

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE CHIMIE

N° :.....



Domaine : Science de la Matière

Spécialité: Chimie de l'environnement

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par :

KARA Souheyla

HERIZI Achwaq

Intitulé :

**Traitement des eaux usées par le procédé coagulation-
floculation à l'aide de $(Al_2(SO_4)_3$ - Alginate -Bentonite)**

Soutenu devant le jury composé de :

Pr .BENYAHIA Azzedine

Dr .NOUFEL Kamel

Dr .MELOUKI Azzedine

Université de M'sila

Université de M'sila

Université de M'sila

Président

Rapporteur

Examineur

Année universitaire : 2021/2022

Remerciement

Nous tenons à remercier le Bon Dieu, le Tout-Puissant pour nous avoir donné la santé physique et morale afin de réaliser ce modeste travail.

Notre reconnaissance va plus particulièrement à monsieur le promoteur Dr NOUFEL Kamel, notre encadrant de mémoire, nous le remercions pour ses conseils, ses encouragements et sa patience. Nos remerciements les plus sincères et les plus profonds sont adressés à Pr. BENYAHYA Azzedine qui nous a fait l'honneur de présider le jury.

Nos remerciements également à Dr MELOUKI Azzedine, pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Nôtres remerciements s'adressent également à monsieur Mohamed laborantin au sien de laboratoire, pour son aide, soutien et encouragements.

ARIOUA Nour elddine chef du Laboratoire de la chimie pour son assistance constante avec tout ce dont nous avons besoin.

Nous remercions tous ceux qui nous ont prodigué des conseils scientifiques, fourni une aide matérielle et technique, ou tout simplement humaine.

Achwaq et Souheyla

Dédicace

Je dédie cet humble travail à mes très chers parents, ma source de vie, d'amour et d'affection qui m'ont toujours soutenu avec leurs encouragements tout au long de mes études et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs, A mes grands parents qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard,

A mes chères sœurs « Rahma, Sofia, Marwa et Sara » pour leurs supports

A ma binôme «Souheyla»

A tous mes ami(e)s qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

A tout ceux que j'aime.

Herizi Achwaq

Dédicace

'اللهم لك الحمد كما أنت أهله ووليه وكما ينبغي لجلال وجهك وعظيم سلطانك'

Je dédie ce mémoire à mes parents :

A mon père « Abd El Hamid KARA » et Ma mère « Nour El Houda SAKER », qui m'ont donné la vie, la tendresse et le courage pour réussir et grâce à leurs prières et leur soutien, me voici.

A mes grands parents, que Dieu vous bénisse et vous garde tous les deux en bonne santé

A mes chère(s) frères et sœurs « Salah, Soundes, Lina et Mohammed », je vous souhaite que le succès, que Dieu vous garde et illumine vos chemins

A mes oncles et tantes, A mon oncle « Tayeb KARA » que Dieu te bénisse, et un merci spécial à ma petite tante « Amira »

A ma binôme « Achwaq »

A mes amies « Bouchra KHARKHACHE », « Wissal ALLAL » et « Bouchra CHIKOUCHE », Pour leur compagnie et bons moments passés ensemble.

KARA Souheyla

Résumé

Le but de ce travail est d'étudier expérimentalement le traitement des eaux usées par Coagulation-floculation (C-F).

Nous avons étudié les principaux paramètres tels que, le temps et la vitesse d'agitation, le temps de décantation, l'effet de pH initial et la dose optimale de différents coagulants utilisés (le sulfate d'aluminium, l'alginate de sodium, la bentonite et leur mélange). Les résultats montrent que la coagulation-floculation C-F est une bonne technique et que le traitement des eaux usées compte du type de coagulant et des facteurs qui l'affectent comme la turbidité, la température et les autres facteurs mentionnées précédemment.

Mots clés : Coagulation-floculation, Turbidité, Jar test, Sulfate d'aluminium, alginate, bentonite.

Abstract

The aim of this work is to study experimentally the treatment of wastewater by coagulation-flocculation (C-F). We studied the main factors such as stirring time and speed, decantation time, initial pH effect and optimal dose of different coagulants used (aluminum sulphate, sodium alginate, bentonite and their mixture). The results show that C-F coagulation-flocculation is a good technique and that wastewater treatment includes the type of coagulant and the factors that affect it such as turbidity, temperature and other factors mentioned above.

Keywords: Coagulation-floculation, Turbidity, Jar test, Aluminium sulphate, alginate, bentonite.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو الدراسة التجريبية لمعالجة مياه الصرف الصحي عن طريق التبختر-التكتل.

تمت دراسة المعلمات الرئيسية مثل وقت وسرعة التحريض، وقت الاستقرار وتأثير الاس الهيدروجيني الاولي والجرعة المثلى لمواد التبختر المختلفة المستخدمة (كبريتات الالمنيوم، الجينات الصوديوم، البنتونيت ومزيجهما). تظهر النتائج ان التبختر-التكتل تقنية جيدة وان معالجة مياه الصرف الصحي تشمل نوع المختر والعوامل التي تؤثر عليه مثل درجة الحرارة، التعكر مع العوامل المذكورة أعلاه.

الكلمات الرئيسية : التخثر-النكتل، التعكر، اختبار الجرة، كبريتات الالمنيوم، الالجينات، البنتونيت.

Table des matières

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Généralité sur les eaux usées

I.1. Introduction :.....	3
I.2. Définition des eaux usées :.....	3
I.3. Origine des eaux usées :.....	3
I.3.2. Origine domestique :.....	4
I.3.3. Origine agricole :.....	4
I.4. Les différents types des eaux usées :.....	4
I.4.1. Les eaux domestiques et urbaines :.....	4
I.4.2. Les eaux usées industrielles :.....	5
I.4.3. Les eaux pluviales :.....	5
I.4.4. Les eaux usées agricoles :.....	5
I.5. Pollution de l'eau :.....	5
I.5.1. Les différents types de pollution :.....	6
I.5.2. Les types de polluants :.....	7
I.6. Impact sur l'environnement et la santé humaine :.....	7
I.7. Caractéristiques des eaux usées :.....	8
I.7.1. Paramètres physiques :.....	8
I.7.2. Paramètres Organoleptiques :.....	9
I.7.3. Paramètres chimiques :.....	10
I.7.4. Paramètres Biologique :.....	11
I.8. Les stations d'épurations des eaux usées :.....	12
I.8.1. Principe de fonctionnement d'une station d'épuration des eaux usées :.....	14
I.8.2. Les étapes de traitement des eaux usées utilisées dans les STEP :.....	15
I.8.3. Présentation de la station d'épuration de M'sila :.....	18

Chapitre II : Procédée de traitement des eaux usées (coagulation-floculation)

II.1. Introduction :.....	21
II.2. coagulation-floculation :.....	21
II.2.1. Généralités (définition) :.....	21
II.2.2. Coagulants et adjuvant de floculation :.....	21
II.2.3. Types des adjuvants poly électrolyte (Alginate et Bentonite) :.....	22

II.3.	Caractéristiques des particules à éliminer :	23
II.3.1.	Généralités :	24
II.3.2.	Matières en suspension et colloïdales :	24
II.3.3.	Structure des particules colloïdales	24
II.4.	La potentielle thermodynamique ou potentiel Stern :	25
II.5.	La potentielle électrocinétique Zêta :	25
II.6.	Le procédé de coagulation floculation :	26
II.6.1.	Coagulation :	26
II.6.2.	Mécanismes de l'instabilité des particules colloïdales :	26
II.6.3.	Les avantages et les inconvénients des coagulants :	28
II.6.4.	Paramètres influençant le processus de coagulation :	29
II.6.5.	Floculation :	30
II.6.6.	La décantation :	31
II.7.	Conclusion :	32

Chapitre III : Méthodes et techniques expérimentales

III.1.	Introduction :	34
III.2.	Appareillage d'expérimentation (jar-test) :	34
III.2.1.	Appareillage :	34
III.2.2.	Matériels et produits :	34
III.2.3.	Procédure expérimentale:	35
III.2.4.	Dispositifs expérimentaux (Jar Test):	35

Chapitre IV : Résultats expérimentaux et discussion

IV.1.	Matériels et méthodes :	44
IV.1.1.	Point de prélèvement des eaux usées brutes :	44
IV.2.	Description des tests de floculation :	44
IV.2.1.	Préparation du coagulant :	44
IV.2.2.	L'essai de Jar-Test :	44
IV.2.3.	Détermination de la concentration optimale des coagulants :	45
IV.2.	Etudes comparative de l'efficacité des Coagulants :	45
IV.2.1.	Variation de pH en fonction des coagulants :	45
IV.2.2.	Variation de La conductivité en fonction des doses des coagulants :	46
IV.2.3.	Variation de la turbidité en fonction de la dose des coagulants et leur mélange:	48
IV.2.4.	Variation de la matière en suspension MES en fonction des doses des coagulants :	49
IV.2.5.	variation de l'absorbance(UV _{254nm}) en fonction de la dose des coagulants :	50

IV.1.6. Variation de la turbidité en fonction de la matière en suspension(MES) :.....	51
IV.1.7. Variation de la turbidité en fonction de l'absorbance UV _{254nm} :.....	52
Conclusion générale :.....	54
Bibliographie :.....	56
Sitographie :.....	60

Liste des figures :

Figure I. 1: Cercles relatifs pour la valeur de rapport de biodégradabilité.....	13
Figure I. 2: Une station d'épuration des eaux usées.	14
Figure I.3 :Les étapes de fonctionnement des stations d'épuration (STEP).	16
Figure II. 1:Nature et gamme de taille des particules colloïdales dans l'environnement (Aouina B et Leblalta M (2020)).	23
Figure II. 2:Effet de la distance entre deux particules colloïdales sur la force de répulsion électrostatique (E_r)la force d'attraction (E_a)et la force résultante (E)	24
Figure II. 3: Double couche d'une particule colloïdale.	25
Figure II. 4: Emprisonnement des particules dans les floccs pendant la décantation.	27
Figure II. 5: Adsorption et pontage à l'aide de polymères.	27
Figure II. 6: Différents phénomènes de coagulation-floculation produits par un polymère. (Tirée de Teramoto, 1993).	31
Figure III. 1: jar-test.	36
Figure III. 2: pH Mètre.	38
Figure III. 3: Conductimètre.	39
Figure III. 4:Turbidimètre.	40
Figure III. 5: Spectrophotomètre UV-Visible.	41
Figure III. 6: Mesure des matières en suspension (MES).	42
Figure IV. 1: Variation de pH en fonction de la dose des coagulants (sulfate d'aluminium, Alginate, Bentonite) et leur mélange.	47
Figure IV. 2: Variation de conductivité en fonction de la dose des coagulants et leur mélange.	48
Figure IV. 3: Variation de la turbidité en fonction de la dose de sulfate d'aluminium.....	49
Figure IV. 4: Variation de la turbidité en fonction de la dose d'Alginate.....	49
Figure IV. 5:Variation de la turbidité en fonction de la dose du Bentonite.....	49
Figure IV. 6: Variation de la turbidité en fonction de la dose du Mélange.	49
Figure IV. 7: Variation de la matière en suspension (MES) en fonction de la dose de sulfate d'aluminium.	50
Figure IV. 8: Variation de la matière en suspension (MES) en fonction de la dose d'Alginate.	50
Figure IV. 9: Variation de la matière en suspension(MES) en fonction de la dose de Bentonite.	50
Figure IV. 10: Variation de la matière en suspension (MES) en fonction de la dose de mélange.....	50
Figure IV. 11: variation de l'absorbance UV_{254nm} en fonction de la dose de sulfate d'aluminium.	51

Figure IV. 12: variation de l'absorbance UV _{254nm} en fonction de la dose d'Alginate.	51
Figure IV. 13: variation de l'absorbance UV _{254nm} en fonction de la dose de Bentonite.	51
Figure IV. 14: variation de l'absorbance UV _{254nm} en fonction de la dose du mélange.	51
Figure IV. 15: Variation de la matière en suspension MES en fonction de la turbidité du sulfate d'aluminium.	52
Figure IV. 16: variation de la matière en suspension MES en fonction de la turbidité d'Alginate.	52
Figure IV. 17: Variation de la matière en suspension (MES) en fonction de la turbidité de Bentonite.	52
Figure IV. 18: Variation de la matière en suspension (MES) en fonction de la turbidité du mélange.	52
Figure IV. 19: Variation de la turbidité en fonction de l'absorbance UV _{254nm} de sulfate d'aluminium.	53
Figure IV. 20: Variation de la turbidité en fonction de l'absorbance UV _{254nm} d'Alginate.	53
Figure IV. 21: Variation de la turbidité en fonction de l'absorbance UV _{254nm} du Bentonite... ..	54
Figure IV. 22: Variation de la turbidité en fonction de l'absorbance UV _{254nm} du mélange.	54

Liste des tableaux :

Tableau I. 1 : les principaux types de polluants des eaux usées.	7
Tableau II. 1 :Avantages et inconvénients du sulfate d'alumine, chlorure ferrique et PAC	26
Tableau III. 1: les appareils nécessaire pour la recherche.....	33
Tableau III. 2: les matériels et produits utilisée dans la recherche.	33
Tableau III. 3: Classification des eaux d'après leur pH.	36
Tableau III. 4: Classes de turbidité usuelles (NTU, nephelometricturbidity unit).....	38
Tableau IV. 1: Caractéristiques des échantillons utilisées.....	44

Liste des abréviations :

STEP	La station d'épuration
PCB	Polychlorobiphényles
MES	Matière en suspension
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
FTU	Formazine Turbidity Unit
PH	Potentiel d'hydrogène
DCO	La Demande Chimique en Oxygène
DBO	La Demande Biologique en Oxygène

Introduction Générale

Introduction Générale:

L'eau est une ressource vitale pour l'homme, sa santé et son développement; mais aussi également pour ses activités agricoles, économiques et la qualité de son environnement en dépend étroitement. Cependant, elle est le réceptacle universel de tout type de pollution, elle peut être chimique, physique ou biologique, mais la croissance alarmante de la pollution des eaux par des matières diverses, organiques ou non : pesticides, détergents, métaux lourds et d'autres substances toxiques, représente un réel danger pour la faune et la flore et cause de sérieux problèmes à l'humanité[1].

Les diverses activités anthropiques liées aux fortes densités de populations dans les milieux ruraux et urbains entraînent une augmentation de la consommation d'eau et une production importante d'eaux usées. Ces eaux usées nécessitent une bonne gestion, une épuration qui a pour objectif de rejeter dans le milieu naturel des eaux d'une qualité suffisante ne pouvant altérer que le moins possible le milieu récepteur, afin de réduire d'une part les risques sanitaires pour la population et d'autre part, préserver les écosystèmes récepteurs, protéger l'environnement, la biodiversité en général et la biodiversité aquatique en particulier ainsi que la santé publique et aussi dans la réutilisation pour les besoins de l'agriculture[2].

Il existe à l'heure actuelle une vaste gamme de méthodes et techniques de traitement visant à éliminer les divers polluants présents dans ces eaux contaminées. Chacune d'elle utilise divers procédés pour y parvenir à un résultat de purification optimale et selon l'usage souhaité. Différentes techniques sont utilisées pour la clarification des eaux. Parmi lesquelles la coagulation-floculation est le traitement chimique le plus utilisé. L'étude de l'étape de coagulation-floculation se fait en laboratoire, dans une installation appelée Jar-Test, permettant la sélection du meilleur jeu de conditions opératoires en vue de l'étape de décantation. Nous allons faire une étude comparative de traitement des eaux usées de la STEP de M'sila par différents coagulants à base de sel d'aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$), de l'alginate, la bentonite et leur mélange.

Ce mémoire est composé de deux parties principales. La première partie est la présentation bibliographique, La deuxième partie présente l'étude expérimentale. Les deux parties comportent quatre chapitres :

- Le premier chapitre traite des généralités sur les eaux usées, dont nous avons citées les origines de ces dernières, leurs caractéristiques, leur traitement et aussi la description de la station d'épuration.
- Le deuxième chapitre présente un rappel théorique sur la coagulation-floculation ainsi que l'ensemble des phénomènes que font intervenir notre traitement sur les eaux usées par le procédé de coagulation-floculation en utilisant le sel d'aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), l'alginate de sodium, la bentonite et leur mélange.
- Le troisième chapitre présente les méthodes et techniques expérimentales.
- Le quatrième chapitre regroupe la discussion de nos résultats expérimentaux.

Notre travail se termine par une conclusion générale, faisant sortir les résultats d'étude.

Chapitre I :

Généralité sur les eaux usées

I.1. Introduction :

Les eaux usées appelées eaux polluées sont constituées de toutes les eaux de nature à contaminer les milieux dans lesquelles elles sont déversées , ils sont formées du sous-produit d'une utilisation humaine , soit domestique ,soit industrielle ou agricole qui doivent bénéficier d'une dépollution avant être rejetées dans la nature ou d'être consommées par l'homme[2].

I.2. Définition des eaux usées :

Les eaux usées, sont des eaux chargées en substances toxiques et ont une composition très complexe, solubles ou non, provenant essentiellement de l'activité humaine. Une eau usée est généralement un mélange de matières polluantes répondant à ces catégories, dispersées ou dissoutes dans l'eau qui a servi aux besoins domestiques ou industriels[3].

Ces eaux sont considérées comme polluées et nécessitent un traitement avant toute réutilisation ou injection dans un milieu récepteur[4].

I.3. Origine des eaux usées :

Suivant l'origine des substances polluantes on distingue trois grandes catégories des eaux usées :

- Des eaux résiduaires ou eaux usées d'origine domestique, industrielle et/ou agricole.
- Des eaux pluviales ou de ruissellement urbain.

I.3.1. Origine industrielle :

La qualité et le taux de pollution des eaux usées est une mesure de classification des déchets et effluents industriels. Tous les établissements industriels dépendent de l'eau dans le cadre de la mise en œuvre de son protocole, mais elles n'en consomment qu'une très faible partie et le reste est rejeté. Les principaux polluants transitant dans les eaux usées d'origine industrielles sont:

- Les métaux toxiques,
- Les toxines organiques,
- Les matières colorées,
- Les huiles et graisses,
- Les sels [5].

La composition des eaux d'origine industrielle ont une composition liée au type d'industrie considérée, ils peuvent présenter des caractéristiques de toxicité liées aux produits chimiques transportés.

I.3.2. Origine domestique :

Les effluents domestiques sont un mélange d'eaux contenant des déjections humaines: urines, fèces (eaux vannes) et eaux de toilette et de nettoyage des sols et des aliments (eaux ménagères).C'est l'eau des évacuations ménagères des cuisines et des salles de bain, constituées de matières organiques et minérales sous forme de matières biodégradables dissoutes ou en suspension[6].

Elles proviennent essentiellement :

- Eau de cuisine (glucides, graisses, protéines et produits détergents utilisés Vaisselle) ;
- Des eaux de buanderie contenant principalement des détergents;
- Des eaux de salle de bain chargées en produits utilisés pour l'hygiène corporelle ;

Des eaux de vannes qui proviennent des sanitaires ,très chargées en matières organiques hydrocarbonées, en composés azotés, phosphatés et en microorganismes[6].

I.3.3. Origine agricole :

Pour améliorer les produits et les cultures et accélérer leur production, les agriculteurs utilisent des produits d'origine industrielle ou agricole, ces autres produits ayant un impact négatif sur l'environnement et la qualité de l'eau[3]. Il s'agit principalement :

- Des fertilisants
- Des produits phytosanitaires (herbicides, fongicides, insecticides...etc.) [3].

I.4. Les différents types des eaux usées :

On distingue cinq catégories d'eaux usées:

I.4.1. Les eaux domestiques et urbaines :

Les eaux usée domestiques sont constituées par :

- Les eaux ménagères (eau des toilettes, eau des cuisines) sont chargées en détergents, graisses, débris organiques,...
- Les eaux de vanne chargées des matières fécales et d'urines.
- Les eaux usées urbaines sont rejetées par les installations collectives (hôpitaux, écoles, commerces, habitats)[7].

I.4.2. Les eaux usées industrielles :

Les composants de l'eau industrielle diffèrent des autres eaux domestiques car ils contiennent des matières organiques, azotées ou phosphorées, ainsi que des substances toxiques, et peuvent également contenir :

- des graisses (industries agroalimentaires, équarrissage) ;
- des hydrocarbures (raffineries) ;
- des métaux (traitements de surface, métallurgie) ;
- des acides, des bases et divers produits chimiques (industries chimiques divers, tanneries);
- de l'eau chaude (circuit de refroidissement des centrales thermiques) ;
- des matières radioactives (centrales nucléaires, traitement des déchets radioactifs).

Les eaux usées doivent subir un traitement avant d'être rejetées, elles sont mélangées aux eaux usées pour éviter les problèmes au niveau des réseaux de collecte et ne pas perturber le fonctionnement des stations d'épuration[7].

I.4.3. Les eaux pluviales :

Ce type d'eaux usées est causé par l'accumulation de polluants atmosphériques, poussières, déchets, suie de combustion et hydrocarbures émis par Véhicules [8], Désigne les eaux de ruissellement des toits, des terrasses, des stationnements et des voies de circulation[9].

I.4.4. Les eaux usées agricoles

L'eau agricole contient des engrais azotés et phosphatés Ioniques et certains pesticides, ces autres transitent par des nappes les plus superficielles et des eaux des cours d'eau ou des retenues. Les aquifères de surface et les rivières ou les réservoirs[8].

I.5. Pollution de l'eau :

La pollution de l'eau toute modification chimique physique ou biologique de la qualité de l'eau qui a un effet nocif les êtres vivants la consommant. Quand les êtres humains consomment de l'eau polluée, il y a en général des conséquences sérieuses pour leur santé. La pollution de l'eau peut aussi rendre l'eau inutilisable pour l'usage désiré [43].

Cette pollution peut avoir des origines diverses :

- La pollution industrielle : avec les rejets de produits chimiques comme les hydrocarbures ou le PCB rejetés par les industries ainsi que les eaux évacuées par les usines
- La pollution agricole : avec les déjections animales mais aussi les produits phytosanitaires, pesticides (herbicides, insecticides, fongicides) contenus dans les engrais et utilisés dans l'agriculture. Ils pénètrent alors dans les sols jusqu'à atteindre les eaux souterraines.
- La pollution domestique : avec les eaux usées provenant des toilettes, les produits d'entretien ou cosmétiques (savons de lessives, détergents), les peintures, solvants, huiles de vidanges, hydrocarbures... [44].

I.5.1. Les différents types de pollution :

On les répartira en deux grands types : d'une part les pollutions d'origine naturelles, et d'autre part, les pollutions d'origine anthropiques dues aux activités humaines .Il y a:

I.5.1.1. La pollution chimique :

Provient généralement des rejets d'eaux usées contenant des produits d'entretien, des hydrocarbures et des métaux lourds.

I.5.1.2. La pollution Organique ou bactériologique :

Elle concerne les microorganismes pathogènes présents dans l'eau comme les bactéries et les virus. Cette pollution bactériologique se caractérise par un taux élevé de coliformes fécaux. La pollution organique provient principalement des excréments, des ordures ménagères et des déchets végétaux.

I.5.1.3. La pollution physique :

Est celle qui résulte de l'entraînement en suspension d'éléments minéraux inertes ou fermentescibles, les rejets de calories et les rejets qui pouvant entraîner une nuisance radioactive.

I.5.2. Les types de polluants :**Tableau I. 1 :** les principaux types de polluants des eaux usées[10].

Substances	Origines	Effets
Hydrocarbures Essences, huiles, fioul	Transports routiers, industries, accidents pétroliers, fuites lors des déchargements des pétroliers, lessivage par la pluie des zones urbaines (parking, route)	Altération des mécanismes physiologiques de tous l
Métaux lourds	Transports routiers, industries métallurgiques et pétrochimiques, peinture et carénage des bateaux	Affectent surtout les animaux Ralentissement de la croissance Altération des organes Classement par ordre de nocivité croissante : Hg>Ag>Cu>Cd>Zn>Pb>Cr>Ni>Co
Pesticides et Insecticides	Utilisation domestique, agriculture	Trouble du métabolisme et du système neurologique Altération des processus enzymatiques
Composés azotés et phosphatés	Agriculture, aquaculture, industries agroalimentaires, eaux usées domestiques	Phénomène d'anoxie et d'eutrophisation
Détergents	Eaux usées domestiques, industries	Affectent les plantes et les algues Effet amplifié si combinaison avec des hydrocarbures
Matières en suspension MES	Eaux usées domestiques, lessivages des sols, industries	Diminution apport de lumière

I.6. Impact sur l'environnement et la santé humaine :

L'écoulement des eaux usées dans les milieux aquatiques provoque des perturbations de la santé des organismes vivants et de l'environnement.

Sur l'environnement :

- Augmente la présence d'azote et de phosphore, entraînant une eutrophisation qui perturbe le processus respiratoire des milieux aquatiques (poissons, crustacés...).
- La toxicité des métaux traces tels que le mercure et l'arsenic, même à faible concentration, perturbe les fonctions physiologiques (nutrition, respiration et reproduction).
- Les contaminants migrent des eaux usées vers les eaux souterraines en raison de l'infiltration dans le sol[11].

Sur la santé humaine :

La mauvaise qualité de l'eau est considérée comme l'une des causes les plus importantes de maladies dans le monde, elles sont nombreuses, nous pouvons les classer comme suit :

- les maladies hydriques (parasites, bactéries, virus) ;
- infections de la peau et des yeux dues à la déshydratation ;
- Maladies causées par des invertébrés aquatiques ;
- Maladies causées par des essaims d'insectes près de l'eau ;
- Diarrhées et maladies infectieuses ou parasitaires principalement liées à la pollution de l'eau[11].

I.7. Caractéristiques des eaux usées :

I.7.1. Paramètres physiques :

I.7.1.1. Température :

La température est un facteur environnemental important pour les milieux aqueux. Elle concerne les variations saisonnières et journalières de la température ambiante ainsi que les fuites humaines à l'origine de pollutions thermiques résultant de la perturbation des eaux par des éléments polluants non traités par le facteur humain[11].

La température de l'eau est également critère important pour déterminer si le plan d'eau est acceptable pour la consommation des êtres vivants et ne cause pas des effets négatifs sur la santé. Il contrôle les types de vie aquatique qui y vivent, il affecte également le taux de réactions chimiques et biologiques et à son tour la cause d'un déséquilibre du niveau d'oxygène dissous dans l'eau, la photosynthèse des plantes aquatiques, les taux métaboliques

des organismes aquatiques et la sensibilité de ces organismes à la pollution, aux parasites et aux maladies[45].

I.7.1.2. Matière en suspension (MES) :

Les matières en suspension sont des particules de grande taille non dissoutes en suspension dans l'eau, supérieure à 10 μ m. Provoque la turbidité de l'eau, on les trouve sous forme naturelle dans les fleuves et rivières et elles troublent l'eau. Les matières en suspension naissent de l'érosion et du lessivage du sol par temps de pluie, elles sont constituées de minéraux et de substances organiques [46].

I.7.2. Paramètres Organoleptiques :

I.7.2.1. Couleur :

Cet indicateur peut être déterminé à l'œil nu. Plus l'eau est claire, moins elle risque d'être contaminée. Mais lorsque l'eau est exposée à la lumière transmise à quelques mètres de profondeur, une teinte bleutée apparaît, nous donnant une vision relativement superficielle que cette eau est pure[6].

I.7.2.2. Turbidité :

La turbidité fait référence à la teneur en particules en suspension dans l'eau. Elle est causée par des particules organiques telles que des matières animales et végétales décomposées ou des organismes vivants (par exemple des algues) et des particules inorganiques (limons, argiles et composés naturels tels que le carbonate de calcium). On mesure la turbidité en unités de turbidité néphelométrique (NTU) à l'aide d'un turbidimètre et grâce aux valeurs obtenues, nous pouvons estimer la situation de l'eau par rapport à ces normes[12] :

NTU < 5 => eau claire

NTU < 30 => eau légèrement trouble

NTU > 50 => Eau trouble.

Unité NTU (Nephelometric Turbidity Unit)=Unité JTU (Jackson Turbidity Unit) = unité FTU (Formazine Turbidity Unit) [12].

I.7.3. Paramètres chimiques :

I.7.3.1. Conductivité électrique :

La conductivité de la colonne d'eau entre deux électrodes métalliques de 1cm^2 [6], généralement exprimée en mS/cm . La mesure de la conductivité est un paramètre accepté qui ne peut plus être omis dans les processus modernes d'analyse de l'eau et des eaux usées. Surveillez la teneur en salinité de l'eau envoyée aux stations d'épuration, contrôlez la qualité de l'eau potable et ultra pure ou déterminez le niveau d'impuretés non spécifiques dans les processus industriels [13].

- 60 à 100 $\mu\text{S/cm}$: Eau de pluie,
- 50 à 300 $\mu\text{S/cm}$: Eaux peu minéralisées (sols schisteux, volcaniques, granitiques)
- 550 $\mu\text{S/cm}$: Eau du robinet à Besançon (région calcaire),
- 300 à 700 $\mu\text{S/cm}$: Eaux minéralisées (sols calcaires, marneux)
- 700 à 1200 $\mu\text{S/cm}$: Eaux fortement minéralisées (sols gypseux, eaux salées)

$$1 \text{ S/m} = 10^4 \mu\text{S/cm} = 10^3 \text{ mS/m}$$

I.7.3.2. Potentiel d'hydrogène (pH) :

La mesure du pH (potentiel hydrogène) permet de définir le caractère acide d'une solution, ou son caractère opposé, celui de basicité (ou basicité). Utilisez un pH-mètre pour mesurer le pH sur une échelle de 0 à 14. Lorsque le pH est de 7, la solution est dite à l'équilibre ou neutre, en plein milieu de l'échelle. En bas, la solution est acide, en haut, elle est basique. Plus on se rapproche de 0 et 14, plus il est acide et basique. D'un point de vue chimique, un acide qui rencontre une base ou une solution alcaline est neutralisé [6].

$$\text{PH} = \log 1/[H^+]$$

I.7.3.3. L'Oxygène Dissous :

L'oxygène dissous est un facteur de soutien important pour la faune car il contrôle les réactions biologiques qui se produisent dans les milieux aquatiques [6], et contribue au phénomène de dégradation de la matière organique et de photosynthèse [14], cette dernière étant influencée par des facteurs tels que la température, la pression et la force ionique des le moyen. Lorsque l'eau se réchauffe, elle contient moins d'oxygène soluble. La pression atmosphérique a également un effet modeste.

Les valeurs de saturation en oxygène de l'eau en conditions ordinaires (pression atmosphérique 760 mm d'Hg) :

- à 5°C, maximum d'oxygène dissous : 12,3mg/l;
- à 10°C : 10,9 mg/l;
- à 15°C : 9,7mg/l;
- à 20°C : 8,8mg/l;
- à 25°C : 8,1 mg/l [15].

Dans l'étude de cas décrite ici, les appareils utilisés sont [16] :

- Oxymètre OSD23, pour la mesure de la quantité d'oxygène dissous ;
- DataLogger L452, pour l'enregistrement des résultats de mesure.

I.7.3.4. La Demande Chimique en Oxygène (DCO) :

C'est la quantité d'oxygène consommée chimiquement pour oxyder tous les oxydants de l'eau, quelle que soit leur origine organique ou minérale [47].

La DCO est la concentration en oxygène, exprimée en mg/L, que lorsqu'un échantillon d'eau est traité avec cet oxydant dans les conditions spécifiées dans la norme, les matières dissoutes et en suspension consomment une quantité équivalente de bichromate [17]. Généralement la valeur de la DCO est :

- DCO = 1.5 à Pour les eaux usées urbaines ;
- DCO = 1 à Pour tout l'ensemble des eaux résiduaires ;
- DCO > 2.5 Pour les eaux usées industrielles.

I.7.3.5. L'azote :

L'azote est présent dans les eaux usées sous les différentes formes chimiques suivantes : ion ammonium NH_4^+ , nitrites NO_2^- , nitrates NO_3^- et azote organique Norg [18].

Ce paramètre est calculé comme suit :

Azote global (NGL) = Azote Kjeldahl (NK) + Nitrites Nitrates

$$\text{NGL} = (\text{NH}_4^+ + \text{Norg}) + \text{NO}_2^- + \text{NO}_3^- \quad (\text{I.1})$$

Notez que l'azote global NGL est également connu sous le nom d'azote total (NT).

Dosage des nitrates dans les rejets liquides selon la méthode au salicylate de sodium. En présence de ce réactif, le nitrate se transforme en acide nitrosalicylique à caractère jaune en milieu alcalin. L'analyse a été effectuée par un spectrophotomètre UV visible à 415 nm. Le dosage des nitrites implique la diazotation du sulfonamide ($C_6H_8O_2N_2S$) en présence de dichlorure de N-(1-naphtyl)éthylènediamine en milieu acide. La solution résultante est un complexe rose, mesuré par spectrophotométrie à 540 nm (Rodier, 1984).

L'analyse de l'azote ammoniacal a été réalisée avec un appareil Buchi 114 Kjeldahl, avec de l'ammoniac libre entraîné en milieu alcalin $pH = 7,4$. Il est piégé par l'acide sulfurique. Un excès d'acide est ensuite ajouté (Rodier, 1984).

L'azote Kjeldahl NK (également exprimé en NTK), mesuré en mg/L, est la somme de Norg et de NH_4^+ . Cette quantité ne comprend donc pas les composés azotés oxydés : nitrites, nitrates et certains composés nitrés organiques [19].

I.7.3.6. Le phosphore :

Le phosphore existe dans l'eau sous de nombreuses formes : phosphates, polyphosphates, organophosphorés, etc. L'ion orthophosphate (PO_4^{3-}) est la forme la plus abondante dans l'eau, provenant principalement du fumier animal et des produits de lessive. Il joue un rôle important dans la respiration, le stockage et le transfert d'énergie dans les cellules vivantes. A forte concentration dans l'eau, il provoque une eutrophisation. La protection du milieu aquatique conduit à la réduction du phosphore. En revanche, la réutilisation des eaux agricoles ne nécessite pas de réduction des niveaux d'azote et de phosphore [4]. La méthode de détermination du phosphore total est basée sur l'oxydation de la matière organique et la transformation de l'un ou l'autre phosphate en orthophosphate soluble par l'action d'acides et d'oxydants [20]. Le phosphore total est mesuré en mg/L.

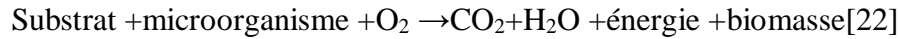
I.7.4. Paramètres Biologique :

I.7.4.1. La demande Biochimique en Oxygène (DBO₅) :

C'est un indicateur de pollution organique biodégradable. Il représente la quantité d'oxygène que les bactéries utilisent pour dégrader partiellement ou oxyder les biochimiques oxydants présents dans l'eau et constituer leur source de carbone (lipides, glucides, tensioactifs, etc.). Cet oxygène est capté par les bactéries, au détriment des autres organismes

de l'environnement, les échantillons sont incubés 5 jours dans l'obscurité à 20°C, la décomposition s'achève au bout de 20 jours réels (processus d'autoépuration) [21].

Elle se résume à la réaction chimique suivante :



En pratique, l'évaluation prend en compte la charge environnementale du matériau en décomposition, sa capacité d'auto-nettoyage et l'induction de la charge maximale admissible, principalement au niveau du traitement primaire de la station d'épuration[6].

I.7.4.2. Biodégradabilité :

La biodégradabilité reflète la capacité des eaux usées à être décomposées ou oxydées par les micro-organismes impliqués dans le processus de purification biologique de l'eau. La biodégradabilité est exprimée par le facteur K, par exemple :

$$k = \text{DCO} / \text{DBO}_5$$

- Si $k < 1,5$: cela signifie que la matière oxydable est constituée majoritairement de matières hautement biodégradables ;
- Si $1,5 < K < 2,5$: Cela signifie que la matière oxydable est modérément biodégradable.
- Si $2,5 < K < 3$: Le matériau oxydable est peu biodégradable.
- Si $K > 3$: La matière oxydable n'est pas biodégradable [22].

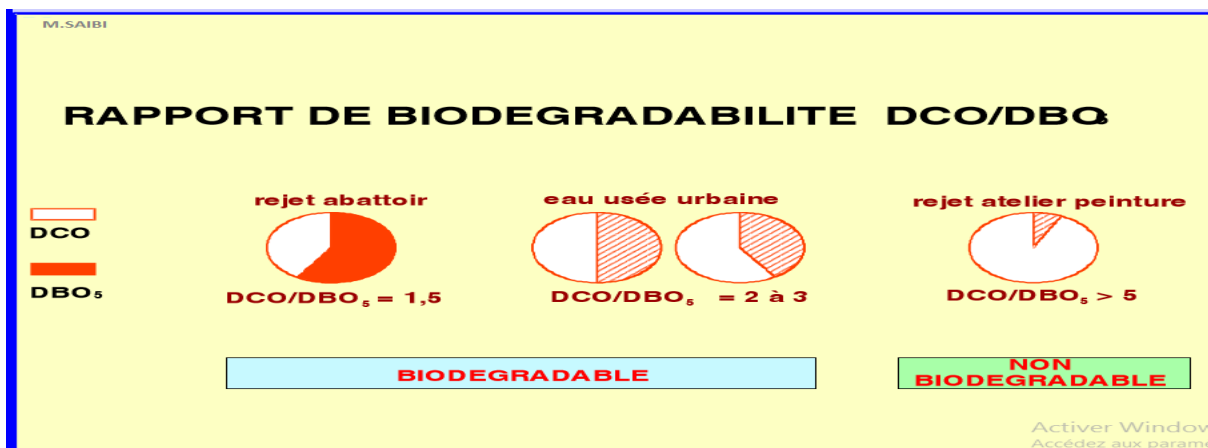


Figure I. 1: Cercles relatifs pour la valeur de rapport de biodégradabilité.

I.8. Les stations d'épurations des eaux usées :

I.8.1. Principe de fonctionnement d'une station d'épuration des eaux usées :

I.8.1.1. Définition d'une station d'épuration :



Figure I. 2: Une station d'épuration des eaux usées.

C'est une installation permettant d'épurer les eaux usées domestiques ou industrielles et les eaux pluviales avant leur rejet dans le milieu naturel. Le but du traitement est de séparer l'eau des substances nuisibles au milieu récepteur [23].

La capacité de traitement des stations d'épuration urbaines varie à la fois quantitativement (capacité à épurer une certaine quantité d'eau, exprimée en équivalents habitants) et qualitativement (degré ou type de dépollution). Habituellement, le prétraitement de l'eau est effectué dans des stations d'épuration. Ensuite, il est possible de distinguer les unités qui effectuent le traitement primaire, secondaire et tertiaire [48].

I.8.1.2. Les objectifs principaux d'une station d'épuration :

- Protéger les eaux souterraines de la contamination.
- Empêcher les agriculteurs d'irriguer leurs champs avec des eaux usées.
- Minimiser le risque de maladies d'origine hydrique.
- Réutiliser l'eau traitée dans les champs d'irrigation.
- Économies d'eau importantes.
- Éviter la surexploitation des eaux souterraines [24].

I.8.1.3. Les conditions d'implantation d'une station d'épuration :

La station d'épuration doit être installée conformément aux conditions suivantes :

- Éviter autant que possible les zones inondables ;
- Tenir compte des zones urbanisées et urbanisables en raison des odeurs désagréables, des maladies aéroportées, etc.;

- L'emplacement doit être en aval (exutoire) du réseau d'égouts pour éviter les surélévations et donc les coûts élevés ;
- L'emplacement de la station d'épuration doit être à un endroit où la collecte des eaux usées est maximisée (ex : déterminer une stratégie entre deux agglomérations) ;
- Le rejet d'eau traitée ne doit pas affecter le milieu récepteur (inondation de terres agricoles)[24].

I.8.1.4. Les risques liés à la station d'épuration :

- Risques de chutes et de glissades liés aux déplacements de personnes à proximité des équipements et matériels ;
- Tout au long du processus de traitement de l'eau, les opérateurs peuvent être contaminés par le tube digestif (principalement en mettant des mains sales ou des objets dans la bouche), la peau.
- Risque de contamination respiratoire à proximité du procédé (dépistage...) ;
- les risques d'incendie et d'explosion liés à la présence de gaz de fermentation ou de résidus de produits inflammables, nécessaires aux opérations ou introduits accidentellement dans les eaux usées ;
- Risques d'étouffement associés aux espaces clos, fosses,...etc.[24].

I.8.2. Les étapes de traitement des eaux usées utilisées dans les STEP :

I.8.2.1. Les méthodes classiques de traitements :

Une ligne complète de traitement des eaux usées peut être grossièrement divisée en deux parties :

- le secteur de l'eau où tous les contaminants sont éliminés de l'eau avant son rejet dans le milieu naturel ;
- Filière boues, les résidus de la filière eau sont traités et déshydratés avant d'être évacués.

L'industrie de l'eau comprend généralement :

- Prétraitement pour éliminer les objets (tamis, tamis), graisse et sable d'une taille comprise entre 0,1 et 50 mm ;
- Élimine le traitement primaire des solides en suspension décantables ;

- Traitement secondaire constitué de bioréacteurs pour éliminer les contaminations biodégradables organiques (DBO_5) ou minérales (NH_3 , NO_3^- , P).
- Certaines stations sont également équipées de traitement tertiaire pour éliminer les micro-organismes ou le phosphore résiduel.

Les boues issues des décanteurs primaires (boues primaires) et du traitement biologique (boues biologiques) seront traitées et conditionnées dans la filière boues. (Gross-Claude, 1999).

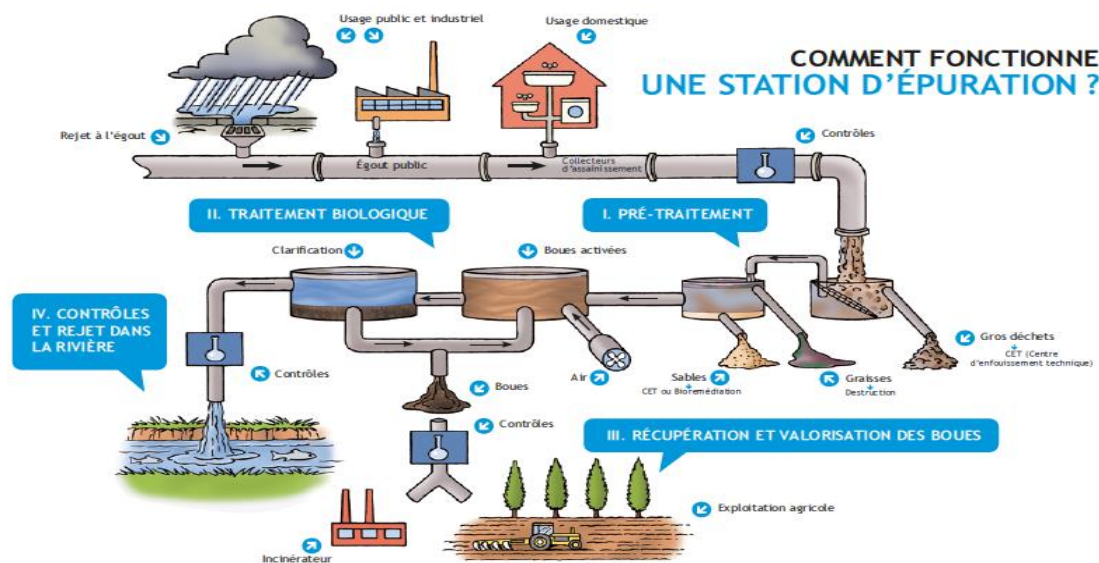


Figure I.3 : Les étapes de fonctionnement des stations d'épuration (STEP).

I.8.2.2. Le prétraitement :

Le prétraitement est nécessaire pour protéger les remontées d'eau brute, les canalisations des obstructions et de l'usure des autres équipements de traitement, et plus généralement, pour éliminer tout ce qui pourrait interférer avec le traitement ultérieur [49].

Ces opérations sont : le dégrillage, le dessablage et le déshuilage

❖ Le dégrillage :

Une fois enlevée, les grilles bloquent les éléments grossiers (flotteurs et déchets encombrants tels que brindilles et cailloux) que l'eau contenait. Le dispositif de criblage comprend : des caniveaux, des grilles, des écrans et des poubelles. L'espacement entre les barres de tamis est supérieur à 3 cm (tamis grossier) ou inférieur à 3 cm (tamis fin).

Les Différents types de dégrilleur sont :

Dégrilleur fin < 10 mm

Dégrilleur moyen 10 – 30 mm

Pré-degrillage 30 – 100 mm [25].

❖ **Le dessablage :**

Le dessablage permet d'éliminer par décantation les particules lourdes de grande taille (>2mm) : sable, gravier et particules minérales plus ou moins fines de taille supérieure à 200 microns pour éviter les dépôts dans les canaux et canalisations.

❖ **Le dégraissage –désuilage :**

Le dégraissage est une opération de séparation liquide-liquide, tandis que le désuilage est une opération de séparation solide-liquide. L'opération consiste à utiliser des racleurs pour récupérer les graisses ménagères ou industrielles à la surface des eaux usées, soit naturellement, soit par flottation (injection de fines bulles d'air).

I.8.2.3. Traitement primaire :

Le but du traitement primaire est de réduire la quantité de solides en suspension et dissous par des processus physico-chimiques. Des coagulants et des flocculant peuvent être ajoutés à l'eau. De grandes quantités de particules en suspension peuvent alors être récupérées par décantation ou flottation. (Boues physico-chimiques) Cette étape élimine 90% des particules et objets en suspension, ce qui est commun à la plupart des stations d'épuration. Mais tout ce qui est dissous dans l'eau est toujours là : éléments azotés et phosphatés, composés réactifs et particules fines. Ajoutez ensuite un traitement secondaire, voire tertiaire [26][27].

I.8.2.4. Traitement secondaire (traitement biologique) :

Ces traitements sont biologiques et permettent d'éliminer les polluants dissous. Pour cela on utilise des populations de micro-organismes capables de les consommer. Dans les cas étudiés, le principe général est de favoriser la croissance de communautés de bactéries aérobies, c'est-à-dire qui prélève l'O₂ pour leur métabolisme. On en distingue différents types:

- Les boues activées : On force ici le mélange du dioxygène, des eaux usées et des bactéries dans des bassins. Les espèces sont sélectionnées selon ce que l'on souhaite éliminer : carbone, azote, phosphore.
- Les bactéries et leurs déchets du métabolisme forment, dans un bassin appelé clarificateur, des boues (boues secondaires) qui sont ensuite traitées et utilisées pour la fertilisation des sols par exemple. Une partie de ces boues retourne dans les bassins pour éviter une trop grande perte en bactéries[26]. De nombreuses stations d'épuration combinent aujourd'hui traitement primaire et traitement secondaire. Quelques rares utilisations de traitement avancé ou tertiaire. En effet, à la fin du traitement secondaire, il reste dans l'eau des éléments dissous (azote, phosphore) et des éléments qu'elles ne sont de toute manière pas aptes à traiter[19].

I.8.2.5. Traitement tertiaire :

Les traitements complémentaires appelés aussi tertiaire, avancés, ou de finissage, ce sont des procédés pouvant améliorer les caractéristiques des eaux usées traitées après un traitement biologique ou un traitement physico-chimique.

Ces procédés ont notamment pour but :

- l'élimination de l'azote et du phosphore.
- La désinfection[28].

I.8.3. Présentation de la station d'épuration de M'sila :

I.8.3.1. Description et situation géographique :

La STEP de M'sila est située au Nord Est de la Wilaya de M'sila et à une distance d'environ 248Km au Sud Est de la capitale d'Alger (Fig. 03) aux coordonnées géométriques suivantes:35°45N et 4°35'E.

Elle est limitée : au nord par la wilaya de Bordj Bou Arreridj Commune d'(Elaach), au sud par la commune OuledMadhi, à l'Ouest ; par la commune de OuledMansour et à l'Est par les communes de Metarfa

La station d'épuration (STEP) de la ville de M'sila est située au sud à environ 9Km du centre de la ville de M'sila et sur la rive droite d'Oued M'sila. Elle s'étend sur une superficie de 16ha. aux coordonnées géométriques suivantes : 35°40N et 4°30N.

I.8.3.2. Caractéristique de l'effluent a la rentrée de STEP de M'sila :

Débit journalier 32000m³/j

Débit de pointe en temps sec 2.772m³/h

Débit de pointe en temps de pluie 5.544m³/h

DBO5 10800kg/j soit 337.5mg/l

MES 12000kg/j soit 375mg/l

PH Entre 6.5 et 8.5

TKN (azote Kjeldhal) 75mg/l

Coliformes totaux 10⁶/100ml

Chapitre II :
Procédé de traitement des
eaux usées

I.1. Introduction :

Le traitement de l'eau brute dépend de sa qualité, et de sa source qui peut changer avec le temps, donc il doit être en permanence analysé. La turbidité et la couleur de l'eau sont principalement causées par de très petites particules, appelées particules colloïdales. Ces particules peuvent rester en suspension dans l'eau durant de très longues périodes, et à traverser des filtres très fins. De plus, puisqu'ils Les concentrations sont stables et ces dernières n'ont pas tendance à adhérer les unes aux autres. Pour les éliminer, on a recours aux procédés de coagulation et de floculation [29]. Le processus de coagulation est complexe et peut être influencé par plusieurs facteurs.

Dans cette partie, nous parlerons brièvement sur le procédé C-F, les différents coagulants et flocculant, l'effet de la dose du coagulant, du pH, de la turbidité, seuls ces paramètres sont abordés dans le cadre de notre projet de recherche. Il convient de préciser que d'autres paramètres tels que la température et l'alcalinité de l'eau, la couleur, la présence d'anions et cations, l'intensité du mélange et le potentiel zêta sont importants.

I.2. coagulation-floculation :

I.2.1. Généralités (définition) :

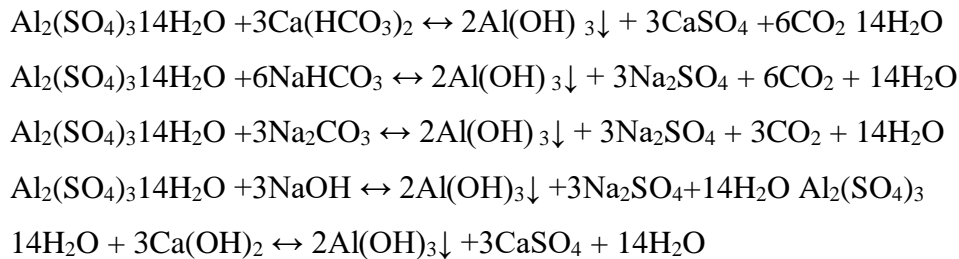
La coagulation-floculation est un traitement physique qui facilite l'élimination des MES (Matières En Suspension) et des colloïdes, qui sont séparés par agglomération sous forme de floccs par décantation, flottation et/ou filtration. Un traitement qui permet d'éliminer tous ou une partie des contaminants de l'effluent, notamment des particules inertes ou actives, fractions flocculées de matières organiques et certains métaux lourds, micropolluants associés aux matières en suspension et macromolécules[30].

Le temps de décantation des particules coagulées dépend du type de particules, du diamètre des particules et de leur surface spécifique. La déstabilisation des entités en suspension passe par des phénomènes d'adsorption [29], expliqués par la théorie de la double couche. Elle explique comment les colloïdes sont traités par coagulation.

I.2.2. Coagulants et adjuvant de floculation :

L'effet de clarification dépend principalement du coagulant utilisé. Les coagulants Plus efficaces sont les sels métalliques à base d'aluminium ou de fer. Les produits les plus utilisés sont l'alun ($Al_2(SO_4)_3$) et le chlorure ferrique ($FeCl_3$). Ces coagulants, une fois introduits dans

l'eau, forment des produits d'hydrolyse qui déterminent l'efficacité de la coagulation[31]. Ces produits complexes ont une solubilité qui varie avec le pH. Dans le cas de l'alun. Les réactions suivantes décrivent comment est formé le précipité [31] :



Les précipités à base de fer sont formés de la même façon. Ils forment la base des floccs qui emprisonnent les particules colloïdales.

L'utilisation d'un seul coagulant ne permet pas, dans tous les cas, d'obtenir une bonne coagulation-floculation. L'utilisation d'un adjuvant de floculation permet d'améliorer les performances du procédé de coagulation floculation et décantation. Les adjuvants les plus utilisés sont la silice activée et les poly électrolytes (comme : l'alginate et la bentonite). Ils agissent par adsorption et pontage entre les particules colloïdales. Les poly électrolytes sont de types anionique, cationique et non anionique, de structures longitudinales et de masses moléculaires élevées.

I.2.3. Types des adjuvants poly électrolyte (Alginate et Bentonite) :

I.2.3.1. Alginate :

Les alginates de sodium sont extraits de l'acide alginique, un composé provenant d'algues marines. Ces produits sont particulièrement employés en combinaison avec les sels ferriques, mais peuvent donner de bons résultats avec les sels d'aluminium[31]. Les principales propriétés des alginates :

- Est de modifier la viscosité des solutions en l'augmentant fortement.
- Ces longues molécules très hydrophiles et déformables se déploient dans tout le solvant en s'entourant de molécules d'eau.
- Dans des solutions contenant des cations divalents, des zones de jonction entre macromolécules peuvent s'établir au niveau de certaines séquences, ce qui conduit à la formation d'un réseau tridimensionnel.

I.2.3.2. Bentonite :

La bentonite : Est une argile en partie amorphe avec une composition variable elle contient plus de 75% de montmorillonite et d'autre minerais d'argile telle que l'illite la kaolinite. Les bentonites se caractérisent par une capacité élevée d'adsorption et d'échange ionique. Elles forment avec l'eau des solutions colloïdales qui flocculent lorsque les charges de surface sont neutralisées par des ions [32].

I.3. Caractéristiques des particules à éliminer :

I.3.1. Généralités :

Les substances présentes dans l'eau peuvent exister sous trois états :

- L'état en suspension, qui regroupe les particules les plus grosses.
- Etat colloïdal.
- L'état dissous des sels minéraux et des molécules organiques.

Cette classification est déterminée par la taille des particules. Les colloïdes ont un diamètre compris entre 1 μm et 1 nm. Ils ont également deux autres caractéristiques très importantes. Leur rapport surface/volume leur confère des propriétés d'adsorption des ions présents dans l'eau. Ce phénomène explique en partie la présence de charges électriques à leur surface. Ces charges, généralement négatives, créent des forces répulsives entre les colloïdes. Ceci permet d'expliquer la stabilité de ces particules en solution. Leur densité peut atteindre 2,5 sans modifier leur valeur de vitesse de sédimentation[32].

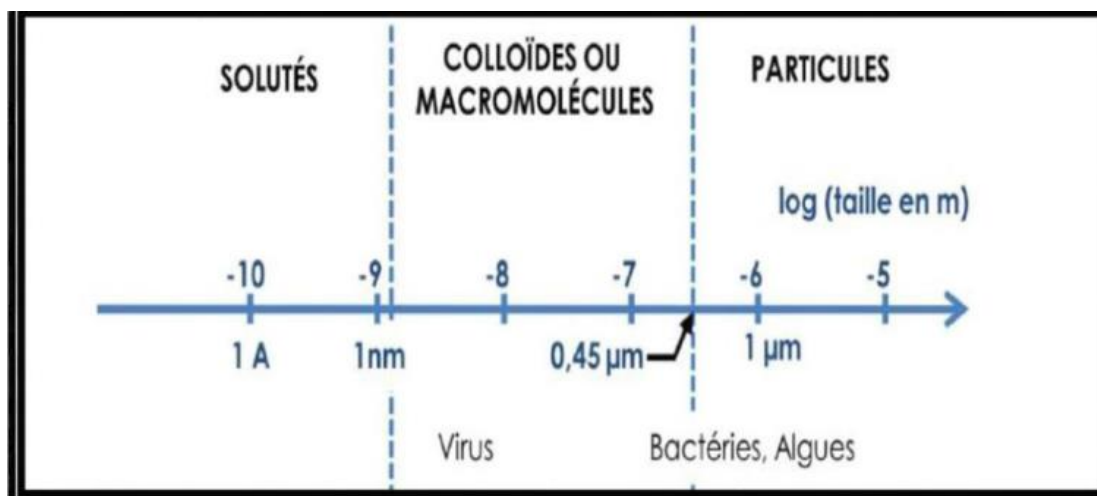


Figure II. 1: Nature et gamme de taille des particules colloïdales dans l'environnement (Aouina B et Leblalta M (2020)).

I.3.2. Matières en suspension et colloïdales :

Les matières en suspension (MES) dans les eaux de surface proviennent de l'érosion des sols, de la dissolution de substance minérales, de la décomposition de substances organique, le déversement des eaux résiduaires urbaines et industrielles ainsi que les déchets agricole [33].L'eau contient de nombreux composés qui peuvent se regrouper en trois catégories :

- Matières en suspension : Ils peuvent être d'origine minérales (sables, limons, argiles...) ou organique (produits de décomposition des matières végétales et animales). A ces composés s'ajoutent les micro-organismes tels que les bactéries, planctons, virus et algue. Ces substances responsables, en particulier de la turbidité et de la couleur.
- Matières colloïdales.
- Matières dissoutes[33].

Ce sont généralement des cations et des anions, une partie de la matière organique dissoute on trouve aussi des gaz (O₂, CO₂... etc.) [33].

I.3.3. Structure des particules colloïdales

Les colloïdes sont généralement chargés négativement. Afin de neutraliser cette charge négative de surface, des ions positifs présents dans l'eau brute ou ajoutés sont attirés et forment une couche autour du colloïde. Diverses théories expliquent ce phénomène[33]

La figure II. 2 montre les forces attractives et répulsives agissant à la distance (r) entre deux particules colloïdales. Bicouche Lorsqu'une particule colloïdale est en suspension dans un milieu polaire contenant des ions, elle attire électro statiquement les ions de charge opposée. On constate qu'au voisinage des particules chargées, les charges portées par les ions se répartissent en deux couches, comme le montre la figure II. 3 [34].

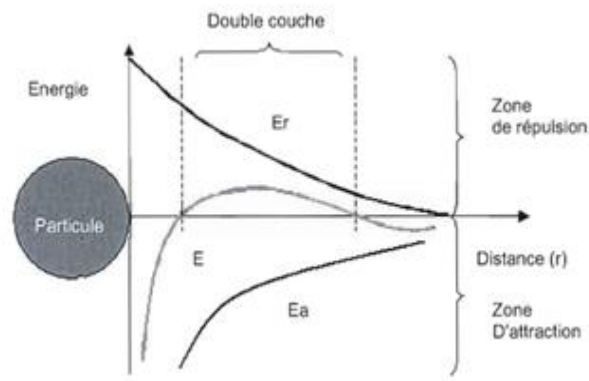


Figure II. 2: Effet de la distance entre deux particules colloïdales sur la force de répulsion électrostatique (E_r), la force d'attraction (E_a) et la force résultante (E) [34].

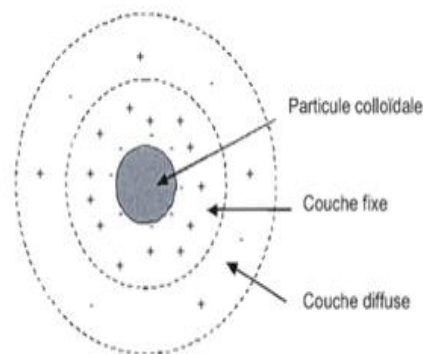


Figure II. 3: Double couche d'une particule colloïdale [34].

I.4. La potentielle thermodynamique ou potentiel Stern :

C'est la limite entre la partie de la solution qui se déplace avec la particule et la partie de la solution qui se déplace indépendamment de la particule.

I.5. La potentielle électrocinétique Zêta :

Le potentiel électrostatique diminue à mesure où l'on s'éloigne de la particule. Le potentiel Zêta se situe à la limite extérieure de la couche liée. C'est ce potentiel qui persiste lorsque la particule se déplace. Lorsqu'un champ électrique est appliqué, les particules ayant un potentiel Zêta négatif se déplacent en direction de l'électrode positive. Le potentiel Zêta est important car il définit le comportement électrocinétique des particules et par voie de conséquence leur stabilité dans la solution, l'annulation du potentiel Zêta est l'objectif de la coagulation. Cela permet de déstabiliser les particules et de favoriser leurs agglomérations [35].

I.6. Le procédé de coagulation floculation :

I.6.1. Coagulation :

I.6.1.1. Définition:

Représente l'ensemble des phénomènes physico-chimiques visant en premier lieu la déstabilisation d'une suspension colloïdale, et en second lieu l'agrégation des particules en petits amas, ou flocons, sous agitation et sous l'action du mouvement brownien[36]. Par conséquent, nous distinguons quatre mécanismes de base de l'instabilité des particules colloïdales [34] .

II.6.2. Mécanismes de l'instabilité des particules colloïdales :

Ces quatre mécanismes sont décrits brièvement ci-dessous :

II.6.2.1. Compression de la double couche :

L'augmentation de la force ionique de l'eau réduit le volume et l'épaisseur de la couche différente. La force répulsive diminue considérablement avec la force L'appel de Van der Waals reste inchangé. La force ionique est exprimée en L'équation suivante :

$$\mu = \frac{1}{2} \sum^n C_n Z_n^2$$

μ = force ionique

C_n = concentration de l'ion n (mol/l)

Z_n = valence de l'ion n

Les concentrations nécessaires en ions Na^+ , Ca^{2+} et Al^{3+} varient approximativement En raison de leurs valences différentes, ils sont dans un rapport de $1:10^{-2}:10^{-3}$ [31]

II.6.2.2. Adsorption et neutralisation des charges :

Ce mécanisme repose sur l'ajout de suffisamment de cations pour neutraliser la charge. Affecte négativement les particules stables en adsorbant les cations à leur surface. Au contraire, Un excès de coagulant, source de cations, peut entraîner une adsorption excessive cations et inverser la charge de la particule, qui devient alors positive. Particule Il sera donc restabilisé[31].

II.6.2.3. Emprisonnement des particules dans un précipité :

Lorsque des quantités suffisantes de coagulants tels que $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ou FeCl_3 ont ajoutés, ils forment généralement des précipités chargés positivement. Le pH de l'eau doit être dans la

plage où la solubilité du sel est minimale. Les forteresses précitées appelées flocs entrent en contact avec des particules chargées négativement et les piègent. Les particules sont alors entraînées lors de la décantation. Le schéma suivant résume le mécanisme décrit :

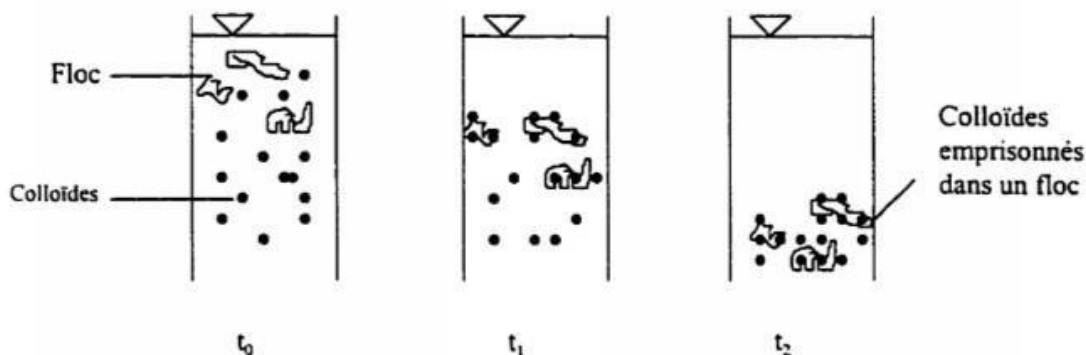


Figure II. 4: Emprisonnement des particules dans les flocs pendant la décantation.

II.6.2.4. Adsorption et pontage entre les particules :

Ce mécanisme implique l'utilisation de polymères cationiques, non anioniques ou anioniques à haut poids moléculaire et à structure longitudinale. Un polymère en présence d'un colloïde utilise l'un de ces groupes fonctionnels pour l'adsorber à une extrémité. L'autre extrémité reste libre et peut adsorber un autre colloïde. Ainsi, ce mécanisme permet l'agrégation des particules par « pontage » des polymères [37]. La figure ci-dessous décrit le processus. En revanche, une concentration trop élevée en polymère va restabiliser le colloïde. Les polymères verront alors que chacune de leurs extrémités est adsorbée par la même particule, se restabilisant ainsi.

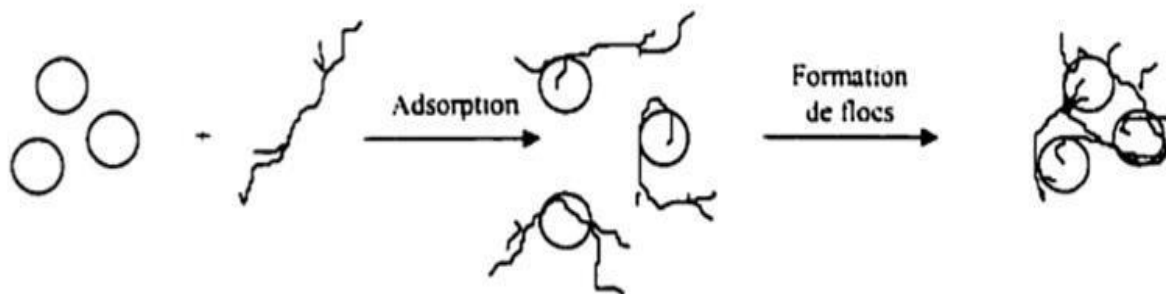


Figure II. 5: Adsorption et pontage à l'aide de polymères.

II.6.3. Les avantages et les inconvénients des coagulants :

Tableau II. 1 :Avantages et inconvénients du sulfate d'alumine, chlorure ferrique et PAC[25].

Coagulants	Avantages	Inconvénient
<p>Sulfate d'alumine $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3, 18 \text{H}_2\text{O}$</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ relativement bon marché ; ✓ Faible acidité (quand pignons même usés Protéger) ; ✓ Élimination très efficace matière en suspension phosphore total et Métal. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ réduire l'élimination de la DCO ; ✓ Des erreurs de dosage peuvent survenir Beaucoup de scories d'aluminium, constituent un risque potentiel pour la santé ; ✓ Utilisez l'alun car il L'interaction avec des substances alcalines peut entraîner une diminution significative du pH.
<p>Polychlorures d'aluminium P.A.C</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Réduction de l'élimination de la DCO ; ✓ Le taux résiduel est inférieur à celui du sulfate d'aluminium ; ✓ Moins d'impact sur le pH et l'alcalinité ; ✓ Le dosage est inférieur à celui du sulfate d'aluminium ; ✓ Formation de floes importants et de taille uniforme qui se 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Son coût chaire, ✓ Forte concentration d'impuretés, ✓ Moins efficace pour l'élimination du carbone organique total (COD).

	déposent ; ✓ Meilleure cohésion des boues.	
Chlorure ferrique FeCl₃	<ul style="list-style-type: none"> ✓ mieux pour éliminer matériau organique ; ✓ Pas cher ; ✓ Pas d'aluminium restant dans l'eau ; ✓ Haute concentration Le laitier est facile détection ; ✓ Large plage de pH (de 5,5 à 8.5) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ une mauvaise dose peut produire couleur rougeâtre et fortes concentrations de résidus de fer ; ✓ Forte concentration de scories de fer Risque de filtres bouchés et de taches la lessive ; ✓ Très acide (porter un équipement de protection une protection complète est indispensable) ; ✓ Beaucoup de boue.

II.6.4. Paramètres influençant le processus de coagulation :

II.6.4.1. Influence pH :

Le pH est l'un des paramètres les plus importants affectant la coagulation-floculation. Il est donc recommandé de le contrôler. Selon les propriétés de l'eau, il existe un pH optimal pour une coagulation optimale (Julien, 1983). Ce pH se situe généralement dans la plage où la solubilité du coagulant utilisé est minimale, ce qui permet une meilleure précipitation. Le contrôle du pH peut également améliorer la coagulation lorsque la température de l'eau est plus froide.

II.6.4.2. Influence de la turbidité :

La turbidité est aussi, considérée comme 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. [22]

II.6.4.3. Influence de la Température de l'eau :

Nous savons qu'une baisse de la température ralentit la cinétique des réactions chimiques. L'équation d'Arrhenius décrit bien l'effet de la température sur les constantes cinétiques Une baisse de température se traduit par une réduction de la constante de vitesse k [38].

II.6.4.4. Influence de la dose du coagulant :

La détermination de la concentration du coagulant est un paramètre essentiel pour la déstabilisation des colloïdes. Une surdose du coagulant produit inévitablement une rentabilisation des particules colloïdales qui sont susceptibles de rester à la surface. Aussi les sites d'adsorption des particules colloïdales ne seraient plus disponibles pour la formation Des ponts inter-particulaires un traitement de coagulation mal ajusté peut donc conduire à une dégradation rapide de la qualité de l'eau et à des dépenses d'exploitation non justifiées. Bien souvent, la dose de coagulant conditionne de fonctionnement des ouvrages de séparation et il se trouve tout simplement impossible de réaliser la clarification si cette dose est mal ajustée [38].

II.6.4.5. Influence de la vitesse et le temps d'agitation :

Lors de l'introduction du coagulant dans l'eau, on procède à une agitation rapide pour la dispersion et l'homogénéisation de la solution. Mais une agitation intense empêche l'agrégation des particules, tandis qu'une agitation prolongée, permet l'effraction des liaisons entre coagulant et la surface des particules, et le rabattement ultérieur des segments étendus sur la surface des particules [38].

II.6.5. Floculation :

II.6.5.1. Définition :

C'est un processus physico-chimique dans lequel des substances sont mises en suspension dans un liquide Agréger ensemble pour former des particules plus grosses, souvent très poreuses appelées floccs. Les floccs se déposent généralement beaucoup plus rapidement que les particules primaires à partir desquelles ils se forment [31] .La floculation utilise des

polymères solubles dans l'eau par adsorption sur les surfaces des particules Suspendu et agit comme agent relai. Un réseau de particules et de chaînes flocculant polymère [31].

II.6.5.2. Processus de floculation :

Après l'instabilité, les particules colloïdales ont tendance à s'agglutiner lorsqu'elles entrent en contact les unes avec les autres. Le but de la floculation est justement d'augmenter la probabilité de contact entre les particules. Pour mieux illustrer cela, la figure II.6 résume les différents phénomènes de coagulation-floculation produits par les polymères[34].

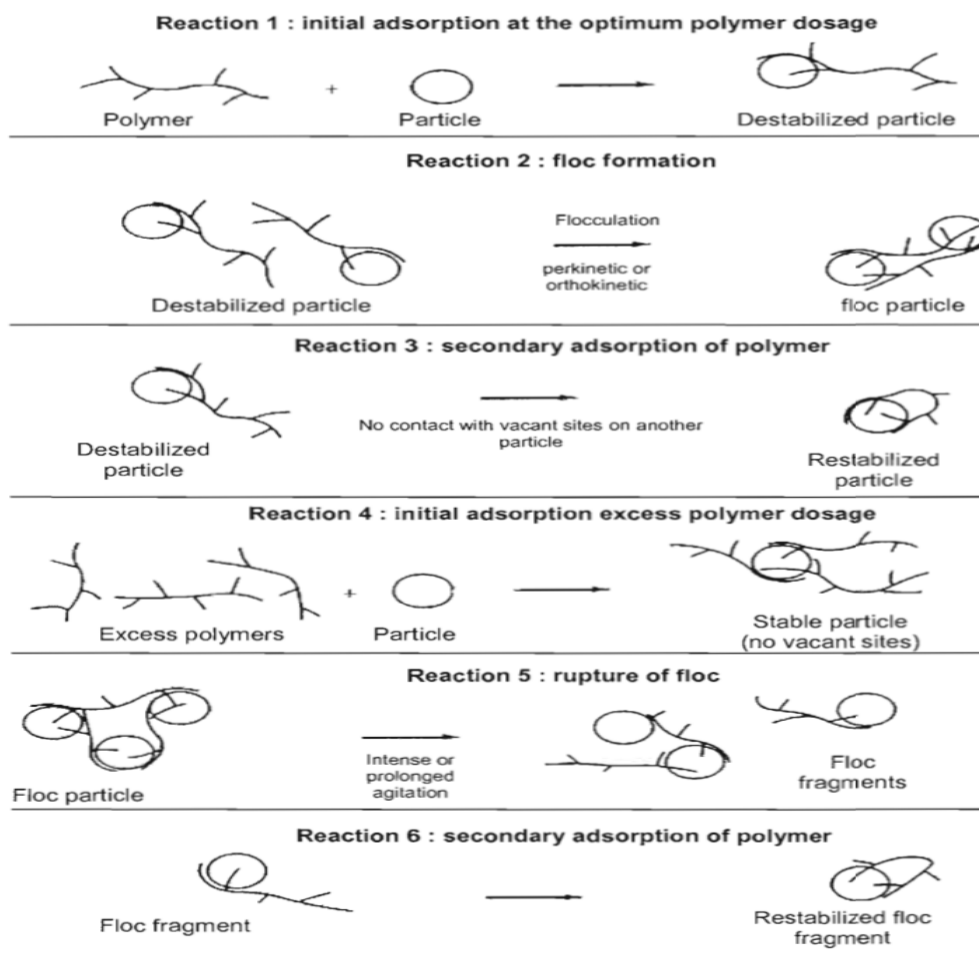


Figure II. 6: Différents phénomènes de coagulation-floculation produits par un polymère.

(Tirée de Teramoto, 1993).

II.6.6. La décantation :

La décantation est conçue pour éliminer les suspensions d'une densité supérieure à l'eau. Les particules s'accumulent au fond du décanteur et sont périodiquement aspirées. L'eau clarifiée située près de la surface est dirigée vers l'unité de filtration. Le temps de sédimentation des particules agglomérées dépend du type de particules, Le diamètre des

particules et leur surface spécifique. Pour obtenir la décantation de ces particules, il faudrait assembler un très grand nombre de colloïdes en agrégats d'au moins 10 à 100 μ m.

II.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le procédé de coagulation-floculation parmi les techniques alternatives aux traitements des eaux et notamment usées. Un procédé utilisé pour séparer les matières en suspensions ainsi que les matières colloïdales dans l'eau. Elle dépend de nombreux facteurs afin d'obtenir une eau prête à être réutilisé avant le rejet dans l'environnement.

L'objectif de cette étude en appliquant ce traitement de coagulation floculation est d'éliminer ou réduire l'effet de quelques paramètres qui affectant la qualité des eaux tels que, le temps et la vitesse d'agitation, le temps de décantation et l'utilisation des coagulants et des flocculant.

Les Facteurs influençant sur la coagulation-floculation ont été présenté tels que : L'influence de la turbidité, de la température, du pH, L'influence de la dose coagulant et aussi l'Influence de la vitesse et temps d'agitation.

Chapitre III :
Méthodes et techniques
expérimentales

I.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons les appareils et les méthodes utilisés pour effectuer des essais expérimentaux pour atteindre nos objectifs. Il existe en effet plusieurs paramètres mesuré ou calculé par des matériaux et des méthodes appropriés. Dans le même cadre nous décrivons également la préparation et la caractérisation des coagulants et adjuvants, ainsi que le protocole expérimental de la méthode de coagulation-floculation par les essais de jar-test.

I.2. Appareillage d'expérimentation (jar-test) :

I.2.1. Appareillage :

Les appareils utilisée dans le travail est classée dans le tableau ci-dessus :

Tableau III. 1: les appareils nécessaire pour la recherche.

Appareillage	Rôle
Balance analytique	peser la masse (poids)
Jar-test	Déterminer la concentration optimale du coagulant pour le processus de coagulation floculation.
Conductimètre	Mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes.
pH- mètre	Mesure l'acidité ou la basicité de l'eau,
Spectrophotomètre UV-vis	Déterminer l'absorbance
Turbidimètre	Déterminer l'intensité lumineuse du faisceau transmis après avoir traversé l'échantillon
Agitateur magnétique	Homogénéiser les solutions à préparer
L'étuve	Chauffer ou sécher l'échantillon

I.2.2. Matériels et produits :

Les matériels et produits utilisée dans le travail est classés dans le tableau ci-dessus :

Tableau III. 2: les matériels et produits utilisée dans la recherche.

Matériels utilisés	Produits utilisés
Béchers -Micropipette- Erlenmeyer (Fiole) - Entonnoir - éprouvette gradué - Verre de montre - Spatule - Papier filtre- Büchner - Barreau magnétique -Pince -Fiole jaugée - Dessiccateur	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sulfate d'aluminium ($Al_2(SO_4)_3$). 2. Alginate de sodium 3. Bentonite 4. Acide chlorhydrique (HCl) 5. Eau distillée

I.2.3. Procédure expérimentale:

Procédé de traitement de l'eau (coagulation-floculation), qui s'effectue en deux étapes, la coagulation nécessite une vitesse d'agitation élevée (100-200 tr/min) pendant une courte durée (1-3 minutes), suivie d'une étape de floculation à faible vitesse d'agitation (40- 50 tr/min) pendant (10-30 minutes) [39]

I.2.4. Dispositifs expérimentaux (Jar Test):

I.2.4.1. Jar Test :

Un jar test est une simulation à petite échelle de ce qui arrive à une station d'épuration pendant le traitement Coagulation/floculation. Ces tests permettent d'évaluer différents paramètres du procédé comme :

- dosage des produits chimiques ajoutés ;
- le temps nécessaire à la floculation et à la coagulation ;
- La vitesse d'agitation du milieu.

Par conséquent, leurs valeurs optimales peuvent être déterminées pour améliorer les performances de la station.

Un banc de cuve d'essai se compose de 6 béchers de 1 litre chacun, tous équipés d'un puits à l'extrémité Parmi eux se trouve une lame rotative. Les axes sont reliés au même moteur, ce qui permet de Maintenir la même vitesse dans chaque bécher comme indiqué[40].

Matériels et produits:

- béchers ;
- flacons ;
- pH- mètre ;

- solution de coagulant ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, alginate, bentonite) ;
- pipette graduée ;
- jar test.

Mode opératoire :

- Préparer une solution de 1 % du coagulants ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, Alginate, bentonite);
- ajuster le PH de la solution ;
- lave bien les béchers avant l'utilisée et assurer qu'il ne reste aucune trace de détersif,
- Remplir 5 béchers avec 500 litres d'eau brute;
- Place chaque bécher sous l'agitateur de jar test ;
- Verser des doses croissantes (entre 4 et 12 ml) de coagulants ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, Alginate, bentonite) dans chaque bécher suivi d'une agitation rapide 150 tr/min pendant 3 minute ;
- agitation à 40 tr/min pendant 25 minutes ;
- arrêt l'agitation et laisser décanter pendant (15 min -30 min -60min) ;
- avec une pipette graduée prend le volume de 50ml de surnageant de chaque cas de décantation ;
- faire la mesure des paramètres (pH, turbidité, conductivité, absorbance ($\text{UV}_{254\text{nm}}$) et matière en suspension (MES)).

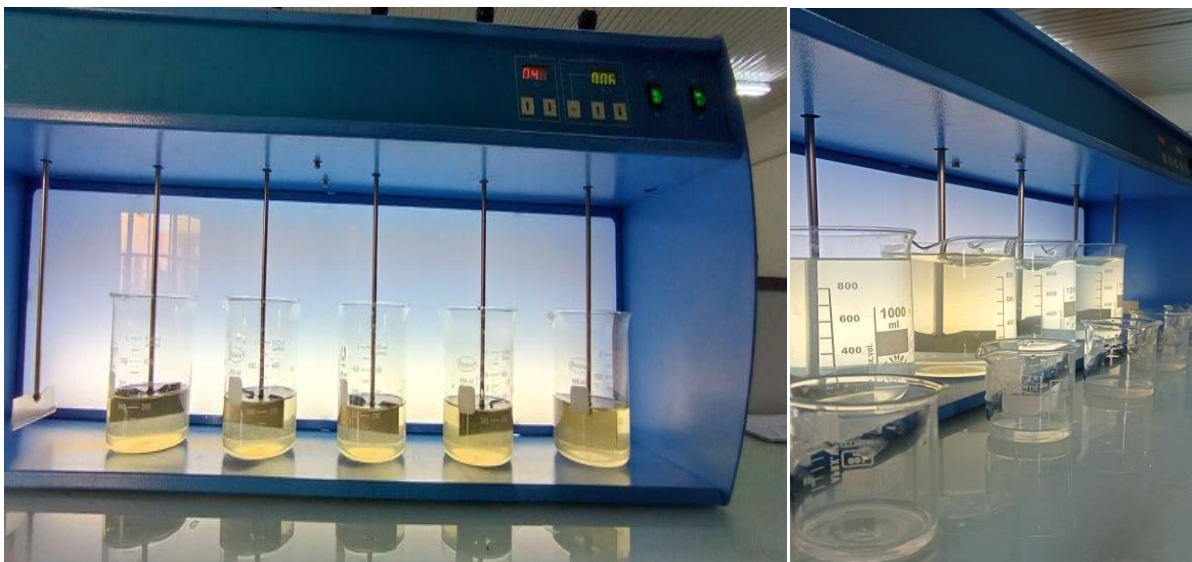


Figure III. 1: jar-test.

I.2.4.2. Mesure pH- mètre:

Le pH est en relation étroite avec la concentration des ions hydrogène (H^+), la mesure du pH doit être effectuée suivant des modalités spécifiques. Le pH d'une solution est le cologarithme décimal de l'activité de la solution en ions hydrogène

Nous avons utilisé un pH-mètre numérique de type HANNA instruments (pH211) pour mesurer le pH. Avant chaque essai, nous avons calibré l'appareil à l'aide des solutions tampons 4, 7 et 10[41].

Tableau III. 3: Classification des eaux d'après leur pH.

pH < 5	Acidité fort = > présence d'acide minéraux ou organique dans les eaux naturelles.
pH = 7	pH neutre.
7 < pH < 8	Neutralité approchée = > majorité des eaux de surface.
5.5 < pH < 8	Majorité des eaux souterraines.
pH = 8	Alcalinité forte, évaporation intense.

Matériels :

- pH-mètre ;
- eau distillée ;
- solutions étalons (pH=4, pH=7, pH=10) ;
- Bêchers.

Mode opératoire

- Allumer (lancer) l'appareil ;
- Calibrer l'appareil ;
- Laver l'électrode par l'eau distillé avant l'utiliser ;
- Homogénéiser l'échantillon ;
- Plonger l'électrode dans l'eau à analyser ;
- Prend les résultats de mesure.



Figure III. 2: pH Mètre.

I.2.4.3. Mesure de Conductivité:

La conductivité est la capacité d'une solution, d'un métal ou d'un gaz - autrement dit de tous les matériaux - à faire passer un courant électrique. Dans une solution, ce sont les anions et les cations qui transportent le courant alors que dans un métal ce sont les électrons.

Mesure de la conductivité avec " Cond 3110" Donne des mesures en $\mu\text{s}/\text{cm}$ et ms/cm .

Matériels et produits:

- conductimètre ;
- eau distille ;
- bécher.

Mode opératoire

- Allumer (lancer) l'appareil ;
- Calibrer l'appareil ;
- Laver l'électrode par l'eau distillé avant l'utiliser ;
- Homogénéiser l'échantillon ;
- Plonger l'électrode dans l'eau à analyser ;
- Prend les résultats de mesure.



Figure III. 3: Conductimètre.

I.2.4.4. Mesure de Turbidité :

La mesure de la turbidité permet de déterminer la qualité de l'eau. Sa clarté et sa transparence sont des images de haute qualité. Cette mesure est basée sur le principe de l'interaction des ondes lumineuses incidentes avec les particules en suspension, se traduisant principalement par des phénomènes de diffusion, de réflexion, d'absorption et de réfraction[40].

L'appareil utilisé est un turbidimètre (Turb 555IR)

Tableau III. 4: Classes de turbidité usuelles (NTU, nephelometric turbidity unit).

NTU < 5	Eau claire
5 < NTU < 30	Eau légèrement trouble
NTU > 50	Eau trouble
NTU	La plupart des eaux de surface en Afrique atteignent ce niveau de turbidité

Matériels :

- Turbidimètre.

Mode opératoire

- Allumer (lancer) l'appareil ;

- Calibre l'appareil ;
- Prend la cuve et verser l'échantillon ;
- mettre la cuve dans l'appareil et lire la valeur de la turbidité en NTU.



Figure III. 4:Turbidimètre.

I.2.4.5. Mesure de l'absorbance:

L'absorbance d'une solution est une grandeur physique qui mesure la quantité de lumière absorbée en fonction de la lumière traversant un échantillon d'une solution. Elle n'a pas d'unité ; elle dépend de la longueur d'onde de la lumière et de la concentration des substances colorées en solution. Les mesures d'absorbance ont été effectuées à l'aide d'un spectrophotomètre en entrant les valeurs de longueur d'onde à l'aide du clavier. Un « ajustement à blanc » doit d'abord se faire en mesurant l'absorbance du solvant dans la solution : cela « efface » l'absorbance du solvant dans la solution [50].

Ces mesures ont été effectuées sur un appareil de type UV-2401PC (Shimadzu) avec un trajet optique de 1 cm et une cellule en quartz.

Matériels :

- spectrophotomètre ;
- cuve

Mode opératoire :

- lancer le spectrophotomètre UV-visible ;
- Introduire dans le spectrophotomètre la cuve qui contient le solvant (eau distillée) ;

- Appuyer sur la touche « ZERO » afin de réaliser le réglage du blanc ;
- Remplacer la cuve qui contient l'eau distillée par celle qui contient la solution colorée étudiée ;
- Noter sur le tableau la valeur de l'absorbance A indiquée par le spectrophotomètre ;
- Procéder de la même manière avec les autres longueurs d'onde.



Figure III. 5: Spectrophotomètre UV-Visible.

I.2.4.6. Mesure des matières en suspensions (MES):

Un volume connu du surnageant est passé à travers un filtre, prétraité et pesé. La différence entre la masse initiale et finale du filtre donne la concentration en MES.

Matériels :

- papier filtre ;
- Büchner ;
- Erlenmeyer ;
- étuve ;
- balance analytique.

Mode opératoire :

- laver les papiers filtre avec l'eau distillé ;
- sécher les papiers filtres dans une étuve a 105°C pendant 2 heures ;
- laisser refroidir dans un dessiccateur ;
- peser les papiers filtre vide avec une balance électronique avant faire la filtration des MES (m_1);

- Placer le papier filtre dans un entonnoir (Büchner) ;
- Rincer l'équipement utilisées (bêcher contient l'échantillon + entonnoir (Büchner)) ;
- Lancer la filtration par versement l'échantillon (50ml) ;
- Sécher le papier après la filtration pendant 2 heures ;
- Laisser le papier filtre refroidir dans un dessiccateur ;
- Peser le papier filtre obtenus (m_2).

Expression des résultats :

$$\text{Le taux de matière en suspension (g/l)} = \left(\frac{m_1 - m_0}{V} \right) * 1000$$

- V : le volume en millilitres d'échantillon mis en jeu.
- m_0 : la masse en mg du disque filtrant avant utilisation.
- m_1 : la masse en mg du disque filtrant après utilisation.



Chapitre IV :

Résultats expérimentaux et

discussion

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre est consacré à l'évaluation des performances du procédé de coagulation floculation. Les essais ont été réalisées pour examiner l'effet des paramètres de fonctionnement du procédé, tels que, le temps d'agitation et de décantation, la concentration du coagulant et le pH. Par conséquent, dans cette section, nous voudrions souligner quelques Ces paramètres concernant la capacité de floculation (Al_2SO_4 , alginate de sodium, Bentonite) et leur mélange.

IV.1. Matériels et méthodes :

IV.1.1. Point de prélèvement des eaux usées brutes :

Le prélèvement des échantillons d'eau usée a analysés ont été prélevés à la sortie de la station d'épuration de M'sila après traitement, Les caractéristiques physico-chimiques de ces eaux sont présentées dans le Tableau IV.1.

Tableau IV. 1: Caractéristiques des échantillons utilisées.

Paramètre	pH	Conductivité (mS/cm)	Turbidité (NTU)	Absorbance	Matière en suspension (g/l)
Eau usée a la sortie de station	8.1	2.94	11.48	/	0.51

IV.2. Description des tests de floculation :

IV.2.1. Préparation du coagulant :

Nous avons utilisé le réactif sulfate d'aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$), alginate de sodium, Bentonite) et leur mélange, comme coagulants pour tous les expériences de coagulation-floculation. Une solution mère est périodiquement préparée par dissolution de 1% dans de l'eau distillée pour chaque coagulant.

IV.2.2. L'essai de Jar-Test :

Tous les tests de coagulation-floculation ont été réalisé selon le protocole de « Jar Test» sur un flocculateur à 6 agitateurs avec une vitesse de rotation Individuelle variant entre 0 et 200 tr / min. Cet appareil permet d'agiter simultanément le liquide contenu dans une série de

béchers remplis chacun de 1000 ml d'eau. Chaque test de floculation comporte 3 phases (Guesbaya.1998) :

1. Phase d'agitation rapide de 150 tr / min pendant 3 minutes durant laquelle on introduit le Coagulant.
2. Phase d'agitation lente de 45 tr / min pendant 25 minutes.
3. Phase de décantation pendant 15, 30 et 60 minutes après laquelle le surnageant est récupéré pour être filtré. Le filtrat est ensuite analysé. Pour évaluer l'efficacité du coagulant sur le traitement des eaux usées traitées, les paramètres suivants sont déterminés :
 - pH ;
 - Conductivité ;
 - Turbidité ;
 - Matière en suspension ;
 - L'absorbance UV $_{254\text{nm}}$.

IV.2.3. Détermination de la concentration optimale des coagulants :

Pour des concentrations variées entre 0.08 et 0.24g/l, on a fait des essais sur jar test avec des concentrations différentes de coagulants, les vitesses d'agitation et le pH sont fixés aux valeurs optimales obtenues dans les essais précédents. Le but c'est de déterminer la concentration optimale de sulfate d'aluminium ainsi l'alginate, la Bentonite et leur mélange. Les résultats obtenus sont représentés dans les courbes suivantes :

IV.3. Etudes comparative de l'efficacité des Coagulants :

Les résultats relatifs à l'étude de l'effet de la dose des coagulants sur le procédé traitement sont présentés dans les courbes suivantes :

IV.3.1. Variation de pH en fonction des coagulants :

Les résultats de pH obtenus après 60min de décantation en utilisant les coagulant suivants : le sulfate d'aluminium, l'Alginate, la Bentonite et le mélange de: 1/3(sulfate d'aluminium + 1/3 d'alginate+ 1/3 bentonite) sont représentée dans la figure IV.1.

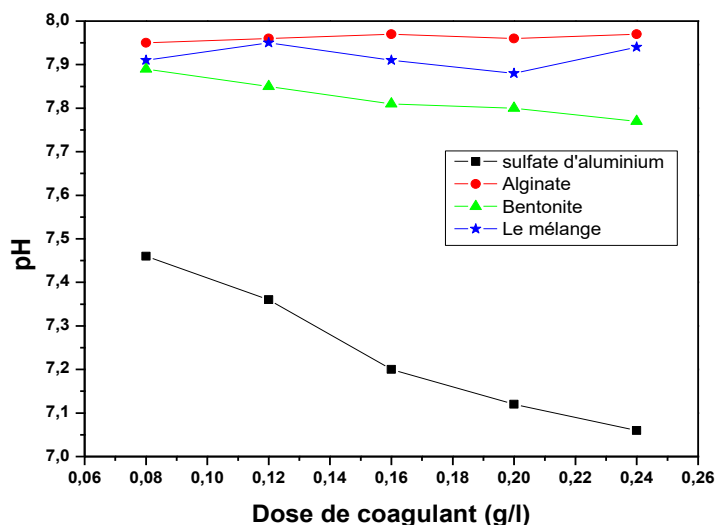


Figure IV. 1: Variation de pH en fonction de la dose des coagulants (sulfate d'aluminium, Alginate, Bentonite) et leur mélange.

On sait que le pH affecte le taux de réduction des contaminants ou le taux d'abattement de la pollution contenus dans les eaux usées, et qu'il existe une plage de pH où la coagulation a lieu rapidement et vite dans chaque type d'eau. La plage dépend du coagulant utilisé, de sa concentration et de la composition de l'eau à traiter.

Les résultats que nous avons obtenus dans la figure(IV.1), montrent que l'addition du coagulant sulfate d'aluminium $Al_2(SO_4)_3$ à l'eau usée accuse une chute de pH au fur et à mesure que de la dose de coagulant augmente. Ce qui est prévisible du fait des réactions d'hydrolyse du sulfate d'aluminium.

Nous constatons également une légère diminution de la courbe de bentonite avec la plage de valeur finale du pH entre 7,78 et 7,88 par rapport à la courbe de sulfate d'aluminium mais dans le cas de courbe mélange et l'alginate lorsque la dose de coagulant augmente, la valeur du pH augmente, ce qui donne à la courbe une trajectoire ascendante.

A l'optimum, le pH final est dans une gamme de valeurs entre 6,9 et 7,5 et reste donc conforme aux normes de rejet des eaux usées.

IV.3.2. Variation de La conductivité en fonction des doses des coagulants :

Les valeurs de conductivité des quatre coagulants. Elle varie entre 5,05 ms/cm et 5,21 ms/cm dont. Ses valeurs sont tous au-dessous par les normes algériennes; donc ses eaux sont de bonne qualité de point de vue conductivité. (Figure IV.2).

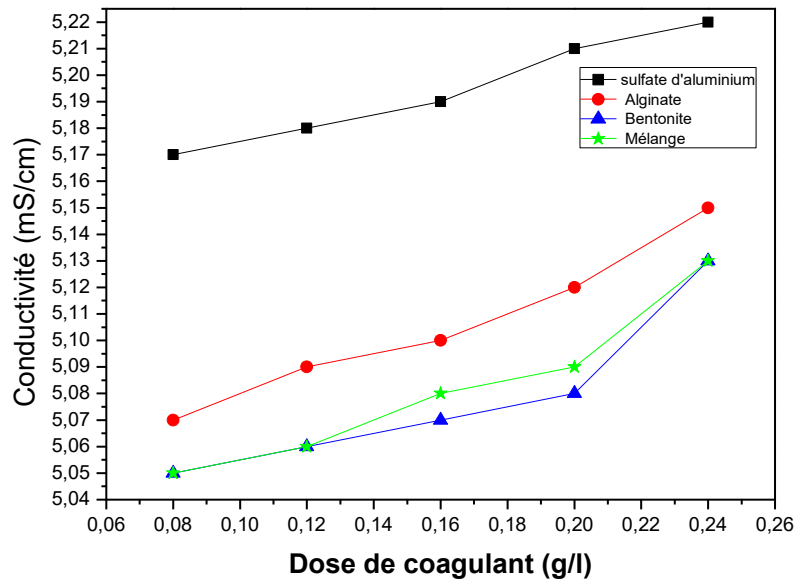


Figure IV. 2: Variation de conductivité en fonction de la dose des coagulants et leur mélange.

La conductivité est utilisée pour évaluer la minéralisation ou la salinité d'un échantillon, elle varie avec la température et la concentration des espèces dissoutes. En tant que paramètre brut, la concentration ionique de la solution est mesurée. Plus il y a de sels dissociés, d'acides ou de bases dans une solution, plus sa conductivité dans l'eau et les eaux usées est élevée, ce sont principalement des ions de sel dissous. Par conséquent, la conductivité indique la teneur en sel des eaux usées ou la pureté de l'eau[13].

Sur La figure IV.2, nous avons détecté une augmentation de conductivité par rapport à celle de l'eau usée brute avant le traitement de coagulation floculation. Cela est dû au fait que le procédé de coagulation floculation chimique est un procédé de séparation solide-liquide, et le polluant ne subit pas une minéralisation.

Nous notons que la courbe de sulfate d'aluminium témoigne d'une augmentation significative de la valeur de conductivité, ce qui indique uniquement la forte présence de solides (les sels minéraux et non les matières organiques) dissous dans l'eau. Ainsi, plus la concentration en minéraux et en oligo-éléments dissous lors de l'utilisation de sulfate

d'aluminium, contrairement à ce qui est observé sur les courbes d'Alginate, Bentonite et le mélange.

IV.3.3. Variation de la turbidité en fonction de la dose des coagulants et leur mélange:

La mesure de la turbidité permet de donner les informations visuelles sur l'eau. Les résultats des analyses obtenus à l'aide d'un turbidimètre déterminent une variation entre 6,5 NTU et 0.

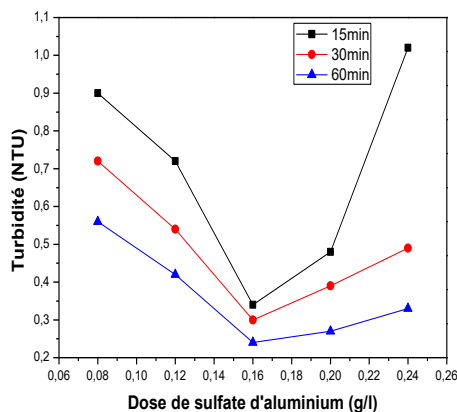


Figure IV. 3: Variation de la turbidité en fonction de la dose de sulfate d'aluminium

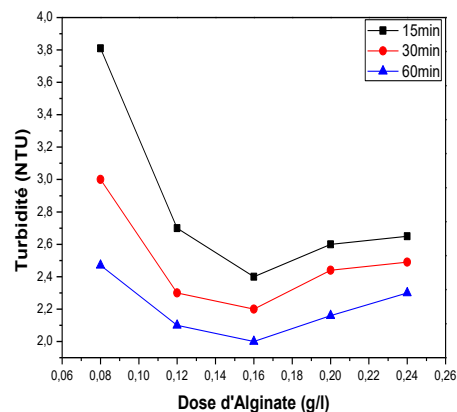


Figure IV. 4: Variation de la turbidité en fonction de la dose d'Alginate.

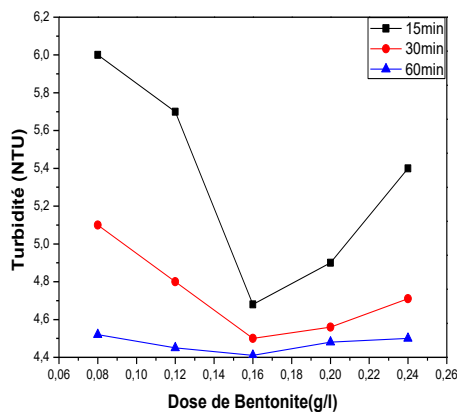


Figure IV. 5: Variation de la turbidité en fonction de la dose du Bentonite.

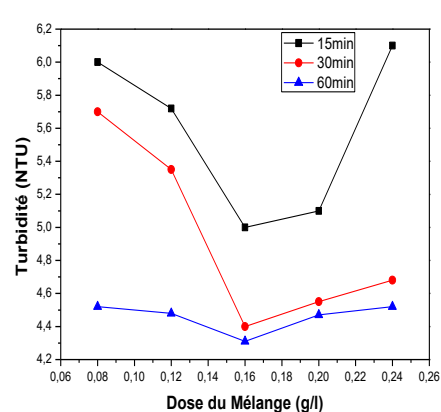


Figure IV. 6: Variation de la turbidité en fonction de la dose du mélange.

L'eau utilisée est caractérisée par une turbidité élevée. L'allure des courbes de figures (IV.3, IV.4, IV.5, IV.6) montrent que l'abattement de la turbidité diminue au fur et à mesure que la dose de coagulant augmente jusqu'à une dose optimale de 0,16 g/l où la formation des floccs a été observés puis s'augmente à nouveau. Cela peut être expliqué par la restabilisation

des particules colloïdales, provoquée par le surdosage du coagulant. On observe aussi, que la turbidité diminue lorsque l'échantillon prend plus de temps de décantation, comme le montre les quatre figures (IV.3, IV.4, IV.5, IV.6). Les résultats, montrent une nette amélioration de l'élimination de la turbidité et mettent bien en évidence l'intérêt d'incorporer du sulfate d'aluminium, d'alginate, de la bentonite et leur mélange, au cours de l'étape de coagulation-floculation qui conforme aux normes algériennes de rejet des eaux usées.

IV.3.4. Variation de la matière en suspension MES en fonction des doses des coagulants :

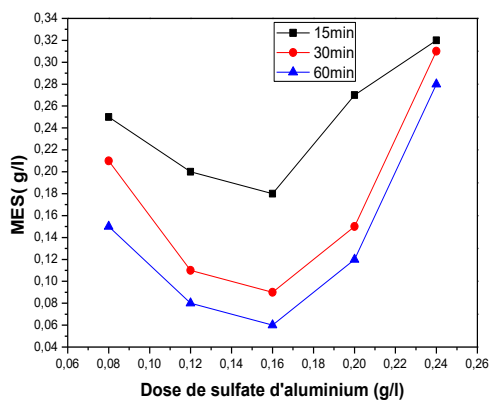


Figure IV. 7: Variation de la matière en suspension (MES) en fonction de la dose de sulfate d'aluminium.

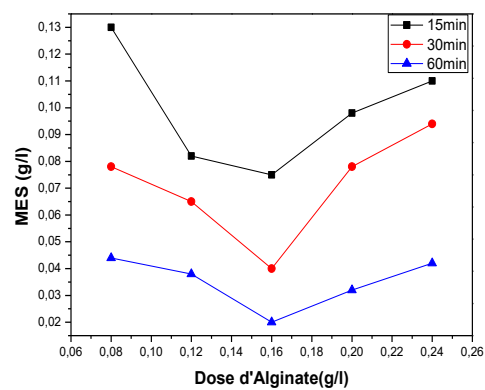


Figure IV. 8: Variation de la matière en suspension (MES) en fonction de la dose d'Alginate.

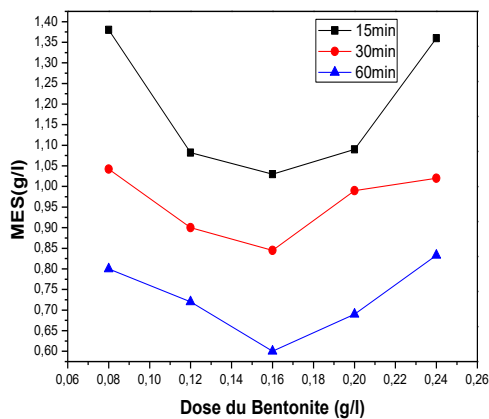


Figure IV. 9: Variation de la matière en suspension (MES) en fonction de la dose de Bentonite.

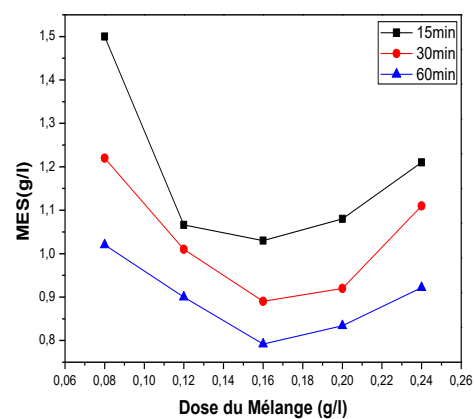


Figure IV. 10: Variation de la matière en suspension (MES) en fonction de la dose de mélange.

D'après les résultats obtenus on remarque, sur les figures (IV.7, IV.8, IV.9, IV.10) une diminution des MES (Matières En Suspension) à une dose optimale 0.16g/l .Au-delà de cette

dernière on observe une augmentation des MES. L'élimination des MES est optimale dans une dose de 0.16 g/l pour les trois types du coagulants et leur mélange.

Selon, la norme de rejet de l'OMS (30 mg/l) et à celle du journal officiel algérien limitée à 35 mg/l (JORA, 2006), et la FAO (2003), la présence de matière en suspension dans les eaux usées ne constitue pas, sauf cas très particulier, un obstacle à la réutilisation de ces eaux[42]. Nous concluons que les résultats ne concordent pas avec ces normes.

IV.3.5.variation de l'absorbance(UV_{254nm}) en fonction de la dose des coagulants :

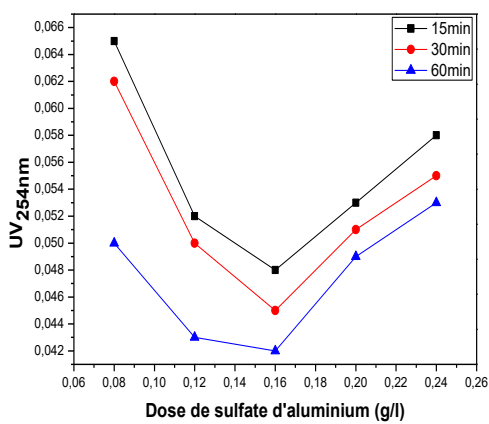


Figure IV. 11: variation de l'absorbance UV_{254nm} en fonction de la dose de sulfate d'aluminium.

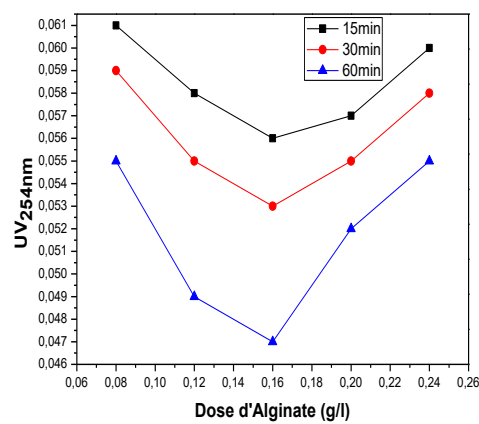


Figure IV. 12: variation de l'absorbance UV_{254nm} en fonction de la dose d'Alginate.

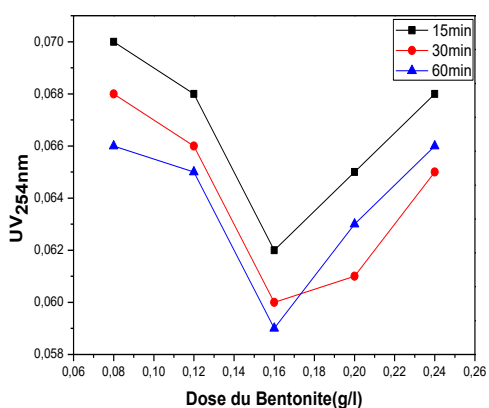


Figure IV. 13: variation de l'absorbance UV_{254nm} en fonction de la dose de Bentonite.

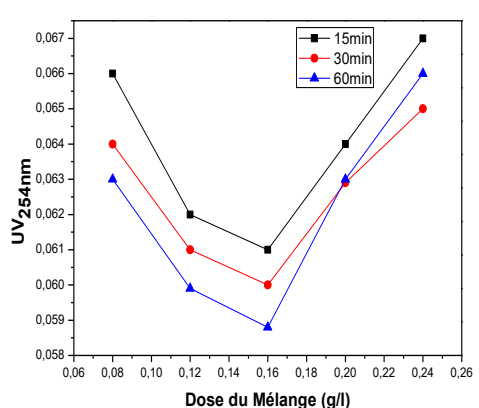


Figure IV. 14: variation de l'absorbance UV_{254nm} en fonction de la dose du mélange.

Les courbes des figure IV.11, IV.12, IV.13, IV.14 représentent la variation de l'absorbance UV_{254nm} en fonction de la dose de coagulants. L'absorbance UV_{254nm} baisse

lorsque la dose augmente de 0,08 à 0,16 g/l. A cette dose 0,16 on atteint la valeur minimale d'absorbance de 0,042, 0,047, 0,059 et 0,0588 pour le sulfate d'aluminium, l'alginate, la bentonite et le mélange respectivement. Une augmentation de la dose au-delà de 0,16 entraîne une augmentation des valeurs de l'absorbance UV_{254nm} .

IV.3.6. Variation de la turbidité en fonction de la matière en suspension (MES) :

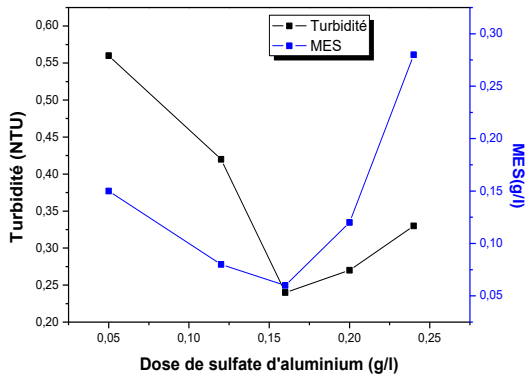


Figure IV. 15: Variation de la matière en suspension MES en fonction de la turbidité du sulfate d'aluminium.

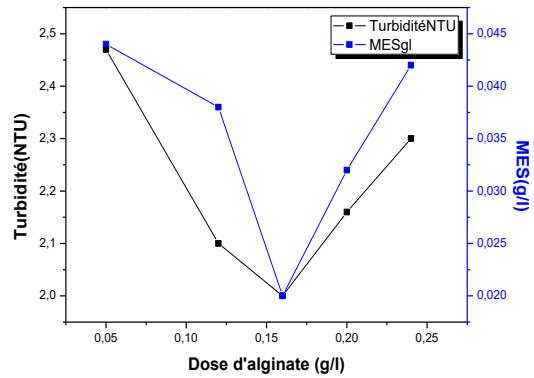


Figure IV. 16: variation de la matière en suspension MES en fonction de la turbidité d'Alginate.

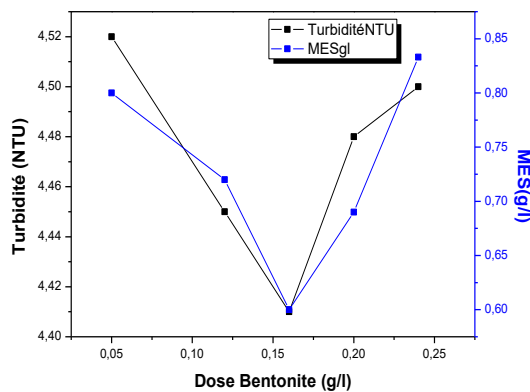


Figure IV. 17: Variation de la matière en suspension (MES) en fonction de la turbidité de Bentonite.

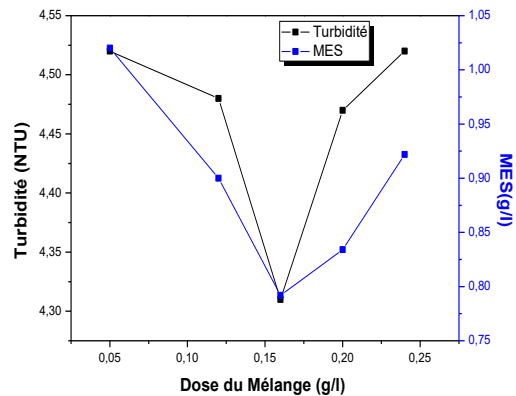


Figure IV. 18: Variation de la matière en suspension (MES) en fonction de la turbidité du mélange.

La turbidité est la réduction de la transparence d'un liquide, due à la présence de matières colloïdales et/ou en suspension. La théorie de Mie (Mishendo et al., 1999), pour n classes de particules en suspension homogènes et d'indice de réfraction déterminé permet de démontrer que la relation entre la turbidité mesurée en atténuation T et la concentration en MES est linéaire[42]:

$$C_{MES} = \frac{2}{3} \left(\sum_{i=1}^n \frac{Q_{MES} P_{mi}}{P_{pi} D_{pi}} \right)^{-1} T = a \times T$$

Q_{MES} : Coefficient d'extinction caractéristique de la classe i (il dépend de la longueur d'onde, de l'indice de réfraction, et de la forme des particules) ;

P_{pi} : Masse volumique des particules de la classe i ;

P_{mi} : Fraction des particules de la classe i de diamètre équivalent D_{pi} .

Au niveau des quatre courbes (IV.19, IV.20, IV.21, IV.22) on voit que la turbidité et la matière en suspension (MES) vont dans le même sens avec la relation de corrélation directe et l'addition progressive du coagulant a diminué les MES et la turbidité jusqu'à la dose optimale 0.16 g/l et qui augmentent en suite pour des concentrations plus élevées pour les quatre cas, puis ils augmentent à nouveau.

Cependant les résultats montrent bien que plus les MES augmentent, plus l'effet de coagulation sur la turbidité est important.

IV.3.7. Variation de la turbidité en fonction de l'absorbance UV 254nm:

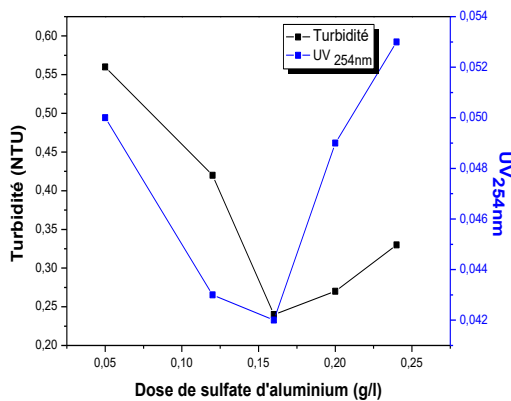


Figure IV. 19: Variation de la turbidité en fonction de l'absorbance

UV 254nm de sulfate d'aluminium.

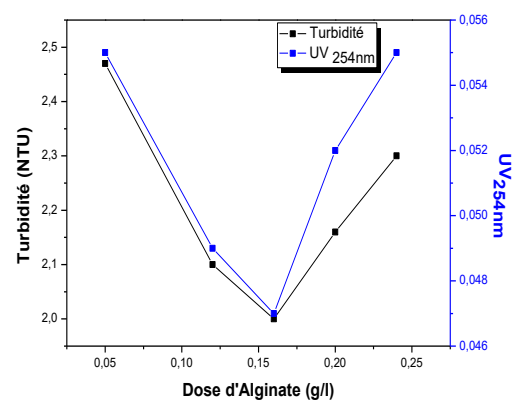


Figure IV. 20: Variation de la turbidité en fonction de l'absorbance

UV 254nm d'Alginate

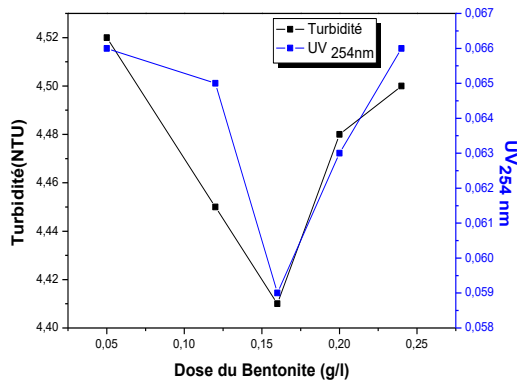


Figure IV. 21: Variation de la turbidité en fonction de l'absorbance UV_{254nm} du Bentonite.

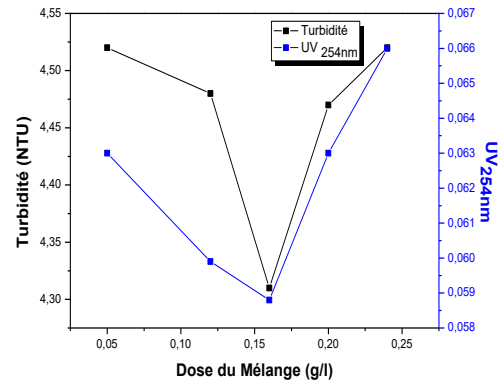


Figure IV. 22: Variation de la turbidité en fonction de l'absorbance UV_{254nm} du mélange.

La turbidité dans les liquides est causée par de petites particules en suspension (non dissoutes) qui ont un indice de réfraction différent de celui du milieu environnant. Cette interférence provoque la réflexion, l'absorption et la diffusion, c'est-à-dire la modification de la direction de la lumière incidente. À mesure que la concentration de particules augmente, l'intensité de la lumière diffusée augmente et atteint une valeur maximale, qui est affectée par la longueur d'onde de la lumière, la taille et la forme des particules, l'indice de réfraction et la couleur de la solution. Les deux facteurs les plus importants qui affectent l'intensité et la distribution spatiale de la lumière diffusée sont la longueur d'onde de la lumière et la taille des particules [51].

A partir des courbes (IV.19, IV.20, IV.21, IV.22) on remarque qu'avec l'augmentation des doses des coagulants utilisés : le sulfate d'aluminium, l'alginate, la bentonite et leur mélange la turbidité et l'absorbance diminuent jusqu'à atteindre une dose 0,16 g/l ce qui signifie la dose optimale, puis augmente à nouveau.

Cela explique que l'absorption a une grande relation avec la présence des matières en suspension que traverse la lumière de spectrophotomètre. Ainsi, lorsque l'on diminue la quantité de matières en suspension, la valeur d'absorption diminue.

Conclusion générale :

L'eau est un élément essentiel de tout écosystème, tant quantitatif que qualitatif. Le traitement des eaux usées est un processus très important dans la vie quotidienne résidents urbains et ruraux. Ce traitement n'est pas seulement Afin de protéger la santé des personnes et d'éviter les maladies infectieuses, mais aussi de protéger l'environnement.

L'étude expérimentale que nous avons menée a été consacrée à l'élimination des MES ou des matières colloïdales existant dans l'eau traitée de la STEP de M'sila, et à la réduction de la turbidité par le procédé de coagulation-floculation en utilisant différents agents coagulants le sulfate d'aluminium et des coagulants naturels de l'alginate et de la bentonite en vue de sa valorisation comme processus naturel, ainsi leur mélange.

L'ensemble des résultats issus de cette étude, peuvent s'expliquer que :

Les eaux usées de la station d'épuration sont polluées notamment en matière colloïdale avec une turbidité de 11,48 NTU et en matières en suspensions (MES 0.51 g/l).

L'origine de la pollution des eaux usées de la station est domestique.

D'après les résultats expérimentaux obtenus, nous avons pu conclure que :

Le traitement par coagulation-floculation au sulfate d'aluminium est plus efficace que celui d'autres coagulants aussi leur mélange.

Le temps, la vitesse d'agitation et le temps de décantation sont des facteurs importants, qu'il faut prendre en considération, pour un bon fonctionnement du traitement C-F.

La détermination de la dose optimale ou de la concentration du coagulant est un paramètre essentiel et principal pour la déstabilisation des colloïdes. Une dose optimale du coagulants sulfate d'aluminium, alginate, bentonite et leur mélange, qui donne et montre la meilleure élimination et réduction des MES, de la turbidité dans ce cas traité est de 0.16 à 0.2g/l, un surdosage provoque nécessairement une restabilisation des particules colloïdales susceptibles de changer la charge de surface.

Le pH, la température des paramètres très importants qu'il faut les prendre en compte et les noter.

L'addition des coagulants naturels (alginate, bentonite) et le mélange des trois coagulants, pour traiter l'eau usée pas C-F, n'est pas très efficace, mais cela ne signifie pas que leur ajout n'a pas fait de différence, mais a plutôt fait une différence remarquable et notable dans la réduction des MES et de la turbidité dans l'eau.

En conclusion, on peut dire que le traitement par coagulation-floculation (dispositif jar-test) et décantation, améliore la qualité d'eau usée traitées naturellement par la STEP, mais ces eaux usées (d'origine domestique) ne peuvent pas être jetés dans notre environnement car il n'est pas conforme aux normes de rejet des eaux usées

Bibliographie

- [1] B. M. S. Oussama, “Étude de la biodégradation du 2,4-dichlorophénol par le microbiote des effluents d’entrée et de sortie de la station d’épuration des eaux usées d’ibn Ziad,” 2011.
- [2] E. Souterraines, *Les eaux*. 2019.
- [3] J. Bethemont, “Usages et polluants . Versailles , Institut National de la recherche Agronomique (Coll . « Un point sur ... »), 204 p . et 210 p . (ISBN 2-7380-0855-0 et 2-7380-0864-X),” no. 1999, pp. 1–3, 2019.
- [4] M. Khawla and S. Rima, “Remerciements,” 2017.
- [5] R. Algerienne, D. Et, and D. Ahlam, “Intitulé Traitement des Eaux de Surface du Barrage El K ’ so b par Coagulation Flocculation”.
- [6] K.Bengouga, “Thèse de Doctorat: Généralités sur les eaux usées,” pp. 1–23, 2010.
- [7] E. Automatique, “Dédicace Je dédie ce modeste travail à Mes chers parents Mes frères et mes sœurs A mes amis,” 2007.
- [8] Metahri MS, “Élimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées, par des procédés mixtes,” *Cas la STEP Est la V. Tizi-Ouzou. Thèse Dr. Univ. tizi-Ouzou*, p. 172 P, 2012.
- [9] U. Abou and B. Belkaid, “Bilan De Suivi Des Performances De Fonctionnement D ’ Une Station D ’ Epuration a Boues Actives : Cas De,” pp. 2012–2013, 2013.
- [10] E. France, “Les eaux usées urbaines et leur épuration”.
- [11] B. Benkaddour, “Contribution à l ’ étude de la contamination des eaux et des sédiments de l ’ Oued Chélif (Algérie) Batoul Benkaddour To cite this version : HAL Id : tel-01955103 Délivré par Contribution à l ’ étude de la contamination des eaux et des sédiments de l ’,” 2018.
- [12] Gouvernement du Canada, “La turbidité dans les sources d’approvisionnement en eau au Manitoba,” p. 1à3, 2011.
- [13] W. Werkst, “Mesurer · Surveiller · Régler Compensation de température Conductivité

électrique,” pp. 26–31.

- [14] B. F. Zahra and A. Hadjer, “Mémoire pour l’obtention Du diplôme de Master Académique Boussadia”.
- [15] C. I. I. I. Pollution, “Chapitre III Pollution des eaux M2 chimie de l’environnement,” pp. 1–24.
- [16] D. U. Taux and D. O. Dissous, “MESURE & ENREGISTREMENT”.
- [17] M. Farida, “Chapitre 1 : Caractéristique générales des eaux à évacuer □ Introduction ; □ classification des eaux usées ; □ Les eaux domestiques ; □ Les eaux de ruissellements ; □ Les eaux industrielles ; Caractéristiques des eaux usées ; chimiques ; Caractères biologiques”.
- [18] K. Y. Etienne *et al.*, “L’étalement urbain au péril des activités agro-pastorales à Abidjan.,” *Vertigo*, vol. 10, no. Volume 10 numéro 2, pp. 1–9, 2010, doi: 10.4000/vertigo.10066.
- [19] A. Rima, “Mémoire de fin de cycle,” pp. 2013–2014, 2007.
- [20] CEAEQ, *Échantillonnage Des Eaux Souterraines*, vol. 05, no. 1. 2012.
- [21] Q. P. G. Des and E. D. E. S. O. Dissous, “Fiche méthodologique - Indicateur: qualité physico-chimique générale des eaux de surface,” pp. 1–7, 2015.
- [22] M. D. E. F. I. N. D. Etudes, “Remerciements,” 2019.
- [23] P. Traitements, “Principe général de fonctionnement d’une station d’épuration à procédé biologique Descriptif :”.
- [24] “Chapitre 1 Pollution de l’eau,” pp. 1–16, 1914.
- [25] “Partie 1 : Traitement de l’eau”.
- [26] C. Press and C. Britannique, “Traitement des eaux usées,” *Panor. l’environnement 2013*, pp. 40–41, 2014, doi: 10.1787/9789264221802-11-fr.
- [27] ASTEE and ADEME, “Guide méthodologique d’évaluation des émissions de gaz à effet de serre des services de l’eau et de l’assainissement,” pp. 1–44, 2013.

- [28] M. Académique, "Traitement des eaux usées de la ville d'El -oued à l' aide des matériaux à base d' argile," 2015.
- [29] Z. M. Seifeddine, "Etude de système d'épuration des eaux usées urbaines par lagunage naturel de village de Méghibra," p. 90, 2014.
- [30] Z. Adamczyk, "Particle adsorption and deposition: role of electrostatic interactions," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 100–102, no. SUPPL., pp. 267–347, Feb. 2003, doi: 10.1016/S0001-8686(02)00062-3.
- [31] D. Christian, "Simulation Et Étude En Laboratoire De La Flocculation Lestee (Actiflo") a L'Aide D'Une Procédure Modifiée De Jar Test," p. 113, 1996.
- [32] N. Bouziane, "Élimination du 2-mercaptobenzothiazole par voie photochimique et par adsorption sur la bentonite et le charbon actif en poudre," *Mémoire de Magister*, p. 182, 2007.
- [33] J. Buffle, K. J. Wilkinson, S. Stoll, M. Filella, and J. Zhang, "A generalized description of aquatic colloidal interactions: The three- colloidal component approach," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 19, pp. 2887–2899, 1998, doi: 10.1021/es980217h.
- [34] E. Assaad, "Étude Du Processus De Coagulation-Flocculation Du Système Montmorillonite-Chitosane Dans L'Élimination De Métaux De Transition," *Univ. Du Québec À Montréal*, p. 182, 2006.
- [35] I. Toulouse, "New Hybrid Process: Hydrocyclone, Coagulation, Flocculation and Flotation for water treatment process," *Water*, 2010.
- [36] DAUD Salah, "Doctorat en Sciences," vol. 2015, p. 37380, 2012.
- [37] R. Ben Aim and J. L. Probst, "« Modélisation mathématique du taux de coagulant dans une station de traitement d' eau » Modélisation mathématique du taux de coagulant dans une station de traitement d' eau Mathematical modelling of optimal coagulant dose," vol. 3, no. November, pp. 377–397, 2016.
- [38] L. Bouazza, "Effet de la coagulation- flocculation sur la qualité des eaux épurées de la STEP de Ain El Houtz," *Diplôme Magister. Univ. Abou Bekr Belkaid, Département Chim.*, p. 106, 2011.

- [39] “jartest.pdf.”
- [40] M. Mujawamariya, “Optimisation de la décantation primaire par ajout de produits chimiques – Jar-Tests,” p. 90, 2012.
- [41] OIV, “Détermination du pH : Méthode de type I,” vol. 4, pp. 1–7, 2009.
- [42] A. F. Zoubiri, M. S. Hamaidi, and H. Kais, “EVALUATION DE L ’ EFFI CACITE DE LA STATION D ’ EPURATION DE MEDEA (ALGERIE),” pp. 113–128, 2016.

Sitographie

- [43] <https://www.lenntech.fr/faq-pollution-eau.htm#ixzz7LuuFyxn8>
- [44] <https://www.cieau.com/connaitre-leau/la-pollution-de-leau/pollution-ressource-eau-comment-reduire/>
- [45] <https://www.safewater.org/french-fact-sheets/2017/2/9/la-temperature-de-leau>
- [46] <https://www.iksr.org/fr/themes/qualite-des-eaux/eaux-de-surface/matieres-en-suspension>
- [47] <https://www.hannainstruments.fr/>
- [48] <http://www.spge.be/de/stations-d-epuration.html?IDC=2036>
- [49] <https://www.suezwaterhandbook.fr/procedes-et-technologies/pretraitements>
- [50] https://www.maxicours.com/se/cours/realiser-des-mesures-d-absorbance/?fbclid=IwAR3gRVbZicj46kMnZYaMJcmgdIIIn_LL6oK8w0gvV0wrKg0HiTIX2orrUQ9c
- [51] <https://www.optek.com/fr/turbidity-guide.asp#:~:text=La%20turbidit%C3%A9%20dans%20les%20liquides,direction%20de%20la%20lumi%C3%A8re%20irradi%C3%A9e.>