

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أمحمد بوقرة بومرداس
Université M'hamed Bougara de Boumerdès



Faculté des Sciences
Département de Biologie

Mémoire de projet de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme de Master en

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Biochimie appliquée

Présenté et soutenue par :

BOUSNINA Assia

SEDDIK Soulef

Thème

**Traitement physico-chimiques et biologiques des eaux brutes
contaminées par des colorants**

Mme KORICHE Nesrine

Maître de conférences B FS-UMBB

Présidente

Mme AKROUM-AMROUCHE Dahbia

Maître de conférences B FS-UMBB

Promotrice

Mme LAHIANI- MEKNACI Sadjia

Maître de conférences B FS-UMBB

Examinatrice

2019/2020

DÉDICACE

Nous dédions ce modeste travail :

A nos chers, père et mère, qui sans eux rien n'aurait pu être fait,

A nos chers grands-parents,

A nos chers sœurs et frères,

A nos nièces et neveux,

A toute notre famille,

A toutes celles et ceux qui nous sont chers,

Et À tous ceux qui auront le plaisir de lire ce mémoire.

Remerciements

Tout d'abords, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné la volonté, la santé et le courage pour réaliser ce travail.

*Nous tenons à remercier particulièrement notre promotrice **Mme AKROUM-AMROUCHE Dahbia**, Maître de conférences à l'Université de Boumerdès UMBB, pour avoir proposée le sujet et pour avoir dirigée ce travail, pour sa gentillesse, son soutien et la qualité de ses conseils apportés à ce mémoire, ainsi pour le temps précieux qu'elle a bien voulu nous consacrer. Tous nos sincères respects.*

*Nous voulons adresser nos vifs remerciements à **Mme KORICHE Nesrine**, Maître de conférences à l'Université de Boumerdès UMBB, pour avoir accepté d'être le président de notre jury de mémoire et à qui nous exprimons notre profond respect.*

*Nous remercions également grandement **Mme LAHLIANI- MEKNACI Sadjia**, Maître de conférences à l'Université de Boumerdès UMBB, d'avoir accepté d'examiner notre travail et à qui nous exprimons notre profonde gratitude.*

Nous souhaitons remercier SEAAAL de Boumerdès, qui nous a ouvert ses portes. Merci à tout le personnel du laboratoire de procès du centre de traitement d'eau «SEAAAL de Boudouaou », pour leurs gentillesse à nos égards.

Enfin merci à tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé directement ou indirectement à l'élaboration de ce mémoire.

ملخص :

الهدف من هذا العمل هو دراسة التقنيات المختلفة لمعالجة المياه الملوثة بالأصبغ و مدى فعاليتها. عادة ما تتم معالجة مخلفات المنسوجات عن طريق عملية فيزيائية كيميائية مقترنة بالمعالجة البيولوجية. إن جودة النفايات السائلة التي يتم الحصول عليها تخضع لمعايير إعادة التدوير أو التصريف في البيئة الطبيعية و تحقيقاً لهذه الغاية يتم اقتراح أنواع مختلفة من معالجة المياه لإزالة الأصبغ: تخضع أولاً للمعالجة المسبقة وهي معالجة فيزيائية تليها معالجة فيزيائية كيميائية (ترسيب ، تخثر / تلبد ، تعويم وترشيح) ثم المعالجة البيولوجية (الهوائية = في وجود الأكسجين واللاهوائية = في غياب الأكسجين) ، وأخيراً تهدف المعالجة الثالثة إلى تحسين الجودة العامة للمياه. تتطلب إزالة التلوث وإزالة لون الماء استخدام عدة تقنيات ولكن الامتزاز هو الطريقة الأكثر استخداماً بفضل كفاءته العالية وانخفاض تكلفته.

كلمات مفاتيح : تنقية المياه،الأصبغ ، التخثر ، الامتزاز ، التحسين

ABSTRACT :

The aim of this work is to study the different techniques of the treatment of water contaminated by dyes and their effectiveness.

The treatment of textile rejects is usually done via a physicochemical process coupled with biological treatment. The quality of the effluent obtained hardly obeys the standards of recycling or discharge into the natural environment. To this end, different types of water treatment to remove dyes are proposed: they first undergo a pre-treatment, it is a physical treatment followed by a physico-chemical treatment (settling, coagulation / flocculation, flotation and filtration), biological treatment (aerobic and anaerobic) and finally tertiary treatments aim to optimize the general quality of the water.

Depollution and decoloration of water requires the use of several techniques but adsorption is the most used method thanks to its high efficiency and lower cost.

Key Words: water treatment, dyes, coagulation, adsorption, optimization

Résumé :

Le but de ce travail consiste à l'étude des différentes techniques des traitements des eaux contaminées par les colorants et leur efficacité.

Le traitement des rejets textiles se fait habituellement via une filière physico-chimique couplée à un traitement biologique. La qualité de l'effluent obtenu obéit difficilement aux normes de recyclage ou de rejet dans le milieu naturel. Dans cet objectif, différentes types de traitement des eaux sont utilisés afin d'éliminer les colorants sont proposées : en premier lieu d'un prétraitement, physique suivi d'un traitement physico-chimique (décantation, coagulation/floculation, flottation et filtration) et biologique (aérobie et anaérobie) et enfin des traitements tertiaires visent à l'optimisation de la qualité générale de l'eau.

La dépollution et la décoloration de l'eau exigent l'utilisation de plusieurs techniques mais l'adsorption est la méthode la plus employée grâce à sa grande efficacité et son moindre coût.

Mots clés : Traitement des eaux, coagulation, colorants, adsorption, optimisation.

TABLE DES MATIÈRES

Liste des Tableaux

Liste des Figures

Liste des abréviations

Introduction 1

Chapitre I : Partie bibliographique

I.1.Les ressources en eaux et les principaux polluants	3
I.1.1. Les ressources en eaux	3
I.1.2.Pollution des eaux naturelles	4
I.2.Les procédés de traitement des eaux brutes et des eaux usées	7
I.2.1.Les prétraitements	7
I.2.2.Traitement primaire (physico-chimique)	8
I.2.2.1La Décantation	8
I.2.2.2.Coagulation – Flocculation	10
I.2.2.3. Flottation	15
I.2.2.4.Filtration	15
I.2.3. Traitement secondaire ou traitement biologique	16
I.2.4. Traitement tertiaire	20
I.3.Les colorants textiles	20
I.3.1.Introduction	20
I.3.2. Définition	21
I.3.3.Classification.	22
I.3.3.1.Classification chimique	22
I.3.3.2.Classification tinctorial	23
I.3.3.3. Colorant thiazine	24
I.3.3.4. Classification selon la nature	24
I.3.4. Les colorants et leur impacte	25
I.3.4.1.Bioaccumulation	25
I.3.4.2.L'impacte sur l'environnement	25
I.3.4.3.L'impacte sur la sante	26
I.3.4.4. Législation sur l'environnement	26

I.3.5. Elimination des colorants	27
I.3.5. 1. Traitement physique	27
I .3.5.1.1. La coagulation-floculation	27
I .3.5.1.2. L'adsorption	27
I.3.5.1.2.1. Définition	27
I.3.5.1.2.2. Nature de l'adsorption	28
I.3.5.1.2.3. Mécanismes d'adsorption	29
I.3.5.1.2.4. La Cinétique d'adsorption	30
I.3.5. 2. Traitement chimique	31
I.3.5. 3. Traitement biologique	32

Chapitre II. Matériel et méthodes

II.1.Introduction	35
II.2.Source et nature des eaux à traiter	35
II.3.Colorant étudié	36
II .3.1. Le bleu de méthylène	36
II 3.2. Propriétés physico -chimiques du bleu de méthylène	36
II.4.Caractérisation physico-chimique et minéralogique des adsorbants et des biosorbants	37
II.5.Optimisation du traitement de l'eau contaminée	38
II.6.Modélisation	39
II.7.Etude comparative	39

Chapitre III. Discussion

III.1. Introduction	40
III.2. Les utilisation et les données toxicologiques du BM	40
III.3. Optimisation des paramètres physicochimiques	41
III.4. Approches pour l'amélioration de l'adsorption et du biosorption	41
III.5. La cinétique et le mécanisme d'adsorption du bleu de méthylène	42

Conclusion générale	44
----------------------------	----

Références bibliographiques	45
------------------------------------	----

Annexes	51
----------------	----

Liste des tableaux

Tableau I.1	Principales différence entre eaux de surface et eaux souterraines.	4
Tableau I.2	Les différents polluants.	5
Tableau I.3	Temps de sédimentation pour différentes particules, d'après la loi de Stokes	9
Tableau I.4	Les étapes de l'agrégation.	12
Tableau I.5	Types de coagulants/floculants utilisés	13
Tableau I.6	Principaux groupes chromophores et auxochromes classés par intensité croissante	22
Tableau I.7	Valeurs limites de quelques paramètres pour les effluents textiles	26
Tableau I.8	Comparaison entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique	29
Tableau I.9	Points d'échantillonnage des différentes étapes de traitement de laboratoire Boudouaou	35
Tableau II.1	Propriétés physico -chimiques du BM	36
Tableau II.2	Les paramètres à mesurer et les appareils à utiliser.	39

Liste des figures

Figure I.1	Etats dispersés- états dissous.	6
Figure I.2	Schéma d'un décanteur à flux verticaux et à flux horizontal.	9
Figure I.3	Phénomène de coagulation-floculation.	10
Figure I.4	Structure de la montmorillonite.	12
Figure I.5	Composition de la boue activée.	17
Figure I.6	<i>Pseudomonas</i> au microscope électronique à balayage.	17
Figure I.7	Lagunage naturel.	18
Figure I.8	Conséquences de la bioaccumulation après déversement de substances toxiques (insecticides) dans un cours d'eau.	25
Figure I.9	l'impacte de l'industrie textile sur l'environnement.	26
Figure I.10	Schéma simplifié représentant le phénomène d'adsorption.	28
Figure I.11	Schéma du mécanisme de transport d'un adsorbat au sein d'un grain.	30
Figure I.12	Structures chimiques du DB38 et des métabolites microbiens produites	34
Figure II.1	Bleu de méthylène	36

Liste des Abréviations :

An : année
ATG : l'analyse thermogravimétrique
BHAA: bactéries hétérotrophes aérobies et anaérobies
BM : bleu de méthylène
Ca⁺² : calcium
CAC : charbon actif commercial
Cl⁻ : chlore
CO₂: dioxyde de Carbone
CO: cobalt
Cu : cuivre
DBO₅ : demande biochimique en oxygène pendant 5 jours
DCO : demande chimique en oxygène
DRX : diffraction des rayons X
FeSO₄ :sulfate de fer
g/l : gramme par litre
H : hydrogène
HAC : charbon actif mésoporeux
H₂O : l'eau
HRS : haloxylon recurvum
IR : infrarouge
K : kelvins (unité de température)
K⁺ : potassium
kcal : kilocalorie
kJ : kilojoule
kg : kilogramme
M : masse
MES : matières en suspension
mg : milligramme
Mg⁺² : magnésium
m/h : mètre par heure
ml : millilitre
MnP : peroxydase de manganèse
mol : quantité de matière
nm : nanomètre
N° : numéro
Na⁺ : sodium
NaOH : hydroxyde de sodium
NH₄⁺ :ion ammonium
Ni : nickel
NO₂⁻: dioxyde d'azote
NO₄⁻: peroxy-nitrate
O₂: Oxygène
O₃: l'ozone
PH : Potentiel hydrogène

PO₄⁻: Phosphate

POA : Procédés d'oxydation avancée

Phz : Point de détermination de zéro charge

Pt : Platine

S : Seconde

SO₄⁻²: Sulfate

SPC : Sous produit

T: Température

THM : Trihalométhanes

UV: Ultraviolet

V : Volume

λ: Longueur d'onde

INTRODUCTION

L'eau est une ressource élémentaire à la vie, elle est indispensable, pour l'homme, on l'utilise pour des usages quotidiens (la potabilisation, l'agriculture, l'hygiène et l'industrie).

L'accroissement des activités humaines dans les domaines industrielles, urbaines ou agricoles provoque une menace sur les ressources en eau douce et la pollution de l'eau. Il est nécessaire de limiter et de traiter ces polluants en mettant en place un moyen de traitement adapté, efficace et économique (Sibeud, 2015).

Les colorants sont les polluants les plus importants, ils ont une structure moléculaire complexe et ils sont classés en deux familles soluble et insoluble dans l'eau. Les colorants solubles dans l'eau sont néfastes en raison de leur toxicité, une fois dissous dans l'eau, ils seront plus stables ce qui les rend parfois difficile à être traité et à être biodégradé, à titre d'exemple, si les teintures synthétiques utilisées en industrie textile sont déversées dans l'environnement aquatique sans aucun traitement préalable, ils vont s'accumuler dans l'écosystème et peuvent constituer une grande menace pour notre santé et pour notre environnement. (Hedi Ben Mansour et *al.*, 2011)

De nombreux travaux ont été réalisés sur la dépollution et la décoloration de l'eau au cours de ces dernières années en utilisant plusieurs techniques tels que la coagulation et la floculation, la filtration, l'oxydation, l'électrochimie, l'électrocoagulation, l'échange d'ions cationique et anionique, les procédés biologiques, la biodégradation, la biosorption et l'adsorption. L'adsorption est la méthode la plus employée en utilisant des matériaux adsorbants solide tels que le charbon actif, argiles, bentonites, zéolites, biomatériaux, qui permettent de piéger les colorants (Degremont, 1989).

La recherche et la valorisation des adsorbants efficaces, des biomatériaux biodégradables et bon marché et la détermination des conditions opératoires optimales constituent une importante voie de recherche pour l'élimination des polluants de l'eau.

C'est dans cette optique que le thème de ce mémoire a été proposé. Notre but de travail sera focalisé principalement sur la :

1. Caractérisation des eaux brutes ;
2. Etude de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux aux différentes phases de traitement de potabilisation des eaux brutes à la station de Boudouaou;
3. Optimisation de l'élimination des colorants des eaux brutes par adsorption sur des adsorbants et

biosorbants brutes et modifiés;

4. Modélisation ;
5. Caractérisation des eaux traitées (après élimination optimale des colorants);
6. Etude de l'efficacité du traitement (étude comparative).

Ce mémoire est subdivisé en trois parties :

La première partie concerne une étude bibliographique renfermant des généralités sur :

- Les ressources en eaux, leurs principaux polluants et les procédés de traitement envisagés.
- Les colorants textiles, leur classification et impact.
- Traitement physico-chimique et biologique des eaux contaminées par les colorants.

La seconde partie de ce travail concerne l'expérimental où les différents instruments, méthodes de caractérisation et du dosage sont présentés.

La dernière partie du travail concernera donc la discussion des résultats rapportés dans la littérature par des auteurs qui travaillent sur ce domaine d'étude.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale qui récapitule l'essentiel du travail.

Chapitre I. Partie bibliographique

I.1. Les ressources en eaux et les principaux polluants

I.1.1. Les ressources en eaux

On retrouve trois sources principales d'eaux brutes : les eaux de surface, les eaux souterraines et les eaux de mer. Les caractéristiques générales de chacune de ces sources reflètent l'interaction de l'eau et du milieu environnant (Kais, 2018).

➤ Les eaux de surface et les eaux souterraines

Les eaux de surface ont pour origines soit les eaux souterraines (par une résurgence, source), soit les eaux de ruissellements, soit les eaux de pluie. Elles se retrouvent stockées dans des réservoirs naturels (eaux de rivière, eaux de rivière et eaux de lac) ou artificiels (barrages), de profondeur variable (Maaliou, 2013). Ces eaux sont toujours en mouvement avec une vitesse variable (Kais, 2018). La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par l'eau durant son parcours dans l'ensemble des bassins versants. Par échange à la surface eau-atmosphère, ces eaux se chargent en gaz dissous (oxygène, azote, gaz carbonique).

Les eaux souterraines, enfouies dans le sol, sont habituellement à l'abri des sources de pollution. Puisque les caractéristiques de ces eaux varient très peu dans le temps. Les usines de purification n'ont pas à résoudre les problèmes dus aux variations brusques et importantes de la qualité de l'eau brute (Kais, 2018). La porosité et la structure du terrain déterminent le type de nappe et le mode de circulation souterraine. Une nappe peut être libre. Elle est alors alimentée directement par l'infiltration des eaux de ruissellement. Une nappe peut être captive. Elle est alors séparée de la surface du sol par une couche imperméable. Elle est généralement plus profonde. Un cas particulier est représenté par les nappes alluviales: ce sont les nappes situées dans les terrains alluvionnaires sur lesquels circule un cours d'eau. La nature géologique du terrain a une influence déterminante sur la composition chimique de l'eau retenue. Elles sont souvent d'une grande pureté bactériologique (Maaliou, 2013, Valiron, 1994, Alain, 2006, Degremont, 2005). Le tableau I.1 donne les éléments caractéristiques des eaux de surface par rapport aux eaux souterraines (Maaliou, 2013).

Tableau. I.1: Principales différences entre eaux de surface et eaux souterraines (Degremont, 2005).

<u>Turbidité</u>	Variable, parfois élevée	Faible ou nulle (sauf en terrain karstique)
<u>Couleur</u>	Liée surtout aux matières en suspension MES sauf dans les eaux très douces et acides (acides humiques)	Liée surtout aux matières en solution (acides humique...)
<u>Minéralisation globale</u>	Variable en fonction des terrains, des précipitations, des rejets...	Sensiblement constante en général nettement plus élevée que dans les eaux de surface de la même région
<u>Fer et Manganèse dissous</u>	Généralement absents	Généralement présents
<u>Nitrates</u>	Peu abondants en général	Teneur parfois élevée
<u>Micropolluants minéraux et organiques</u>	Présents dans les eaux de pays développés, mais susceptibles de disparaître rapidement après suppression de la source	Généralement absents mais une pollution accidentelle subsiste beaucoup plus longtemps
<u>Éléments vivants</u>	Bactéries, virus	Ferro-bactéries fréquentes

➤ Eaux de mer et eaux saumâtres

Les mers et les océans constituent des énormes réservoirs d'eau, elles représentent près de 97.4% du volume d'eau existant actuellement sur notre planète, le reste est la part des eaux continentales (eaux souterraine et superficielles). Lorsqu'il n'y a pas moyen de s'approvisionner en eau douce, il est parfois nécessaire de recourir à des eaux de mer (salinité moyenne de 35 g/l) ou même les eaux saumâtres (1 et 10 g/l de sels). Pour dessaler ces eaux, les principales techniques sont à membranaire : l'électrodialyse ou l'osmose inverse. Mais elles sont coûteuses et consomment beaucoup d'énergie (Valiron, 1994, Alain, 2006).

I.1.2. Pollution des eaux naturelles :

La pollution des eaux se définit par la dégradation de leur qualité naturelle et pure qui est souvent provoquée par l'activité humaine. Ceci constitue un problème universel car elle compromet la santé et menace l'avenir d'un développement durable.

❖ Origine de la pollution des eaux naturelles

La pollution des eaux procède de plusieurs origines :

➤ Industrielle, elle concerne les rejets industriels sous forme insoluble ou soluble d'origine minérale

et/ou organique, à caractère plus ou moins biodégradable et parfois toxique même à très faible concentration (Jean-Claude, 2001).

- Agricole, elle concerne surtout l'épandage d'engrais chimiques (nitrates, phosphates), les herbicides, insecticides, les excédants de déjection animale provenant d'effluents d'élevages, et les sels nutritifs qui favorisent la prolifération des algues qui abaissent le taux d'oxygène et gêne la vie aquatique lors de l'eutrophisation. Ces produits vont contaminer en période de pluie les eaux de surface et les eaux souterraines par infiltration. (Collas R., 1977, Leclech B., 1998). De même, l'eau de pluie n'est pas totalement pure, elle se charge d'impuretés au contact de l'air (fumées industrielles) (Sibeud, 2015).
- Domestique, les eaux usées domestiques se présentent comme un mélange complexe de matières non dissoutes dans une solution aqueuse de matières organiques (graisses, savons, protéides et glucides) et minérales (Guereneand Gamella, 1978).
- Naturelle, les composés inorganiques comme le baryum, l'arsenic, les fluorures, le sodium, les chlorures, le mercure, le cadmium et les cyanures peuvent contaminer l'eau potable (Joris, 2011).
- Induite par les substances associées au traitement de l'eau, le chlore, en présence de matières organiques, entraîne la formation de plusieurs sous-produits de chloration (SPC) potentiellement cancérogènes comme par exemple les trihalométhanes (THM). Le sulfate d'aluminium à des concentrations élevées dans l'eau traitée a été étudié en relation avec la maladie d'Alzheimer.

❖ Les principaux polluants des eaux naturelles

Les principaux polluants des eaux naturelles sont représentés dans le Tableau I.2 :

Tableau I.2: Les différents polluants.

Matières physiques	pH, MES, Température
Matières minérales	Résidu sec, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^-
Matières organiques	Oxygène dissous, DBO_5 , DCO, M. organique
Matières azotées	NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-
Matières phosphorées	PO_4^{3-}

La pollution physique : représente les éléments solides entraînés par l'eau. Ils se subdivisent en, éléments grossiers (les brindilles, les feuilles, les arbres...etc), les sables (Claude, 1999); les matières en suspension (MES) (quartz, d'argiles, de sels minéraux insolubles, de particules organiques composées de micro-

organismes, et de produits de dégradation animaux ou végétaux), Figure I.1 (Emsalem, 1986).

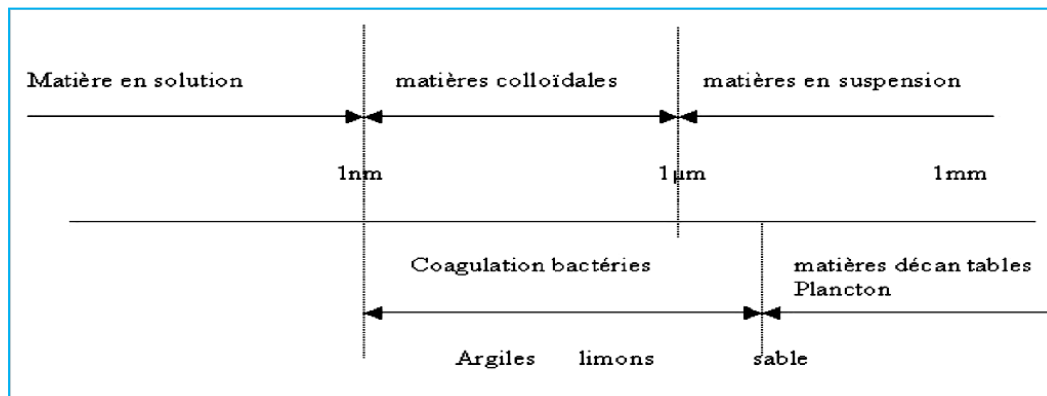


Figure I.1 : Etats dispersés- états dissous.

Polluants chimiques : On distingue selon la nature de la pollution chimique :

➤ les éléments chimiques minéraux :

- Les nitrates (NO_3^-) : Les nitrates se transforment en nitrite dans l'estomac. Ces nitrites peuvent provoquer la transformation de l'hémoglobine du sang en méthémoglobine, impropre à fixer l'oxygène. Ce phénomène est à l'origine de cyanoses, notamment chez les nourrissons. La consommation d'eau chargée en nitrates ou nitrites par la femme enceinte ou le nourrisson peut constituer un risque pour le nouveau-né (Cardot, 1999).
- Les chlorures : en plus de l'agressivité et de la minéralisation qu'ils confèrent à ces eaux, des taux élevés modifient la saveur de l'eau et contribuent aux dépôts de sels néfastes pour l'agriculture.
- Les sulfates (SO_4^{2-}) : les sulfates Participent aux métabolismes des bactéries sulfato-réductrice qui transforment les sulfates en sulfures avec dégagement de gaz sulfureux (œufs pourris) créant des désagréments à l'environnement (Claude, 1999).
- Les métaux lourds : il faut citer le plomb, le mercure, le cadmium, l'arsenic, le cuivre, le zinc et le chrome. Ces métaux se trouvent à l'état naturel dans le sol, sous forme de traces qui posent peu de problèmes (Robert, 2015).

➤ les éléments chimiques organiques (Bouziani, 2000, Robert, 2015) : Elles se classent en 6 groupes principaux: substances humiques, acides hydrophiliques, acides carboxyliques, peptides et amino-acides, hydrates de carbone et hydrocarbures (Degremont, 2005). D'origine naturelle provenant de la décomposition des organismes végétaux ou animaux vivant à la surface du bassin versant ou dans la rivière et qui se décomposent après leur mort (végétaux, animaux...) (Maaliou, 2013). On trouve également des substances organiques provenant des activités urbaines. Les substances organiques

sont caractérisées analytiquement soit par la mesure d'indices globaux (*L'oxydabilité au permanganate et le carbone organique total*), soit par la mesure de groupes réactionnels, soit encore par la mesure de substances bien définies (Degremont, 2005).

Polluants microbiologiques : L'eau peut contenir des micro-organismes pathogènes (des virus, des bactéries, des parasites). Ils sont dangereux pour la santé humaine, et limitent donc les usages que l'on peut faire de l'eau.

I.2. Les procédés de traitement des eaux brutes et des eaux usées:

L'épuration des eaux usées s'effectue au niveau des stations d'épuration, ce traitement est nécessaire pour les rendre propres et sécuritaires et pour protéger l'environnement et la santé publique ainsi que la santé animale de tout danger. À la sortie de la station, il résulte d'une part une eau épurée rejetée dans le milieu naturel et d'autre part, il reste des sous-produits désignés sous le terme des boues résiduelles (F.A.O., 2003 ; Amir, 2005).

La potabilisation des eaux brutes s'effectue au niveau des stations de potabilisation, où les eaux des barrages subissent différents types de traitements.

Il existe trois techniques principales pour épurer les eaux, s'appliquant tant au traitement des eaux usées qu'à la production d'eau potable :

1. les procédés physico-chimiques (les prétraitements les traitements primaires et la désinfection, essentiellement réservées à la production d'eau potable) ;
2. les procédés biologiques ;
3. les procédés chimiques, qui se basent sur l'oxydation des composés. Ils sont très efficaces mais également onéreux. Les produits les plus utilisés sont l'ozone et des composés chlorés.

I.2.1. Les prétraitements:

Les prétraitements sont des traitements physiques ou mécaniques destinées à extraire et à séparer le maximum d'éléments solides et des matières volumineuses ou flottantes des eaux non traitées, telles que (morceaux de bois, plastiques, feuilles, sables, graisses, bouteilles ...etc.)(Degremont, 2005). L'eau passe dans des tamis de maille de plus en plus fines. On peut citer par ordre 3 étapes d'apparition des prétraitements, présentes ou non selon les besoins, à savoir:

- **Le dégrillage** : Les eaux passent au travers d'une grille dont les barreaux, plus ou moins espacés, retiennent les matières les plus volumineuses et flottantes charriées par l'eau brute, qui pourraient

nuire à l'efficacité des traitements suivants ou en compliquer leur exécution. Le dégrillage permet aussi de protéger la station contre l'arrivée intempestive des gros objets susceptibles de provoquer des bouchages dans les différentes unités de l'installation. Les éléments retenus sont, ensuite, éliminés avec les ordures ménagères.

- **Le dessablage** : Le dessablage a pour but d'extraire des eaux brutes les graviers, les sables et les particules minérales plus ou moins fines, de façon à éviter les dépôts dans les canaux et conduites, ainsi pour protéger les pompes et autres appareils contre l'abrasion et à éviter de surcharger les stades de traitements ultérieurs en particulier les réacteurs biologiques. L'écoulement de l'eau, à une vitesse réduite, dans un bassin appelé "désableur" entraîne leur dépôt au fond de l'ouvrage. Les sables récupérés, par aspiration, sont ensuite essorés, puis lavés avant d'être soit envoyés en décharge, soit réutilisés selon la qualité du lavage.
- **Le dégraissage déshuilage** : Le déshuilage est une opération de séparation liquide-liquide, alors que le dégraissage est une opération de séparation solide-liquide (à la condition que la température de l'eau soit suffisamment basse, pour permettre le figeage des graisses). Ces deux procédés visent à éliminer la présence des corps gras dans les eaux, qui peuvent gêner l'efficacité du traitement biologique qui intervient en suite
- **Oxydation**: Si la charge organique est très importante ou s'il y a de l'ammoniaque, du fer ou du manganèse en solution, l'oxydation facilite leur élimination lors de la phase de clarification. Cette étape d'oxydation peut se faire avec du chlore ou de l'ozone.

I.2.2 Traitement primaire (Clarification):

La clarification fait appel à des procédés physico-chimiques. Ces traitements sont :

I.2.2.1. La Décantation

En soumettant l'eau à un ralentissement important ou à un repos relatif suffisamment long, il est possible de la débarrasser d'une fraction substantielle de sa charge de matières en suspension MES. En supprimant la turbulence, on permet aux particules en suspension et colloïdales rassemblées dans les flocons, plus lourdes que l'eau, de se sédimenter (Tableau I.3). Cette opération est plus communément appelée : la décantation (Beaudry, 1984). La décantation est assurée par un ouvrage appelé décanteur), (**Figure I.2**)(Mouchet, 1991 ; Edeline, 1992 ; Maaliou, 2013).

Tableau.I.3 : Temps de sédimentation pour différentes particules, d'après la loi de Stokes (Degremont, 1989).

Type de particules	Diamètre (mm)	Temps de décantation pour 1 m d'eau
Graviers.	10 000	1 s
Sables.	1 000	10 s
Sables fins.	100	2 min
Argiles.	10	2 h
Bactéries.	1	8 j

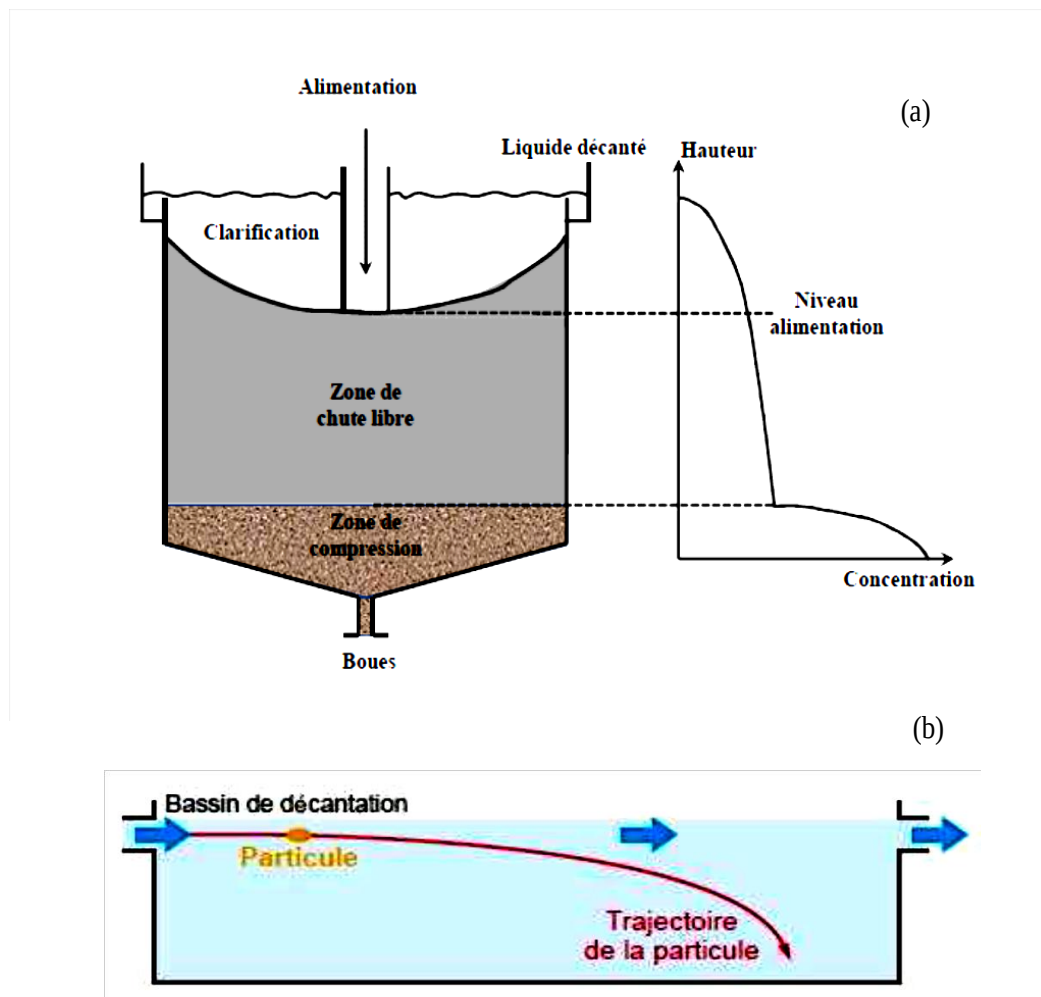


Figure I.2: Schéma d'un décanteur à flux verticaux (a) et à flux horizontal (b) (Bernard Pironin, 1997)

Par ailleurs, il est important de préciser pour qu'une décantation particulaire soit efficace, l'écoulement de l'eau à l'intérieur du décanteur doit être laminaire (Kemmer, 1984).

On distingue deux types de matières décantables selon leur concentration en solides et leur nature (densité et forme) :

- **Les particules grenues** (*décantation de particules discrètes ou individuelle*) qui conservent les mêmes dimensions au cours de leur chute, elles sédimentent indépendamment les unes des autres avec une vitesse de chute constante.
- **Les particules coalescentes** s'agglomèrent pendant la sédimentation, on distingue : la décantation diffuse et la décantation en piston (Desjardinsr, 1990, Mohand-Said O., 2001, BaouiaKais, 2018).

I.2.2.2.Coagulation – Flocculation:

La coagulation-floculation est un procédé de traitement physico-chimique d'épuration de l'eau, utilisé pour le traitement de potabilisation ou le traitement d'eau usée. Son principe repose sur la difficulté qu'ont certaines particules de très faible diamètre à se décanter naturellement et qui sont responsable de la couleur et la turbidité d'une eau de surface: les colloïdes (Figure I.3).

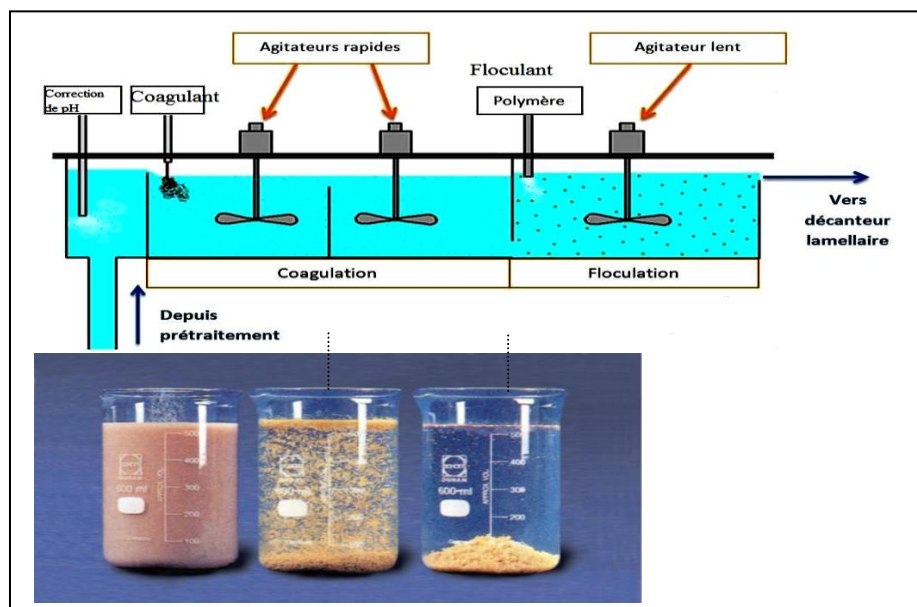


Figure I.3: Phénomène de coagulation-floculation

Ce procédé consiste à ajouter à l'eau un électrolyte permettant de transformer la suspension colloïdale en des particules plus importantes et aptes à sédimenter. Pour optimiser ce procédé, il faut tenir compte de plusieurs variables en relation, comme le pH, la dose de coagulant, les conditions de mélange et la température.

Ce procédé est le résultat de deux actions distinctes (Tableau I.4), (Degremont, 2005) :

- L'adjonction d'un réactif chimique « *le coagulant* » (Tableau I.5), à une eau permet la déstabilisation des particules par neutralisation de leurs charges électriques répulsives donc l'annulation du potentiel électrostatique des particules et permettre leur rencontre: c'est la « **coagulation** », et
- La formation de flocons, dépendante du transport et de la mise en contact des particules déstabilisées constitue « **la floculation** ». La floculation est l'agglomération de ces particules déchargées en micro- floccules, puis en flocons volumineux et décantables. Cette floculation peut être améliorée par l'ajout d'un autre réactif : « *le flocculant ou adjuvant de floculation* » (Tableau I.5), exemple la bentonite (des silicates d'alumine hydratés appartenant au groupe des Montmorillonites, Figure I.4). Les *adjuvants* sont des colloïdes de même charge que les particules à floculer. Deux phénomènes de transport régissent la floculation (Tardat-Henry and Beaurio, 1984, Kettab, 1992) :
 - La floculation péricinétique liée à la diffusion brownienne (agitation thermique).
 - La floculation orthocinétique est liée à l'énergie dissipée. L'efficacité de cette floculation qui permet d'obtenir le floc volumineux séparable est donnée dans la pratique par le gradient de vitesse correspondant au régime turbulent (Edeline, 1992, Cornet, 1981, Bottero, Lartiges, 1992, Thebault, 1978).

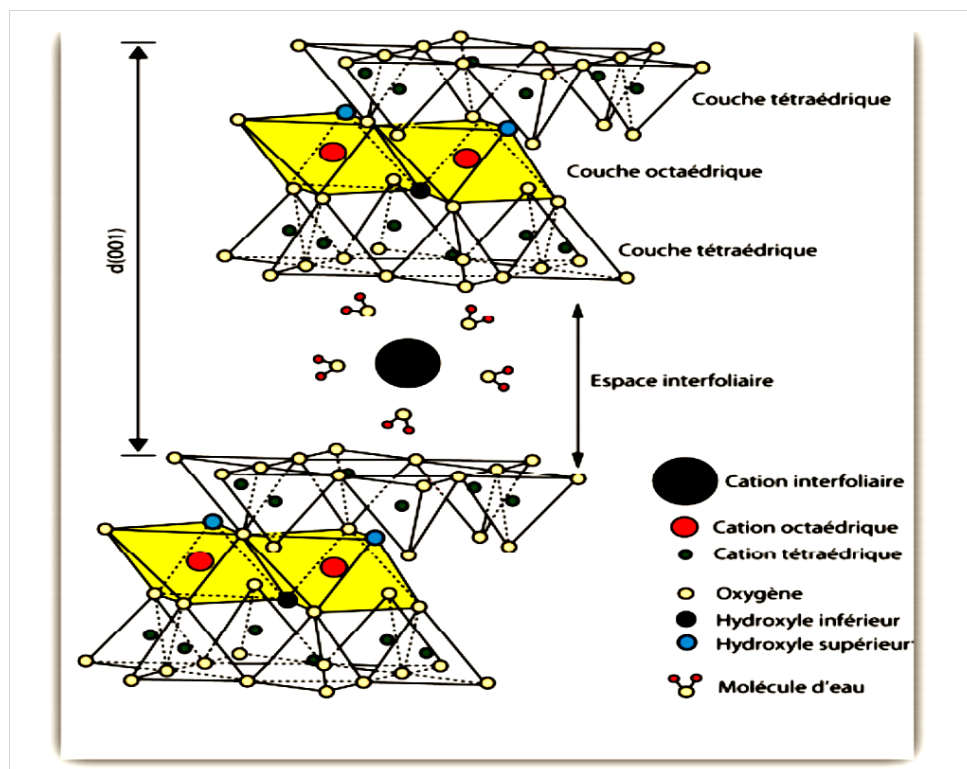


Figure I.4 : Structure de la montmorillonite (Grim, 1968)

Tableau I.4: Les étapes de l'agrégation (Degremont, 2005)

Stade		Phénomène	Terminologie
Coagulation	Ajout du coagulant	Réaction avec l'eau : ionisation, hydrolyse, polymérisation.	Hydrolyse
	Déstabilisation	Compression de la double couche électrique	Coagulation
		Adsorption spécifique d'ions du coagulant à la surface de la particule	
		Inclusion du colloïde dans un précipité d'hydroxyde	
		Liaison interarticulaire par des espèces polymériques du coagulant	
Floculation	Transport de la particule (contact entre les particules)	Mouvement brownien	Floculation péricinétique
		Energie dissipée (gradient de vitesse)	Floculation orthocinétique

Tableau. I.5 : Types de coagulants/floculants utilisés

Coagulants/ Floculants	Composition chimique /réaction	avec la molécule d'eau	Propriétés	Références
Coagulants				
Sels d'aluminium	Sulfate d'aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3, 18\text{H}_2\text{O}$).	Formation de polychlorure d'aluminium: $\text{Al}_n(\text{OH})_m(\text{SO}_4)_k \text{Cl}_{3n-m-2k}$ Formation de polychlorures basiques d'aluminium : $[\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}]_n$		(Lefebvre, 1990, Seghiri, 1996)
Sels de fer	chlorure ferrique ($\text{FeCl}_3, 6\text{H}_2\text{O}$) Chlorosulfate ferrique : FeSO_4Cl Sulfate ferreux: $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3, 9\text{H}_2\text{O}$.		plus coûteux que le sulfate d'aluminium et il peut induire une coloration de l'eau traitée	(Sibeud Elisabeth 2015, Maaliou, 2013)
Les adjuvants				
Charbon actif	charbon minéral, du coke et du lignite	-peut enlever de l'eau la plupart des matières organiques solubles. - moins efficace vis-à-vis des polluants minéraux -Sa combinaison avec l'ozone s'avère le meilleur procédé en nature d'affinage. - Améliore le goût et l'odeur de l'eau	-en poudre, il est injecté directement dans la floculo-décanteur ; - en granulés, l'adsorption est réalisée sur des filtres, en traitement tertiaire	(Degremont, 2005, Mouchet, 1991)

Les bentonites (roches argileuses d'origine volcanique: composée de feuillets complexes à trois couches, séparés par des molécules d'eau	plus de 75 % de montmorillonite c'est des phyllosilicates de formule de base : $4\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, -sa teinte (blanche, grise ou légèrement jaune) dépend des composés organique et oxydes des métaux	- Le pouvoir gonflant au contact de l'eau (5 à 30 fois son volume initiale) ; - l'adsorption d'eau et la fixation de cations sont très élevées -Elles forment avec l'eau des solutions colloïdales qui flocculent lorsque les charges de	-une capacité élevée d'adsorption, d'échange ionique et de gonflement	(Kanouri and Labide, 2012/2013, Mouaziz, 2012,Bougda h, 2007, Abdelouhab et al. 1988, Bouras, 2003, Meier. et al, 1999, Sadki et al., 2014, Amirouche, 2011)
<i>Bentonites sodiques naturelles</i>	le sodium est le cation échangeable majoritaire,	surface des particules sont neutralisées par des ions. Ce phénomène est réversible: les particules retrouvent l'état dispersé lorsque les ions sont éliminés par rinçage	un fort pouvoir de gonflement et d'adsorption	
<i>Bentonites calciques naturelles</i>	où le calcium est le cation échangeable majoritaire,	- Grâce à ce pouvoir d'adsorption, elles désintoxiquent en captant les virus, les bactéries et les pesticides et autres molécules indésirables.	un pouvoir de gonflement et d'adsorption plus faible que les bentonites sodiques.	
<i>Bentonites actives:</i>	-Bentonites calciques sont activées par du carbonate de sodium	- Elles sont capables de fixer certaines protéines instables et permettent ainsi leur élimination	les propriétés d'adsorption améliorées	
	-Bentonites sodiques sont activées par des acides		L'activation avec des acides augmentent la capacité d'adsorption et la porosité par dissolution périphérique des smectites.	

La connaissance de la chimie des coagulants et les flocculants minéraux et organiques, de leur structure et des mécanismes d'interaction avec les minéraux sont nécessaires afin d'optimiser les procédés (Thebault, 1978). 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. Quand la turbidité de l'eau est trop faible, on peut augmenter la concentration en particules par addition d'argiles. Dans le cas de fortes pluies, l'augmentation des MES favorise une meilleure décantation. Enfin, pour grossir et alourdir le floc, on ajoute un adjuvant de floculation (Cidf, 2000, Kettab, 1992, Tardat-Henry, Beaury, 1984).

Les deux étapes de formation du floc consistent en une phase d'agitation rapide suivie d'une phase d'agitation lente permettant la maturation du floc. Néanmoins, il faut éviter que l'agitation soit trop intense car elle empêche l'agrégation, ni trop prolongée car elle entraîne la restabilisation des colloïdes (Lind, 1994).

I.2.2.3. Flottation:

La flottation est un procédé de séparation des matières en suspension dans l'eau utilisant la densité apparente plus faible de ces matières et conduisant à leur rassemblement et à leur collecte à la surface libre (Bernard Pironin, 1997). L'eau clarifiée, Située près de la surface est dirigée vers l'unité de filtration (BaouiaKais, 2018).

I.2.2.4. Filtration:

La filtration est un procédé de séparation dans lequel on fait percoler un mélange solide-liquide à travers un milieu poreux (filtre) qui idéalement retient les particules solides et laisse passer le liquide (filtrat). L'utilisation de membrane ayant des pores de plus en plus petits permettent de pousser très loin le seuil de séparation de la matière pour aller jusqu'à la rétention de molécules et de sels (Degrement, 2005). On distingue deux grands types de filtration qui se différencie par la vitesse de filtration:

- La filtration lente est une méthode d'épuration biologique qui consiste à faire passer l'eau à traiter à travers un lit de matériau filtrant à une vitesse de 0,1 à 0,2 m/h. Le matériau filtrant le plus utilisé est le sable. Au cours de ce passage, la qualité de l'eau s'améliore considérablement par la diminution du nombre de micro-organismes (bactéries, virus) par l'élimination de matières en suspension et colloïdales et par des changements dans sa composition chimique. A la surface du lit se trouve une mince couche appelée "membrane biologique" ou « bio film ».
- La filtration rapide est un processus physique qui consiste à filtrer l'eau sur différentes couches de sables afin d'enlever les solides en suspension dans l'eau. Le taux d'écoulement de l'eau peut aller jusqu'à 20 mètres par heure (Maaliou, 2013).

Remarque : Dans le cas de potabilisation des eaux brutes, la clarification des eaux est suivie par une étape de *désinfection* où les bactéries et virus pathogènes qui demeurent dans l'eau sont éliminés. On utilise pour cela du chlore, de l'ozone ou des ultraviolets. Une petite quantité de chlore reste dans l'eau produite pour éviter un développement bactérien plus en aval, dans le réseau d'eau.

I.2.3. Traitement secondaire ou traitement biologique:

Le but des traitements biologiques est d'éliminer la pollution organique soluble telle que, les sucres, les graisses et les protéines, pour lesquels les solutions par voie physico-chimique sont souvent peu efficaces, coûteuses ou difficiles à mettre en œuvre. Cette technique qui est pratiquée grâce à l'action des micro-organismes, les bactéries, les algues, les champignons et les protozoaires. Ces microflore se nourrissent de différents polluants et s'adaptent à leurs différents types. Ces microorganismes ne seront capables de dégrader les polluants organiques en composés moins toxiques ou de les minéraliser que lorsque ces molécules présentent un minimum de biodégradabilité et une faible toxicité. Les procédés biologiques diffèrent en fonction de la présence (**aérobie**) ou de l'absence (**anaérobie**) de l'oxygène. On distingue cinq méthodes essentielles :

 *Les cultures fixes (lits bactériens et disques biologiques) :* Leur principe de fonctionnement, quelques fois appelé filtre bactérien ou filtre percolateur, qui consiste à faire ruisseler l'eau à traiter, préalablement décantée, sur une masse de matériau de grande surface spécifique servant de support aux microorganismes épurateurs, qui y forment un feutrage ou un film plus ou moins épais, sous lequel une couche anaérobie peut se développer sous la couche aérobie, si son épaisseur est importante. Parallèlement, il existe d'autres lits bactériens appelés disques biologiques tournants.

 *Les cultures libres (boues activées) :* Les boues activées constituent le traitement biologique aérobie le plus répandu (WHO, 1989). Le procédé consiste à provoquer le développement d'une culture bactérienne dispersée sous forme de flocons (boues activées), dans un bassin brassé et aéré (bassin d'aération) et alimenté en eau à épurer. Dans ce bassin, le brassage a pour but d'éviter les dépôts et d'homogénéiser le mélange des flocons bactériens et de l'eau (liqueur mixte) ; l'aération peut se faire à partir de l'oxygène de l'eau, du gaz enrichi en oxygène par (le brassage, l'injection d'air comprimé, voire même d'oxygène pur), a pour but de dissoudre ce gaz dans la liqueur mixte, afin de répondre aux besoins des bactéries épuratrices aérobies. Après un temps de contact suffisant, la liqueur mixte est envoyée dans un clarificateur appelé parfois décanteur secondaire, destiné à séparer l'eau épurée des boues. Une partie de ces dernières sont recyclées dans le bassin d'aération pour y maintenir une concentration suffisante en bactéries épuratrices.

L'excédent (boues secondaires en excès) est extrait du système et évacué vers le traitement des boues. Une boue activée de bonne qualité a une couleur blonde légèrement rougeâtre. Le temps de séjour des organismes actifs dans le système est plus élevé que celui de l'eau, ce qui facilite le contrôle de la minéralisation de la matière organique.

Selon (Lazarova et al, 2003.) la boue activée est constituée par le floc, lui-même étant constitué de bactéries agglomérées, emprisonnées dans une matrice organique.

Remarque : Dans les conditions d'une eau usée, les bactéries sont sous-alimentées et pour mieux résister elles vont sécréter des polymères exocellulaires composés d'un mélange de polysides principalement. Grâce à ce polymère, les bactéries peuvent adhérer les unes aux autres pour éviter leur dispersion et retenir et adsorber les substances nutritives de l'eau usée, et donc de concentrer les matières nutritives (DBO_5 , O_2 ...) au voisinage des bactéries. Viennent ensuite se développer sur et à proximité de ces flocs une faune de protozoaires voire de métazoaires qui profitent de cette " oasis " voir Figure I.5.

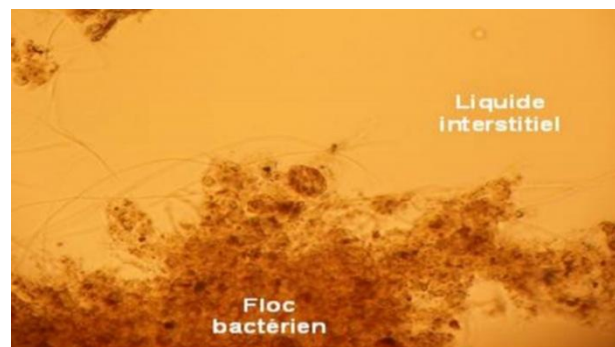


Figure I.5 : Composition de la boue activée (Lazarova et al, 2003).

Les bactéries (Figure I.6), à raison de 6,6 milliards/ml de boue activée, représentent la biomasse la plus abondante, on y trouve des bacilles Gram-, aérobies et mobiles. Les principaux genres sont *Pseudomonas*, *Aeromonas*, *Arthrobacter*, *Flavobacter*, *Achromobacter* et *Alcaligenes*.

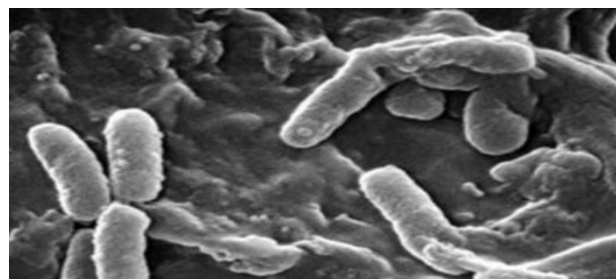


Figure I.6 : *Pseudomonas* au microscope électronique à balayage.

- Les protozoaires à raison de 50 000/ml de boue activée. Ils se partagent en différentes classes comme les zooflagellés (Bodo...), les holotriches (*Litonotus*...), les hypotriches (*Aspidisca*...) et les péritriches (*vorticelles*...).
- Les métazoaires comme les rotifères et les nématodes. Le fonctionnement d'une boue activée est organisé comme une chaîne alimentaire, les bactéries étant à la place des producteurs et se multipliant de manière proportionnelle à la charge organique (Metahri, 2012). Les autres organismes établissent des relations de prédation ou de compétition. Les bactéries minéralisent la matière organique alors que les autres organismes favorisent leur élimination, participant ainsi au maintien d'une biomasse bactérienne constante et à la clarification du liquide interstitiel (Lazarova, 1999).

 **Lagunage** : Le lagunage ou le bassin de stabilisation est un système biologique d'épuration extensive, qui consiste à déverser les eaux usées dans plusieurs bassins successifs de faible profondeur (Figure I.7), et qui permettent de retenir les effluents dans des bassins pendant une période plus ou moins longue au cours de laquelle les organismes présents permettent d'éliminer 20 à 60 Kg de DBO₅/hectare j (Ghoualem-Saouli, 2007). La matière polluante, soustraite aux eaux usées, se retrouve en grande partie dans la végétation et les sédiments accumulés, et en faible partie dans l'atmosphère sous forme de méthane et d'azote gazeux.



Figure I.7 : Lagunage naturel.

On peut classer les lagunes en fonction de leur régime ou en fonction de leur place dans la filière épuratoire. On aura donc :

Selon le premier critère, des bassins de stabilisation :

- Anaérobies : sorte de pré-digester exposé à l'air.
- Aérobies : fonctionnant grâce à une association typique d'algues et de bactéries.
- Facultatifs : où la zone supérieure est aérobie et la zone inférieure anaérobie.

Selon le deuxième critère, de :

- Lagunage complet : lorsque l'installation est directement alimentée d'eau brute non décantée.
- Lagunage secondaire : lorsque l'installation est alimentée d'eau décantée.
- Lagunage tertiaire : pour une installation directement alimentée d'un effluent traité suivant un procédé conventionnel (boues activées, lits bactériens,...).

 *Filtration/percolation* : La filtration ou percolation consiste à traiter l'eau par l'intermédiaire du sol ou d'un massif filtrant (Vasel, 2007). On filtre les effluents à raison de quelques centaines de litres d'effluent par mètre carré de massif filtrant et par jour. Deux mécanismes entrent en jeu :

- *la filtration des MES* : plus le sable est grossier, plus la fixation des MES se fera en profondeur. Les MES finissent par colmater le filtre. Pour lutter contre le bouchage du massif filtrant, il faut donc alterner phase de filtration et phase de séchage, l'élimination des MES permet également l'élimination des micro-organismes qui y sont fixés ;
- *L'adsorption des bactéries libres par les grains de sable du filtre* : il se forme alors un film biologique contaminé, surtout dans la partie supérieure, ce film va permettre une dégradation microbienne de la matière organique et des substances dissoutes dans l'effluent (phosphates, nitrates, etc.). Cette dégradation consomme de l'O₂ et produit du CO₂, il faut donc aérer régulièrement le film pour éviter l'asphyxie du milieu.

 *La filtration par le sol et les plantes (filtres plantés)* : Le sol et les rivières, ont été depuis toujours le réceptacle naturel de la pollution engendrée par l'activité humaine. Les techniques sophistiquées actuellement mises en œuvre dans les stations d'épuration des eaux résiduaires urbaines, ne constituent qu'une optimisation de l'auto épuration naturelle qui s'exerce dans ces deux milieux (Guilloteau, 1992). Plusieurs chercheurs proposent une épuration par les procédés de type extensif qui sont des systèmes d'épuration d'eaux usées par voie naturelle (ou zones humides artificielles), dont le plus connu est le lagunage à microphytes et à macrophytes (bassin de stabilisation, bassin facultatif ou bassin de maturation). Ce système est expérimenté depuis la première moitié du siècle sous climat tempéré et présente de nombreuses possibilités d'adaptation au climat des pays en développement qui est généralement chaud et donc favorable à l'activité bactérienne dont dépend son bon fonctionnement. Ces stations d'épuration par voie naturelle sont nombreuses, mais elles ne sont pas souvent connues du grand

public. Leur principe de fonctionnement s'inspire de celui des écosystèmes rencontrés dans les zones humides naturelles (Radoux, 1989).

I.2.4. Traitement tertiaire

Appelés aussi les traitements complémentaires qui visent l'élimination de la pollution l'azotée et phosphatée ainsi que la pollution biologique des eaux usées domestiques, ayant déjà subi au préalable des traitements primaires et secondaires qui s'avèrent insuffisants pour arriver au bout de ces polluants. Pour cela les traitements tertiaires s'imposent et deviennent plus que nécessaires, afin de garantir une meilleure protection des milieux naturels récepteurs ou une réutilisation de l'effluent en agriculture ou en industrie. Les traitements tertiaires visent à améliorer la qualité générale de l'eau. On y distingue généralement les opérations suivantes :

- **Élimination de l'azote** : obtenue grâce à des traitements biologiques, de "nitrification-dénitrification" ou par échange d'ions. L'azote ammoniacal; N-NH_4^+ subit différentes transformations de la forme nitreuse N-NO_2^- puis nitrique N-NO_3^- et de retour à la forme gazeuse.
- **L'élimination du phosphore** : ou "déphosphatation", peut être réalisée par des voies physico-chimiques ou biologiques. Les mécanismes de la déphosphatation biologique sont relativement complexes, et leur rendement variable (en fonction notamment de la pollution carbonée et des nitrates présents dans les eaux usées). Dans les grosses installations d'épuration, ce procédé est souvent couplé à une déphosphatation physico-chimique, pour atteindre les niveaux de rejets requis.
- **Élimination et traitement des odeurs** : La dépollution des eaux usées produit des odeurs, qui sont parfois perçues comme une gêne par les riverains des stations d'épuration. Les principales sources de mauvaises odeurs sont les boues et leur traitement, ainsi que les installations de prétraitement
- **Traitement de désinfection** : Elle assure la désactivation des germes pathogènes et des virus dans l'eau en vue de l'obtention d'une eau bactériologiquement pure. On procède physiquement par l'addition de réactifs tels que ses dérivés, ozone, ultraviolet UV (exposition à des lampes à mercure durant 20 à 30 s) et le chlore (Lazarov, 1998, Degremont, 2005, Mouchet, 1991).

I.3. Les colorants textiles :

I.3.1. Introduction :

La couleur et le colorant ont toujours joué un rôle important dans la vie de l'homme depuis des époques préhistoriques. Elle augmente généralement la manière dont nous apprécions notre

environnement (Christie R.M, 2001). La longue histoire des matières colorantes a connu deux périodes, séparées par une année très importante : l'année 1856. Pendant la première période, les colorants utilisés étaient uniquement des colorants naturels empruntés aux trois règnes : végétal, animal et minéral. Ils étaient nombreux, une trentaine environ (Maba B, 2014). Les colorants synthétiques représentent aujourd'hui un groupe relativement large de composés chimiques organiques rencontrés dans les effluents aqueux. La production mondiale est estimée à 700 000 tonnes/an, dont 140 000 tonnes/an sont rejetées dans les effluents au cours des différentes étapes d'application et l'industrie textile représente 70% de l'utilisation des colorants (ZawlotskiGy, 2004).

I.3.2.Définition des colorants

Un colorant doit posséder, outre sa couleur propre, la propriété de teindre. Cette propriété résultant d'une affinité particulière entre le colorant et la fibre est à l'origine des principales difficultés rencontrées lors des traitements. En effet, selon le type d'application et d'utilisation, les colorants synthétiques doivent répondre à un certain nombre de critères afin de prolonger la durée de vie des produits textiles sur lesquels ils sont appliqués : résistance à l'abrasion, stabilité photolytique des couleurs, résistance à l'oxydation chimique (notamment les détergents) et aux attaques microbiennes. (HediBenMansour et *al.*, 2011). L'affinité du colorant pour la fibre est particulièrement développée pour les colorants qui possèdent un caractère acide ou basique accentué. Ces caractéristiques propres aux colorants organiques accroissent leur persistance dans l'environnement et les rendent peu disposés à la biodégradation (Pagga and Brown, 1986).

Les matières colorantes sont un assemblage de groupes chromophores, auxochromes et de structures aromatiques conjuguées (cycles benzéniques, anthracène, perylène,... etc.). Ces groupements sont capables de transformer la lumière blanche dans le spectre visible (de 380 à 750 nm), en lumière colorée par réflexion sur un corps, ou par transmission ou diffusion (Chouat Laboubi, 2013)

- **Chromophores** : Ce sont des groupements chimiques insaturés covalents qui donnent lieu à une absorption dans le visible.
- **Auxochromes**: Ce sont des groupements saturés qui, lorsqu'ils sont liés à un chromophore, modifient la longueur d'onde $\lambda_{\max}$ et l'intensité du maximum d'absorption.

Les chromophores et auxochromes habituels sont résumés dans le tableau I.6 :

Tableau I.6. Principaux groupes chromophores et auxochromes classés par intensité croissante. (Hedi Ben Mansour et *al.* , 2011)

Groupe chromophores	Groupe auxochromes Groupe donneurs d'électrons
Azo (-N=N-)	Amino (-NH ₂)
Nitroso (-N=O-)	Méthylamino (-NHCH ₃)
Carbonyle (-C=O)	Diméthylamino (-N(CH ₃) ₂)
Vinyle (-C=CH ₂) ou méthine (C=)	Hydroxyle (-OH)
Nitro (-NO ₂)	Alkoxy (-OR)
Thiocarbonyle (-C=S)	

Lorsque le nombre de noyaux aromatiques augmente, la conjugaison des doubles liaisons s'accroît et le système conjugué s'élargit. L'énergie des liaisons π diminue tandis que l'activité des électrons π ou n augmente et produit un déplacement vers les grandes longueurs d'onde. De même, lorsqu'un groupe auxochrome donneur d'électrons (amino, hydroxy, alkoxy, etc.) est placée sur un système aromatique conjugué, ce groupe se joint à la conjugaison du système π , la molécule absorbe dans les grandes longueurs d'onde et donne des couleurs plus foncées (Christie, 2001, Seyewetz and Sisley 1896, Welham, 2000, Zhenwang et *al.*, 2000).

I.3.3. Classification descolorants :

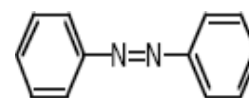
La classification des colorants peut être faite selon leur structure chimique, ou selon le domaine d'application (Djebbari and Benkerrou, 2016) ou bien selon leur nature :

I.3.3.1 Classification selon la constitution chimique :

Le classement des colorants selon leur structure chimique repose sur la nature du groupe chromophore (Guivarch, 2004).

❖ Les colorants azoïques :

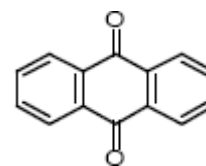
Les colorants "azoïques" sont caractérisés par le groupe fonctionnel azo (-N=N-) unissant deux groupements alkyles ou aryles identiques ou non (azoïque symétrique et dissymétrique).



Ces structures qui reposent généralement sur le squelette de l'azobenzène, sont des systèmes aromatiques ou pseudo- aromatiques liés par un groupe chromophore azo.

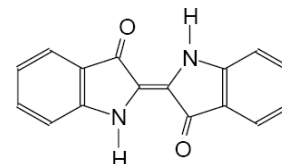
❖ Les colorants anthraquinoniques :

D'un point de vue commercial, ces colorants sont les plus importants après les colorants azoïques. Leur formule générale dérivée de l'anthracène montre que le chromophore est un noyau quinonique sur lequel peuvent s'attacher des groupes hydroxyles ou amines.



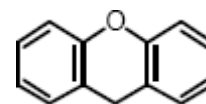
❖ Les colorants indigoïdes :

Ils tirent leur appellation de l'Indigo dont ils dérivent. Ainsi, les homologues séléné, soufré et oxygéné du Bleu Indigo provoquent d'importants effets hypsochromes avec des coloris pouvant aller de l'orange au turquoise.



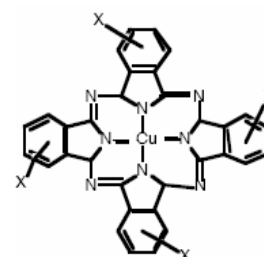
❖ Les colorants xanthène :

Ces colorants sont dotés d'une intense fluorescence. Le composé le plus connu est la fluorescéine. Peu utilisé en tant que teinture, leur faculté de marqueurs lors d'accident maritime ou de traceurs d'écoulement pour des rivières souterraines est malgré tout bien établie.



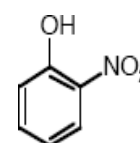
❖ Les phtalocyanines :

Ils ont une structure complexe basée sur l'atome central de cuivre. Les colorants de ce groupe sont obtenus par réaction du dicyanobenzène en présence d'un halogénure métallique (Cu, Ni, Co, Pt, etc.).



❖ Les colorants nitrés et nitrosés :

Ces colorants forment une classe très limitée en nombre et relativement ancienne. Ils sont actuellement encore utilisés, du fait de leur prix très modéré lié à la simplicité de leur structure moléculaire caractérisée par la présence d'un groupe nitro (-NO₂) en position ortho d'un groupement électrodonneur (hydroxyle ou groupes aminés).



I.3.3.2. Classification tinctorial:

Si la classification chimique présente un intérêt pour le fabricant de matières colorantes, le teinturier préfère le classement par domaines d'application. Ainsi, il est renseigné sur la solubilité du colorant dans le bain de teinture, son affinité pour les diverses fibres et sur la nature de la fixation. Celle-ci est de force variable selon que la liaison colorant - substrat est du type ionique, hydrogène, de Van der Waals ou covalente. On distingue différentes catégories tinctoriales définies cette fois par les

auxochromes (Hedi Ben Mansour et *al.*,2011) .

❖ ***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.

❖ ***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 sur ces fibres est très faible. Ces colorants ont bénéficié d'un regain d'intérêt avec l'apparition des fibres acryliques, sur les quelles ils permettent des nuances très vives et résistantes.

I.3.3.3. Colorantthiazine :

Les colorants thiazines sont analogues aux colorants oxazines sauf que l'atome de soufre remplace l'atome d'oxygène dans l'anneau hétérocyclique. Ces colorants ont un noyau phenazonium comme chromophore, avec des groupes aminés en parallèles par rapport au soufre comme auxochrome. Ils ont un intervalle de couleur du vert au bleu et ils sont stables à la lumière (Wilson, 1907). Ils sont utilisés dans le domaine du textile, médecine, pharmacie et biologie, et employés comme antihistaminiques, tranquillisants, et comme des insecticides, des photo- sensibilisateurs, dans le traitement du cancer et agents antimicrobiens (Saidi, 2013).

I.3.3.4. Classification des colorants selon leurs natures :

Le colorant, qu'il soit organique ou inorganique, peut être d'origine naturelle ou synthétique (Boukaous, 2014).

❖ ***Colorants naturels :***

Il existe seulement une dizaine de colorants naturels, ils sont extraits des plantes, des fruits, des arbres, des lichens, des insectes ou des mollusques par procédés simples comme le chauffage ou le broyage.

❖ ***Colorants synthétiques :***

Ce sont des composés ayant comme matières premières des molécules telles que le benzène, issu de la distillation de la houille. A partir des matières premières, et grâce à une série de procédés chimique, qui

correspondent en général au remplacement d'un ou plusieurs atomes d'hydrogène du produit de départ par des éléments ou des radicaux particuliers on peut avoir ce qu'on appelle les intermédiaires qui serviront à la fabrication du colorant final.

I. 3.4. Les colorants et leurs impacts :

I. 3.4..1. Bioaccumulation :

La bioaccumulation traduit l'absorption des substances chimiques, présentes dans l'environnement, et leur concentration dans certains tissus par les organismes vivants (Figure I.8). A une certaine concentration, ces substances deviennent nocives pour les organismes.

Les espèces qui se trouvent à l'extrémité supérieure de la chaîne alimentaire, y compris l'homme, se retrouvent exposées à des teneurs en substances toxiques pouvant aller jusqu'à cent mille fois plus élevées que les concentrations initiales dans l'eau (illustration du phénomène de bioaccumulation de pesticides dans la (Figure I.8) (Servais, 1999).

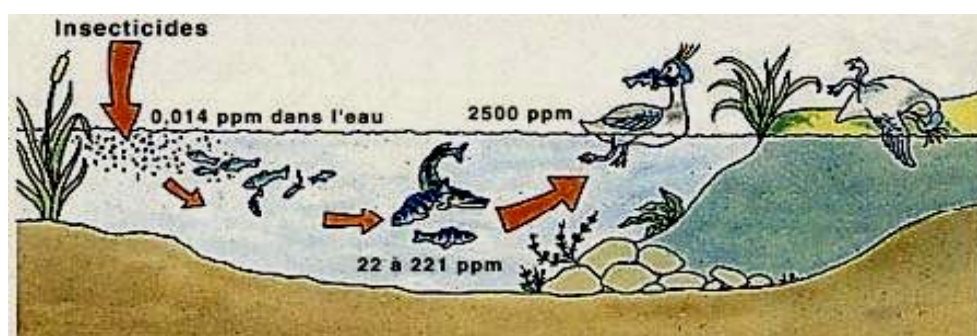


Figure. I.8 : Conséquences de la bioaccumulation après déversement de substances toxiques (insecticides) dans un cours d'eau.

I. 3.4.2.L'impacte sur l'environnement :

Les principaux dommages causés par l'industrie textile à l'environnement sont tout fois ceux résultant de la décharge d'effluents non traité dans les masses d'eau (Figure I.9), (Bhatia, 2017). La composition de la plupart des eaux résiduelles de l'industrie textile présente des niveaux relativement élevés de la DBO₅ et de DCO. Les couleurs associée aux colorants textiles ne cause pas seulement des dommages esthétiques aux masse d'eau (Setiadi et *al.*, 2006), mais empêche également la pénétration de la lumière à travers l'eau (Hassan and Carr, 2018), ce qui entraîne une réduction du taux de photosynthèse (Imran et *al.*, 2015) et des niveaux d'oxygène dissous affectant l'ensemble du biote aquatique (Hassan and Carr, 2018), (Figure I.16).



Figure I.9 : l'impacte de l'industrie textile sur l'environnement.

I. 3.4.3. L'impacte Sur la santé :

Sont due à certaines capacités de ces colorants qui peuvent ; être mutagène, génotoxique, entraîne des cancers de la thyroïde, et des tumeurs des glandes surrénales, contenir des substances cancérigènes, avoir des actions sur le système nerveux central, inhibition ou déficit de certaines enzymes et augmentation de la perméabilité intestinale. Il est donc essentiel d'utiliser des stratégies de traitement (Orts et *al.*, 2018), visant à assurer la durabilité de l'environnement pour les générations futures (Jordao et *al.*, 2018), par des techniques physiques, chimiques et biologiques ou une combinaison de celle-ci (Setiadi *et al.*, 2006) qui déjà mentionné.

I. 3.4.4. Législation sur l'environnement :

Vus le grand danger que pose l'industrie textile et l'utilisation des colorants dans notre vie quotidienne sur l'environnement et notre santé, tous les pays du monde sont soumis à une réglementation stricte sur les rejets des effluents textiles dans le milieu hydrique : Exemple de l'Algérie, Décret exécute if N°06 -141 du 19 avril 2006 (tableau I.7), (JournalOfficielAlgérien2006).

Tableau.I.7: Valeurs limites de quelques paramètres pour les effluents textiles

Paramètres	Valeurs limites
T (°C)	30
pH	6,5 – 8,5
DBO ₅ (mg.L ⁻¹)	150
DCO (mg.L ⁻¹)	250
Matières décantables (mg.L ⁻¹)	0,4
Matières non dissoutes (mg.L ⁻¹)	30
Oxydabilité (mg.L ⁻¹)	100
Permanganate (mg.L ⁻¹)	20

I. 3.5. L'élimination des colorants :

Le traitement des rejets textiles, compte tenu de la composition très hétérogène de ceux-ci, conduira toujours à la conception d'une chaîne de traitement assurant l'élimination des différents polluants par étapes successives. La première étape consiste à éliminer la pollution insoluble par l'intermédiaire de prétraitements (dégrillage, dessablage, déshuilage, etc.) et/ou de traitements physiques ou physico-chimiques assurant une séparation solide - liquide. Les techniques de dépollution intervenant le plus couramment en deuxième étape dans les industries textiles, d'après (Hao et *al.*, 2000) et (Dos Santos et *al.*, 2007), elles se divisent en trois types physique, chimique et biologique :

I. 3.5.1. Traitement physique

I. 3.5.1.1. La coagulation -floculation

Méthodes de précipitation (coagulation, floculation, sédimentation): processus physico- chimiques par lesquels des particules colloïdales ou des solides en fine suspension sont transformés par des flocculant chimiques en espèces plus visibles et séparables (les floes). Les floes formés sont ensuite séparés par décantation et filtration puis évacués. Les coagulants inorganiques tels que l'alun donnent les résultats les plus satisfaisants pour la décoloration des effluents textiles contenant des colorants dispersés, de cuve et au soufre, mais sont totalement inefficace pour les colorants réactifs, azoïques, acides et basiques (ZawlotskiGv, 2004). Par ailleurs, la coagulation -floculation ne peut être utilisée pour les colorants fortement solubles dans l'eau. D'importantes quantités de boue sont formées avec ce procédé : leur régénération ou réutilisation reste la seule issue mais demande des investissements supplémentaires.

I. 3.5.1.2. L'adsorption :

I. 3.5.1.2.1. Définition :

L'adsorption est un phénomène physico-chimique se traduisant en particulier par une modification de concentration à l'interface de deux phases non miscibles. C'est un phénomène de surface, à distinguer de l'absorption, phénomène de profondeur. Il existe cinq types d'interfaces selon la nature des deux phases contiguës: (gaz / liquide), (gaz/solide), (liquide/liquide), (liquide/solide), (solide/solide), et pour chacun de ces types d'interfaces, on peut distinguer le cas où ces phases sont pures de celui où elles constituent des mélanges.

Les phénomènes d'adsorption se rapportant aux interfaces liquide/solide, à savoir donc l'adsorption des liquides, purs ou en mélange, par les solides considérés généralement comme des phases pures. L'adsorption par un solide peut être définie comme étant le phénomène physique de fixation de molécule

à la surface du solide par des forces d'interaction faible de type Van der waals (Bougdah, 2007). On appelle « adsorbat » la molécule qui s'adsorbe et « adsorbant » le solide sur lequel s'adsorbe la molécule. Le phénomène inverse par lequel les molécules se détachent est la désorption (Boulkrah, 2008), comme montre la **(Figure I.10)**.

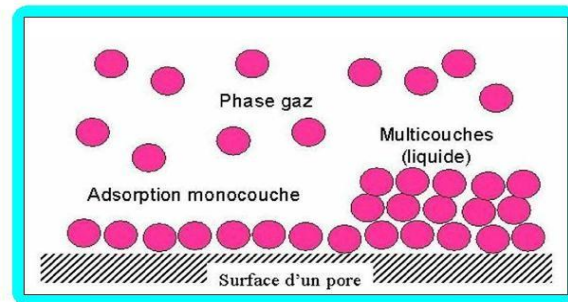


Figure I.10: Schéma simplifié représentant le phénomène d'adsorption

L'adsorption qui s'avère comme un traitement efficace à l'industrie. En pratique, elle est utilisée dans les cas suivants (Chouat, laboubi, 2013) : séchage, traitement des huiles, traitement des gaz, industrie textile, décoloration et traitement des eaux.

I. 3.5.1.2..2.Nature de l'adsorption

L'adsorption est parfois différenciée en adsorption physique et chimique (Tableau I.8):

A. Physisorption

Elle se produit lorsque les forces qui fixent l'adsorbat dans une couche à la surface de l'adsorbant sont du même ordre que les forces de Van der Waals. Ce type d'adsorption se caractérise par :

- ❖ La rapidité dans l'établissement de l'équilibre entre la phase adsorbée et la phase fluide;
- ❖ Une chaleur d'adsorption sensiblement du même ordre que la chaleur de liquéfaction du gaz adsorbé;
- ❖ Une réversibilité relativement facile et une absence de spécificité (Sedira N, 2012/2013).
- ❖ Les valeurs d'enthalpie d'adsorption se situent souvent autour de 10 kJ/mol (Bouaziz A, 2009)

Ce phénomène consiste essentiellement en la condensation de molécules sur la surface du solide est favorisé par un abaissement de la température (Kanouri and Labide, 2012/2013).

B. Chimisorption

Elle résulte des forces de liaison de nature chimique (nettement supérieures aux forces de Van der

Waals) avec mise en commun ou transfert d'électrons; il y a donc des ruptures et des créations de liaisons chimiques en surface entre le réactif et les sites actifs de l'adsorbant. La chimisorption se caractérise par :

- ❖ Un équilibre long à atteindre entre la phase adsorbée et le milieu fluide;
- ❖ Une augmentation de la quantité de matière adsorbée avec la température;
- ❖ Une chaleur dégagée durant l'adsorption comparable aux chaleurs de réaction (de 40 à 100 kJ/mol), environ 10 fois supérieure à l'adsorption physique;
- ❖ La non-réversibilité;
- ❖ Une spécificité marquée, dans le sens que sur un adsorbant déterminé se fixent certains adsorbats.

Quand les conditions s'y prêtent, l'adsorption chimique peut assez souvent se superposer à l'adsorption physique (Sedira, 2012/2013). L'enthalpie relative à la chimisorption est plus grande que celle de la physisorption et les valeurs se situent généralement autour de 200 kJ/mol (Bouaziz, 2009).

Tableau I.8: Comparaison entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique (Bouaziz, 2009)

Propriétés	Adsorption physique	Adsorption chimique
Types de liaison	Liaison de Van Der Waals	Liaison chimique
Températures du Processus	Relativement faible comparée à la température d'ébullition de l'adsorbat	Plus élevée que la température d'ébullition de l'adsorbat
Individualité des Molécules	L'individualité des molécules est conservée	Destruction de l'individualité des molécules
Désorption	Facile	Difficile
Cinétique	Rapide, indépendante de la Température	Très lente
Chaleur d'adsorption	Inférieure à 10 kcal/mole	Supérieure à 10 kcal/mole
Energies mises en jeu	Faibles	Elevées
Type de formation	Formation en multicouches et monocouche	Formation en monocouche

I. 3.5.1.2..3.Mécanismes d'adsorption

Au cours de l'adsorption d'une espèce sur un solide, le transfert de masse des molécules se fait de la phase fluide vers le centre de l'adsorbant, ce processus s'opère au sein d'un grain d'adsorbant en plusieurs

étapes (Cherraye, 2012), (Figure I.11) :

- Transfert de masse externe (diffusion externe) (1) : qui correspond au transfert du soluté du sein de la solution à la surface externe des particules.
- Transfert de masse interne dans les pores (diffusion interne)(2) : qui a lieu dans le fluide remplissant les pores. En effet, les molécules se propagent de la surface des grains vers leur centre à travers les pores.
- Diffusion de surface (3) : pour certains adsorbants, il peut exister également une contribution de la diffusion des molécules adsorbées le long des surfaces des pores à l'échelle d'un grain d'adsorbant (Kanouri and Labide, 2013, Schrotter et *al.*, 2008).

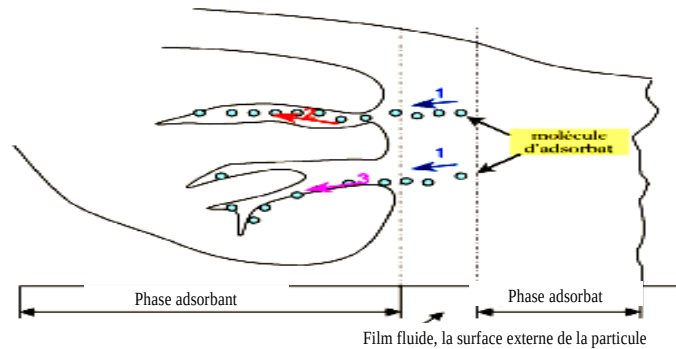


Figure I.11: Schéma du mécanisme de transport d'un adsorbant au sein d'un grain (Cherraye, 2012).

I. 3.5.1.2..4.La Cinétique d'adsorption

L'adsorption dépend de plusieurs paramètres, notamment la surface spécifique, le pH, la température qu'il faut optimiser pour atteindre la cinétique la plus rapide possible. Si l'adsorbant n'est pas poreux, c'est l'étape de transfert de masse de couche externe qui contrôle la vitesse d'adsorption, alors qu'en présence d'adsorbants poreux, c'est l'étape de transfert de masse interne qui limite la vitesse d'adsorption. La cinétique de l'adsorption et de désorption sur un adsorbant poreux devenue un sujet important, dans le processus de séparation et purification (Hema and Deva, 2009, Wang et *al.*, 2010, Jozjaetal, 2003) Arivoli et *al.*, 2009)

La cinétique d'adsorption, exprimée en termes de taux de rétention de soluté en fonction du temps de contact, est l'une des plus importantes caractéristiques définissant l'efficacité d'une adsorption. La célérité avec laquelle l'équilibre thermodynamique est atteinte en fonction de la vitesse de diffusion de l'adsorbant

et de l'interaction adsorbât-adsorbant. La cinétique d'adsorption est en général du premier ou du second pseudo-ordre (Abderrahim et *al.* 2009).

En général, une faible adsorption a été signalée pour les colorants acides et réactifs ayant une faible masse moléculaire, alors qu'une forte adsorption se produit avec des colorants directs qui sont généralement de masse moléculaire relative plus élevée et à moyen pour les colorants dispersés à caractère hydrophobe. Faible solubilité et les propriétés de dispersion colloïdale des colorants dispersés, des colorants de cuve et les pigments contribuent à leur faible taux d'adsorption sur le carbone à température ambiante (Reife, and Freeman, 1996).

I. 3.5.2. Traitement chimique

La méthode de décoloration chimique la plus étudiée est l'oxydation en raison de la simplicité du processus. Dans ce processus, comme les molécules de colorant sont oxydées, ils sont décomposés en petites molécules incolores telles que dioxyde de carbone, eau, azote, aldéhydes, acides et sulfates selon la structure du colorant et sur la résistance de l'oxydant utilisé. Conventionnel l'oxydation chimique des colorants implique généralement l'utilisation de des agents tels que le chlore et le dioxyde de chlore, l'ozone (O_3), le peroxyde d'hydrogène, et permanganate (Xu et *al.* 2005).

❖ Les procédés d'oxydation classique :

La chloration et l'ozonation constituent les deux voies majeures d'oxydation classique. Elles sont surtout appliquées à la désinfection, étape commune à tous les traitements de l'eau. Le chlore et l'ozone agissent sur les métaux, les matières organiques et inactivent les bactéries.

- **Chloration :** La chloration constitue l'unique procédé d'oxydation et de désinfection sous forme d'hypochlorite de sodium (eau de javel) ou plus rarement de chlore gazeux. Bien que la réaction chimique du chlore avec les matières organiques présentes dans l'eau conduit à la formation de sous-produits organohalogénés potentiellement toxiques, la chloration demeure le procédé d'oxydation et de désinfection préféré à cause de sa simplicité, de son faible coût et de son efficacité (Demirbas, 2008).
- **Ozonation :** Dans l'ozonation, le principal agent oxydant utilisé en traitement des eaux est l'ozone, qui est produit dans des générateurs d'ozone par le biais de décharges électriques dans de l'air purifié et séché ou directement dans de l'oxygène industriel. Le pouvoir oxydant de l'ozone température et pression ambiantes et sa faculté de casser les plus grosses molécules

organique est un préalable indispensable à un bon traitement chimique. Elle permet donc de rendre biodégradables des molécules organiques en les coupant en petites parties ; elle oxyde les micropolluants organiques (en particulier les pesticides) et son pouvoir oxydant lui permet de détruire les bactéries et les virus. Après le traitement par l'ozone, l'eau acquiert des qualités remarquables (Demirbas, 2008).

❖ Les procédés d'oxydation avancée (POA)

Les POA regroupent des méthodes chimiques, photochimiques ou électrochimiques. Le développement de ces méthodes est en plein essor depuis environ trois décennies. Ces méthodes de traitement consistent à dégrader les molécules de colorants en CO_2 et H_2O au moyen du rayonnement UV en présence d'hydrogène peroxyde (Joseph, 2009).

I. 3.5.3. Traitement Biologique :

Un traitement biologique est souvent l'alternative la plus économique par rapport à d'autres procédés physiques et chimiques. Les méthodes de biodégradation telles que la décoloration fongique, la dégradation microbienne, l'adsorption par la biomasse microbienne et les systèmes de bioremédiation sont couramment appliquées au traitement des effluents industriels car de nombreux microorganismes tels que les bactéries, les levures, les algues et les champignons sont capables d'accumuler et de dégrader différents polluants (Barr et *al.*, 1994). L'utilisation de diverses enzymes, en tant que composés non toxiques et respectueux de l'environnement, en est aux premiers stades du développement, mais leurs applications innovantes se multiplient et se répandent rapidement. L'industrie textile peut grandement bénéficier de l'utilisation élargie de ces enzymes.

❖ Traitement aérobie:

Dans le cas idéal, les polluants organiques sont oxydés jusqu'au dioxyde de carbone par des bactéries aérobies et autres microorganismes en une boue qui sédimente. Ce procédé est limité par le coût élevé de traitement de boue et son inefficacité vis-à-vis des effluents concentrés ou contenant des substances bio-résistantes et toxiques (Daunis, et *al.* 2008) qui détruisent ces micro-organismes et la rend inefficace. Par exemple, les composés phénoliques peuvent inhiber la croissance des micro-organismes présents dans les boues activées dès 400 mg/l (Barrios-Martinez, 2006, Uygur and Kargi, 2004).

De plus, cette technique n'est pas suffisamment efficace pour les rejets textiles à cause de la structure poly aromatique complexe et de la nature réfractaire des colorants. De nombreuses classes de colorants telles que les azoïques, les colorants acides (à cause des groupes sulfonés) et les colorants réactifs y sont

récalcitrants (Pagga, and Taeger, 1994). Seuls les colorants de structure chimique simple et de faible poids moléculaire ont des taux de décoloration importants (Sani and Banerjee ,1999).

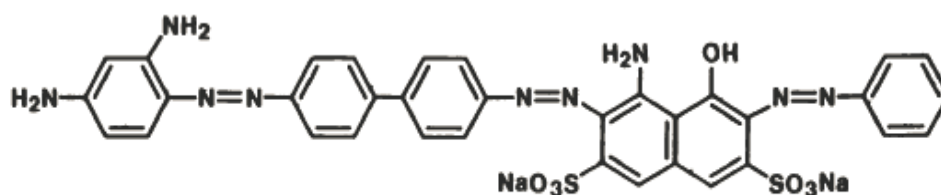
Certaines des substances qui n'ont pas pu être dégradées biologiquement, peuvent être adsorbées et incorporées, par la suite, aux floes de boues formées lors de l'agglomération des micro-organismes (**biosorption**). Ces derniers utilisent les polluants comme substrats nécessaires à la production d'énergie vitale et à la synthèse de nouvelles cellules vivantes (Dhaouadi, 2008).

❖ **Traitement anaérobie:**

A l'inverse de la biodégradation aérobie, la digestion anaérobie des composés organiques s'effectue en l'absence d'oxygène et forme du dioxyde de carbone, du méthane et de l'eau. Les conditions de réduction dans la digestion anaérobie sont adaptées à la décoloration des colorants azoïques par clivage de la liaison azo entraînant une destruction subséquente du groupe chromophore, mais une minéralisation complète est impossible dans ce type de procédé (Pagga and Taeger ,1994).

La dégradation des molécules initiales à l'aide de l'azoréductase, les micro-organismes entraîne souvent la formation d'amines aromatiques incolores plus toxiques que la molécule initiale, qui finissent dans les sédiments aquifères peu profonds et les eaux souterraines (Weberand Wolfe, 1987, Carliell et *al*, 1995).La benzidine est généralement utilisée dans la construction de colorants azoïques directs et a été signalée comme cancérigène potentiel. Les colorants directs sont peu coûteux et utilisés pour teindre des fibres, des cuirs ou des papiers sans aucun prétraitement.

Parmi les colorants azoïques à base de benzidine, le colorant le plus généralement utilisé est le Direct Black 38. La dégradation du colorant Direct Black 38 peut être obtenue en utilisant *Enterococcus gallinarum*. Direct Black 38 a trois liaisons azo dans sa structure qui sont les sites actifs de l'azoréductase. Direct Black 38 par des réactions métaboliques est converti en benzidine qui, lors de la désamination, donne du phényle 4-amion (Figure I.12). Il a été rapporté que les colorants qui ont la benzidine comme base sont hautement cancérigènes par rapport aux colorants sans benzidine. Cela est dû à l'existence de polluants comme le 4-amino-biphényle et le 2-4, le diaminoazobenzène, qui ont été signalés comme cancérigènes (Varjani et *al*, 2020).



Direct Black 38 (DB 38)

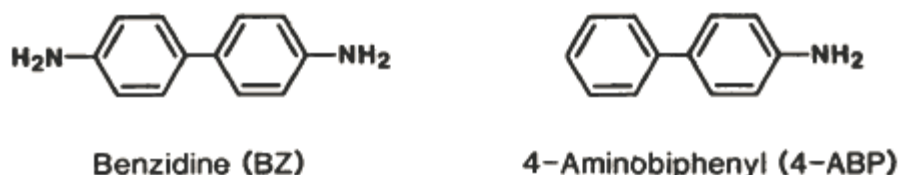


Figure I.12 : Structures chimiques du DB38 et des métabolites microbiens produites *par Enterococcus gallinarum*

L'avantage du traitement anaérobie, est la consommation modérée d'énergie d'où le coût opératoire faible. Ils peuvent détruire la plupart des composés carbonés présents sous forme soluble tels que sucres, graisses, protéines,...etc., pour lesquels les procédés physico-chimiques sont souvent peu efficaces (Abdelhafid Zehhaf, 2012).

❖ **Traitement enzymatique:**

Les enzymes ont un certain nombre de caractéristiques qui les rendent plus viables par rapport aux catalyseurs classiques. Les enzymes sont des catalyseurs biodégradables, permettent le fonctionnement à des concentrations de substrat faibles et élevées, permettent le fonctionnement sur une large gamme de formation de boues réduite et sont simples et faciles à contrôler. Malgré les avantages du traitement enzymatique des eaux usées, la limitation majeure de l'utilisation des enzymes est leur coût excessif (Nicell *et al.*, 1993 ; Wesenberg *et al.*, 2003).

Les enzymes ligninolytiques comme la lignine peroxydase, le manganèse peroxydase et la laccase sont produites par des champignons sont capables d'oxyder un grand nombre de composés différents y compris les colorants (Rodriguez *et al.*, 1999 ; Đurđić *et al.*, 2021).

La souche L-25 produit de la peroxydase de manganèse (MnP) comme sa principale enzyme ligninolytique. L'adsorption du colorant par les cellules a été observée lors de la décoloration au début du processus. La peroxydase de manganèse présente un fort potentiel de dégradation, elle oxyde les ions Mn^{2+} en Mn^{3+} qui sont très réactifs (Ziegenhagen and Hofrichter, 2000).

D'autre part, les enzymes laccases ont une large spécificité de substrat. Le mécanisme de la laccase implique l'élimination d'un atome H^+ des groupes hydroxyle et amino des substrats mono et polyphénoliques ortho- et para-substitués, et des amines aromatiques (Kahramann and Yasilada, 2011).

Chapitre II : Matériel et méthodes

II.1. Introduction :

Des traitements physico-chimiques et biologiques des eaux brutes contaminées par les colorants seront étudiés. Différents paramètres physico-chimiques tels que la concentration initiale du colorant, la masse de l'adsorbant, le pH de la solution, la vitesse d'agitation et la cinétique de l'adsorption du colorant seront optimisés.

L'application de différents modèles des cinétiques et des isothermes de l'adsorption permet de préciser la validité et les limites d'application des modèles afin de générer une base de données de l'adsorption en termes de vitesse et de capacités de l'adsorption. Aussi, cette modélisation permet d'identifier les mécanismes de l'adsorption du colorant par l'adsorbant.

II.2. Source et nature des eaux à traiter :

Des échantillons d'eau brute des différentes phases de traitement à la station de Boudouaou sont arrivés au laboratoire (Tableau I.9) par le biais des pompes d'échantillonnage qui fonctionnent en continue 24H/24H.

Tableau I.9 : Points d'échantillonnage des différentes étapes de traitement de laboratoire Boudouaou



Prise d'échantillons

Il existe Cinq prises d'échantillons d'eau au niveau de laboratoire

- A l'entrée de l'usine au niveau de l'ouvrage d'Arrivée pour l'eau brute. Il est à noter que L'eau brute est arrive par gravité depuis le tuyau d'amenée jusqu'au laboratoire,
- A la sortie des décanteurs Filière n°1, n°2 : pour l'eau décantée ;
- A la sortie des filtres Filière n°1, n°2 : pour l'eau filtrée ;
- A l'entrée de chambre de répartition vers les réservoirs pour l'eau filtrée désinfectée ;

- En sortie de station pour l'eau traitée réservoir n°1 ; réservoir n°2.

A chaque point d'échantillonnage, une caractérisation physicochimique et biologique des eaux est effectuée, cela permet de suivre la qualité de l'eau traitée ainsi que les polluants éliminés après chaque phase de traitement de potabilisation des eaux brutes.

II.3. Colorant étudié :

3.1. Le bleu de méthylène :

Le bleu de méthylène (BM) est un colorant thiazine de la famille basique ou cationique (**figure II.1**) Le colorant thiazine le plus important est le « bleu de méthylène » découvert par Heinrich Caro (un chimiste allemand) en 1876 (Wilson, 1907).

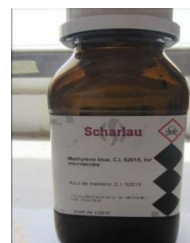


Figure II.1 : Bleu de méthylène

3.2. Propriétés physico-chimiques du bleu de méthylène:

Les propriétés physico-chimiques du bleu de méthylène sont résumées dans le tableau II.1

Tableau II.1 : Propriétés physico-chimiques du bleu de méthylène

Propriétés	
Dénomination	Bleu de méthylène ou chlorure de méthylthionium, Basic Blue 9 (C.I.)
Appellation chimique	Chlorure de bis- (diméthylamino) -3,7 Phénazathionium
Famille	Colorant basique
Formule brute	$C_{16}H_{18}ClN_3S$
Masse molaire (g/mol)	319,85
Solubilité dans l'eau (g.L ⁻¹) à 20°C	50
Point de fusion (°C)	180
Ph	5,9
PKa	3,8
λ_{max} (nm)	665
Structure	

II.4.Caractérisation physico-chimique et minéralogique des adsorbants et des biosorbants

Le laboratoire de procès au centre de traitement Boudouaou est subdivisé en 2 laboratoires, un réservé à l'étude physico-chimique et l'autre réservé à l'étude biologique. L'étude analytique de l'eau est réalisée dans le cadre d'études et de recherches d'ordre physique, chimique et bactériologique.

Plusieurs techniques expérimentales sont utilisées pour déterminer les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques, telles que :

****La détermination de la composition chimique et minéralogique***

Pour la détermination de la composition chimique et minéralogique, les analyses par fluorescence des rayons X seront effectuées grâce à un diffractomètre.

****La mesure de la masse volumique***

La mesure de la masse volumique apparente (aérée) et (tassé) de l'adsorbant est un test simple et rapide. Trois essais sont nécessaires pour faire la moyenne et minimiser les erreurs.

La Masse volumique apparente et réelle est déterminée comme suit :

$$P \text{ (apparente)} = m_0 / V_1$$

$$P \text{ (réelle)} = m_0 / V_2$$

Avec :

m_0 : la masse initiale (prise d'essai) ; **V_1 (ml)** : volume aéré occupé par l'adsorbant ; **V_2 (ml)** : volume tassé occupé par l'adsorbant

****Le taux d'humidité :***

C'est le rapport, exprime en pourcentage du poids de l'eau contenu dans l'adsorbant, au poids même matériau sec.

****Point de détermination de zéro charge (pHz)***

Le point de charge zéro (pHz) devait être étudié pour trouver la charge de surface des adsorbants étudiés. La charge de surface de l'adsorbant est positive lorsque le pH de la solution est inférieur à pHz.

****La diffraction des rayons X (DRX) :***

Elle est utilisée de façon préférentielle dans la caractérisation minéralogique d'un matériau.

****La spectroscopie infrarouge (IR) :***

Elle est utilisée pour la caractérisation des composés organiques et inorganiques.

****L'analyse thermogravimétrique ATG :***

L'ATG est utilisée pour caractériser les propriétés physiques et chimiques des matériaux en fonction de la température dans une atmosphère contrôlée avec précision.

II.5. Optimisation du traitement de l'eau contaminée

Le bleu de méthylène (BM), un colorant thiazine basique ou cationique (Tableau II.1), sera dilué dans un volume d'eau brute à différentes concentrations.

Les essais sont effectués dans un flocculateur. Les béchers contiennent des doses croissantes d'adsorbants et des biosorbants bruts et modifiés. Différents paramètres physico-chimiques tels que la concentration initiale du colorant, la masse de l'adsorbant, le pH de la solution, la vitesse d'agitation et la cinétique de l'adsorption du colorant seront optimisés. Après décantation, les divers paramètres physico-chimiques et bactériologiques les plus indicatifs de cette étape seront déterminés par les méthodes standards d'analyse qui sont :

Analyses microbiologiques :

- ❖ Coliforme totaux et bactéries atypiques
- ❖ Coliformes fécaux (*E. Coli*)
- ❖ Streptocoques fécaux et entérocoques
- ❖ BHAA (Bactéries Hétérotrophes Aérobie et Anaérobies)

Analyses physico-chimique :

- ❖ Métaux
- ❖ Carbone organique total
- ❖ pH,
- ❖ turbidité
- ❖ la teneur en colorant
- ❖ UV

Les appareils à utiliser sont consignées dans le tableau II.2

Tableau II.2: Les paramètres à mesurer et les appareils à utiliser.

Paramètres mesures	Appareils utilisés
PH	PH-mètre
La conductivité	Conductimètre
MES	Centrifugation
DBO ₅	Appareil DBO ₅
Absorbance	Spectrophotomètre
Les pesés	Balance

II.7.Modélisation

Après optimisation des paramètres les plus indicatifs, la cinétique de l'adsorption sur un adsorbant la plus rapide possible sera atteinte et exprimée en termes du taux de rétention de soluté en fonction du temps de contact. La cinétique d'adsorption définit l'efficacité d'une adsorption, elle est en général du premier ou du second pseudo-ordre. La validité et les limites d'application des modèles permettent l'identification des mécanismes de l'adsorption du colorant par l'adsorbant.

II.8. Etude comparative

Une étude comparative entre les propriétés physicochimiques et biologiques des eaux traitées et celles exigées par le Décret N°06 -141 du 19 avril 2006, (Journal Officiel Algérien 2006) qui concerne la réglementation sur les rejets des effluents textiles dans le milieu hydrique est effectuée.

Chapitre III : Discussion

III.1. Introduction

Vu la pandémie du COVID-19, nous n'avons pas pu réaliser des travaux pratiques sur des échantillons d'eau brute contaminée par des colorants pour l'étude de la cinétique et le mécanisme de l'adsorption du bleu de méthylène ainsi que l'évaluation de l'efficacité du traitement physicochimique et biologique au niveau de ces derniers. Ce chapitre concernera donc la discussion des résultats rapportés dans la littérature par des auteurs qui travaillent sur ce domaine d'étude.

III.2. Les utilisation et les données toxicologiques du BM :

Le BM est utilisé intensivement dans différents domaines tel que: la chimie, la médecine, l'art dentaire et l'industrie des colorants. Quelques usages de BM:

- Colorant vital, il colore certaines structures histologiques ;
- Antiseptique (Mohd. Rafatullaha et *al.* , 2010), un antirhumatismal (Rosenberg and Rousselin, 1988.)
- Coloration du coton, bois, soie et papier (Uddin et *al.* 2009 ; Sukumaran and Ramalingam, 2011).
- Limiteur optique combiné à un Polymère, pour la protection des yeux contre les lasers intenses. (Bolutin et *al.*, 2006)
- Photosensibiliseur actif pour le traitement des tumeurs malignes (Cenens and Schoonheydt, 1988)
- Traitement spécifique d'une méthémoglobinémie toxique (Barriot and Danel, 1999) ...etc.

Les données toxicologiques relatives à l'utilisation du bleu de méthylène chez l'homme depuis de nombreuses années ont indiqué jusqu'à présent l'absence de danger lié à l'utilisation de ce produit comme médicament, dont la dose totale administré e ne doit pas dépasser 7 mg/kg (Saidi, 2013). Il peut causer des douleurs thoraciques, une dyspnée ; une anxiété, des tremblements, des hypertensions, et même coloration de la peau si la dose est élevée.

Le bleu de méthylène n'est pas fortement dangereux, mais il a un effet nocif sur les organismes vivants et les eaux. L'exposition aigue à ce produit causera :

- Exposition externe: irritation de la peau et des dommages permanents aux yeux;
- Par l'inhalation: respiration rapide ou difficile et augmentation de la fréquence cardiaque;
- Par l'ingestion: irritation de l'appareil gastro-intestinal, nausée, transpiration prodigue, confusions mentaux, cyanose et nécrose des tissus humains (Larbi, 2008).

III.3. Optimisation des paramètres physicochimiques :

L'élimination du bleu de méthylène (MB) des solutions aqueuses est étudiée en utilisant plusieurs adsorbants. Les effets du pH, du temps de contact, de la concentration du colorant et de la température sont tous pris en compte par plusieurs auteurs. Les effets de divers paramètres expérimentaux ont été étudiés à l'aide d'une technique d'adsorption par lots pour obtenir des informations sur le traitement des eaux contaminées par des colorants.

Le degré d'élimination du colorant augmentait avec la diminution de la concentration initiale du colorant et de la taille des particules de l'adsorbant et augmentait également avec l'augmentation du temps de contact, de la quantité d'adsorbant utilisé et du pH initial de la solution.

Houas *et al.*, (1999) ont étudié l'élimination du bleu de méthylène (BM) en solution aqueuse par adsorption sur le charbon actif commercial CECA 40 en réacteur statique clos. Ils ont rapporté qu'à pH et à température constants, le temps d'équilibre d'adsorption est indépendant de la concentration initiale du bleu de méthylène et égal à 5 heures. L'adsorption de ce colorant obéit à une isotherme de Langmuir de type I avec une capacité ultime d'adsorption de l'ordre de 367,6 mg de BM par gramme de CECA40. L'absence d'effet important de la température sur l'équilibre d'adsorption est également notée. L'adsorption est nettement meilleure en milieu basique qu'en milieu acide. Elle est meilleure, également, pour la granulométrie la plus fine.

Les capacités d'adsorption des charbons actifs naturels ont été comparées à celles du charbon actif commercial. Ces carbones pourraient être utilisés comme alternatives à faible coût au charbon actif commercial dans le traitement des eaux pour l'élimination de la couleur et des colorants (Kannanand Sundaram, 2001).

Mouni *et al.*, (2018) ont utilisé un autre adsorbant le kaolin algérien brut, ils ont trouvé que le kaolin algérien brut est efficace pour éliminer le MB des solutions aqueuses, de plus il peut être utilisé comme alternative aux adsorbants commerciaux à coût élevé. La capacité d'adsorption maximale de MB sur cet échantillon de kaolin est égale à 52,76 mg / g à $T = 25^{\circ} \text{C}$ et $\text{pH} = 6,0$. Les données thermodynamiques calculées démontrent que l'adsorption est spontanée et améliorée à des températures plus élevées. Les études de désorption avec de l'eau indiquent que l'adsorbant pourrait retenir avec succès le MB, même après quatre cycles.

III.4. Approches pour l'amélioration de l'adsorption et du biosorption

L'amélioration de l'adsorption et du biosorption représente une étape prometteuse pour une élimination rentable des colorants. Azharul *et al.*, (2017) ont préparé un charbon actif mésoporeux (HAC) par

carbonisation hydrothermale de déchets de meubles en rotin suivie d'une activation par NaOH. Les caractéristiques texturales et morphologiques, ainsi que les performances d'adsorption du HAC préparé vers le colorant bleu de méthylène (MB), ont été évaluées. Les effets des variables d'adsorption communes sur les performances ont abouti à une efficacité d'élimination de 96% pour l'échantillon MB à une concentration initiale de 25 mg / L, un pH de la solution de 7, 30 ° C et 8 h, avec une absorption maximale de 359 mg / g. Le HAC préparé avec une surface spécifique élevée de 1135 m² / g et une distribution moyenne de la taille des pores de 35,5 Å pourrait être un adsorbant efficace pour le traitement des eaux contaminées par des colorants synthétiques.

Zhang et *al.*, (2020) ont rapporté que la capacité du biochar modifié (un composite biochar vert / oxyde de fer a été produit en utilisant l'extrait de peau de banane et FeSO₄), à adsorber le bleu de méthylène (MB) a été considérablement améliorée (Langmuir Q_{max} de 862 mg / g pour MB lorsque C₀ = 500 mg / L, pH = 6,1, T = 313 K) par rapport au biochar non modifié de la peau de banane, et ont présenté de bonnes performances pour une large gamme de valeurs de pH (pH 2,05–9,21).

Hassan et *al.*, (2013) ont utilisé une biomasse séchée à partir de tiges végétales *Haloxylon recurvum* (HRS) pour l'élimination du bleu de méthylène. Ces tiges en poudre peuvent agir comme un biosorbant économique et écologique pour l'élimination du colorant des solutions aqueuses. Ces dernières années, un grand nombre de biosorbants ont été expérimentés pour être utilisés dans l'élimination des colorants, tels que la paille de lentilles (Celekli et *al.*, 2012), les cendres de balle de riz (Chowdhury et *al.*, 2009), les charbons actifs de la coque de tournesol (Thinakaran et *al.*, 2008), coquille de fruit de tamarin (Saha et *al.*, 2010), écorce de fruit de Cucumis sativus (Santhi et Manonmani, 2011), tégument de *Xanthoceras sorbifolia* (Yao et *al.*, 2009), tige de vigne (Ayan et *al.*, 2011), la cosse de graines de coton (Zhou et *al.*, 2011) et la coque de graines de castor (Sen et *al.*, 2010).

III.5. La cinétique et le mécanisme d'adsorption du bleu de méthylène

La cinétique et le mécanisme de l'adsorption du bleu de méthylène sur le charbon actif commercial (CAC) et les charbons actifs préparés à partir de la poussière de bambou, de noix de coco, d'arachide, de balle de riz et de paille ont été très étudiés dans la littérature.

Les données d'adsorption ont été modélisées en utilisant les isothermes d'adsorption de Freundlich et Langmuir et les équations cinétiques du premier ordre. La cinétique d'adsorption s'est avérée être de premier ordre en ce qui concerne la vitesse de diffusion intra-particule (Kannan and Sundaram, 2001).

Zhang et *al.*, (2020), Mouni et *al.*, (2018) et Azharul et *al.*, (2017) ont rapporté que le modèle isotherme de Langmuir et le modèle cinétique pseudo du second ordre décrivent avec précision le processus

d'adsorption.

Bedin et *al.*, (2016) ont rapporté que les données d'équilibre d'adsorption du bleu de méthylène (MB) sur charbon actif ont été mieux ajustées au modèle Redlich – Peterson. La monocouche de capacité d'adsorption maximale était de 704,2 mg g⁻¹, ce qui s'est avéré être élevé par rapport aux autres charbons actifs rapportés dans la littérature. Les données cinétiques ont montré un meilleur ajustement au modèle de pseudo-premier ordre à faible concentration de MB, et avec l'augmentation de la concentration, aux modèles de pseudo-second ordre et d'Elovich. Les paramètres thermodynamiques indiquent que le processus d'adsorption MB – AC est spontané et endothermique.

CONCLUSION

L'objectif de ce travail est d'étudier l'efficacité des techniques physico-chimiques et biologiques pour le traitement des effluents liquides produits par les industries manufacturières qui utilisent les colorants toxiques et polluants et notamment ceux difficilement biodégradables.

L'adsorption est la méthode la plus employée grâce à sa grande efficacité et son moindre coût. Au cours des dernières décennies, le développement des méthodes hybrides biologiques et physicochimiques peuvent améliorer l'efficacité d'élimination des colorants à faible coût et à haut rendement.

L'eau est indispensable à notre vie et à notre écosystème. L'élimination des polluants dissouts et particulaires permet d'obtenir une eau traitée de qualité telle qu'elle puisse être réutilisée pour un certain nombre d'applications.

Les références

- Abdelhafid-Zehhaf, (2012), *Etude d'adsorption et d'électroadSORPTION des métaux toxiques dans les eaux de surface sur différents adsorbants*, Thèses de doctorat, Université Djillali Liabes- Sidi Bel Abbès.
- Abdelouhab C., Aitamar H., Obretenov T.Z., Gaid A., (1988). Caractéristiques physico-chimiques et structurales de quelques argiles bentonitiques du nord-ouest algérien, *Analisis*, VOL 16 (5), pp 292-299.
- Abderrahim O., Didi M.A., Villemin D. (2009)., «Polyethyleneiminemethylenephosphonic acid for the solid-phase sorption of lead(II)», *Anal Lett* vol 42: pp1233–1244.
- Alain Maurel, (2006), *Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce*, Lavoisier / Tec et Doc 2ème édition, pp 1-286, France.
- Amir S (2005). *Contribution à la valorisation de boues de stations d'épuration par compostage : devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost*. Th. Doc., Ins. Nati. Poly de Toulouse. 341p.
- Amirouche L, (2011), *Etude du pouvoir de sorption du cuivre (II), du zinc (II) et des polyphénols par les bentonites sous l'effet des irradiations micro-ondes*, Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri-Tizi-Ouzou.
- Arivoli, S., Arivoli, M., Thenkuzhali, P., Deva, M., (2009), “Adsorption of rhodamine B by acid activated carbon-Kinetic, thermodynamic and equilibrium studies”, *Orbital: The Electronic Journal of Chemistry*, Vol.1 pp2.
- Ayan, E.M., Toptas, A., Kibrislioglu, G., Yalcinkaya, E.E.S., Yanik, J., (2011). “Biosorption of dyes by natural and activated vine stem. Interaction between biosorbent and dye”. *Clean – Soil, Air, Water* Vol.39, pp. 406–412.
- Azharul, Md., Ahmed, I.M.J., Khanday W.A., Asif, M. Hameed, B.H. (2017), “Mesoporous activated carbon prepared from NaOH activation of rattan (*Lacospermasecundiflorum*) hydrochar for methylene blue removal”, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Vol. 138, pp. 279-285.
- Baouia Kais, (2018), *Cours Traitement des eaux, université d'Oran*, Algérie
- Barr, D.P., Aust, S.D. (1994), Mechanisms white rot fungi use to degrade pollutants, *Environmental Science & Technology*, Vol. 28 pp. 78-87.
- Barrios-Martinez, A. Barbot, E. Marrot, B. Moulin, P. Roche, N. (2006), “Degradation of synthetic phenol-containing wastewaters by MBR”, *Journal of membrane science*, Vol. 281, pp288-296.
- Barriot, V. Danel P. (1999), *«Intoxications aiguës en réanimation; Groupe liaisons S.A»* 2ème édition.
- Beaudry J.P., (1984), *Traitement des eaux*, Edition de Griffon d'argile Bernard Pironin. Traitement des eaux
- Bedin K.C., Martins, A.C., Cazetta, A. L., Pezoti, O., Almeida, V.C. (2016), “KOH-activated carbon prepared from sucrose spherical carbon: Adsorption equilibrium, kinetic and thermodynamic studies for Methylene Blue removal”, *Chemical Engineering Journal*, Vol.286, pp. 476-484.
- Bernard Pironin, (1997). *Traitement des eaux*. Desjardins.
- Bhatia, S.C. (2017). *Pollution control in textile industry*. WPI Pub-lishing.
- Bolotin, P.A. Baranovsky, S.F. Evstigneev M.P. (2006): «Spectrophotometric investigation of the hetero-association of Caffeine and thiazine dye in aqueous solution. *Spectrochimica Acta Part A* VOL 64, pp693–697.
- Bottero J.Y, Lartiges B, (1992), *Séparation liquide-solide par coagulation-floculation : les coagulants/floculant, mécanismes d'agrégation, structure et densité des floes*, Mines et carrières Industrie minières Les Techniques.
- Bouaziz A. (2009) *Biosorption du nickel par la biomasse Pleurotus mutilus*, Ecole Nationale polytechnique, juin.
- Bougda N, (2007) *Etude de l'adsorption de micropolluants organiques sur la bentonite*, Mémoire de Magister, Université 20 Août 55-Skikda.

- Boukaous. N. (2014) «Extraction du colorant noir bleu naphthol et du médicament ibuprofène en milieu aqueux par membrane liquide émulsionnée». Université d'Annaba
- Boulkrah H.(2008) *Etude comparative de l'adsorption des ions plomb sur différents adsorbants*, Mémoire de Magister, l'université du 20 août 1955-Skikda.
- Bouras O, (2003), *Propriétés adsorbantes d'argiles pontées organophiles : Synthèses et caractérisation*, Thèse de doctorat, université de Limoges.
- Bouziani M., (2000), *L'eau de la pénurie aux maladies*, Editions Ibn-khaldoun, Algérie.
- Cardot, (1999), *Les traitements de l'eau. Procédés physico-chimiques et biologiques*. Ellipses EditionMarketing S.A.
- Carliell, C.M., Barclay, S.J., Naidoo, N., (1995). "Microbial decolorisation of a reactive azo dye under anaerobic conditions". *Water SA*, vol .21(1), pp61-69.
- Celekli, A., Tanrıverdi, B., Bozkurt, H.S., (2012). "Lentil Straw: a novel adsorbent for removing of hazardous dye – Sorption behavior studies". *Clean – Soil, Air, Water*, pp. 1–8.
- Cenens, J. Schoonheydt, R. A. (1988), «Visible spectroscopy of methylene blue on hectorite laponiteb, and barasym in aqueous suspension » *Clays and Clay Minerals*, Vol. 36, pp.214- 224.
- Cherraye R, (2012). *Préparation par voie chimique d'un charbon actif à partir des déchets de café (Effet de taux d'adjuvant)*, Mémoire Master Académique, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 16/06/2012.
- Chouat M. laboubi F, (2013). *Etude de l'adsorption du bleu méthylène par charbon actif*, Mémoire de Master, Université Mohamed Khaider-Biskra, Juin.
- Chowdhury, A.K., Sarkar, A.D., Bandyopadhyay, A., (2009). "Rice Husk Ash as a low cost adsorbent for the removal of methylene blue and congo red in aqueous phases". *Clean – Soil, Air, Water* vol .37, pp. 581–591.
- Christie R. (2001). *Colour chemistry*. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, United Kingdom.
- Cidf- (2000), *Lyonnaise des Eaux*, CIDF Centre International De Formation. Principes généraux de traitement des eaux.
- Claude Cardot, (1999), *Génie de l'environnement : les traitements de l'eau*. Paris: Page 9.
- Collas R., (1977), *La pollution des eaux*. Presses universitaires de Paris, 4^{ème} édition, pp 1-128.
- Cornet J.L, (1981), *Détermination des gradients hydrauliques dans les différentes phases du traitement des eaux, technique de l'eau et de l'assainissement*.
- Daunis, M. Champredonde, R. Blesbois E. (2008), *Etude du fonctionnement d'un pilote expérimental Système de boues activées (Rapport de stage)*, *Eau Sol Environnement*, Université Paul Sabatier Toulouse
- Degremont., (2005). *Mémento technique de l'eau*. Tome1. Ed 10^{ème}. 466p.
- Degremont, (2005), *Mémento technique de l'eau, France, Technique et documentation*, Degremont, 10^{ème} édition, pp. 1-2503
- Desjardins R, (1990), *Le traitement des eaux*, 2^{ème} édition revue de l'école polytechnique de Montréal
- Dhaouadi H., (2008), *Traitement des eaux usées urbaines les procédés biologiques d'épuration*, Université Virtuelle de Tunis.
- Djebbari, N. Benkerrou, A. (2016). «Préparation et caractérisation des microsphères basées PEEK-WC/D2EHPA, appliquées à l'adsorption de la Rhodamine B et de Bleu de Méthylène ». Mémoire de Master. Université de Bejaia
- Dos Santos A., F.J. Cervantes et J.V. van Lier, (2007). Review paper on current technologies for decolorisation of textile wastewaters: Perspectives for anaerobic biotechnology. *Bioresour. Technol.*, VOL 98, pp 2369-2385
- Đurđić, K. I., Ostafe, R., Prodanović, O., Đelmaš, A., Popović, N., Fischer, R., Schillberg, S., Prodanović, R. (2021), "Improved degradation of azo dyes by lignin peroxidase following mutagenesis at two sites near the catalytic pocket and the application of peroxidase-coated yeast cell walls", *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, Vol. 15 (19).
- Edeline M. F, (1992), *Epuration physico-chimique des eaux*, 2^{ème} édition, Ed. CEBEDOC, France

- Emsalem R, (1986), *Climatologie Générale. Edition. I.P.E.N.A.*, Tome 1 : Page 198.
- F.A.O., (2003). *Irrigation avec les eaux usées traitées. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture*. Bureau Régional pour le Proche Orient et Bureau sous régional pour l'Afrique du Nord. 73p.
- Grim, R. E., (1968). *Clay Mineralogy*. McGraw-Hill, Inc., New York, 596 p
- Guerene H. et Gamella C., (1978), *Le traitement des eaux publiques industrielles et privées*, Ed. Elyrols
- Guivarch E, (2004). *Traitement des polluants organiques en milieux aqueux par le procédé électrochimique d'oxydation avancée « Electro-Fenton »*. Application à la minéralisation des colorants synthétiques, Thèse de doctorat de l'université de Marne-la-Vallée.
- Hao J., H. Kim et P.C. Chiang (2000). « Decolorization of wastewater ». *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, VOL 30, pp 449-505.
- Hassan, M. M., & Carr, C. M. (2018). "A critical review on recent advancements of the removal of reactive dyes from dyehouse effluent by ion-exchange adsorbents". *Chemosphere*, VOL 209(1), pp 201-219.
- Hassan, W., Farooq, U.M. Ahmad, Arabian, M.A. (2017) "Potential biosorbent, *Haloxylon recurvum* plant stems, for the removal of methylene blue dye", *Journal of Chemistry*, Vol.10, pp.S1512–S1522
- Hedi Ben Mansour, Oualid Boughzala, Dorra Dridi, Daniel Barillier, Leila Chekir-Ghedira et Ridha Mosrati (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 / Journal of Water Science*, vol. 24, n° 3, pp. 209-238.
- Hema, M., Deva M. P., (2009), "Adsorption of malachite green onto carbon prepared from borassus bark" *J. Arabia. Scien. Engine*, pp. 677-681.
- Houas A., Bakir I., Ksibi M. and Elaloui E., (1999), « Etude de l'élimination de bleu de méthylène dans l'eau par le charbon actif commercial CECA40 », *J. Chim. Phys.* Vol. 96, N°3, pp. 479-486
- Imran, M., Crowley, D. E., Khalid, A., Hussain, S., Mumtaz, M. W., & Arshad, M. (2015). "Microbial biotechnology for decolorization of textile wastewaters". *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, VOL 14(1), pp 73--92.
- Jean-Claude, Boeglin, (2001), *Propriétés des eaux naturelles*. Technique de l'ingénieur, traité environnement, G1110, V1.
- Joris Robillard, (2011), *Techniques alternatives en assainissement pluvial*, Montpellier, Agro Paris Tec, pp 1-23.
- Joseph, O., (2009). *Etude du potentiel d'utilisation de résidus agricoles haïtiens pour le traitement par biosorption d'effluents pollués*, Thèse doctorat, chimie de Lyon.
- Journal Officiel Algérien (2006), *Les valeurs limitent des rejets de l'industrie textile*, Décret exécutif n°06-141 du 19 Avril
- Jozja et al, N., (2003), "Impacts « multi-échelle » d'un échange (Mg,Ca)-Pb et ses conséquences sur l'augmentation de la perméabilité d'une bentonite". *Comptes Rendus Géoscience*, pp 729–736.
- Kahramann, S., Yasilada, O. (2001), wastes for laccase production by White Rot fungi, *Folia Microbiology*, Vol. 46 pp. 133 – 136
- Kais Baouia, (2018), Cours Traitement des eaux, université d'Ouargla, Algérie.
- Kannan, N., Sundaram, M.M. (2001), "Kinetics and mechanism of removal of methylene blue by adsorption on various carbons—a comparative study", *Dyes and Pigments*, Vol. 51, Issue 1, pp.25-40.
- Kanouri R. Labide A, (2012/2013) *Adsorption du phénol sur la bentonite de Maghnia*, Mémoire master Académique, Université Kasdi Merbah-Ouargla.
- Kemmer F. N., (1984), *Manuel de l'eau*, Edition technique et documentation, Lavoisier, Paris.
- Kettab A, (1992), *Traitement des eaux "les eaux potables"*, O.P.U, Alger.
- Larbi F. (2008), *Contribution à la décoloration des eaux résiduaires textiles par des argiles naturelles*, mémoire de magister, Science de l'Environnement Climatologique, Université d'Oran ES-SENIA, 126p.
- Lazarova V, (1998). « La réutilisation des eaux usées : un enjeu de l'an 2000 » ; « L'eau, l'industrie, les nuisances », n°212, mai. *Aquatiques par le fer ferrique en milieu aqueux. Effet de la préoxydation*, Thèse de Doctorat, université de Poitiers.

- Leclech B., (1998), *Environnement et agriculture*. Bordeaux, *Synthèse Agricole*, 2ème édition, pp1-342
- Lefebvre E.,(1990), *Coagulation des substances humiques aquatiques par le fer ferrique en milieu aqueux. Effet de la préoxydation*, Thèse de Doctorat, université de Poitiers.
- Lind C., (1994), *Coagulation Control and Optimization: Part 1*, Public Works.
- Maaliou, (2013), *Notes de cours STEP-Traitement épuraton. Systèmes hydrauliques de traitement et épuration des eaux usées et industrielles*, université des sciences et de la technologie houari Boumediene, Algérie.
- Maba, B. (2014), *dégradation des effluents textiles (cas d'un colorant synthétique : le bleu de méthylène) par procédé « Fenton » en utilisant la latérite*, Mémoire de mas ter, Eau et Assainissement, Institut International d'Ingénierie (2IE), Burkina Faso, 44p.
- Md. T. Uddin, Md. A.Islam, S. Mahmud, Md. Rukanuzzaman (2009). "Adsorptive removal of methylene blue by tea waste". *Journal of Hazardous Materials* VOL 164, pp 53–60.
- Meier.M, Namjesnik.K, Maurice P et Aiken, G.R, (1999), "Fractionation of aquatic natural organic matter upon sorption to goethite and kaolinite". *Chemicalgeology*.VOL157(3) pp 275-284 .
- Mohand-Said O., (2001), *Traitement des eaux*, Office des publications universitaires.
- Mohd.Rafatullaha, O.Sulaimana, R. Hashima, A.Ahmad(2010), «Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents»: A review; *Journal of Hazardous Materials* VOL 177,pp70–80.
- Mouaziz.S, (2012), *Préparation et Caractérisation des bentonites modifiées par des sels de Bis-imidazolium – Application à l'adsorption du bleu Telon*, Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, 14/06/2012.
- Mouchet P, (1991), *les modalités de traitement des eaux brutes : quelle qualité d'eau quels procédés*, S.T.P, Pharma Pratique 1.
- Nicell, J.A., Bewtra, J.K., Biswas, N., Pierre, C. St., Taylor, K.E. (1993), "Enzyme catalysed polymerization and precipitation of aromatic compounds from aqueous solution", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 20, pp. 725-735.
- Orts, F., del Río, A. I., Molina, J., Bonastre, J., & Cases, F. (2018). "Electrochemical treatment of real textile wastewater: Trichromy Procion HEXL® ». *Journal of Electroanalytical Chemistry*, VOL 808, pp387–394.
- Pagga, U. t D. Brown (1986). The degradation of dyestuffs part II: behaviour of dyestuffs in aerobic biodegradation tests. *Chemosphere*, VOL 15, PP 479-491.
- Pagga, U., Taeger, K., 1994. "Development of a method for adsorption of dyestuffs on activated sludge". *Wat. Res.*, VOL 28 (5), pp 1051-1057
- Reife, A., and Freeman, H. S. (1996). *Environmental chemistry of dyes pigments*. Wiley, New York. Plusieurs rapports récents ont été publiés sur la comparaison des performances de sorption.
- Robert Blieft Claus. Perraud, (2015), *Chimie de l'environnement : air, eau, sols, déchets* : pp 271, 290, 291.
- Rodriguez, E., Pickard, M.A., Duhalt, R.V. (1999) "Industrial dye decolorization by laccases from lignolytic fungi", *Current Microbiology*, Vol. 38 pp. 27 – 32.
- Rosenberg N, X. Rousselin, (1988). *Rhinite et asthme professionnels aux colorants Réactifs*. Documents pour le médecin de travail, Vol 34, pp 111-114.
- Sadki, H. Zait K., Saidi, M., (2014). *Adsorption d'un colorant cationique d'un milieu aqueux sur une argile locale activée*, Rapport bibliographique, Université Abdelmalek Essaâdi -Maroc.
- Saha, P., Chowdhury, S., Gupta, S., Kumar, I., Kumar, R., (2010). "Assessment on the removal of malachite green using tamarind fruit shell as biosorbent". *Clean – Soil, Air, Water* Vol. 38, pp. 437–445.
- Saidi F.Z. (2013), *Elimination du bleu de méthylène par des procédés d'oxydation avancée*, Mémoire de magister, *Chimie inorganique et environnement*, Université Abou Bakr Belkaid - Tlemcen -, 88p.
- Sani, R.K., Banerjee, U.C., (1999). "Decolorization of triphenylmethane dyes and textile and dye-stuff effluent by Kurthiasp". *Enzyme and microbial Tech.*, Vol. 24, pp 433-437.
- Santhi, T., Manonmani, S., (2011). "Malachite green removal from aqueous solution by the peel of Cucumis sativa fruit". *Clean – Soil, Air, Water* Vol. 39, pp. 162–170.

- Schrotter J.-C., Daines C., Bozkaya B., (2008). *Elimination de la matière organique dans les concentrats membranaires*, Anjou Recherche Chemin de la Digue-BP76.
- Sedira N., (2012/2013). *Etude de l'adsorption des métaux lourds sur un charbon actif issu de noyaux de dattes*, Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Massaadia Souk-Ahras.
- Seghiri R., (1996), *Elimination des substances humiques extraites de l'eau de la retenue de Hammam-Ghrouz par coagulation-floculation avec le fer ferrique et les sels d'aluminium*, Thèse de Magister, université de Constantine.
- , T.K., Mohammod, M., Maitra, S., Dutta, B.K., (2010). "Removal of cadmium from aqueous solution using castor seed hull: a kinetic and equilibrium study". *Clean – Soil, Air, Water* Vol. 38, pp. 850–858.
- Servais J.-P., (1999). *La matière organique dans les milieux naturels*. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, octobre, p.49.
- Setiadi, T., Andriani, Y., & Erlania, M. (2006). *Treatment of textile wastewater by a combination of anaerobic and aerobic processes: A denim processing plant case*. In S. Ohgaki, K. Fukushima, H. Katayama, S. Takizawa, & C. Polprasert (Eds.), *Southeast Asian Water Environment 1: Selected papers from the first International symposium on Southeast Asian Water environment (biodiversity and Water environment)*, Bangkok, Thailand, October (pp. 159–166). Oxford: IWA Publishing, 2003.
- Seyewetz and Sisley, (1896) *Chimie des matières colorantes artificielles*. Libraires de l'Académie de Médecine (Éditeur), Paris Masson, France.
- Sibeud Elisabeth, (2015), *Aménagement et eaux pluviales*. Guide Méthodologique : Page 4.
- Sukumaran, V. S. Ramalingam, A. (2011), «Third order optical nonlinearities and spectral characteristics of methylene blue». *Journal of Quantum Information Science*, Vol. 1, 69-72.
- Tardat-Henry M, Beaury J.-P., (1984). *Chimie des eaux*, Ed. Le Griffon d'argile INC, Canada.
- Thebault P., 1978, *Elimination des matières organiques et des micropolluants contenus dans les eaux de surface : Rôle et efficacité des coagulants*, Thèse de docteur-Ingénieur, I.N.P.L.
- Thinakaran, N., Baskaralingam, P., Ravi, K.V.T., Panneerselvam, P., Sivanesan, S., (2008). "Adsorptive removal of Acid Blue 15: equilibrium and kinetic study". *Clean – Soil, Air, Water*, Vol. 36, pp. 798–804.
- Uygur, A. and Kargi F., (2004), "Biological nutrient removal from pre-treated landfill leachate in a sequencing batch reactor", *Journal of environmental management*, Vol. 71, pp 9-14.
- Valiron F., (1994), "Lyonnaise des Eaux. Mémento du Gestionnaire de l'alimentation en eau et de l'assainissement. Tome I Eau dans la ville Alimentation en Eau", Technique et documentation Lavoisier,
- Varjani, S., Rakholiya, P., Yong Ng, H., Youd, S., Teixeira, J. A. (2020), "Microbial degradation of dyes: An overview", *Bioresource Technology*, Vol. 314, pp 123728.
- Wang, L.; Jiang, Z.; Zhao, R.; Cong, L.; Li, Y.; Chenglu, Z., (2010), "Adsorption of basic dyes on activated carbon prepared from Polygonum orientale Linn: equilibrium, kinetic and thermodynamic studies », *Desalination*, Vol. 254:1–3, pp. 68-74.
- Weber, E., Wolfe, N.L., (1987). Kinetics studies of reduction of aromatic azo compounds in anaerobic sediment/water systems. "Environ. Toxicol. Chem.", Vol. 6, pp 911-920.
- Welham A. (2000). *The theory of dyeing (and the secret of life)*. J. Soc. Dyers Colour., VOL 116, pp 140-143.
- Wesenberg, D., Kyriakides, I., Agathos, S.N. (2003), White Rot Fungi and their enzymes for the treatment of industrial dye effluents, *Biotechnology Advances*, Vol. 22 .pp 161 –187.
- Wilson M. (1907), "The chemistry and staining properties of certain derivatives of the methylene blue", *American Journal of Physiology* VOL 19, pp 647-670.
- Xu, X.-R., Li, H.-B., Wang, W.-H., and Gu, J.-D. (2005). 'Decolorization of dyes and textile wastewater by potassium permanganate'. *Chemosphere* VOL 59, pp 893.
- Yao, Z., Wang, L., Qi, J., (2009). "Biosorption of methylene blue from aqueous solution using a bioenergy forest waste: Xanthoceras sorbifolia Seed Coat". *Clean – Soil, Air, Water* Vol. 37, pp. 642–648.

- Zawlotski Gv, (2004). «*Traitement des polluants organiques en milieu aqueux par procédé électrochimique d'oxydation avancée*» "Electro-Fenton". Application à la minéralisation des colorants synthétiques. Thèse de Doctorat. Université de Marne-La- Vallée.
- Zhang, P., O'Connor, D., Wang, Y., Jiang, L., Xia T., Wang, L., Tsang, D. C.W., Okd, Y. S., Hou, D. (2020), "A green biochar/iron oxide composite for methylene blue removal", *Journal of Hazardous Materials*, Vol.384, , pp121286
- Zhenwang L., C. Zhenlu et L. Jianyan (2000). *The PT dye molecular structure and its chromophoric luminescences mechanism*. Dans : 15th World Conference on Non-Destructive Testing, 15-21 October 2000, Rome, Italie.
- Zhou, Q., Gong, W., Yang, D., Xie, C., Li, Y., Liu, X., Bai, C., Wang, R., (2011). Assessment of the biosorption characteristics of a spent cottonseed husk substrate for the decolorization of methylene blue. *Clean – Soil, Air, Water* Vol.39, pp. 1087–1094.
- Ziegenhagen, D., Hofrichter M., (2000) A simple and rapid method to gain high amounts of manganese peroxidase with immobilized mycelium of the agric white-rot fungus *Clitocybuladusenii*, *Applied Microbiology Biotechnology*, Vol. 53 pp.553 – 557.

Annexes

I. Présentation du centre de traitement d'eau potable Boudouaou *SEAAL*:

SEAAL a été créée en 2006, comme opérateur pilote de la modernisation du service public de l'eau sur Alger. *SEAAL* est un opérateur public de droit Algérien en charge de la gestion des services de l'Eau et de l'Assainissement. Elle assure et surveille le traitement de l'eau potable et sécurise la distribution d'eau de qualité 24h/24 sur l'ensemble des Wilayas de Boumerdes, d'Alger et de Tipasa (soit 57 communes à Alger et 28 communes à Tipasa).

Le centre de traitement fait partie du système appelé SPIK (Système de production IsserKeddarra), mise en service en 1987, il se situe à 7 Km du barrage de Kedarra, entre la ville de Boudouaou et d'Ouled Moussa, il occupe une superficie de 17 hectares (Figure i).



Figure. i: Centre de Traitement Eau potable SEAAL BOUDOUAOU

La station de traitement a été dimensionnée pour traiter un débit maximal d'eau du barrage de Kedarra de $540000 \text{ m}^3/\text{j}$, (Fig. ii).

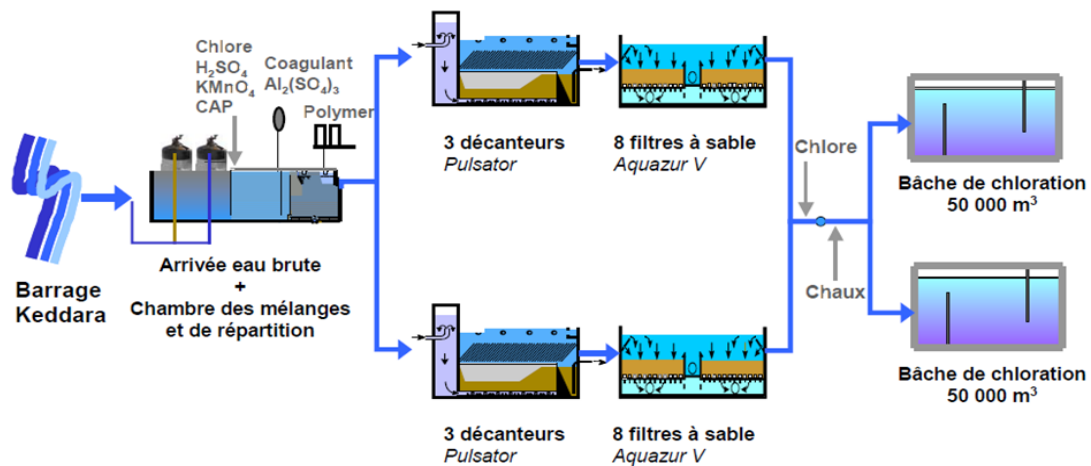


Figure. ii : La filière de traitement de la station Boudouaou

Elle est alimentée à partir du barrage de Keddara (capacité 142 millions de m^3 , profondeur de 106 m, déversoir à 145 m) à partir d'une prise d'eau à 3 niveaux, munie d'un système de dégrillage. Ce barrage est lui-même alimenté à partir de l'Oued Keddara, les eaux du barrage de Beni-Amrane et le trop-plein du barrage Hamiz, tous les 2 situés plus en amont (Fig iii).

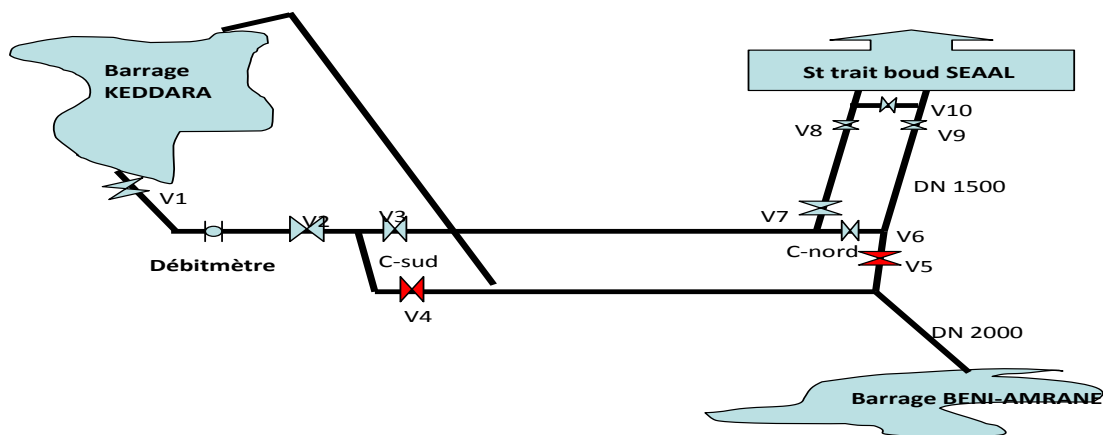


Figure. iii : Système de production Isser Keddarra