du colorant étudié.

Couleur	Orange
λ_{\max}(nm)	508
PH₀	6.01
Turbidité (NTU)	08
Absorbance	0.1713
Concentration(mg/L)	50
Conductivité initiale (μS/cm)	340

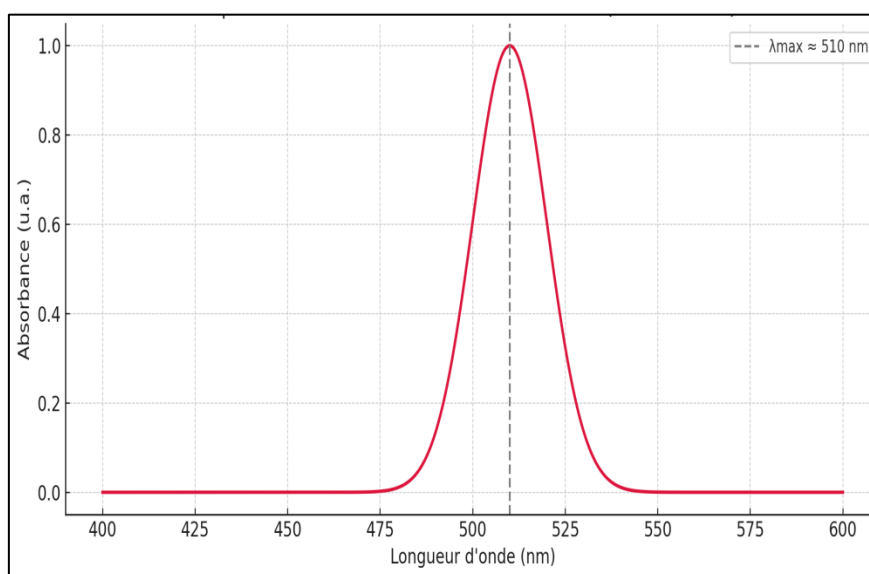


Figure IV.3 : Spectre d'absorbance du colorant étudié

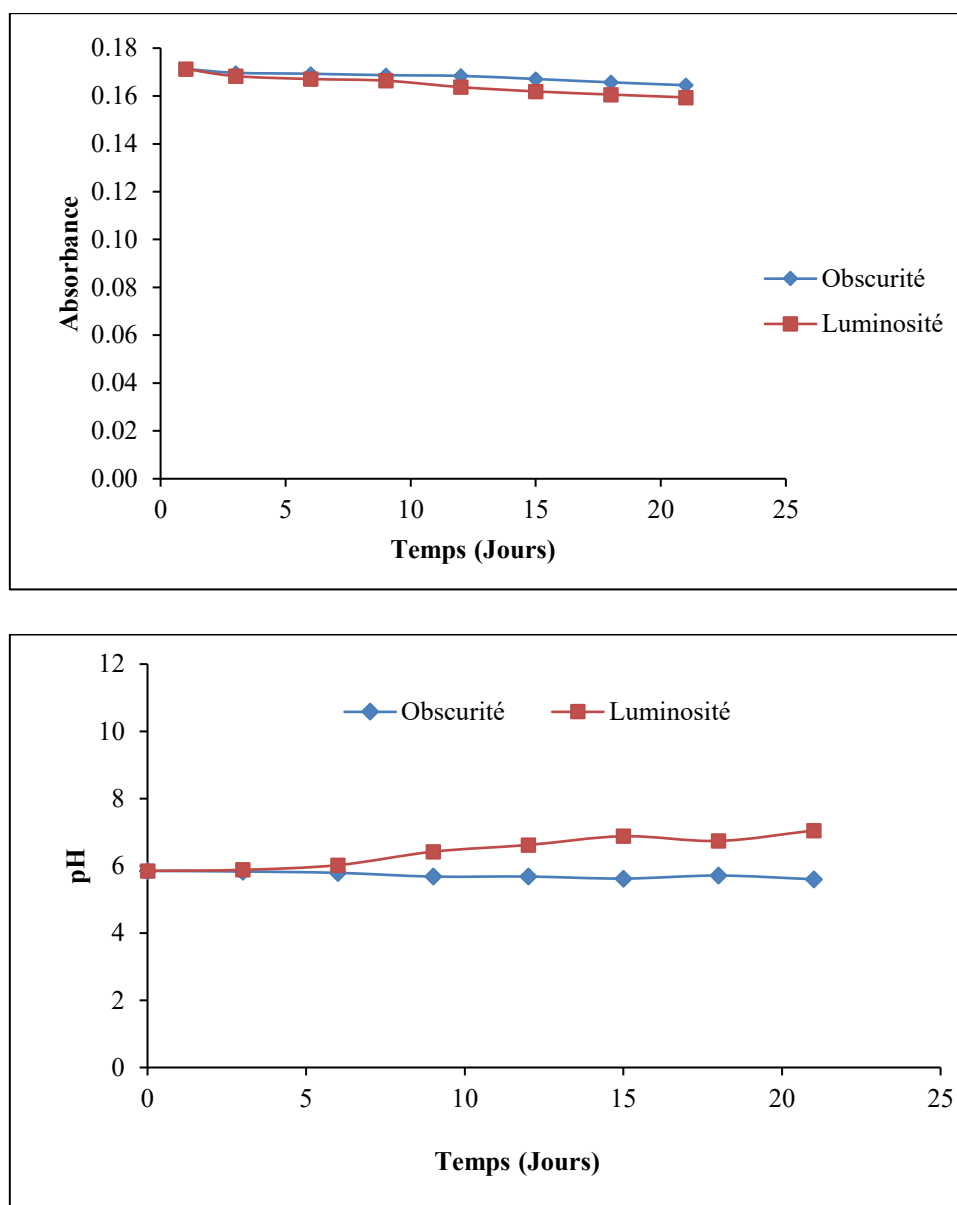


Figure IV.4 : Essais de stabilité ou de conservation des colorants dans le temps

IV.2.2. Etablissement de la courbe d'étalonnage du colorant étudié

La courbe d'étalonnage du colorant étudié a été réalisée à partir d'une solution mère à $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, préparée dans de l'eau bi-distillée, puis diluée pour obtenir une série de solutions filles aux concentrations de 5, 10, 20, 30, 40 et $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. L'ensemble des solutions a été analysé par spectrophotométrie dans le domaine du visible, à la longueur d'onde maximale déterminée au préalable ($\lambda = 508 \text{ nm}$). La courbe d'étalonnage, représentant l'absorbance en fonction de la concentration ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), est présentée en **figure IV.5**. Elle révèle une excellente linéarité, avec un coefficient de corrélation proche de 1, témoignant de la fiabilité de la méthode.

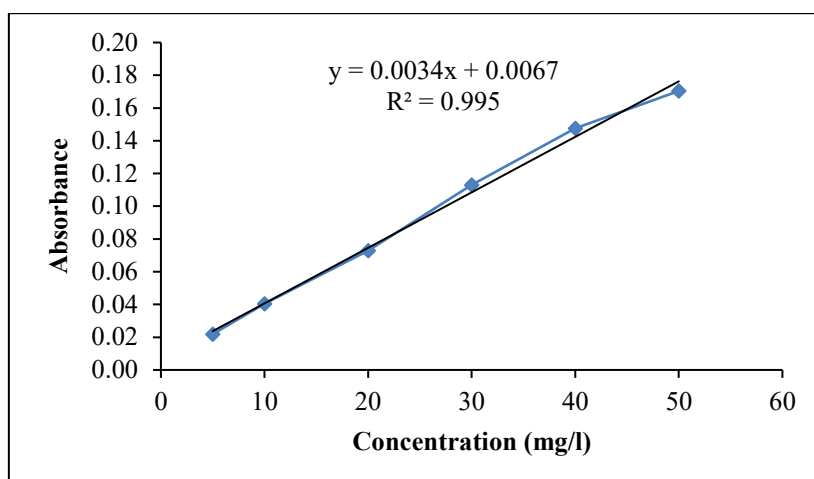


Figure IV.5 : Courbe d'étalonnage du colorant étudié

IV.2.3. Résultats d'élimination du colorant par Coagulation floculation – Effet de la masse de coagulant

L'objectif de cette partie est d'étudier l'influence de la masse de coagulant sur l'efficacité d'élimination de la couleur par une technique physico-chimique de la coagulation floculation. Ce processus fonctionne de manière optimale en produisant la quantité requise en coagulant (Al^{3+}) dans la solution via l'ajout d'un sel ($Al(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$), des pH qui favorisent la formation de complexes amorphes insolubles, et d'autres phénomènes liés à l'adsorption mis en solution. [52-53]. Pour le procédé de la coagulation floculation envisagé, plusieurs paramètres peuvent influencer l'efficacité d'élimination du colorant, notamment la dose en coagulant. C'est pour cette raison que nous avons choisi d'examiner son influence sur l'efficacité de réduction de la couleur.

Afin d'évaluer l'efficacité du traitement par coagulation floculation, nous avons opté de tester la concentration en $[Al^{3+}]$ en fixant les autres paramètres optimaux obtenus dans nos études antérieures, tels que le temps de contact, vitesse d'agitation, température...etc.

Les expériences ont été réalisées dans un bûcher de 500 ml, dans la série d'expériences, cinq valeurs de masse de coagulant dans la plage de 100 à 500 mg ont été appliquées pour le sel de sulfates d'aluminium à une solution de pH libre égale 6.8, une concentration initiale en colorant de 50 mg/l, un temps de contact de 30 min, et une agitation d'une vitesse de 200 t/min. Les résultats sont illustrés dans la figure IV.6.

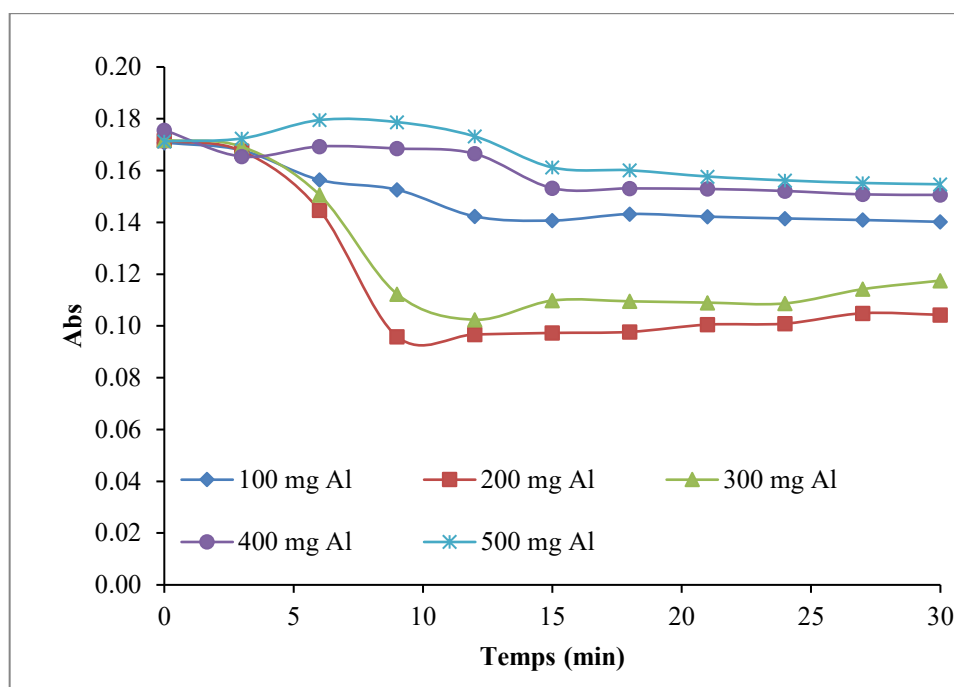


Figure IV.6 : Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différentes masses de coagulants ($T = 24^{\circ}\text{C} \pm 1$; Agitation = 200rpm, temps de contact = 30 min ; pH initial = 6.1, concentration initiale en colorant = 50 mg/l ; floculant SP6)

La performance d'élimination de la coloration par la coagulation floculation a été contrôlée à différentes masses ou doses de coagulant pendant 30 min d'expérience, on peut constater que l'absorbance décroît avec le temps d'une manière importante pour les masses de 200 et 300 mg. Toutes les masses testées conduisaient à une diminution de l'intensité de la coloration, le taux de réduction le plus important est d'environ 50 % avec la cinétique la plus rapide, ce taux est observé avec une masse de 200 mg après 9 min d'expérience, des taux d'abattements de 15, 22, 27 et 44% ont été observés respectivement avec 500, 400, 100 et 300 mg après des temps différents de traitement.

Il convient de noter que le processus de coagulation-floculation présente une efficacité limitée pour l'élimination des colorants présents dans les eaux, même lorsque des doses optimales de coagulants sont utilisées. Ce phénomène s'explique par le fait que cette technique physico-chimique est principalement conçue pour éliminer la fraction non soluble des eaux, notamment les matières en suspension et les particules colloïdales [54]. Il convient également de souligner que la concentration de certains polluants solubles peut être réduite grâce à d'autres mécanismes, tels que la formation de complexes entre ces polluants et des métaux ou minéraux présents, qui participent à la formation de floes. De plus, l'adsorption de certains polluants à la surface des floes formés contribue également à leur élimination.

La coagulation-floculation présente une efficacité limitée, voire négligeable, pour l'élimination de certains types de colorants. Cette inefficacité s'explique principalement par la stabilité chimique de ces substances, en particulier les colorants azoïques, qui sont fortement résistants à la dégradation. Leur grande solubilité dans l'eau, ainsi que la complexité de leur structure moléculaire, entravent leur agglomération et, par conséquent, leur élimination par ce procédé physico-chimique [55].

D'autres facteurs peuvent également expliquer cette inefficacité, notamment la très faible affinité de certains colorants avec les coagulants classiques tels que le sulfate d'aluminium ($Al_2(SO_4)_3$) ou le chlorure ferrique ($FeCl_3$). S'ajoutent à cela les interférences causées par les matières organiques dissoutes, certains tensioactifs et métaux lourds, qui perturbent le processus de floculation. Enfin, la variation du pH joue un rôle important, d'autant plus que certains colorants restent stables sur une large plage de pH, rendant leur élimination encore plus difficile

IV.2.4. Résultats d'élimination du colorant par Coagulation floculation – Effet de pH

La performance d'élimination de la coloration par le procédé de coagulation-floculation a été évaluée à différentes valeurs de pH pendant une durée de 30 minutes. Il a été observé que l'absorbance diminue aux pH 6,2 et 8, indiquant une réduction de la coloration. En revanche, à pH 4, la solution conserve une forte intensité colorée, (figure IV.7).

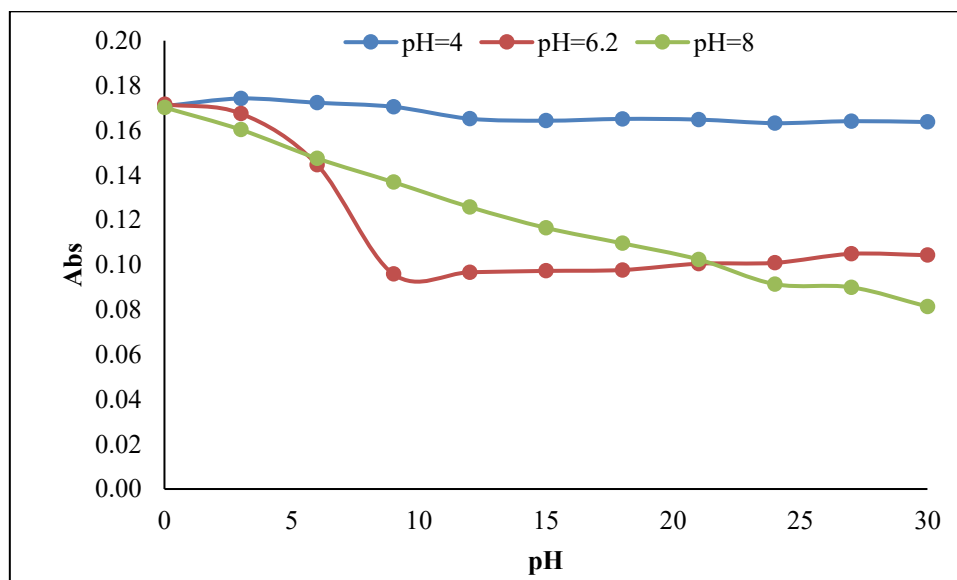


Figure IV.7 : Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différents valeurs de pH ($T = 24^{\circ}C \pm 1$; Agitation = 200 rpm, temps de contact = 30 min ; concentration initiale en colorant = 50 mg/l ; coagulant $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O]$ 200 mg ; floculant SP6)

Les résultats montrent clairement que les cinétiques d'élimination sont lentes. En effet, après neuf minutes de traitement par le processus de coagulation-floculation à un pH optimal, généralement situé autour de 6,5, le taux d'abattement enregistré ne dépasse pas 50 %. À un pH acide (pH = 4), le taux d'élimination reste faible, voire négligeable, même après 30 minutes de traitement. En revanche, à un pH légèrement basique, on observe une cinétique d'élimination constante et linéaire en fonction du temps.

Ces résultats peuvent s'expliquer par les limites d'efficacité du procédé de coagulation-floculation dans l'élimination de certains colorants, même aux pH optimaux (~6,5) qui favorisent pourtant la formation de complexes insolubles d'hydroxyde d'aluminium. En milieu basique, le colorant étudié subit une dégradation, probablement par l'un des mécanismes réactifs présents en solution, tels que la rupture de la liaison azoïque (-N=N-) (clivage de la liaison azoïque), l'hydrolyse ou la réduction. Ces réactions peuvent conduire à la formation de composés aminés aromatiques, comme les sulfanilamides ou les naphtylamines, en fonction des groupes fonctionnels portés par la molécule initiale. De plus, en milieu basique, l'environnement chimique favorise l'oxydation de certains groupements, contribuant également à la dégradation du colorant [56].

IV.2.5. Résultats d'élimination du colorant par Adsorption – Effet de masse d'adsorbant

Dans la littérature, l'élimination des colorants des eaux par la technique d'adsorption est largement étudiée [57]. Cette technique offre plusieurs avantages tels que, ses efficacités importantes, sa simplicité de mise en œuvre et de son faible coût. Elle est fondée sur le déplacement des molécules de colorant de la phase aqueuse vers la surface d'un matériau adsorbant, comme le charbon actif, les argiles traitées ou d'autres matières biosourcées, ce qui permet une purification efficace de l'eau. L'efficacité de ce procédé d'adsorption dépend de plusieurs facteurs comme la surface spécifique du matériau adsorbant, la nature chimique des substances impliquées et la température. De plus, la quantité de l'adsorbant peut avoir un impact sur l'efficacité de l'adsorption, car elle détermine le degré de l'adsorption, ce dernier est intimement lié au rendement d'élimination, et plus précisément à la quantité de polluant retenue par unité de masse d'adsorbant.

L'étude de l'influence de la masse de l'adsorbant sur la réduction de la coloration est nécessaire puisque la surface de contact justifie la faisabilité du procédé en termes de quantité et de temps d'agitation pour d'homogénéisation (adsorbant et adsorbant) donc de consommation énergétique et le coût du procédé [58]. C'est pour cette raison que nous avons choisi d'étudier ce paramètre de quantité d'adsorbant avec les valeurs suivantes : 30, 50, 80, et 100 mg sur l'efficacité d'élimination du colorant (E124) dans les eaux (eaux de robinet) par adsorption

avec un matériau préparé à base de déchets agricoles (peleurs de fève ; PF). Les expériences ont été réalisées à pH libre ~ 6.1 , temps de contact de 30 min et une concentration initiale de colorant de 50 mg/l. Après avoir été filtrée, la solution a été analysée pour mesurer l'absorbance (puis sa concentration). Les résultats de cette influence sont illustrés dans la figure ci-dessous (**figure IV.8**).

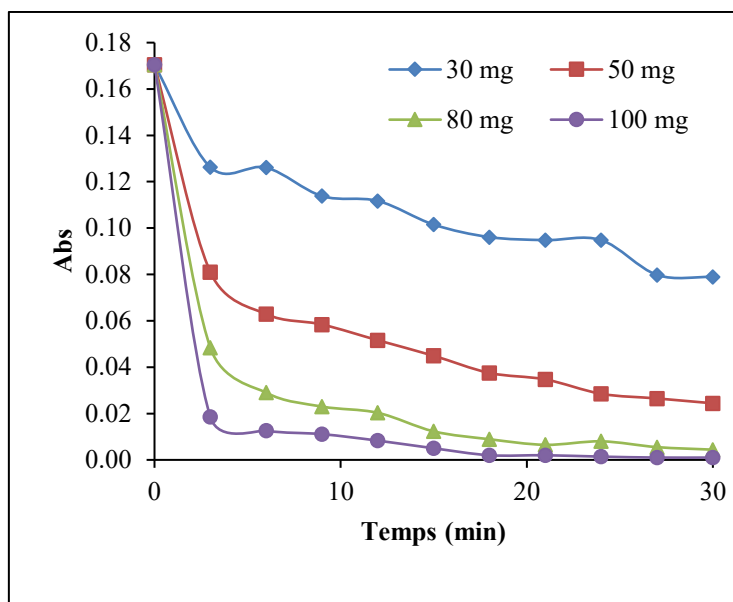


Figure IV.8 : Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différentes masses de l'adsorbant ($T \sim 24^{\circ}\text{C}$; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; concentration initiale de colorant = 50 mg/l ; Adsorbant (A : CAPPP ; B : CPF)).

Les résultats de cette influence montrent (**figure IV.8**) une bonne élimination de la couleur avec les quantités de 100 mg après trois minutes de contact pour le matériau préparé (PF), le taux d'élimination atteint son maximum ($>99\%$) pour des masses de 80 mais avec un temps de contact de 30 minutes. Alors que les taux d'élimination sont 90 et 60 % avec 50 et 30 mg d'adsorbant successivement et un temps de contact de 30 minutes. Cela s'explique par le fait qu'une plus grande quantité d'adsorbant présente davantage de sites actifs pour l'adsorption, ce qui augmente la probabilité de piéger les molécules de colorants dès le début du processus et accélère la cinétique d'élimination. Des résultats similaires ont été observés pratiquement par plusieurs auteurs, ils ont observé souvent une diminution de la vitesse d'abattement et, parfois, une augmentation du temps nécessaire pour atteindre un seuil de décontamination donné lorsque la masse de l'adsorbant diminue. Toutefois, dans certaines situations spécifiques, une réduction de la quantité d'adsorbant semble réduire temporairement

le temps requis pour parvenir à l'équilibre, surtout si les sites d'adsorption sont facilement accessibles ou si l'adsorbant possède une surface spécifique importante [59].

IV.2.6. Résultats d'élimination du colorant par couplage coagulation floculation-adsorption

L'échantillon d'eau à traiter, a été réalisé en milieu synthétique (colorant plus eau de robinet). Le traitement physico-chimique employé est la coagulation floculation-Adsorption en mode statique. L'optimisation de traitement adopté est importante ; nécessite l'étude de l'influence de certains paramètres sur l'efficacité du traitement adopté. Dans l'objectif de mieux optimiser cette association de procédés, et voir l'effet de l'ensemble de phénomènes et réactions mises dans la solution, nous avons travaillé essentiellement sur les paramètres clés influençant les deux techniques qui sont, la dose de coagulant pour la coagulation floculation et la masse de l'adsorbant.

L'effet du premier paramètre sur l'efficacité du traitement par coagulation-floculation couplée à l'adsorption (CF/adsorption) a été évalué en testant trois doses de coagulant (200, 400 et 600 mg), en présence de 50 mg de PF comme adsorbant. Une deuxième série d'expériences a été réalisée avec les mêmes doses de coagulant, mais en augmentant la masse d'adsorbant à 80 mg de PF. Toutes les expériences ont été menées dans les mêmes conditions opératoires : température constante, dose fixe de flocculant, vitesses d'agitation rapide et lente constantes, et un temps de traitement de 30 minutes. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures IV.9 et IV.10.

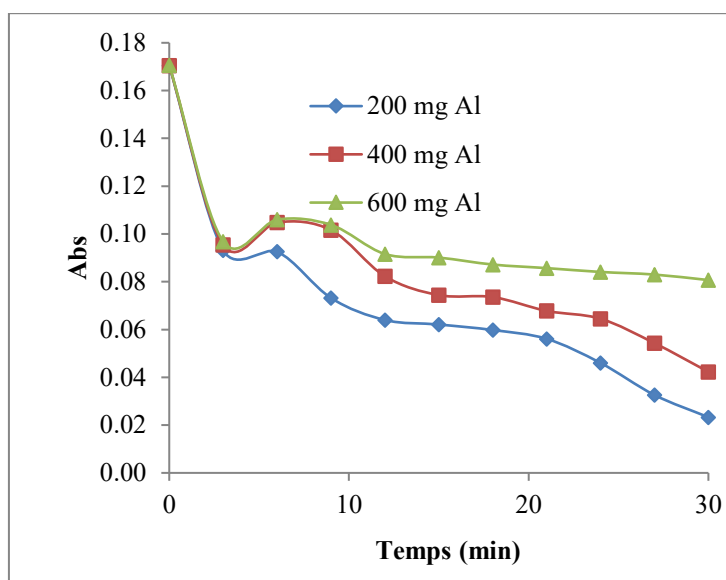


Figure IV.9 : Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps à différentes doses de coagulant ($T \sim 24^{\circ}\text{C}$; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; concentration initiale de colorant = 50 mg/l ; masse d'adsorbant = 50 mg ; Adsorbant CAPF)).

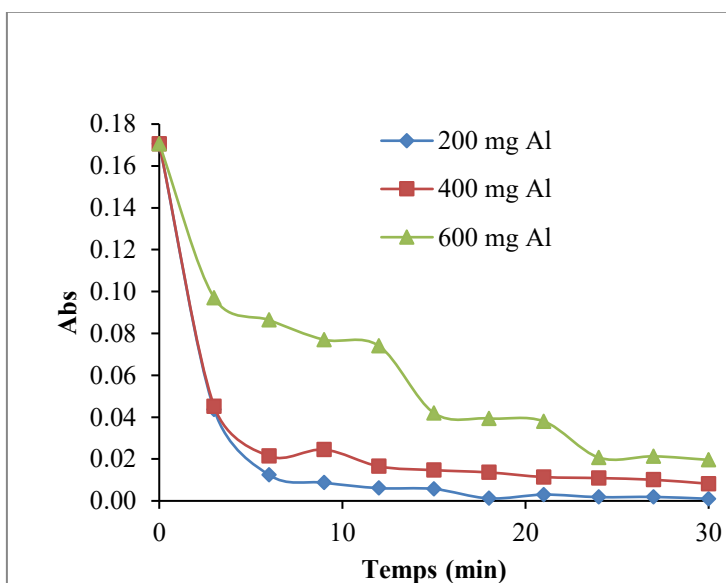


Figure IV.10 : Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps à différentes doses de coagulant ($T \sim 24^{\circ}\text{C}$; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; concentration initiale de colorant = 50 mg/l ; masse d'adsorbant = 80 mg ; Adsorbant CAPF)).

On observe clairement une dégradation de la coloration, quel que soit le dosage du coagulant ou la masse d'adsorbant utilisée. La figure IV.12 montre que, pour une masse d'adsorbant de 50 mg (PF), le taux d'abattement augmente à mesure que la dose de coagulant diminue, passant de 600 à 200 mg. Lorsque la masse d'adsorbant est augmentée à 80 mg, les taux d'abattement obtenus sont globalement plus élevés, notamment avec une dose de

coagulant de 200 mg, identifiée comme dose optimale. Après 18 minutes de traitement, les taux d'élimination enregistrés sont d'environ 91 %, 97 % et plus de 99 % pour les doses de 600, 400 et 200 mg, respectivement.

Le traitement combiné par coagulation-floculation et adsorption, utilisant 200 mg de coagulant et 80 mg d'adsorbant, permet une élimination quasi complète du colorant. Cette efficacité élevée s'explique par la synergie des mécanismes associés aux deux procédés. D'une part, l'augmentation de la masse d'adsorbant accroît la surface de contact disponible pour l'adsorption. D'autre part, la dose suffisante de coagulant permet de neutraliser les charges négatives des particules en solution, réduisant ainsi le potentiel zêta. Cette neutralisation favorise l'agglomération des particules et la formation de floccs stables, qui peuvent ensuite sédimenter au fond du bécher [60].

CONCLUSION GENERALE

Ce travail avait pour objectif d'étudier et de démontrer l'intérêt de la combinaison de deux procédés (coagulation floculation - Adsorption) pour le traitement et l'élimination d'un colorant alimentaire E124 présent dans les eaux.

Une association de procédés, telle que la coagulation floculation couplée à l'adsorption, a été étudiée comme alternative aux traitements physicochimiques conventionnels des eaux usées. Ce système de traitement, fiable et performant, permet de réduire efficacement la concentration des matières organiques solubles, et plus particulièrement d'éliminer les colorants présents dans les effluents. Cette étude met en évidence les mécanismes physicochimiques impliqués dans l'élimination de polluants potentiellement toxiques pour les écosystèmes aquatiques récepteurs.

L'élimination des molécules de colorant repose essentiellement sur des phénomènes d'interaction de surface et des réactions d'oxydo-réduction qui se produisent dans le milieu à traiter. Ces mécanismes permettent d'éliminer une large proportion de polluants organiques persistants, grâce à la grande surface spécifique des matériaux adsorbants utilisés, ainsi qu'à la forte capacité oxydante et réductrice des réactions mises en jeu lors du processus d'électrocoagulation.

L'utilisation de ce système de traitement a permis de réduire la coloration des eaux étudiées mais a des efficacités différentes, ce qui conduit à l'optimisation de cette combinaison. Une étude d'optimisation de traitement est basée sur l'étude de l'influence de paramètres réactionnels tels que la dose de coagulant, la quantité d'adsorbant et le pH de la solution, qui sont considérées comme des paramètres clés dans le mécanisme de décoloration.

Les mesures d'absorbance du colorant avant et après traitement indiquent que l'application du système combiné de coagulation floculation-adsorption (CF-Adsorption) permet d'atteindre des rendements d'élimination très élevés (>99 %), sous des conditions optimales : dose de coagulant de 200 mg, pH initial de 6,1, masse d'adsorbant de 80 mg, et durée de traitement d'environ 30 minutes. Ce couplage améliore significativement l'efficacité du traitement par rapport à l'application individuelle de la coagulation floculation ou de l'adsorption.

Cette étude met en évidence l'intérêt de coupler la coagulation floculation et l'adsorption à l'aide des matériaux adsorbants issus de déchets agricoles, en vue d'un traitement efficace et économique des eaux colorées. Elle ouvre la voie à des recherches futures portant sur l'application de cette approche à des effluents réels ainsi que sur l'optimisation des méthodes de régénération des adsorbants naturels.

REFERENCE
BIBLIOGRAPHIQUE

Références bibliographiques

- [1] **Hallis. L et al.**, Evidence for primordial water in Earth's Deep mantle, Science, vol. 350, n° 6262, pp. 795-797, 2015.
- [2] **FAO, Nation unies**, World Resources Institute (WRI) Copyright © 2008, United Nations Environnement Programme & Philippe Rekacewicz (Le Monde diplomatique)
- [3] **Lenntech BV. Rotterdamseweg** .402 M 2629 HH Delft. 1998-2017
- [4] **David R. Smith** "Climate Change, Water Supply, and Conflict in the Aral Sea Basin", présenté au "Pri-Aral Workshop 1994", a l'université de l'Etat de San Diego, mars 1994 : Les autres valeurs sont de Peter H. Gleick, Water in Crisis (NY, Oxford Université Press, 1993).
- [5] **Jean-François Sabouret** - Responsable éditoriale : Maryvonne Tissier - Coordination éditoriale & technique : DIST — Cellule Web du CNRS.
- [6] **Olivier Petitjean. Mercredi 16 décembre 2015.** L'eau au centre de la crise climatique.
- [7] **Rodier, J., Legube, B., Merlet, N., Et al. (2009).** L'analyse de l'eau, 9ème Edition. Edition DUNOD, Paris.1526 p.
- [8] **Bordet, J. (2007).** L'eau dans son environnement rural. Copyright éditions Johanet. Parais, 317 p
- [9] **Guiraud, J., et Galzy, P. (1980).** L'analyse microbiologique dans les industries alimentaire. Paris : L'usine nouvelle. PP 69-110 (Collection Génie alimentaire). ISBN 2-7327-00002.
- [10] **Haslay, C., Leccler. H.** microbiologique des eaux d'alimentations ; édition TEC et DOC.PARIS 1993.
- [11] **Ben Mansour .H, Boughzala O., Bariller. D, Cchekir-Ghedira. L et RMorsrati. R 2011** « Les colorants textiles sources de contamination de l'eau : CRIBLAGE de la toxicité et des méthodes de traitement, » Revue des sciences de l'eau, Volume 24, numéro 3,
- [12] **Ouchene. A 2017** Élimination du bleu de méthylène et du jaune basique 28 par adsorption sur les grignons d'olives, mémoire de master, Université Ferhat Abbas Sétif 1

- [13] **Mlle BENAÏSSA. A** 2012 Etude de la faisabilité d'élimination de certains Colorants textiles par certains matériaux déchets d'origine naturelle. Emonnier, M. Viguier, « Les textiles et leur entretien ». Editions Jacques Lanore, Paris 7e, 2002, 104-105.
- [14] **CHOUIH. Z, BOUGHAZ. I** 2022 dégradation d'un colorant triphénylméthane par procédé d'oxydation avancée. Mémoire Master Université de Médéa
- [15] **Ben Ammar Halima. S** 2023 Effets synergiques et pouvoir adsorbant du charbon actif dans l'élimination de deux colorants azoïques. Lemonnier, M. Viguier, « Les textiles et leur entretien ». Editions Jacques Lanore, Paris 7e, 2002, 104-105
- [16] **GHOZLANE FATMA. Z** 2018 Elimination du colorant bleu de méthylène sur un charbon actif préparé à partir des noyaux de dattes. Mémoire de Master Université Biskra
- [17] **Par AnaëlleChaudierDiététicienneNutritionniste**.<https://www.passeportsante.et/nutrition/additifsalimentaires?doc=e124poncea-4r-faut-savoir-sur-colorant>
- [18] **Aouabed Nadjia- Mellaoui Hayet** 2021 Traitement des Colorants des rejets textiles, par l'opuntia Ficus-Indica Mémoire Master Université Bounaama Djilali - Khémis Miliana
- [19] **Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., & Nigam, P.** (2001). Assainissement des colorants dans les effluents textiles une revue critique des technologies de traitement actuelles. doi.org/10.1016/S0960-8524(00)000808Obtenez les droits et le contenu
- [20] **Zollinger, H.** (2003). Chimie des couleurs : synthèses, propriétés et applications des colorants et pigments organiques Synthèses, propriétés et applications des colorants et p (2e éd.). Par
- [21] **Forgacs, E., Cserhádi, T., & Oros, G.** (2004) Élimination des colorants synthétiques des eaux usées E,30(7), <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.02>
- [22] **Saratale, R. G., Saratale, G. D., Chang, J. S., & Govindwar, S. P.** (2011). Décoloration et dégradation bactérienne des colorants azoïques. : une revue. Journal de l'Institut de génie chimique de Taiwan, doi.org/10.1016/j.jtice.2010.06.006Obtenez les droits et le contenu
- [23] **Crini, G.** 2006Adsorbants non conventionnels à faible coût pour l'élimination des colorantsBioré,97(9), 10611085.h<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.05.01>

[24] **Pearce, C. I., Lloyd, J. R., & Guthrie, J. T. (2003).** L'élimination de la couleur des eaux usées textiles à l'aide de cellules bactériennes entières une revue. *Teintures a*, 5(3)

[25] **Teh, C. Y., Wu, T. Y., & Juan, J. C. 2016** utilisation potentielle de l'amidon de riz dans le processus de coagulation-floculation des eaux usées de teinture : performances de traitement et caractérisation des floes. *Environnemental Technologie*, doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.07.005

[26]. **Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019).** Avantages et inconvénients des techniques utilisées pour le traitement des eaux usées une revue. *Bioressource Technologie*, doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9

[27] **GUERROUF. N 2023** Etude comparative entre deux procédés du traitement : la phyto-épurations et la coagulation-floculation dans l'élimination des composés inorganiques présents dans les eaux usées de la ville de Biskra. Thèse doctorat Université Biskra

[28] **Samihha Hammami 2012** Étude de dégradation des colorants de textile par les procédés d'oxydation avancée. Application à la dépollution des rejets industriels. Université de Marne la Vallée, 2008. Français. NNT : tel-00740155

[29] **Melle MADAOUI Rym Rania Melle GHENNAM Oumaima Zouaouia 2023** Elimination d'un colorant par un biomatériau université Belhadj Bouchaib - Ain temouchent

[30] **Élias, Assad. 2006** Étude du processus de coagulation-floculation du système montmorillonite-chitosane dans l'élimination de métaux transition thèse, Université Laval canada

[31] **OUCHENE. A 2022** efficacités de l'élimination des composés organiques simples par des procédés physicochimiques de traitement des eaux de surface, thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif 1

[32] **Mlle : Ben Amraoui Faouzia 2004** Elimination des colorants cationiques par des charbons actifs synthétisés à partir des résidus de l'agriculture. Magister Université Ferhat Abbas Sétif 1

[33] **ALOUI Hicham BERNOU Oussama 2020** Adsorption de la fuchsine basique sur des adsorbant naturels. Mémoire Master Université Mohamed Oulhadj - Bouira

[34] **[Laetitia. M 2005** Elaboration, caractérisation et étude des performances de nouveaux adsorbants hydrophobes : application aux atmosphères odorantes et/ou

chargées en composés organiques volatils thèse Université Jean Monnet de Saint-Étienne.

[35] **Hameed, B.H., Salman, J. M., et Ahmad, A. L.** (2009). Isotherme d'adsorption et modélisation cinétique du pesticide 2,4-D sur charbon actif dérivé de noyaux de dattes. *Journal of Hazard Materials*, doi : 10.1016/j.jhazmat.2008.06.069

[36] **Ghanbari, F., et Moradi, M.** (2016). Application du peroxymono sulfate et de ses méthodes d'activation à la dégradation des polluants organiques_: *Revue de génie chimique*, doi.org/10.1016/j.cej.2016.10.064

[37] **Katheresan, V., Kansedo, J., & Lau, S. Y.** (2018). Efficacité de diverses méthodes récentes d'élimination des colorants des eaux usées_: revue. *Journal of EnvironmentalChemicalEngineering*,6(4), 46764697.doi.org/10.1016/j.jece.2010

[38] **Ponomarëvka.AV.**2022 Décoloration radiolytique des solutions aqueuses de colorants alimentaires<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110357>,

[39] **Almeida .MR, Stephani. R, Dos Santos. HF, LFC Oliveira**2010, Étude spectroscopique et théorique du colorant « azoïque » E124 en phase condensée : mise en évidence d'une forme hydrazo dominante, <https://doi.org/10.1021/jp907473d>

[40] **De Keijzer .M, Van Bommel.M. R, Keijzer. R.H, Knaller.R, et Oberhumer. E,**2012 « Indigo carmine : Understanding a problematic blue dye », *Stud. Conserv.*,vol.57,nosup1,p.S87-S95,août2012,doi :10.1179/2047058412Y.0000000058

[41] **Selcuk .H,**2016 « Decolorization and de toxification of textile waste water by ozonation and coagulation processes », *Dyes Pigments*, vol. 64, no 3, p. 217-222, mars 2005, Dio : 10.1016/j.dyepig.2004.03.020

[42] **Oguz. E, Keskinler. B, et Celik. Z,**2005 « Ozonation of aqueous Bomaplex Red CR-L dye in a semi-batch reactor », *Dyes Pigments*, vol. 64, no 2, p. 101-108, févr. 2005, doi : 10.1016/j.dyepig.2004.04.009.

[43] **Santhy. K et Selvapathy. P,**2005 « Removal of reactive dyes from wastewater by adsorption on coir pith activated carbon », *Bioresour. Technol.*, vol. 97, no 11, p. 1329-1336, juill. 2006, doi: 10.1016/j.biortech.2005.05.016.

[44] **Gemeay. A.Z, I. A. Mansour, El-Sharkawy R. G., et Zaki A. B.,** « Kinetics and mechanism of the heterogeneous catalyzed oxidative degradation of indigo carmine », *J. Mol. Catal. Chem.*, vol. 193, no 1-2, p. 109-120, févr. 2003, doi: 10.1016/S1381-1169(02)00477-6.

- [45] **Flox. C, Ammar. S, Arias.C., Brillas. E, Vargas-Zavala A. V, et Abdelhedi. R,**2006 « Electro-Fenton and photoelectro-Fenton degradation of indigo carmine in acidic aqueous medium », *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 67, no 1-2, p. 93-104, sept. 2006, doi: 10.1016/j.apcatb.2006.04.020.
- [46] **Sriwong .C, Wongnawa. S, et Patarapaiboolchai. O,**2012 « Rubber sheet strewn with TiO₂ particles : Photocatalytic activity and recyclability », *J. Environ. Sci.*, vol. 24, no 3, p. 464-472, mars 2012, doi: 10.1016/S1001-0742(11)60794-8.
- [47] **Ahmed M. J. et Dhedan S. K.,**2012 « Equilibrium isotherms and kinetics modeling of methylene blue adsorption on agricultural wastes-based activated carbons », *Fluid Phase Equilibria*, vol. 317, p. 9-14, mars 2012, doi : 10.1016/j.fluid.2011.12.026.
- [48] **El Hannafi. N, Boumakhla M. A, Berrama. T, et Bendjama. Z,**2008 « Elimination of phenol by adsorption on activated carbon prepared from the peach cores : modelling and optimisation », *Desalination*, vol. 223, no 1-3, p. 264-268, mars 2008, doi : 10.1016/j.desal.2007.01.229.
- [49] **Baccar. R, M. Sarrà, Bouzid. J, Feki .M, et P. Blánquez,** « Removal of pharmaceutical compounds by activated carbon prepared from agricultural by-product », *Chem.Eng. J.*, vol. 211-212, p. 310-317, nov. 2012, doi: 10.1016/j.cej.2012.09.099.
- [50] **Liou T.-H,** 2010« Development of mesoporous structure and high adsorption capacity of biomass-based activated carbon by phosphoric acid and zinc chloride activation»,*Chem.Eng.J.*,vol.158,no2,p.129-142,avr.2010,doi:10.1016/j.cej.2009.12.6.
- [51] **Ouchene. A, Khelili .H, Guellal .M, Zouaoui. N, et Amrane. A,** « Preparation and characterization of new adsorbents of pea and bean agricultural peels for water purification loaded with organic tryptophan compound », *Desalination Water Treat.*, vol. 234, p. 206-221, sept. 2021, doi: 10.5004/dwt.2021.27656.
- [52] **Z Du, M Ji, R Li** 2012 Enhanced membrane fouling control and trace organic compounds removal during microfiltration by coupling coagulation and adsorption in an electric field. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148830>
- [53] **Lin. R, Li. Y, Yong. T, Cao. W, J Wu, Shen. Y** 2022 Synergistic effects of oxidation, coagulation and adsorption in the integrated fenton-based process for wastewater treatment : A review. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114460>
- [54] **Tolkou. AK, Zouboulis .AL** 2014 Review of Recent Patents on Coagulation / Flocculation (C/F) Process : Methods and Applications with Emphasis on Phosphates Removal. DOI:10.2174/1874464807666140714165608

- [55] **WA Al-Amrani, MAKM Hanafiah, AHA Mohammed** 2022 A comprehensive review of anionic azo dyes adsorption on surface-functionalised silicas. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23062-0>
- [56] **Khan .MD, Singh. A, Khan .MZ, Tabraiz. S, Sheikh. J** 2023 Current perspectives, recent advancements, and efficiencies of various dye-containing wastewater treatment technologies. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103579>
- [57] **Gupta. VK, Kumar. R, Nayak. A, Saleh. TA, MA Barakat** 2013 Adsorptive removal of dyes from aqueous solution onto carbon nanotubes : A review. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2013.03.003>
- [58] **Moradi. O, Sharma. G** 2021 Emerging novel polymeric adsorbents for removing dyes from wastewater : A comprehensive review and comparison with other adsorbents. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111534>
- [59] **Rashid. R, Shafiq. I, Akhter. P, MJ Iqbal, Hussain .H**2021 A state-of-the-art review on wastewater treatment techniques : the effectiveness of adsorption method. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12395-x>
- (60) Nourrirai .H, Zabihollahi. S** 2016 Removal of a common textile dye, navy blue (NB), from aqueous solutions by combined process of coagulation–flocculation followed by adsorption. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.1003102>

Résumé

La caractérisation des eaux résiduaires colorées des industries agroalimentaires, par l'analyse d'un certain nombre de paramètres physico-chimique et microbiologique, a montré la nécessité de traiter ces eaux. Dans cette étude nous avons opté pour un traitement combiné de coagulation floculation et adsorption à base de déchets de plantes reconnu d'emploi facile et peu coûteux. Comme il est compliqué de contrôler l'efficacité d'élimination de colorant par le contrôle de tous les paramètres, nous avons opté de suivre la coloration en tant que paramètre représentatif de la décoloration de l'eau étudiée. L'efficacité du traitement a atteint un taux supérieur à 99 % avec une dose de 200mg de coagulant, une quantité d'adsorbant d'environ 80 mg, un temps d'expérience de 30 min et pH de la solution égale 6.1. Par ailleurs, une meilleure optimisation de cette combinaison de traitement nécessite, le suivi de la concentration des facteurs clés dans ce processus tels que la DCO, COT.

Mots clés : eaux usées, électrocoagulation, adsorption, élimination, E124, colorants alimentaires.

Abstract:

The characterization of colored wastewater from the agri-food industry, through the analysis of several physico-chemical and microbiological parameters, has demonstrated the necessity of treating these waters. In this study, we opted for a combined treatment method involving coagulation-flocculation and adsorption using plant waste, known for being easy to use and low-cost. Since it is complex to monitor the efficiency of dye removal by tracking all parameters, we chose to monitor coloration as a representative parameter of the water decolorization process. The treatment efficiency reached a rate higher than 99% with a coagulant dose of 200 mg, an adsorbent quantity of approximately 80 mg, an experiment duration of 30 minutes, and a solution pH of 6.1. Furthermore, better optimization of this treatment combination requires monitoring the concentration of key factors in the process, such as COD and TOC.

Keywords: wastewater, electrocoagulation, adsorption, removal, E124, food dyes.

ملخص

إن المياه القذرة المنبعثة من المصانع التي تستعمل الملونات الغذائية تحتوي على كمية كبيرة من المواد العضوية كما أثبتتها التحاليل الفيزيوكيميائية والمكروبيولوجية لبعض الدراسات لذا وجب معالجتها. في هذه الدراسة، اعتمدنا على معالجة مركبة تجمع بين التخثير الكيميائي المعروفة بسهولة استخدامها وتكلفتها المنخفضة والامتزاز باستخدام مخلفات نباتية. ونظرًا لصعوبة التحكم في فعالية إزالة الصبغة من خلال ضبط جميع الخاصيات، فقد اخترنا تتبع تغير اللون كمؤشر تمثيلي لمدى إزالة اللون من المياه المدروسة. وقد بلغت كفاءة المعالجة نسبة تفوق 99% عند استخدام 200 مع من المخثر، كمية المادة تبلغ حوالي 80 ملغ، زمن

التجربة يقدر بـ 30 دقيقة، ودرجة حموضة للمحلول تساوي 6.1. من جهة أخرى، فإن تحسين هذا النظام المركب يتطلب تتبع تركيز بعض العوامل الأساسية في هذا النوع من المعالجة مثل الطلب الكيميائي على الأوكسجين (DCO) والكربون العضوي الكلي (COT).

الكلمات الدالة: المياه القذرة، التخثير الكيميائي، الامتزاز، الإزالة، E124، الملونات الغذائية.