

République Algérienne Démocratique et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université M'hamed Bougara Boumerdes

جامعة امحمد بوقرة- بومرداس



Faculté de Technologie

Département Génie Des Procédés

Spécialité : Génie de l'environnement

Mémoire de Fin D'étude en vue de L'obtention du Diplôme de
Master

Etude de l'efficacité de deux traitements, coagulation et oxydation appliqués
aux eaux du barrage de KEDDARA.

Réalisé par :

TOUMACHE Elghalia

BOUFLAH Maroua

Promoteurs :

Mr. BALOUL. H

Mme. BENHABILES. N

Soutenu le 02/07/2024 devant le jury composé de :

M.AMITOUCHE

Pr

Présidente

F. BOUMECHHOUR

MCA

Examinatrice

N. OUAZENE.

MCA

Examinatrice

H. BALOUL

MCA

Encadreur

Année universitaire : 2023/2024

Résumé :

La présence de l'aluminium résiduel dans les eaux potables après traitement, peut poser un grand problème de santé public, pour cela nous avons étudié tous les paramètres qui nous permettent d'avoir le minimum d'aluminium résiduel.

L'objectif de notre travail est l'étude de l'efficacité de traitement des eaux par le coagulant sulfate d'aluminium tout en assurant un minimum d'aluminium résiduel, et l'efficacité de l'hypochlorite de sodium et du permanganate de potassium sur l'élimination, de la matière organique naturelle par oxydation.

La zone optimale de pH de coagulation en fonction d'abattement de l'aluminium résiduel, c'est le (pH=7) avec une valeur d'aluminium résiduel de 0.018 mg/l. Les doses optimales de coagulant pour différents pH (pH=7,7.2, 7.5, 8) sont respectivement (60.80.80.60 mg/l).

On a trouvé que le meilleur pH pour l'élimination de la matière organique par oxydation au Cl₂ est le pH de 5.5, ce qui est logique car à ce pH la forme la plus oxydante (HOCl) est présente à 99%.

Les mots clé : coagulation-floculation, sulfate d'aluminium, turbidité, aluminium résiduel, matière organique, poly-électrolyte, chlore actif, KMnO₄

المخلص

يمكن أن يشكل وجود الألمنيوم المتبقي في مياه الشرب بعد المعالجة مشكلة صحية عامة كبيرة، ولهذا قمنا بدراسة جميع المعايير التي تسمح لنا بالحصول على الحد الأدنى من الألمنيوم المتبقي.

الهدف من عملنا هو دراسة فعالية معالجة المياه بواسطة مادة تخثر كبريتات الألمنيوم مع ضمان الحد الأدنى من الألمنيوم المتبقي، وفعالية هيبوكلوريت الصوديوم وبرمنغنات البوتاسيوم في التخلص من المواد العضوية الطبيعية عن طريق الأكسدة.

بقيمة الألمنيوم المتبقية 0.018 ملغم/لتر. الجرعات المثلى (pH = 7) المجال المثالي لدرجة الحموضة التخثرية كدالة لخفض الألمنيوم المتبقي هي (pH = 7.7.28 ، 7.5 ،) من المواد المتخثرة لمختلف الأس الهيدروجيني.

هو الأس الهيدروجيني 5.5، وهو أمر منطقي لأن الشكل Cl₂ وجد أن أفضل الأس الهيدروجيني للتخلص من المادة العضوية عن طريق الأكسدة. موجود بنسبة 99% (HOCl) الأكثر أكسدة في هذا الأس الهيدروجيني.

KMnO₄الكلمات الرئيسية: التخثر و التلبد، كبريتات الألمنيوم، التعكر، الألمنيوم المتبقي، المواد العضوية، البولي إلكتروليت، الكلور النشط،

Abstract :

The presence of residual aluminum in drinking water after treatment, can pose a great public health problem, for this we studied all the parameters that allow us to have the minimum of residual aluminum.

The objective of our work is the study of the water treatment efficiency by aluminum sulfate coagulant while ensuring a minimum of residual aluminum, and the effectiveness of sodium hypochlorite and potassium permanganate on elimination, natural organic matter by oxidation.

The optimal area of coagulation pH as a function of abatement of residual aluminum is (pH=7) with a residual aluminum value of 0.018 mg/l. The optimal doses of coagulant for different pH (pH=7.7.2, 7.5, 8) are respectively (60.80.80.60 mg/l).

It was found that the best pH for the elimination of organic matter by Cl₂ oxidation is the pH of 5.5, which is logical because at this pH the most oxidizing form (HOCl) is present at 99%.

Keywords: coagulation-floculation, aluminum sulfate, turbidity, residual aluminum, organic matter, poly-electrolyte, active chlorine, KMnO₄

Sommaire

Introduction	1
Chapitre I :Généralité sur les eaux	
I.1.Définition.....	3
I.1.1L'eau.....	3
I.1.2L'eaubrute.....	4
I.1.3L'eau potable.....	4
I.2Sources d'eau.....	4
I.3La composition des eaux naturelles.....	5
I.3.1Les substances minérales.....	7
I.3.2Les matières organiques.....	7
I.3.3Les matières dissoutes.....	7
I.3.4Les matières colloïdales.....	7
I.3.5Les matières en suspension.....	7
I.4Propriétés de l'eau.....	8
I.4.1Propriétés physiques.....	8
I.4.2Propriétés chimiques.....	8
I.4.3Propriétés biologiques	9
I.5Les paramètres de l'eau.....	9
I.5.1.Paramètres organoleptiques.....	9
I.5.2Paramètres physiques	10
I.5.3Les paramètres chimiques.....	11
I.5.4Les paramètres bactériologiques.....	12
I.6La pollution des eaux	13
I.7Source de la pollution	14
I.7.1La pollution industrielle	14
I.7.2La pollution agricole	14
I.7.3La pollution domestique	14
I.7.4 La pollution accidentelle	14
I.8 Les types de pollution de l'eau	14
I.8.1 Pollution chimique	14
I.8.2 Pollution physique	14
I.8.3 Pollution thermique	14
I.8.4 Pollution organique	14

I.8.5 Pollution bactériologique	14
I.9 Conséquences de la pollution des eaux.....	15

Chapitre II :les procédés de traitement des eaux potable

II.1 Objectif du traitement.....	16
II.2 Les étapes et les procédés de traitement des eaux.....	17
II.2.1 Prétraitement.....	17
II.2.2 Le dégrillage.....	17
II.2.3 Le tamisage.....	17
II.2.4 Le dessablage.....	17
II.3 Le traitement primaire.....	18
II.4 Traitement de clarification (traitement physico-chimique)	18
II.4.1 La coagulation-floculation	18
II.4.2 Décantation	19
II.4.3 La filtration	23
II.5 Le traitement complémentaire	27
II.5.1 La désinfection	27
II.5.2 La déminéralisation	30
II.5.3 Dénitratation	31
II.5.4 Adoucissement	31
II.5.5 La défferrisation – démanganisation	32
II.5.6 La défluoruration	32

Chapitre III :Coagulation-floculation et oxydation chimique

III.1 Matières en suspension et colloïdes	33
III.1.1 Définitions.....	33
III.2 Théorie de la double couche	33
III.3 Le potentiel Zeta	34
III.4 La coagulation.....	35
III.4.1 Facteur influençant la coagulation	35
III.4.2 Les coagulants utilisés	37
III.5 La floculation	39
III.5.1 Le principe de phénomène	39
III.5.2 Les types de floculation	40
III.5.3 Les flocculants utilisés.....	41
III.5.4 Aspects pratiques de la floculation	42

III.6	Les avantage et les inconvénients de coagulation floculation	42
III.6.1	Les avantage.....	42
III.6.2	Les inconvénients	42
III.7	Oxydation chimique	43
III.7.1	Les objectifs de l'oxydation	43
III.7.2	Les oxydants chimique	43

Chapitre IV :Présentation de la station de « Boudouaou »

IV.1	Présentation des différents services	55
IV.2	Les produits de traitement mise en œuvre dans la station.....	56
IV.3	Suivis la qualité de l'eau au laboratoire.....	57
IV.4	Les différents ouvrages de traitement	57
IV.4.1	L'ouvrage d'arrivée.....	58
IV.4.2	Décanteurs.....	58
IV.4.3	Filtre AQUAZUR «V»	60
IV.4.4	Réservoirs	62

Chapitre V :Matériel et méthodes

V.1	Les appareillages et les méthodes d'analyse.....	63
V.1.1	Mesure du pH.....	63
V.1.2	Spectrophotomètre.....	63
V.1.3	Turbidité	64
V.1.4	Jar test	65
V.2	Autres équipements.....	67
V.3	Suivi de l'élimination de l'aluminium	67
V.3.1	Les réactifs	67
V.3.2	Appareillage	68
V.3.3	Les expériences pour éliminer l'aluminium.....	68
V.3.4	Dosage d'aluminium par kit LCK 301.....	68
V.4	Elimination la matière organique par le permanganate de potassium	69
V.4.1	Détermination de la matière organique (l'indice du KMnO_4)	70
V.5	Elimination la matière organique par le chlore actif	71

Chapitre VI :Résultats et discussions

VI.1	Coagulation et Floculation	74
VI.1.1	Recherche de la dose optimale du coagulant (Sulfate d'alumine).....	74
VI.1.2	Recherche de la dose optimale du Flocculant (Poly- électrolyte)	75

VI.1.3 Recherche de la zone optimale du pH de coagulation	76
VI.1.4 Recherche de la dose du sulfate d'aluminium à différents pH	77
VI.2 Oxydation la matière organique	83
VI.2.1 Par le chlore actif	83
VI.3 Comparaison entre le chlore actif (eau de Javel) et KMnO_4	91
Conclusion	92

Liste des tableaux

Tableau I.1:composition des eaux naturelles.....	6
TableauI..2: Qualité de l'eau en fonction de la turbidité.....	10
Tableau I.3:les normes algériennes concernant les eaux potables	12
Tableau I.4:paramètres bactériologiques.....	13
Tableau III.1 action de l'ozone sur la matière organique	49
Tableau III. 2 action de permanganate sur la matière organique.....	50
Tableau IV.1:les produits de traitement mise en œuvre dans la station.....	56
Tableau IV. 2 : les données hydrauliques des réservoirs de stockage	62
Tableau VI.1: Caractéristique de l'eau brute.....	74
Tableau VI.2 : Recherche de la dose optimale du coagulant (Sulfate d'alumine). 79	74
Tableau VI. 3 : recherche de la dose optimale du floculant poly-électrolyte.....	75
Tableau VI.4 : recherche de la zone optimale du pH de coagulation.	76
TableauVI.5 : recherche de la dose du sulfate d'aluminium à pH = 7.....	77
TableauVI.6 :recherche de la dose du sulfate d'aluminium à pH = 7,2.	79
Tableau VI.7 : recherche de la dose du sulfate d'aluminium à pH= 7,5.	80
Tableau VI.8 : recherche de la dose du sulfate d'aluminium à pH= 8.....	81
Tableau VI.9 : recherche la dose optimale du chlore actif.	83
Tableau VI.10 : Taux d'abattement de la Matière Organique en fonction des différentes.....	83
doses du sulfate d'alumine en présence du chlore actif (1mg/l).	84
Tableau VI.11 : Recherche de la zone du pH pour l'élimination de la Matière Organique.	85
Tableau VI.12 : Recherche la dose optimale de permanganate de potassium KMnO4.....	87
Tableau VI.13 : recherche de la zone du pH pour l'élimination de la matière organique.	89
Tableau VI.15: comparaison économique entre le chlore actif et le permanganate de potassium du l'étude économique	91

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur les eaux	
Figure I.1: Molécule d'eau.	3
Figure I.2: la polarité moléculaire de l'eau.....	9
Chapitre II : les procédés de traitement des eaux potable.	
Figure II.1: schéma type d'une station de traitement.....	16
Figure II.2: coagulation-floculation.....	18
Figure II.3: types de décantations.....	19
Figure II.4: schéma d'un décanteur horizontal.	20
Figure II.5: schéma d'un décanteur Horizontal théorie de Hazen.	21
Figure II.6: schéma d'un décanteur lamellaire.	21
Figure II.7: décanteurs lamellaire contre-courant et croisé.....	22
Figure II.8: décanteur lamellaire à co-courant.....	22
Figure II.9: schéma De Filtre à sable rapide.	25
Figure II.10: schéma de Filtre à sable lents.....	26
Figure II.11: schéma des filtres sous pression.....	26
Figure II.12: schéma de filtre à terre diatomée.	27
Figure II.13: courbe du break point.	29
Figure II.14: schéma du spectre électromagnétique.	30
Figure II.15: mécanisme de résine échangeuse d'ions.....	31
Chapitre III :coagulation-floculation et oxydation	
Figure III.1: théorie de la double couche.....	34
Figure III.2 : courbe de différent proportion de Cl ₂ et HClO, ClO.....	44
Chapitre IV : présentation de la station	
Figure IV.1: implantation de la station de traitement de l'eau potable de Boudouaou.....	54
Figure IV.2 : laboratoire physico-chimique.....	57
Figure IV.3: Chambres des obturateurs	58
Figure IV.4 : Chambre de répartition.....	59
Figure IV. 5 : Décanteur pulsateur.....	60
Figure IV.6 : Filtre AQUAZU.....	61
Chapitre V :matériel et méthodes	
Figure V.1: pH mètre.....	63
Figure V.2: Spectrophotométrie UV-visible.....	64
Figure V. 3: turbidimètre.....	65

Figure V.4 : Essai de jar test.....	65
Chapitre VI : résultats est discussion	
Figure VI.1: la variation de la turbidité en fonction de la dose du sulfate d'alumine.....	74
Figure VI.2 : la variation de la turbidité en fonction de la dose du poly-électrolyte.....	75
Figure VI.3: La variation de la turbidité en fonction de la dose optimale du sulfate d'alumine.....	76
Figure VI.4 : La variation de la concentration d'aluminium en fonction de pH.....	76
Figure VI.5 : la variation de la turbidité en fonction de la dose du sulfate d'alumine.....	78
FigureVI.6 : concentration du l'aluminium totale et résiduel en fonction de dose du sulfate d'aluminium.....	78
Figure VI.8 : concentration du l'aluminium totale et résiduel en fonction de la dose du sulfate d'aluminium.....	79
Figure VI.9 : la variation de la turbidité en fonction de la dose du sulfate d'alumine.....	80
Figure VI.10: concentration du l'aluminium totale et résiduel en fonction de dose du sulfate d'aluminium.	81
Figure VI.11:la variation de la turbidité en fonction de la dose du sulfate d'alumine.....	82
FigureVI.12 : concentration de l'aluminium totale et résiduel en fonction de la dose du sulfate d'aluminium.....	82
Figure VI.13 : la variation la matière organique en fonction du la dose du chlore.	83
Figure VI.14 : taux d'abattement de matière organique en fonction les dose du chlore actif.....	84
Figure VI.15 : taux d'abattement de matière organique en fonction les dose du sulfate d'aluminium.	85
Figure VI.16 : la variation de la matière organique en fonction de la zone du pH.....	86
Figure VI.17: taux d'abattement de la matière organique en fonction des doses du sulfate d'aluminium.	88
Figure VI.18: la variation organique avant et après filtration en fonction le pH.....	88
Figure VI.19 : taux d'abattement de la matière organique en fonction des doses du sulfate d'aluminium.....	89
Figure VI.20 : la variation organique avant et après filtration en fonction le pH.....	89

Liste des abréviations

ADE : Algérienne Des Eaux

NTU :Unité Néphéломétrrique de turbidité

TA : Titre alcalimétrique

TAC : Titre alcalimétrique complet

OMS : Organisation mondiale de la santé

MES : Matière En suspension

pH : potentiel d'hydrogène

°C : Degré Celsius

CAP : Charbon Actif Poudre

ppm : partie par million

SEAAL : Société des Eaux et de l'Assainissement d'Alger

SPIK : Système de production ISSER KEDDARRA

SA : Sulfate d'Alumine

PE : Poly-électrolyte

μS/cm : Micro-siemens par centimètre

tr/min : Tour par minutes

μm : micromètre

nm : Nanomètre

UV : Ultra-violet

Introduction Générale :

L'eau est la base de la vie sur la planète Terre. Elle joue un rôle dans le maintien de la santé de l'écosystème. Elle est également considérée comme une ressource essentielle pour l'humanité en raison de ses nombreuses utilisations dans plusieurs domaines : comme l'agriculture, l'industrie, le nettoyage, la production d'énergie. En plus de sa consommation.

Malgré l'abondance d'eau claire sur notre planète, l'accès à une eau potable propre et salubre n'est pas du tout garanti pour tout le monde. En effet 2 milliard de personnes dans le monde manquent d'eau propre et facilement accessible à la maison. Cela a conduit certains pays en général, et l'Algérie en particulier, à rechercher et développer des technologies pour le traitement précis de l'eau avant sa consommation, ainsi que pour la bonne gestion des ressources en eau. L'eau potable est soumise à un traitement selon les normes internationales avant d'être distribuée à la consommation humaine, et elle se caractérise par sa propreté et est exempte de substances nocives ou de microbes qui causent des problèmes de santé aux consommateurs.

La pollution de l'eau englobe la présence indésirable de la concentration excessive de substances nocives dans les ressources aquatiques, telles que les rivières, les lacs, les nappes phréatiques et même les océans. Cette pollution peut résulter de multiples activités humaines, allant des déversements industriels et des rejets d'eaux usées à l'utilisation excessive d'engrais agricoles et à la mauvaise gestion des déchets. La pollution de l'eau constitue une menace majeure pour l'environnement et la santé humaine et nécessite des efforts durables et multidisciplinaires pour la contrôler et la réduire.

Dans le cadre de notre étude, nous allons travailler sur des échantillons d'eaux brutes à SEAAL, cette dernière traite l'eau brute, et pour cela elle utilise des procédés de traitement de l'eau, des technologies avancées, ainsi que des équipements modernes et performants. La station est une entreprise algérienne qui assure la production, le traitement, la distribution et la gestion de l'eau potable dans la région d'Alger et ses environs. SEAAL s'engage à fournir une eau de qualité, conforme aux normes sanitaires en vigueur.

L'objectif de notre travail est l'étude de l'efficacité de traitement des eaux par le coagulant sulfate d'aluminium tout en assurant un minimum d'aluminium résiduel, et l'efficacité de l'hypochlorite de sodium et du permanganate de potassium sur l'élimination, de la matière organique naturelle par oxydation.

Des niveaux élevés d'aluminium peuvent présenter des risques pour la santé, portent essentiellement sur le système nerveux central et sur le tissu osseux, pouvant entraîner la maladie d'Alzheimer ainsi que d'autres maladies neurodégénératives, comme la maladie de Parkinson.

Le traitement de l'eau contaminée par les matières organiques nécessite généralement l'utilisation des produits chimiques comme le chlore actif et le permanganate de potassium.

Le chlore actif est un désinfectant qui peut neutraliser la matière organique par oxydation. La transformant en composés moins nocifs. Cependant, une utilisation excessive de chlore actif peut entraîner la formation de sous-produits de désinfection potentiellement nocifs.

Le permanganate de potassium qui peut oxyder la matière organique il est efficace pour réduire les niveaux de la matière organique et peut être particulièrement utile dans les cas où le chlore actif pourrait ne pas convenir en raison de problèmes de sous-produits chlorés.

L'objectif de notre travail est l'étude de l'efficacité du traitement des eaux par le coagulant sulfate d'aluminium tout en assurant un minimum d'aluminium résiduel, et l'efficacité de l'hypochlorite de sodium et du permanganate de potassium sur l'élimination la matière organique naturelle.

Ce mémoire commence par une introduction générale et organisé en six chapitres comme suit :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur l'eau.

Le deuxième chapitre présente les principaux procédés utilisés pour le traitement de l'eau potable.

Le troisième chapitre donne les procédés coagulation-floculation et d'oxydation ainsi que les oxydants les plus utilisés.

Le quatrième chapitre présente la station de traitement de l'eau potable de BOUDOUAOU.

Le cinquième chapitre explique les modes opératoires, ainsi que le méthodes d'analyse utilisées.

Le sixième chapitre illustre les résultats des essais effectués et leur interprétation.

Enfin le travail se termine par une conclusion générale qui synthétise les principaux résultats.

Chapitre I

Généralité sur les eaux

I. Généralité sur les eaux

Introduction :

La terre est l'unique planète du système solaire, dont la surface est recouverte de grande partie d'eau à l'état liquide environ 70%, mais cette quantité d'eau est salée ou non potable.

L'eau est la source de toute la vie, elle est essentielle à notre existence. C'est pourquoi, elle a besoin d'être protégée et économisée. Avec l'énorme croissance de la consommation d'eau, il est apparu que la nature seule ne pouvait assumer la purification des eaux, pour cela, des stations de traitement deviennent indispensables.

Les pénuries d'eau qui font déjà défaut à plus d'un milliard d'humains, pourraient en affecter trois fois plus sous l'effet du réchauffement climatique, préviennent les experts mondiaux sur le climat [1].

I.1 Définition :

I.1.1 L'eau :

L'eau est un corps, incolore, inodore et sans saveur. C'est un composé chimique simple, liquide à température et pression ambiantes. Sa formule chimique est H_2O . C'est-à-dire que chaque molécule d'eau est constituée d'un atome d'oxygène (O) relié à deux atomes d'hydrogène (H) par deux liaisons covalentes simples, formant un angle de $104,5^\circ$. La représentation de la molécule de l'encombrement des atomes qui la constituent(figure I.1)[2].

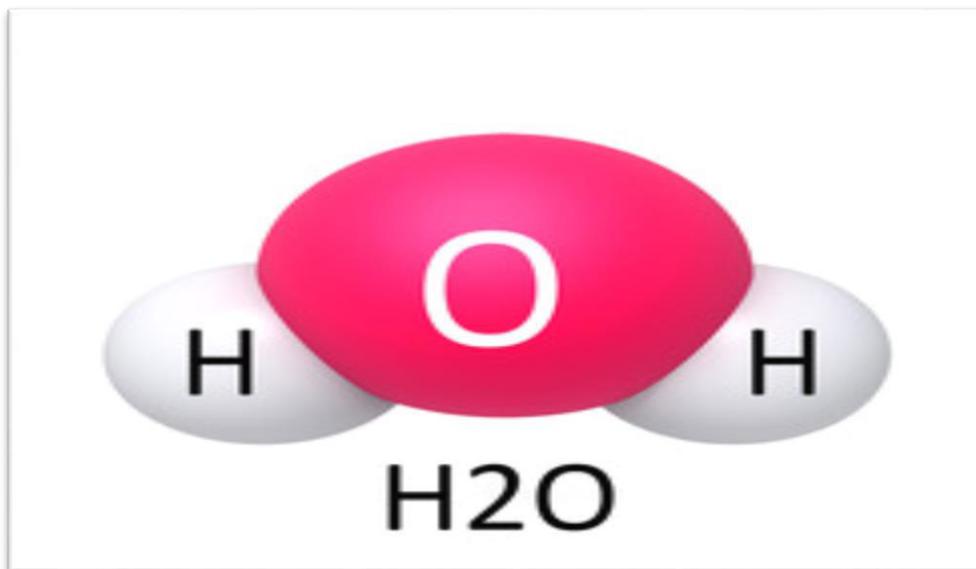


Figure I.1 : Molécule d'eau.

I.1.2 L'eau brute :

L'eau brute désigne celle qui n'a pas été traitée, c'est-à-dire, l'eau dans l'état où elle est prélevée dans le milieu naturel, et qui n'a pas été introduite dans le réseau de distribution [2].

I.1.3 L'eau potable :

L'eau potable est une eau brute ; qui a subi des traitements avant sa distribution. On appelle aussi une eau de consommation qui peut être définie en ce qui concerne l'OMS comme une eau ne contenant en quantité dangereuse, ni substances chimiques, ni des germes nocifs à la santé du consommateur.

La qualité de l'eau ne doit pas nuire à la santé du consommateur. Elle doit être conforme à la réglementation sanitaire [2].

I.2 Sources d'eau :

On retrouve quatre sources principales d'eaux brutes : les eaux de pluie, les eaux de surface, les eaux souterraines et les eaux de mer [3].

➤ Eau de pluie :

Les eaux de pluie sont des eaux de bonne qualité pour l'alimentation humaine.

Elles sont saturées d'oxygène et d'azote et ne contiennent aucun sel dissous, comme les sels de magnésium et de calcium ; elles sont très douces. Dans les régions industrialisées, les eaux de pluie peuvent être contaminées par des poussières atmosphériques. La distribution des pluies dans le temps ainsi que les difficultés de captage font que peu de municipalités utilisent cette source d'eau (Gibraltar constitue, à cet égard, un cas isolé) [3].

➤ Eau de surface :

On peut répartir les eaux de surface en trois catégories : eaux de rivière (partie amont), eaux de rivière (partie aval) et eaux de lac. La dureté de toutes les eaux de surface est modérée [3].

➤ Eau souterraines :

Les eaux souterraines, enfouies dans le sol, sont habituellement à l'abri des sources de pollution. Puisque les caractéristiques de ces eaux varient très peu dans le temps, les usines de purification n'ont pas à résoudre les problèmes dus aux variations brusques et importantes de la qualité de l'eau brute [3].

➤ Eau de mer :

Les eaux de mer sont une source d'eau qu'on n'utilise que lorsqu'il n'y a pas moyen de s'approvisionner en eau douce les eaux de mer sont caractérisées par leur concentration en sels dissous ; c'est ce qu'on appelle leur salinité. La salinité de la plupart des eaux de mer varie 33 000 à 37 000 mg /l [3].

➤ **Eau de source :**

Eau de source est une eau entièrement souterraine propre à la consommation humaine, elle est microbiologiquement saine et sans risque de contamination [4]. Les eaux de source sont des eaux qui contrairement aux eaux minérales, doivent répondre, à l'émergence, aux critères de potabilité, et ne peuvent subir aucun traitement [5].

➤ **Eau minérale :**

L'eau minérale naturelle est une eau microbiologiquement saine provenant d'une nappe ou d'un gisement souterrain, exploitée à partir d'une ou plusieurs émergences naturelles ou forcées. Ces caractéristiques sont appréciées sur les plans géologique-hydrogéologique, physiques, chimiques, microbiologiques et pharmacologiques [5].

I.3 La composition des eaux naturelles :

L'eau se comporte comme un solvant quasi-universel de ce fait, sa composition est fonction du milieu avec lequel elle est en contact. Les substances présentes dans l'eau peuvent être classées selon deux modes différents :

- Suivant leur nature chimique organique ou minérale
- Suivant leur état physique matières dissoutes, colloïdales ou en suspension.

Ces distinctions sont arbitraires dans la mesure où, d'une part, une substance peut se trouver soit en suspension selon les conditions du milieu et d'autre part, l'eau est le siège de phénomène de dégradation biologique qui peut transformer des substances minérales [6].

Tableau I.1:composition des eaux naturelles. [7]

L'état ou forme des éléments	Nature des éléments
Matière en suspension	Sable, argiles, boues divers, roches en débris, matières organiques, minérales ou végétales, débris divers insolubles
Matière en émulsion	Matières organiques colloïdales, huiles, goudron, suies, pétrole, argiles colloïdales
Matière organiques solubilisées	Tourbes, déchets, végétaux, matières azotées ; produits de synthèses organiques solubles....etc.
Matière minérales	<u>Dissoutes :</u> Carbonates calcium Bicarbonates magnésium Sulfate sodium Chlorures potassium Nitrates ammonium <u>A l'état trace :</u> Arsenic, cuivre, cadmium, plomb, zinc, fer, manganèse. <u>En suspension :</u> Matériaux argileux, limons.....etc.
Organismes vivants d'origine végétale, animale, bactérienne et virale	Plancton , algues, champignons, bactéries, amibes, Virus.....etc.
Gaz	Oxygène, azote, dioxyde de carbone, ammoniac,.....etc.

I.3.1 Les substances minérales :

Ce sont essentiellement des composés ioniques, anions et cations, qui proviennent de la dissolution des roches dans l'eau qui circule à leur contact.

L'eau contient également des gaz dissous ayant une grande importance dans les phénomènes biologiques ainsi que chimiques comme par exemple la corrosion [6].

I.3.2 Les matières organiques :

Ce sont, par définition, des composés du carbone, de l'hydrogène, de l'oxygène et de l'azote.

Ces matières proviennent soit de l'érosion des sols, soit de la décomposition de matières animales ou végétales qui se retrouvent dans l'eau. Elles se décomposent du fait de leur instabilité chimique et par l'action des microorganismes de l'eau en formant des composés de plus en plus simple [6].

I.3.3 Les matières dissoutes :

Ce sont des matières dispersées de façon homogène dans l'eau, faiblement polarisées ou ionisées.

Elles obéissent à des équilibres de dissolution qui sont fonction de la température et de la pression. Ce dernier facteur étant très important pour les gaz.

Du fait de leur état dissous, ces molécules sont difficiles à éliminer de l'eau à traiter par les procédés physiques classiques, décantation et filtration. Si leur élimination est nécessaire, par exemple pour les nitrates, il faudra utiliser des méthodes chimiques ou biologiques [6].

I.3.4 Les matières colloïdales :

L'état colloïdal est un état intermédiaire entre l'état dissous et la suspension. Les matières colloïdales sont constituées d'éléments de petite taille chargés négativement. Ce qui explique qu'ils se repoussent et se répartissent de façon dispersée et désordonnée dans la masse liquide.

Aussi, leur élimination de l'eau à traiter est difficile car elles ne décantent pas de manière spontanée et sont peu retenues par les filtres.

On devra utiliser des réactifs chimiques qui neutralisent les charges négatives superficielles et permettent leur agrégation. Cette étape est appelée coagulation-floculation, elle est suivie par une décantation pour éliminer les colloïdes agrégés, floccs, qui peuvent alors décanter [6].

I.3.5 Les matières en suspension

Ce sont des particules solides dont la taille est supérieure à 10 μm , dispersées dans l'eau sans être chimiquement liées avec elle. De ce fait, leur élimination est assez simple car, si l'on fait reposer l'eau elles décantent de manière spontanée et peuvent être retirées de l'eau par des procédés physiques simple (décantation, filtration) [6].

I.4 Propriétés de l'eau

I.4.1 Propriétés physiques :

Les propriétés physiques de l'eau les plus intéressantes sont les suivantes :

Chaleur latente: la chaleur latente de transformation est la quantité de chaleur nécessaire pour effectuer le changement d'état de l'unité de masse portée au préalable à la température associée à la pression régnante. Cette chaleur est libérée lors du passage à l'état condensé. Les enthalpies de transformation sont pour la fusion de 334 KJ. Kg⁻¹ et pour la vaporisation de 2259 kJ. Kg⁻¹ à la pression normale et à 100°C [5].

Masse volumique : Elle varie avec la température et la pression, mais aussi avec la teneur en sels dissous. L'eau a une masse volumique de 1g/cm³ [5].

Viscosité : est une caractéristique des fluides qui se manifeste sous forme d'une résistance à divers mouvements, internes ou globaux. Cette résistance découle des frictions réciproques des molécules en mouvement. Elle est responsable de la perte d'énergie cinétique (perte de charge) et joue un rôle crucial dans le traitement de l'eau [5].

Tension superficielle : est une force de traction qui agit à la surface d'un liquide, cherchant constamment à minimiser la surface étendue de cette dernière. Cette force diminue à mesure que la température augmente [5].

Pression osmotique : elle traduit un phénomène qui s'établit entre des phases liquides de concentrations différentes séparées par une membrane semi-perméable [5].

I.4.2 Propriétés chimiques :

L'eau est un excellent solvant, donc facilement polluée le processus de dissolution d'une substance est une destruction de sa cohésion interne, cette dernière est due à des forces inter atomique et intermoléculaire. L'eau est par ses propriétés électriques et sa constitution moléculaire, particulièrement apte à la mise en solution de nombreux corps gazeux, liquides polaires, et surtout solides [8].

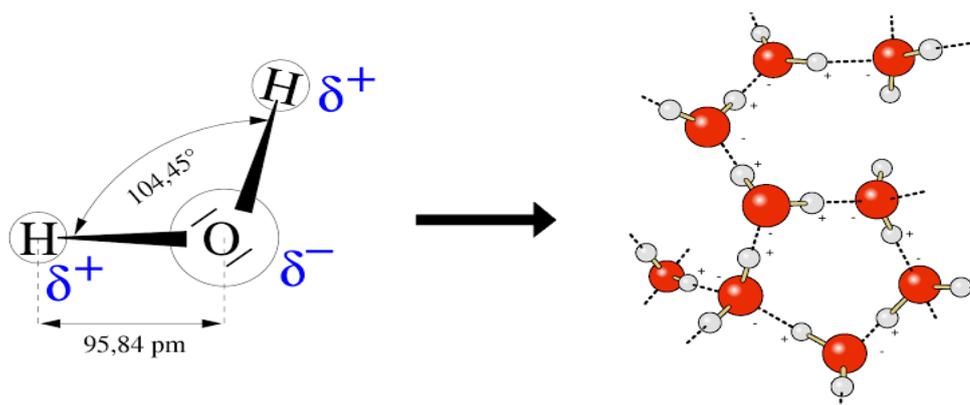


Figure I.2: la polarité moléculaire de l'eau

I.4.3 Propriétés biologiques :

L'eau, l'oxygène et le dioxyde de carbone contribuent à créer des conditions favorables au développement des êtres vivants. Il existe un cycle biologique, cycle ou cours duquel s'effectue une série d'échanges. L'eau entre pour une grande part dans la constitution on des êtres vivants [8].

I.5 Les paramètres de l'eau :

I.5.1 Paramètres organoleptiques :

✓ *Gout et odeurs :*

Les eaux de consommation doivent posséder un gout et une odeur <Non désagréables>. La plupart des eaux, qu'elles soient ou non traitées, dégagent une odeur plus ou moins exaltable et ont une saveur.

Ces deux propriétés, purement organoleptiques, sont extrêmement subjectives et il n'existe aucun appareil pour les mesurer. D'après les physiologistes, il n'y a que quatre saveurs élémentaires : salée, sucrée, acide et amère.

Les odeurs de l'eau sont générées par la présence de substances relativement volatiles dans celle-ci. Ces substances peuvent être de nature inorganique, tels que le chlore, les hypochlorites, le bioxyde de soufre SO_2 et le sulfure d'hydrogène H_2S , les nitrites, ou organique, tels que les esters, les alcools, les dérivés aromatiques et divers composés résultant de la dégradation de matières animales ou végétales, tels que les algues, ainsi que des polluants non spécifiés [9].

✓ *Couleur :*

La coloration de l'eau peut provenir soit de sources naturelles, soit être liée à la pollution de l'eau potable. Par conséquent, la coloration de l'eau est souvent due à la présence de

composés dissous. En outre, la présence de solutés entraîne une coloration qui peut s'étendre au-delà du spectre visible [10].

I.5.2 Paramètres physiques :

✓ *Température :*

Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision car elle joue un rôle important dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la dissociation des sels et impliquée dans la conductivité électrique ainsi que la détermination du pH [11].

✓ *Potentiel d'hydrogène pH :*

Le pH d'une eau est un indicateur de son caractère acide ou alcalin, et dépend de l'activité des ions hydrogène H^+ présents dans l'eau. Dans les eaux naturelles, cette activité peut être due à diverses causes, notamment l'ionisation de l'acide carbonique et de ses sels. Un pH inférieur à 7 peut entraîner la corrosion du ciment ou des métaux des canalisations, ce qui peut libérer des éléments indésirables tels que le plomb et le cuivre. Un pH élevé peut causer des dépôts de tartre dans les circuits de distribution. À partir d'un pH de 8, l'efficacité de la désinfection bactérienne par le chlore diminue progressivement. En outre, la chloration de l'eau diminue son pH [11].

✓ *Turbidité :*

La turbidité est le premier paramètre perceptible par le consommateur lorsqu'il s'agit de la qualité de l'eau. Elle se caractérise par une réduction de la transparence de l'eau, causée par la présence de matière non dissoute. Telle que des débris organiques, de l'argile ou encore des organismes microscopiques [11]. La turbidité élevée de l'eau révèle la précipitation du fer, aluminium ou manganèse due à une oxydation dans le réseau. En outre, la turbidité encourage la fixation et la multiplication des micro-organismes, ce qui peut remettre en question la qualité bactériologique de l'eau [12].

Tableau I.2: Qualité de l'eau en fonction de la turbidité [13].

la turbidité (NTU)	Qualité de l'eau
< 5	Eau claire
5 < T < 30	Eau légèrement trouble
T > 50	Eau trouble

✓ Conductivité électrique :

La conductivité d'une eau correspond à sa capacité à conduire l'électricité. Toutes les eaux ont une certaine conductivité qui est étroitement liée à la présence d'ions dissous. En effet, il existe une relation entre la quantité de sels dissous dans une eau et sa conductivité électrique. Une conductivité élevée peut être due à une température élevée, mais le plus souvent le résultat d'une forte teneur en sel. Cela peut causer un entartrage des conduites [14].

I.5.3 Les paramètres chimiques

- **Magnésium (Mg^{2+}) :**

C'est l'un des éléments le plus répandus dans la nature ; Sa teneur dépend de la composition des roches sédimentaires rencontrées. Ainsi il constitue un élément significatif de la dureté de l'eau.

- **Calcium (Ca^{2+}) :**

Le calcium est un élément de la dureté de l'eau, il est généralement l'élément dominant des eaux potables. Il existe à l'état de bicarbonates et en quantités faibles. Les eaux chargées de calcium sont dures et celles qui sont faiblement chargés sont douces.

- **Chlorures (Cl^-) :**

Dans l'eau, le chlorure n'a ni odeur, ni couleur, mais peut procurer un goût salé amère, les teneurs en chlorures des eaux sont extrêmement variées et liées principalement à la nature des terrains traversés. Ainsi, les eaux courantes non polluées ont souvent une teneur faible en chlorures [8].

- **Sulfates (SO_4^{2-}) :**

Le sulfate se dissout dans l'eau et provient principalement de certains minéraux, notamment du gypse, ainsi que de l'oxydation de minéraux sulfureux [15].

- **Oxygène dissous :**

L'oxygène dissous est la quantité d'oxygène gazeux O_2 dissous dans l'eau. L'oxygène pénètre dans l'eau par absorption directe de l'atmosphère, par déplacement rapide ou comme déchet de la photosynthèse des plantes.

- **Titre alcalimétrique (TA) et alcalimétrique complet (TAC) :**

Le titre alcalimétrique (TA) d'une eau permet de connaître sa concentration en carbonates (CO_3^{2-}) et en bases fortes, autrement dit son alcalinité.

Ce titre se mesure en degrés français ($^{\circ}F$) : $1^{\circ}F$ équivaut à 3,4 mg/L d'ion hydroxyde (OH^-) ou à 6 mg/L d'ion carbonate, ou encore à 12,2 mg/L d'ion hydrogénocarbonate (HCO_3^-).

Pour prendre également en compte les ions bicarbonates (HCO_3^-), on utilise le titre alcalimétrique complet (TAC).

Tableau I.3:les normes algériennes concernant les eaux potables. [4]

Paramètre	valeur limite	valeur indicative	unités
Aluminium	0.2	/	mg/l
Ammonium	0.5	/	mg/l
Nitrates	50	/	mg/l
Nitrites	0.2	/	mg/l
Manganèse	50	/	mg/l
Chlorure	/	500	mg/l
Chlore actif	5	/	
Calcium	/	200	mg/l
Résidu sec	1500	/	mg/l
Sulfate	400	/	mg/l
Potassium	/	12	mg/l
Dureté	/	200	mg/l
Phosphore	/	5	mg/l
Température	/	25	°C
Turbidité	/	5	NTU
Conductivité à 20°C	/	2800	µS/cm
pH	/	6,5 et 9	Unité PH
Couleur	/	15	mg/l Platine
Odeur à 12°C	/	4	Taux dilution
Saveur à 25°C	/	4	Taux dilution

I.5.4 Les paramètres bactériologiques :

Les indicateurs bactériologiques les plus couramment utilisés sont les coliformes fécaux, *Escherichia coli* et les entérocoques. De façon générale, plus les concentrations de ces bactéries indicatrices sont élevées, plus la probabilité qu'il y ait des microorganismes pathogènes est élevée.

✓ *Coliforme totaux (CT) :*

Les coliformes totaux sont des entérobactéries qui incluent des espèces bactériennes qui vivent dans l'intestin des animaux homéothermes sous forme de bâtonnet, mais aussi dans l'environnement en général.

✓ **Coliforme fécaux (CF) :**

Les coliformes fécaux, ou coliforme thermotolérants, sont un sous-groupe des coliformes totaux capables de fermenter le lactose à une température de 44,5°C. L'espèce la plus fréquemment associée à ce groupe bactérien est l'*Escherichia coli*.

✓ **Streptocoque fécaux (CF) :**

Sang chaud. Leur recherche associée à celle des coliformes fécaux constitue un bon indice de contamination fécale.

✓ **Les clostridium sulfito-réducteur :**

Clostridium sulfito-réducteur sont souvent utilisés comme des témoins de contamination fécale. La forme spore est beaucoup plus résistante que les formes végétatives. Le genre bactérien regroupant des bacilles à Gram positif, anaérobies strict. Leur présence indique une contamination ancienne.

✓ **Les Germes totaux :**

Les Germes totaux sont germés aérobies mésophiles se développant sur un milieu aérobie à 22°C pendant 72 heures ou 37°C pendant 24 heures. Certains d'entre eux sont anaérobies facultatifs. D'une manière générale, leur dénombrement est utilisé comme indicateur de pollution et également comme indicateur d'efficacité de traitement [3].

Tableau I.4:paramètres bactériologiques.

Paramètres	Concentration maximale admissible
Germes totaux	10 Ufc/100 ml
Coliformes totaux et fécaux	0 Ufc/100 ml
Streptocoques fécaux	0 Ufc/100 ml
Clostridium Sulfito-réducteur	0 Ufc/20 ml

I.6 La pollution des eaux :

Les pollutions de l'eau peuvent se présenter sous différentes formes, notamment chimique, mais aussi bactériologique ou thermique ; la pollution de la ressource en eau se caractérise par la présence de micro-organismes, de substances chimiques ou encore de déchets industriels. Elle peut concerner les cours d'eau, les nappes d'eau, les eaux saumâtres mais également l'eau de pluie, la rosée, la neige, et peuvent avoir différentes origines :

- Urbaine (domestiques)
- Agricole
- Industrielle

I.7 Source de la pollution :

I.7.1 La pollution industrielle :

Avec les rejets des produits chimiques comme les hydrocarbures ou le PCB rejetés par les industries ainsi que les eaux évacuées par les usines.

I.7.2 La pollution agricole :

Avec les déjections animales mais aussi les produits phytosanitaires/pesticides (herbicides, insecticides, fongicides) utilisés dans l'agriculture. Ils pénètrent alors dans les sols jusqu'à atteindre les eaux souterraines.

I.7.3 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....

I.7.4 La pollution accidentelle :

Avec le déversement toxique dans le milieu naturel et qui viennent perturber l'écosystème.

I.8 Les types de pollution de l'eau :

I.8.1 Pollution chimique :

La pollution chimique des eaux résulte de la libération substance minérales toxiques dans les cours d'eaux (les nitrates, les phosphates, l'ammoniac et autre sels) ainsi que des ions métalliques. Ces substances exercent un effet toxique sur les matières organiques et les rendent plus dangereuses. Les polluants chimiques sont classés en : substances chimiques dites indésirables, les pesticides, les détergents, les colorants et autres éléments toxiques.

I.8.2 Pollution physique :

La pollution physique désigne la pollution thermique due à la température élevée causant une diminution de la teneur en oxygène dissous ainsi qu'une réduction de la solubilité des gaz et la pollution mécanique, qui se traduit par la présence des particules de taille et de matière très variés dans l'eau ; qui lui confèrent un caractère trouble.

I.8.3 Pollution thermique :

Peut avoir pour origine des rejets d'eaux chaudes urbaines ou industriels dans le cours d'eau. Dans les petits cours d'eau, elle peut avoir aussi pour origine les déversoirs d'étangs installés sur leur rive et qui par leur grande surface jouent un rôle de « pompe à chaleur ».

I.8.4 Pollution organique :

La pollution organique provient principalement des excréments, des ordures ménagères et des déchets végétaux.

I.8.5 Pollution bactériologique :

Il s'agit de bactéries qui proviennent principalement des rejets d'eaux usées (non traitées) contenant de la matière fécale et des déchets organiques.

I.9 Conséquences de la pollution des eaux :

Les conséquences de la pollution des milieux aquatiques sont multiples. Elles conduisent à des mortalités massives d'espèces, mais elles ont aussi des effets moins visibles : une eutrophisation des milieux, des effets toxiques à plus ou moins long terme, des maladies ou des perturbations endocriniennes.

A partir d'une certaine dose, les substances polluantes ont un effet toxique sur les êtres vivants. Cela signifie que, lorsqu'elles pénètrent dans l'organisme (essentiellement par ingestion, mais parfois par respiration), elles sont néfastes à sa survie ou sa santé.

En outre, certains polluants ne sont pas biodégradables et s'accumulent tout au long de la chaîne alimentaire. Pour ces substances, même si elles se trouvent en petites quantités dans le milieu, sans conséquences sur les organismes, des effets toxiques peuvent s'observer chez les espèces prédatrices situées en haut de la chaîne alimentaire ; La santé humaine peut ainsi être menacée en cas d'ingestion d'eau polluée. Toutefois, les traitements de potabilisation visent à éviter ce risque, en éliminant les substances toxiques de l'eau potable. Si la pollution de l'eau est trop forte, il est néanmoins parfois impossible de respecter les normes de potabilisation en dépit des traitements : l'eau ne peut alors pas être distribuée.

Chapitre II :

Les procédés de traitement des
eaux potables

II Les procédés de traitement des eaux potable

Généralité :

La plupart du temps, l'eau prélevée dans le milieu naturel n'est pas directement consommable. Elle est chargée de sable, de limons, de débris de matières organiques ou minérales, de substances colorantes dissoutes.

Pour rendre l'eau potable, on applique des traitements qui, s'ils peuvent varier suivant l'origine et la qualité de l'eau : on élimine les matières contenues dans l'eau par étapes successives, jusqu'aux organismes microscopiques comme les virus et les microbes. Ces procédés peuvent être résumés dans la figure ci-dessous [21].

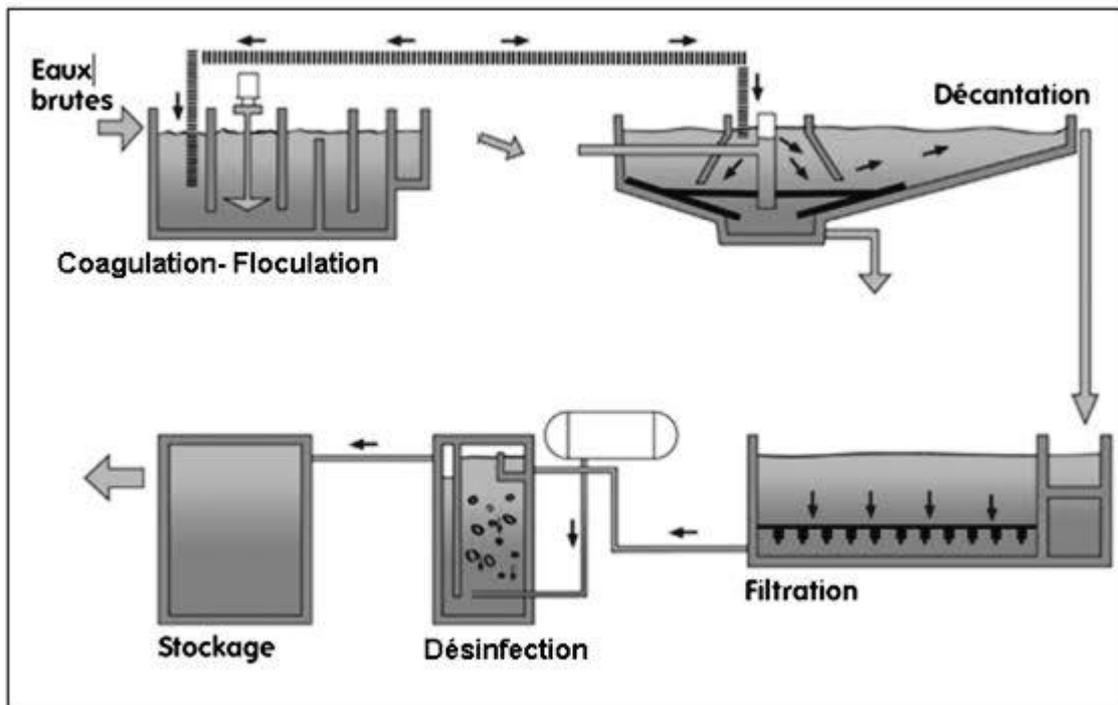


Figure II.1: schéma type d'une station de traitement de l'eau potable.

II.1 Objectif du traitement :

- Le traitement de l'eau est essentiel pour protéger la santé publique en éliminant les substances toxiques et les organismes pathogènes. Il garantit que l'eau distribuée respecte les normes physico-chimiques et bactériologiques, assurant ainsi sa sécurité pour les consommateurs.
- L'agrément du consommateur, qui est différent du premier point car une eau peut être agréable à boire toute en étant dangereuse (source polluée...) il s'agit des qualités organoleptiques, c'est-à-dire ce qui est perçu par les sens olfactifs de l'homme à savoir la couleur, l'odeur et le goût.
- La protection du réseau de distribution, et des installations et des usagers contre l'entartrage et/ou la corrosion [1].

II.2 Les étapes et les procédés de traitement des eaux :

Un traitement d'une eau brute destinée à la consommation suit généralement les étapes suivantes :

- Le prétraitement
- Les traitements de clarification.
- Les traitements complémentaires [1].

II.2.1 Prétraitement :

Le processus implique le dégrillage et le dessablage pour éliminer les particules volumineuses telles que les branches et le sable, ensuite, l'eau traverse un bassin de sédimentation ou de débouage où les particules d'un diamètre supérieur à 1 micron se déposent naturellement.

Le prétraitement est principalement de quatre types :

- Le dégrillage
- Le tamisage
- Le dessablage
- Le déshuilage / dégraissage [1].

II.2.2 Le dégrillage :

L'opération du dégrillage a pour but d'éliminer les matières volumineuses transportées par l'eau résiduaire ; c'est ce qui permet de protéger la station contre le problème de bouchage au niveau de ces différents ouvrages causés par les différents objets. En fonction de l'espacement des barreaux des grilles, on distingue différents types de dégrillages

- Dégrillage grossier : 30 – 100 mm
- Dégrillage moyen : 10 – 25 mm
- L'élimination des matières retenues par les barreaux des grilles peut s'effectuer manuellement ou bien mécaniquement [1].

II.2.3 Le tamisage :

Le tamisage est en fait un dégrillage poussé et consiste en une filtration sur toile mettant en œuvre des mailles de différentes dimensions (0,1 à 4 mm). Trois principales fonctions du tamisage peuvent être mentionnées

- La récupération de déchets recyclables
- La protection de canalisations et des pompes
- La limitation des risques de dépôts et de fermentation [1].

II.2.4 Le dessablage :

Le dessablage a pour but de piéger les matières minérales de diamètre supérieur à 0,2 mm. Du gravier et du sable de façon à éviter les conduites et protéger les autres appareils contre l'abrasion. La vitesse de chute des particules dépend de la nature de ces particules et de leurs diamètres et la viscosité du liquide dont lequel elle se trouve. La technique de dessablage consiste à faire circuler l'eau dans une chambre de tranquillisation où il est tenté d'obtenir une vitesse constante quelques soit le débit. Une vitesse de 0,3 m/s permet un dépôt de la majeure quantité des matières minérales contenues dans l'eau [1].

II.3 Le traitement primaire :

Les traitements primaires regroupent les procédés physiques ou physico-chimiques visant à éliminer par décantation une forte proportion de matières minérales ou organiques en suspension.

Le processus principal du traitement primaire est la décantation qui est considérée comme un procédé physique, elle a pour but d'éliminer les particules décantables en suspension dont la densité est supérieure à celle de l'eau (diamètre $>1\mu\text{m}$).

La décantation primaire classique consiste en une séparation des éléments liquides et des éléments solides sous effet de la pesanteur. Les matières solides se déposent au fond d'un ouvrage appelé décanteur pour former les boues primaires.

Elle est adaptée pratiquement dans toutes les usines de traitement des eaux puisqu'elle est la plus économique pour éliminer les polluants, elle a pour objectif d'éliminer :

Les matières flottantes ; Une fraction de matières colloïdales. Les matières solides finement dispersées par formation des floccs avec des particules plus grosses [1].

II.4 Traitement de clarification (traitement physico-chimique) :

Le traitement physico-chimique vise principalement à éliminer les particules non dissoutes présentes dans l'eau, généralement sous forme colloïdale. Cela se fait par un processus de coagulation-floculation suivi d'une décantation et de filtration [1].

II.4.1 La coagulation-floculation :

Dans le traitement des eaux, la coagulation-floculation est un procédé chimique souvent confondu.

-Ce processus facilite l'élimination des solides en suspension et des particules colloïdales [22].

-La coagulation est la première étape dans le processus de traitement physico-chimique des eaux, elle consiste essentiellement à neutraliser à diminuer la charge électrique et favoriser ainsi le rapprochement des particules en vue de leur agglomération [23].

-La floculation est l'agglomération de particules déstabilisées en micro floc et ensuite en flocons plus volumineux que l'on appelle floccs. On peut rajouter un autre réactif appelé floculant ou adjuvant de floculation pour faciliter la formation de floccs [24].

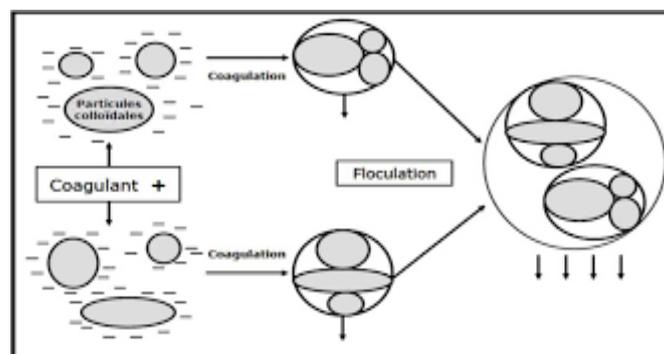


Figure II.2: coagulation-floculation

II.4.2 Décantation :

Une fois le floc formé, il faut réaliser la séparation solide-liquide qui permettra d'obtenir l'eau clarifiée d'un côté et les boues (particules colloïdales initiales + floc) de l'autre. On utilise en général l'action de la pesanteur sur les particules en suspension et l'on recueille ensuite l'eau claire à la partie supérieure de l'appareil, alors qu'on soutire les boues sédimentées dans la partie inférieure : c'est la décantation.

Les particules grenues décantent indépendamment les unes des autres avec chacune une vitesse de chute constante.

Dans un décanteur, lorsque la concentration en matières est faible, les particules plus ou moins floculées ont des tailles et des vitesses de décantation variables. La vitesse de chute augmente au fur et à mesure que les dimensions du floc ; accroissent par suite de rencontres avec autres particules, est la décantation diffuse. Lorsque la concentration en matières est plus élevée, l'abondance du floc crée une décantation d'ensemble, caractérisée par une interface nettement marquée entre la masse boueuse et le liquide surnageant : c'est la décantation en piston ou « à contact de boues », principalement utilisée dans les décanteurs « à lit de boues » ou « à recirculation de boues » ou appelé aussi « accélérés », dans lesquels l'eau brute, additionnée de ses réactifs, est mise en contact avec les boues préexistantes [25].

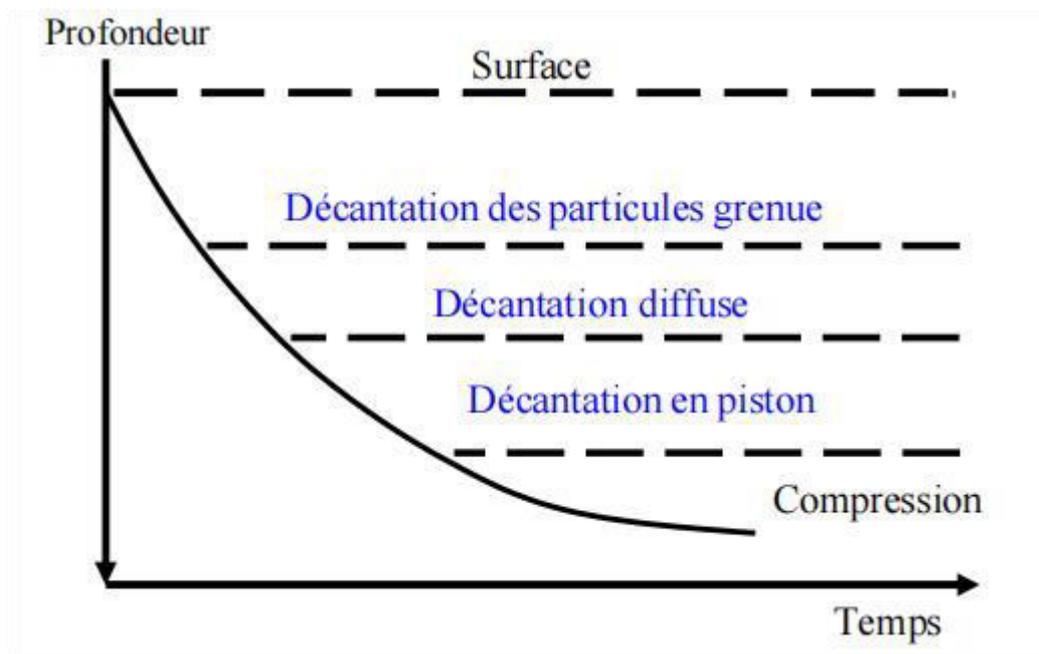


Figure II.3: types de décantations.

II.4.2.1 Types de décantation :

Selon la concentration en solide et la nature des particules (densité et forme), on distingue quatre types de décantation : [3]

➤ Décantation de particules discrètes ou individuelle :

Ce type de décantation est caractérisé par le fait que les particules conservent leurs propriétés physique initiales (formes, dimension, et densité) au cours de leur chute. La vitesse de chute est indépendante de la concentration en solides ; c'est pourquoi les lois classiques de Newton et de Stokes s'appliquent ici, on retrouve ce type de décantation dans les déssableurs [3].

➤ **Décantation des particules floculants :**

Ce type de décantation est caractérisé par l'agglomération des particules au cours de leur chute. Les propriétés physiques de ces particules (forme, dimension, densité, et vitesse de chute) sont donc modifiées pendant le processus. On retrouve ce type de décantation dans les décanteurs des usines de traitement des eaux et dans les décanteurs secondaires des usines d'épuration [3].

➤ **Décantation freinée :**

Ce type de décantation est caractérisé par une concentration élevée de particules, ce qui entraîne la formation d'une couche de particules et par conséquent, l'apparition d'une démarcation nette entre les solides décantés et le liquide surnageant. On retrouve ce type de décantation dans la partie profonde des décanteurs [3].

➤ **Décantation en compression de boue :**

Dans ce type de décantation, les particules entrent en contact les unes avec les autres et reposent sur les couches inférieures. Dans cette zone, le phénomène de consolidation est relativement lent. On retrouve ce type de décantation dans les épaisseurs de boues par gravité [3].

II.4.2.2 Types de décanteur :

II.4.2.2.1 Décanteurs à flux horizontaux (Christelle wisniewski) :

Le décanteur horizontal est constitué d'une cuve parallélépipédique, l'eau chargée de MES pénètre à une extrémité et l'eau décantée ressort à l'autre côté suivant un écoulement horizontal. Elle nécessite une surface de bassin de décantation importante avec une vitesse de sédimentation généralement faible [26].

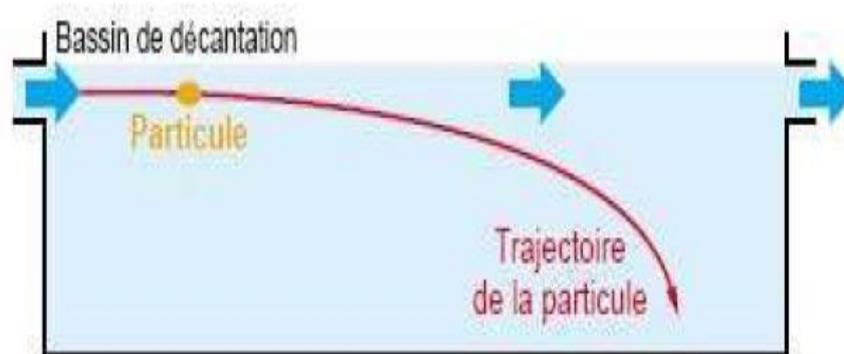


Figure II.4: schéma d'un décanteur horizontal.

Dans ces bassins, la condition pour que la particule soit retenue et qu'elle ait le temps d'atteindre le fond avant le débordement ou la sortie d'ouvrage.

Un décanteur horizontal est caractérisé par :

- Le débit traversier Q
- Sa surface S
- Sa hauteur entre le plan d'eau libre et le radier h .
- Le temps de rétention dans ouvrage sera $t = S \times h / Q$.

Le principe de la décantation à flux horizontal est représenté de manière simplifiée par le modèle de Hazen. Selon ce modèle, une particule de vitesse chute V_c décante sur une hauteur H est retenue dans un bassin de longueur L et de surface horizontale S traversé par un débit Q , si $V_c \geq V_h$
 $V_h = Q/S$ avec V_h vitesse de Hazen [26].

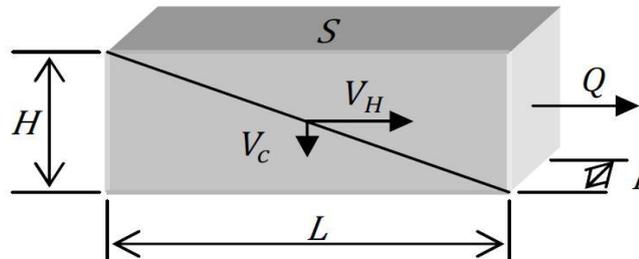


Figure II.5: schéma d'un décanteur Horizontal théorie de Hazen.

II.4.2.2.2 Les décanteurs lamellaires :

Il s'agit d'un ouvrage de décantation dans lequel des lamelles parallèles inclinées permettant de multiplier la surface de décantation utile tout en réduisant la surface au sol par rapport à un bassin de décantation classique à flux horizontal. Les décanteurs utilisant des plaques ou des tubes réalisent également une décantation considérable plus rapide que la décantation classique.

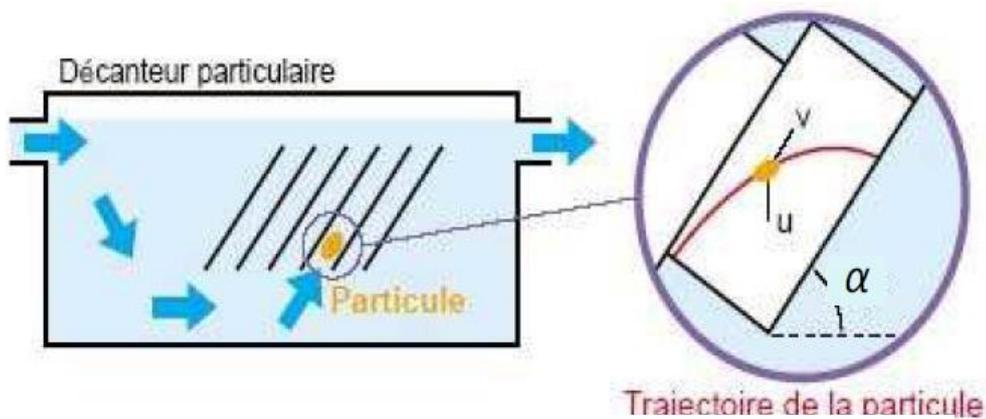


Figure II.6: schéma d'un décanteur lamellaire.

La décantation lamellaire est fondée sur le principe de la décantations à flux horizontal. Ainsi on constate que la décantation d'une particule est liée uniquement au débit et à la surface horizontale S , et qu'elle est théoriquement indépendante de la hauteur H de décantation.

Si on répartie le débit sur n lamelles parallèles de surface unitaire $S_l = S/n$, on obtient une décantation théoriquement identique dans un bassin.

Afin de pouvoir extraire en continu les solides décantés, et pour des raisons pratiques de fonctionnement et d'exploitation, les lamelles sont inclinées d'un angle α , compris entre 30 et

60° par rapport à l'horizontal selon le type de décanteur. Une telle disposition permet pour un

$$V_{lim} = \frac{Q}{Si * n * \cos\alpha} = \frac{Q}{(L * l) * n * \cos\alpha}$$

même rendement identique de construire, des ouvrages plus compacts qu'un bassin classique. Par analogie avec la théorie de Hazen, et moyennant quelques hypothèses simplificatrices (écoulement laminaire permanent notamment), on peut déterminer la vitesse limite d'une particule V_{lim} .

Avec

L : longueur de lamelle.

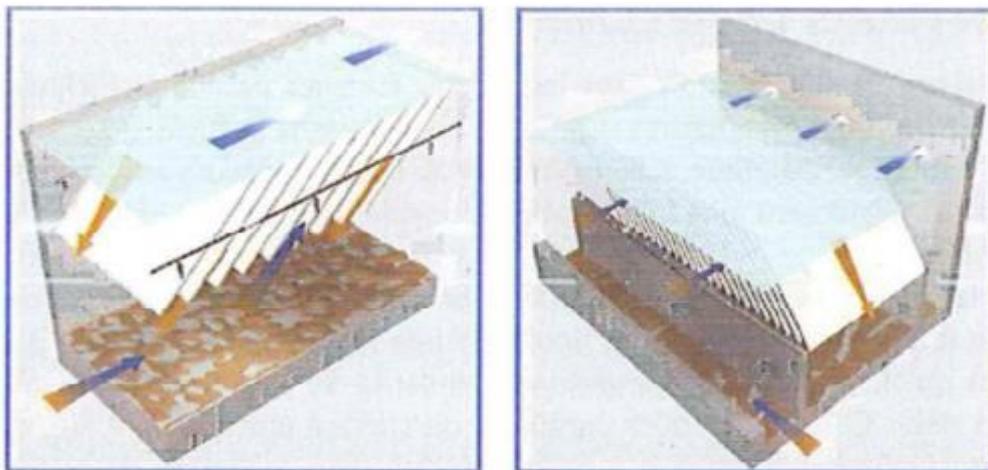
l : largeur de la lamelle.

n : nombre de lamelles.

α : angle d'inclinaison des lamelles par rapport à l'horizontale.

Il existe trois types de décanteurs lamellaires [26]

- **Contre-courant** : boue et eau circulent en sens inverse.
- **Courants croisés** : boue et eau circulent perpendiculairement.
- **Co-courant** : boue et eau circulent de haut en bas.



Décanteur à contre-courant (gauche) - Décanteur à courant croisé (centre)

Figure II.7: décanteurs lamellaire contre-courant et croisé

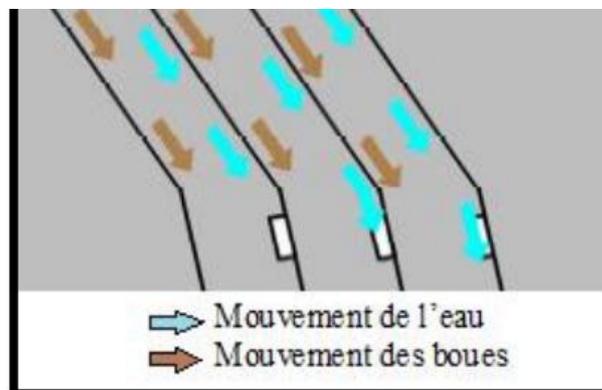


Figure II.8: décanteur lamellaire à co-courant

II.4.3 La filtration :

La filtration est un procédé de séparation qui utilise le passage d'un mélange solide-liquide à travers un milieu poreux (filtre) qui retient les particules solides et laisse passer le liquide (filtrat).

- Que l'eau soit coagulée ou non, décantée ou non, il faut toujours la filtrer pour que l'élimination des matières insolubles soit aussi complète que possible (c'est-à-dire pour que la turbidité soit ramenée au voisinage de zéro). C'est surtout la filtration en profondeur, sur matériau granulaire, qui constitue le cœur de la majorité des stations de préparation d'eau de consommation.

- l'eau à filtrer passe à travers un lit filtrant constitué de matériau granulaire, dont la hauteur de couche est importante et dépend du type de filtre. Lors de la filtration, le fluide circule à travers les ouvertures tandis que les particules sont arrêtées [27].

II.4.3.1 Ecoulement de l'eau dans un filtre :

Au cours de sa percolation au travers d'un lit filtrant granulaire, l'eau subit par frottement une perte d'énergie, c'est-à-dire de pression, appelée perte de charge. Celle-ci est régie à faible vitesse (écoulement en laminaire) par la loi de Darcy :

$$V = K \cdot \frac{\Delta p}{\mu \cdot H} \text{ et } R = \frac{1}{K \cdot \mu}$$

Avec :

V : vitesse d'infiltration.

K : perméabilité de la couche filtrante.

Δp : perte de charge à travers la couche filtrante.

H : hauteur de couche considérée.

μ : viscosité dynamique de l'eau.

R : résistance à la filtration de la couche de l'eau.

La perte de charge Δp est proportionnelle à la vitesse de filtration V, à la viscosité dynamique de l'eau, à la hauteur de couche et inversement proportionnelle à la perméabilité du milieu filtrant (ou directement proportionnelle à la résistance de ce milieu) [28].

II.4.3.2 Mécanismes de filtration :

Selon les caractéristiques des particules à retenir et du matériau filtrant utilisé plusieurs des trois principaux mécanismes suivants peuvent intervenir : capteur, fixation et détachement.

Mécanismes de capture :

Ils sont essentiellement de deux natures

- Tamisage mécanique : il s'agit de la rétention des particules plus grosses que la maille du filtre ou que celle des éléments déjà déposés formant eux-mêmes matériau filtrant. Ce phénomène intervient d'autant plus que la maille du matériau filtrant est plus fine : il est de peu d'importance pour un lit filtrant composé de matériau relativement grossier, par contre il est prépondérant dans une filtration sur support mince : tamis, manchon filtrant, etc.
- Dépôt sur le matériau filtrant : la particule en suspension suit dans le liquide une ligne de courant ; sa taille, comparée à celle des pores, pourrait lui permettre de traverser le

matériau filtrant sans être arrêtée. Différents phénomènes entraînent cependant un changement de trajectoire et le contact avec le matériau.

On distingue en particulier

- L'interception directe par frottement.
- La diffusion par mouvement brownien.
- L'inertie de la particule.
- La décantation par leur poids les particules peuvent se déposer sur le matériau filtrant quel que soit le sens de filtration.

Ces différents mécanismes de capture interviennent principalement dans la filtration en profondeur.

➤ **Mécanismes de fixation :**

La fixation des particules à la surface du matériau filtrant est favorisée par une faible vitesse d'écoulement. Elle est due à des forces d'origine physique (coincement, principalement les forces de Van der Waals).

➤ **Mécanismes de détachement :**

Sous l'action des mécanismes précédents, il se produit une diminution de l'espace entre les parois du matériau recouvertes de particules déjà déposées. Il y a alors augmentation de la vitesse d'écoulement. Les dépôts déjà retenus peuvent se détacher partiellement et être entraînés plus avant dans le matériau filtrant ou même dans le filtrat.

Les particules solides contenues dans un liquide et les particules colloïdales plus ou moins floculées n'ont pas les mêmes caractéristiques et ne réagissent pas dans la même proportion aux divers mécanismes précédents. La filtration directe d'un liquide dont les matières en suspension conservent leur état et leur charge électrique est donc très différente de la filtration d'un liquide coagulé [28].

II.4.3.3 Les différents procédés de filtration :

- **La filtration par gravité :**

Le mélange est soumis uniquement à la pression atmosphérique. Le liquide passe à travers le support filtrant, tandis que le solide est récupéré sur le support filtrant.

- **La filtration par surpression :**

L'effluent, arrive sous pression dans le filtre.

- **La filtration sous pression réduite :**

Le mélange est soumis d'un côté du filtre à la pression atmosphérique, et de l'autre côté, où sort le filtrat, à une dépression réalisée grâce à une pompe à vide.

Le passage de l'eau à travers un milieu filtrant entraîne, une dissipation d'énergie qui se traduit par une perte de pression, ou « perte de charge » entre l'amont et l'aval. Cette perte de charge croît plus ou moins rapidement au fur et à mesure que le milieu filtrant charge d'impuretés, et le flux d'eau filtrée décroît en conséquence, pour une pression donnée [29].

II.4.3.4 Les types de filtres :

II.4.3.4.1 Des Filtres à sable rapide :

La filtration rapide par le sable est un processus physique qui enlève les solides en suspension dans l'eau. Les plus utilisés en eau potable avec des vitesses de 5 à 10 m/h, ils s'appliquent à des eaux préalablement traitées.

Cette filtration rapide est beaucoup plus répandue parce que les filtres de sable rapide ont des débits assez élevés et exigent peu d'espace pour fonctionner. Durant la filtration, le taux d'écoulement de l'eau peut aller jusqu'à 20 mètres par heure.

Les filtres sont généralement nettoyés 2 fois par jour [30].

Les eaux filtrées sont recueillies en utilisant l'une des deux méthodes suivantes :

- La couche filtrante peut reposer directement sur des dalles de béton, qui sont soit poreuses soit munies de bougies poreuses.
- La deuxième méthode consiste à recueillir l'eau filtrée au moyen de tuyaux perforés qui sont moyés dans une couche de sable fin.

La filtration rapide a pour inconvénient qu'elle est une opération relativement complexe, nécessitant du personnel qualifié. D'autre part, la surface nécessaire à l'installation d'un filtre rapide est très réduite et les débits d'eau filtrée très élevés [31].

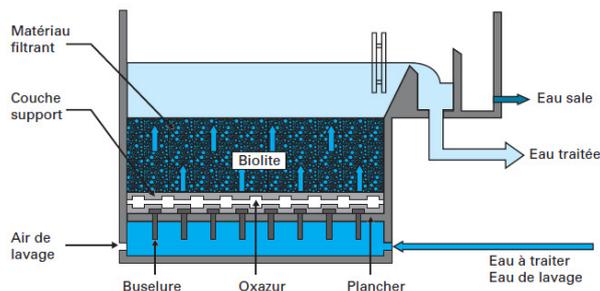


Figure II.9: schéma De Filtre à sable rapide.

II.4.3.4.2 Des Filtres à sable lents :

La filtration lente (0,08 à 0,4 m/h) constitue à elle seule un traitement quasi complet de l'eau brute, grâce au développement d'une biomasse importante.

La filtration lente par le sable est un processus biologique parce qu'elle emploie des bactéries pour traiter l'eau, les bactéries forment une couche sur la partie supérieure du sable et nettoie l'eau pendant qu'elle traverse le filtre, en digérant les contaminants dans l'eau.

La couche de bactéries s'appelle le biofilm. Des systèmes de filtration lente de sable ont été employés pendant beaucoup d'années [30].

Ce procédé a un avantage de produire une bonne qualité d'eau, par contre elle a plusieurs inconvénients :

- Elle occupe une grande superficie.
- Elle produit un débit de traitement faible.
- Elle est sensible au colmatage.
- Elle n'arrête pas la turbidité élevée [32].

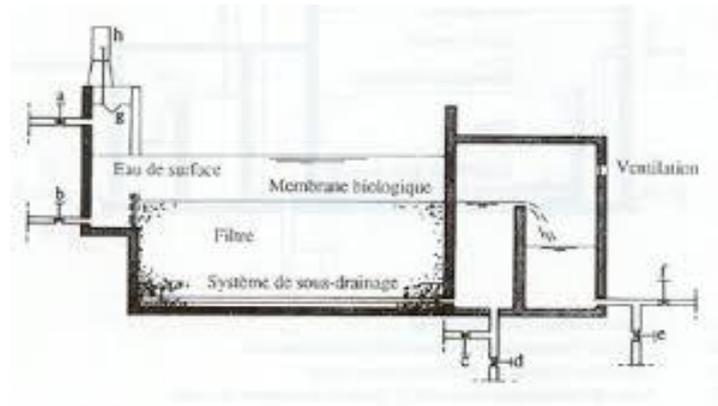


Figure II.10: schéma de Filtre à sable lents

II.4.3.4.3 Des filtres sous pression :

Le principe de fonctionnement est le même que celui des filtres rapides. Le plancher et le matériel filtrant sont situés dans des cylindres supportant des pressions allant jusqu'à 1000 kPa. Leur exploitation est plus difficile que celle des filtres ouverts. Leur utilisation est limitée aux petites installations [30].

Cet avantage ne compense toutefois pas les difficultés auxquelles on se heurte lorsque les filtres sont précédés d'unités de coagulation, de floculation et de décantation.

En effet, pour éviter le double pompage, il faut alors que toutes ces unités de traitement fonctionnent sous pression [28].

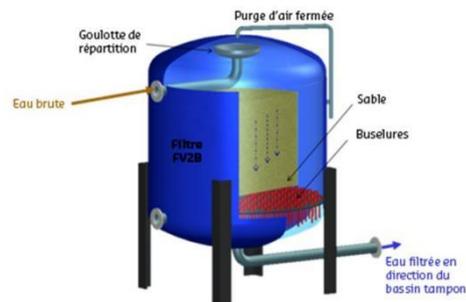


Figure II.11: schéma des filtres sous pression

II.4.3.4.4 Des filtres à terre diatomée :

Ils permettent une bonne clarification des eaux de turbidité faible et éliminent efficacement les MES et les microorganismes, sans nécessité de coagulation. Pour des eaux plus chargées, ils se colmatent très rapidement.

Les filtres sous pression et à terre de diatomée sont surtout utilisés pour le traitement des eaux des piscines [30].

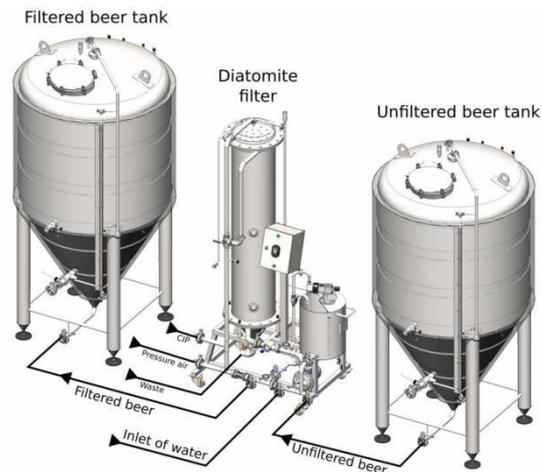


Figure II.12: schéma de filtre à terre diatomée.

II.4.3.4.5 Des filtrations à charbon actif :

La filtration sur charbon actif permet de biodégrader et d'oxyder les matières organiques, ainsi que d'éliminer ou d'absorber certains micropolluants pour améliorer le goût, l'odeur et la couleur de l'eau. Ce procédé repose sur l'adsorption, un phénomène physique où les substances adhèrent à la surface du charbon actif sans réaction chimique. Grâce à sa structure extrêmement poreuse, le charbon actif possède une grande surface d'adsorption, permettant de retenir les bactéries et de dégrader les matières organiques et les micropolluants, comme les pesticides, par voie microbiologique. De plus, la pré ozonation de l'eau augmente la biodégradabilité des micropolluants, facilitant leur dégradation par des organismes biologiques. Le charbon actif est ainsi efficace pour éliminer la matière organique et l'ammoniac [33].

II.5 Le traitement complémentaire :

II.5.1 La désinfection :

La désinfection est un traitement visant à éliminer les micro-organismes pathogènes, bactéries, virus et parasites ainsi que la majorité des germes banals moins résistants. C'est le moyen de fournir une eau bactériologiquement potable, tout en y maintenant un pouvoir désinfectant suffisamment élevé pour éviter les reviviscences bactériennes dans les réseaux de distribution [34].

II.5.1.1 Principe de la désinfection :

La désinfection est un traitement qui permet d'éliminer les microorganismes susceptibles de transmettre des maladies. On peut procéder à la désinfection en ajoutant à l'eau une certaine quantité d'un produit chimique doté de propriétés germicides. Les produits chimiques les plus utilisés sont : le chlore, le dioxyde de chlore, l'ozone. On peut également désinfecter l'eau grâce à des moyens physiques : ultraviolets ou rayons gamma [34].

II.5.1.2 Les désinfectants chimiques utilisés :

➤ **La chloration :**

Le chlore (Cl_2) :

Le chlore est un gaz toxique de couleur verte jaunâtre, plus dense que l'air. Il est très oxydant et réagit facilement avec de nombreux composés. En présence d'humidité, il devient extrêmement corrosif, ce qui nécessite l'utilisation d'alliages spéciaux pour les conduits et les équipements en contact avec le chlore. Inhalé, le chlore peut causer des irritations et des blessures graves, surtout à des concentrations élevées. Par conséquent, il est préférable d'utiliser des hypochlorites en solution ou sous forme solide, qui sont des alternatives plus sûres et efficaces [27].

➤ **L'hypochlorite de sodium (NaClO) :**

En solution est un désinfectant utilisé depuis le siècle XVIII, et populairement connu comme eau de Javel. Dans l'industrie, ceci est obtenu par réaction du chlore gazeux avec une solution d'hydroxyde de sodium. Après la réaction on obtient des solutions aqueuses de couleur jaune verdâtre. L'hypochlorite de sodium est un oxydant très puissant et instable, à tel point qu'une solution de 100 grammes de chlore actif par litre, après avoir été emmagasinée pendant trois mois, peut en contenir 90 grammes ou moins [27].

➤ **L'hypochlorite de calcium ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$) :**

Est un solide blanc avec un contenu entre 20 et 70% de chlore actif. Il est très corrosif et il peut s'enflammer en contact avec certains matériaux acides. Cependant, il présente deux avantages par rapport à l'hypochlorite de sodium : un contenu en chlore plus élevé et une plus grande stabilité. Pour son utilisation on le dilue dans l'eau pour en obtenir une solution avec une concentration plus maniable, par exemple 20% [27].

➤ **Le dioxyde de chlore (ClO_2) :**

Est également un bon désinfectant. Son pouvoir rémanent est plus important que celui du chlore. Il persiste donc plus longtemps dans les réseaux de distribution. Le pH a peu d'effet sur son efficacité et il ne forme pas de composés indésirables comme les THM. Il peut par contre former d'autres sous-produits : les chlorites et les chlorates [35].

➤ **Demande de chlore :**

Une partie importante du chlore étant nécessaire pour neutraliser ces matières organiques, il n'en reste cependant qu'une partie, appelée chlore résiduel libre, pour traiter la contamination éventuelle ultérieure de l'eau dans le réseau ou les habitations. La concentration en chlore libre de l'eau traitée doit être selon l'OMS de 0,2 à 0,5 mg/l. Il faut donc utiliser assez de chlore pour qu'il en reste assez une fois l'eau traitée, sauf consommation immédiate.

Le chlore injecté réagit d'abord avec les matières facilement oxydables (fer, manganèse...), puis avec la matière organique pour former des mono, di- puis trichloramine qui sont alors détruits. Le chlore injecté au-delà du point critique (break point) sera du chlore libre actif : le chlore rémanent, qui exerce un effet de désinfection dans le temps [30].

Pour connaître la dose de chlore à injecter, il faut introduire dans différents récipients remplis d'une même quantité d'eau, une dose croissante de chlore. La mesure du chlore résiduel (chlore total) après environ 30 minutes donne la courbe d'absorption du chlore [30].

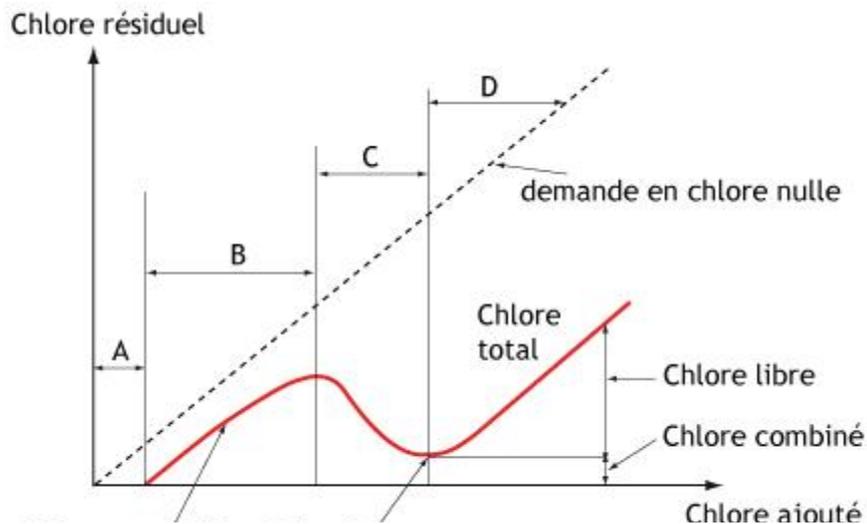


Figure II.13: courbe du break point.

A : destruction du chlore par les composés minéraux (fer, manganèse...);

B : formation de composés chlorés organiques et de chloramines, réduction des monochloramines et des dichloramines, formation des trichloramines;

C : destruction des chloramines par ajout de chlore supplémentaire;

Point de rupture (break-point) : les mono-, di et trichloramines ont pratiquement disparu;

D : production de chlore actif. Tout le chlore ajouté sera sous forme d'acide hypochloreux (HClO), mais il reste du chlore combiné (trichloramines et autres sous-produits de désinfection). Les trichloramines ont un très léger effet désinfectant, mais ils donnent un goût de chlore à l'eau.

➤ **L'ozonisation :**

L'ozone est un gaz instable composé de molécules d'oxygène triatomique O_3 . Puisque l'ozone se décompose rapidement en oxygène on doit le produire immédiatement avant son utilisation, grâce à l'émission d'un effluve électrique sous haute tension dans une atmosphère contenant de l'air sec. Dans la production de l'ozone, les coûts imputables à l'énergie électrique utilisée et l'entretien sont très importants [35].

➤ **Désinfection par les rayons ultra-violet :**

Ils ont un effet bactéricide maximum à 250 nm et sont obtenus au moyen de lampes à basse pression de vapeur de mercure. Ils ne produisent pas de sous-produit indésirable. La stérilisation par rayonnements ultra-violet : est un procédé peu coûteux, du fait de sa faible persistance. Il est utilisé par les communes ayant un réseau peu étendu. Il consiste à soumettre l'eau à un rayonnement ultraviolet d'une longueur d'onde précise UV capable de détruire les bactéries et les virus [35].

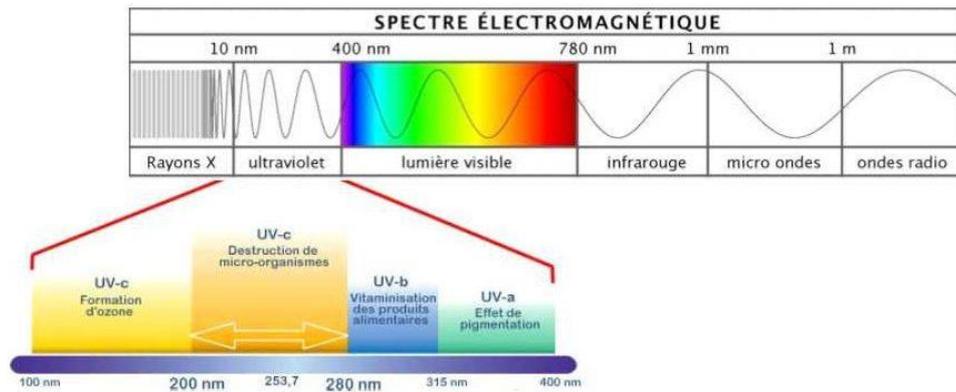


Figure II.14: schéma du spectre électromagnétique.

II.5.2 La déminéralisation :

Les eaux très chargées en sels minéraux dissous peuvent présenter des inconvénients dans certains usages. Ainsi, souvent on est appelé à éliminer totalement ou partiellement certains ions gênants tel que : Ca^{2+} Mg^{2+} est donc la dureté, CO_3^{-2} et HCO_3^{-} et donc l'alcalinité où SO_4^{-2} est donc l'agressivité.

Pour l'élimination de ces sels minéraux, plusieurs méthodes sont utilisées dont les plus utilisées sont :

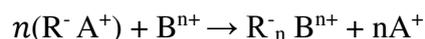
- Les procédés d'échange ionique
- Les procédés de distillation
- Les procédés membranaires [35] .

✓ Les procédés d'échange ionique :

L'échange d'ions est un procédé par lequel, dans certaines conditions, une substance insoluble (résine) attire un ion positif ou négatif d'une solution et rejette un autre ion de même signe.

L'échange d'ions est un procédé par lequel, dans certaines conditions, une substance insoluble (résine) attire un ion positif ou négatif d'une solution et rejette un autre ion de même signe.

Les échangeurs d'ions peuvent être d'origine minérale mais les substances organiques (les résines synthétiques et certains polymères organiques) sont les plus utilisés pour les applications en traitement des eaux. La réaction générale de cette phénomène est la suivante :



Il existe deux grands groupes d'échangeurs ioniques :

Échangeuses de cations : pour les fortement acides présence de radicaux sulfoniques (HSO_3^-), et pour les faiblement acides, sont caractérisés par la présence de radicaux carboxyliques ($COOH$).

Echangeuses d'anions : dans le premier type, on retrouve des radicaux ammoniums quaternaires simples NH_3OH . Ces résines sont moins basiques que celles du premier type, leur capacité d'échange est plus élevée et l'efficacité de leur régénération supérieure [28].

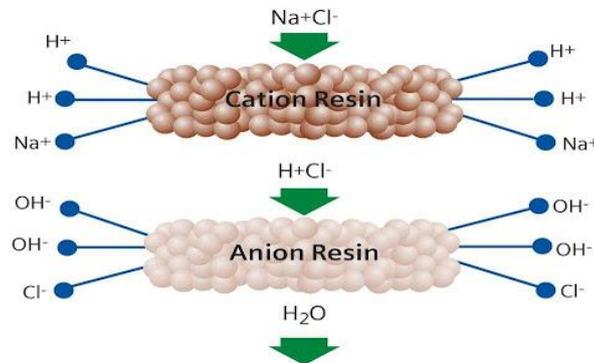


Figure II.15: mécanisme de résine échangeuse d'ions

Dénitratation :

Le nitrate, est insipide, inodore et incolore. Est un ion hautement soluble et stable dans l'eau. Par conséquent, certaines techniques ont été employées pour une élimination efficace de l'eau, telles que l'adsorption, l'échange d'ions, l'osmose inverse et les traitements biologiques. Certaines de ces méthodes ont des coûts opérationnels élevés. Le procédé d'échange d'ions semble être le plus adapté aux petits fournisseurs d'eau en raison de sa simplicité, de son efficacité et de son coût relativement faible. Le processus d'échange d'ions implique le passage d'eau chargée de nitrate à travers un lit de résine contenant des résines échangeuses d'anions fortement basiques sur lesquelles les ions nitrate sont échangés contre du chlorure jusqu'à épuisement de la résine [21].

II.5.4 Adoucissement :

La dureté d'une eau est fonction des quantités de calcium et de magnésium qu'elle contient. Le calcaire, carbonate de calcium, précipite sous forme de tartre sous certaines conditions.

Les ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) d'une eau déterminent sa dureté.

Ainsi, certaines eaux, trop riches en ces éléments, doivent subir ce que l'on appelle une décarbonatation. La décarbonatation réduit le risque de formation de calcaire mais on ne supprime pas le calcaire. Elle permet l'obtention d'un compromis entre le bon équilibre minéral de l'eau et le niveau optimum de dureté.

Parmi les procédés de décarbonatation, on trouve :

- Adoucissement par décarbonatation à la chaux ou à la soude.
- Adoucissement par décarbonatation sur résines échangeuses d'ions
- L'électro-décarbonatation [21].

II.5.5 La défferrisation – démanganisation :

Les sels de fer de manganèse dans les eaux souterraines sont instables ; ils réagissent avec l'eau pour former des précipités insolubles qui sédimentent sous la forme d'un limon de couleur rouille (fer) ou noire (manganèse). L'OMS : précise la concentration en fer (Fe) égal à 0,3 mg/l et manganèse (Mn) de 0,1mg/l. Pour diminuer leurs concentrations on applique le traitement de défferrisation – démanganisation

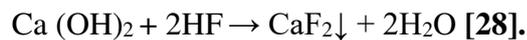
Les procédés de traitement d'élimination du fer et du manganèse sont basés sur l'oxydation des formes réduites dissoutes de (Fe²⁺) et (Mn²⁺) en formes insolubles ferriques (Fe³⁺) et manganiques (Mn⁴⁺) grâce à une réaction d'oxydoréduction. Ces formes insolubles sont ensuite retenues sur un milieu filtrant granulaire [21].

II.5.6 La défluoruration :

La présence de fluorure dans l'eau potable en trop grande quantité peut avoir des effets nocifs sur le développement des os (maladie de fluorose dentaire et osseuse). C'est pourquoi la recommandation concernant ce produit se situe à 1,5mg/l. Par contre, lorsque l'eau brute contient plus de 1,5mg/l de fluorure, on doit chercher à l'éliminer par les méthodes suivantes :

a) **Par adsorption sur alumine activée :** pour ce type d'application, l'alumine activée est un produit granulaire de 0,3mm utilisé en filtration. La vitesse de filtration sera fonction de la concentration de fluor à éliminer, à raison de 6 à 20 m/h pour des concentrations de 15 à 5 mg/l, respectivement.

- **Par précipitation à la chaux :** par l'addition d'une dose importante de chaux, il est possible de réduire la teneur en fluorure de l'eau brute et par l'ajout d'un coagulant peut s'avérer nécessaire pour clarifier l'eau traitée [30].



Chapitre III
Coagulation-floculation
et oxydation chimique

III. Coagulation-floculation et oxydation chimique

Introduction :

La turbidité et la couleur d'une eau sont principalement causées par des particules très petites, dites particules colloïdales. Ces particules, qui peuvent rester en suspension dans l'eau durant de très longues périodes, peuvent même traverser un filtre très fin. Par ailleurs, puisque leur concentration est très stable, ces particules n'ont pas tendance à s'accrocher les unes aux autres. Pour éliminer ces particules, on a recours aux procédés de coagulation et de floculation. La coagulation a pour but principal de déstabiliser les particules en suspension. C'est-à-dire de faciliter leur agglomération. En pratique, ce procédé est caractérisé par l'injection et la dispersion rapide de produits chimiques. La floculation a pour objectif de favoriser, à l'aide d'un mélange lent, les contacts entre les particules déstabilisées. Ces particules s'agglutinent pour former un floc qu'on peut facilement éliminer par les procédés de décantation et de filtration [28].

III.1 Matières en suspension et les colloïdes

III.1.1 Définitions

L'eau contient de nombreux composés qui peuvent se regrouper en trois catégories :

- **Matières en suspension**

Ces produits peuvent être d'origine minérale (sables, limons, argiles, ...) ou organique (produits de la décomposition des matières végétales ou animales, acides humiques ou fulviques par exemple). A ces composés s'ajoutent les micro-organismes tels que bactéries, plancton, algues et virus.

Ces substances sont responsables, en particulier, de la turbidité et de la couleur.

- **Matières colloïdales :** (moins de 1 micron) Ce sont des MES de même origine que les précédentes mais de plus petite taille, dont la décantation est excessivement lente. Elles sont également génératrices de turbidité et de couleur.
- **Matières dissoutes** (moins de quelques nanomètres) Ce sont généralement des cations ou des anions. Une partie de la matière organique est également sous forme dissoute. On trouve aussi des gaz (O_2 , CO_2 , H_2S , ...) [8].

III.2 Théorie de la double couche :

Les colloïdes présents dans l'eau brute sont très généralement chargés négativement (imperfections du réseau cristallin, ionisation des groupements chimiques périphériques, ...). Afin de neutraliser cette charge négative de surface, des ions positifs, présents dans l'eau brute ou ajoutés, viennent former une couche autour du colloïde. Diverses théories ont été avancées

- ✓ **Théorie de HELMHOLTZ :** Une couche d'ions positifs recouvre intégralement la surface du colloïde et assure la neutralité de l'ensemble (couche adhérente).
- ✓ **Théorie de GOUM-CHAPMAN** La couche d'ions positifs est inégalement répartie autour du colloïde ; la neutralité est obtenue à plus grande distance (couche diffuse).

Théorie de STERN qui rassemble les deux précédentes et considère la formation d'une double couche. La première couche est adhérente au colloïde, le potentiel y décroît rapidement. La seconde couche est plus diffuse, avec une diminution plus lente du potentiel [26].

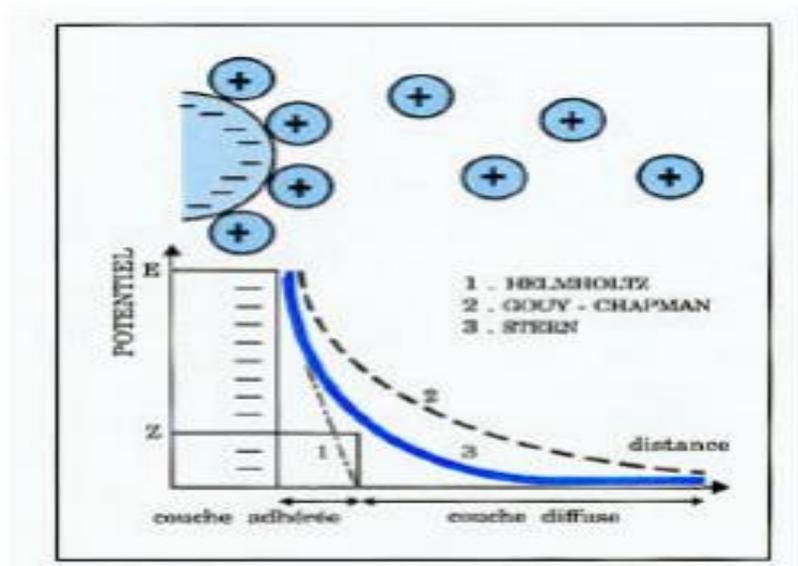


Figure II.1: théorie de la double couche

III.3 Le potentiel Zeta :

Le potentiel zêta se situe à la limite extérieure de la couche liée. Ce potentiel est responsable du comportement électrocinétique de la particule colloïdale dû à la charge effective de l'ensemble particule-double couche. Quand la charge effective diminue, le potentiel Zeta et la stabilité diminuent. L'annulation du potentiel Zêta est l'objectif de la coagulation. Cela permet de déstabiliser les particules et de favoriser leurs agglomérations.

Le potentiel Zeta (Z) est défini par la relation suivante

$$me = \frac{\epsilon Z}{k\mu}$$

Avec :

K= fonction du diamètre de particule.

μ = viscosité dynamique (Pa. S).

me= mobilité électrophorétique ($\mu\text{m}\cdot\text{S}^{-1}\cdot\text{V}^{-1}$).

ϵ = constante diélectrique du milieu on mesure ce potentiel par Zétamètre [26].

III.4 La coagulation

Les particules colloïdales en solution sont « naturellement » chargées négativement. Ainsi, elles tendent à se repousser mutuellement et restent en suspension. On dit qu'il y a stabilisation des particules dans la solution. La coagulation consiste dans la déstabilisation des particules en suspension par la neutralisation de leurs charges négatives. On utilise, pour ce faire, des réactifs chimiques nommés coagulants. Le procédé nécessite une agitation importante. Les coagulants sont des produits capables de neutraliser les charges des colloïdes présents dans l'eau. Le choix du coagulant pour le traitement de l'eau de consommation doit tenir compte de l'innocuité du produit, de son efficacité et de son coût. Le type de coagulant et la dose ont une influence sur :

- La bonne ou la mauvaise qualité de l'eau clarifiée,
- Le bon ou le mauvais fonctionnement de la floculation et de la filtration,
- Le coût d'exploitation.

Il existe deux principaux types de coagulant

- Les sels de fer (chlorure ferrique)
- Les sels d'aluminium (sulfate d'aluminium) [36].

III.4.1 Facteur influençant la coagulation :

Afin d'optimiser la coagulation, il faut tenir compte de plusieurs variables en interrelations, comme le pH, les sels dissous, la température de l'eau. Le coagulant utilisé, les conditions de mélange, la turbidité et la couleur [28].

✚ Influence du pH :(Hernandez)

Le *pH* a une influence primordiale sur la coagulation. Il est d'ailleurs important de remarquer que l'ajout d'un coagulant modifie souvent le *pH* de l'eau. Cette variation est à prendre en compte afin de ne pas sortir de la plage optimale de précipitation du coagulant. La plage du *pH* optimal est la plage à l'intérieur de laquelle la coagulation a lieu suffisamment rapidement. En effet, une coagulation réalisée à un *pH* non optimal peut entraîner une augmentation significative du temps de coagulation. En général, le temps de coagulation est compris entre 15 secondes et 3 minutes. Le *pH* a également une influence sur l'élimination des matières organiques [34].

✚ Influence des sels dissous :

Modification de la plage de pH optimale,

Modification du temps requis pour la floculation,

Modification de la quantité de coagulant requis

Modification de la quantité résiduelle de coagulant dans l'effluent.

Les réactions qui peuvent avoir lieu sont : [26]

✓ Sels d'aluminium

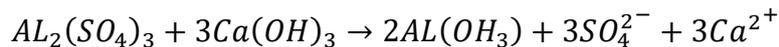
Sulfate d'aluminium :



Chlorure d'aluminium



Sulfate d'aluminium + la chaux :

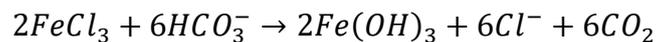


Sulfate d'aluminium + carbonate de sodium :

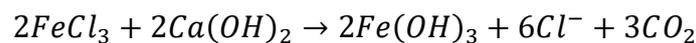


✓ Sels de fer

Chlorure ferrique



Chlorure ferrique + la chaux



✚ Influence de la température de l'eau

Des expériences montrent que lorsque la température de l'eau avoisine 0°C, le floc se décante plus difficilement et a tendance à pénétrer plus profondément dans les filtres. Une diminution de la température de l'eau entraîne une augmentation de sa viscosité, ce qui explique les difficultés de décantation du floc [26].

✚ Influence de la turbidité :

La turbidité des eaux de surface est en grande partie due à la présence de particules de glaise dont le diamètre varie de 0.2 à 0.5 µm. Il s'agit donc la grosse particule colloïdale qui peuvent se déposer naturellement. La coagulation de ces particules est assez facile à réaliser lorsqu'on maintient le pH dans sa plage optimale [28].

Influence de la couleur :

Des études ont révélé que 90% des particules responsables de la couleur avaient un diamètre supérieur à 3,5 nm ; ces particules sont donc des particules colloïdales beaucoup plus petites que les particules responsables de la turbidité.

La plupart des particules responsables de la couleur possèdent des charges négatives à leur surface.

La quantité de coagulant requise est fonction de la couleur initiale : pour un pH optimal, la couleur résiduelle décroît proportionnellement avec l'augmentation de la quantité de coagulant utilisée. Le pH optimal pour l'élimination de la couleur varie entre 4 et 6 [28].

Influence de l'agitation

Le processus de coagulation floculation se déroule généralement en deux étapes [37]

La première étape c'est l'agitation énergique rapide de courte durée (2 minutes au maximum). Elle a pour but de favoriser la dispersion et l'homogénéisation du produit injecté dans la totalité du volume d'eau à traiter ; mais une agitation intense peut empêcher l'agrégation des particules.

La deuxième étape c'est l'agitation lente (30 à 60 min) et elle a pour but de provoquer les contacts entre les particules pour former des floccs décantables [32].

Influence de coagulant :

Le choix du coagulant peut influencer les caractéristiques de la coagulation.

Ainsi, même si l'alun est le coagulant le plus fréquemment utilisé, il peut être avantageux de le remplacer par du sulfate ferrique .ce dernier procure en effet à plusieurs eaux une plage de pH optimale plus large que celle due à l'alun. De plus, pour un même pH élevé, le sulfate ferrique est moins soluble que l'alun. On ne peut choisir .un coagulant et en déterminer la concentration optimale, pour une eau donnée, qu'après avoir effectué des essais en laboratoire.la théorie qui explique les différents mécanismes de déstabilisation des particules colloïdales n'est pas suffisamment développée pour qu'on puisse résoudre un problème aussi complexe. Cette théorie est cependant très utile aux moments de la planification des essais de laboratoire et de l'interprétation des résultats obtenus [28].

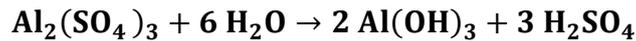
III.4.2 Les coagulants utilisés :

Les coagulants sont des produits qui neutralisent les charges de surface des matières colloïdales. L'efficacité de la clarification dépend d'abord du coagulant utilisé. Les coagulants les plus efficaces sont des sels métaux, à bases d'aluminium ou de fer [38].

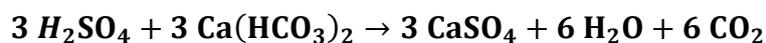
III.4.2.1 Les sels d'aluminium :✓ **Le sulfate d'aluminium :**

Le sulfate d'aluminium est le plus utilisé en coagulation .c'est un sel basique, hydraté commercialisé sous la forme solide $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, il se dissocie dans l'eau en ions d'aluminium et sulfate, conduisant à des réactions chimiques avec les ions hydroxydes de l'eau [37].

En effet, l'ion d'aluminium réagit sur l'eau pour former l'hydroxyde d'aluminium qui précipite sous la forme d'un floc volumineux.



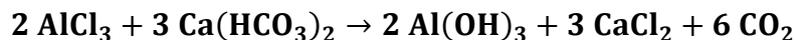
Il se forme un acide qui réagit avec le bicarbonate présent dans l'eau



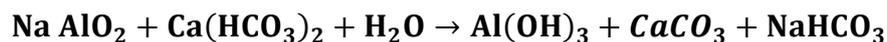
La réaction globale est :

✓ **le chlorure d'aluminium :**

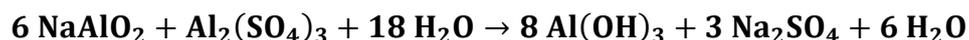
Suivant la turbidité de l'eau, la dose sera comprise entre 12 et 40 g/m³, la formule de réactif commercial de chlorure d'aluminium est $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

✓ **L'alumine de sodium :**

Suivant la turbidité de l'eau, la dose sera comprise entre 5 et 50 g/m³.La formule de réactif commercial d'aluminate de sodium est à 50% de AlO_3 .

✓ **L'addition de sulfate d'aluminium et l'aluminate de sodium :**

Pour une réaction équimoléculaire, il faut que la dose en aluminate de sodium commercial soit égale à 75% de la dose de sulfate d'alumine commerciale, la dose d'aluminate peut cependant être beaucoup plus faible et dans ce cas le réactif ne sert qu'à amorcer la coagulation de sulfate d'alumine .

✓ **Le P.C.B.A :**

C'est un polychlorure basique d'aluminium dont la formule chimique générale est $(\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl})$, il est sous forme très instable [37].

III.4.2.2 Les sels de fer :

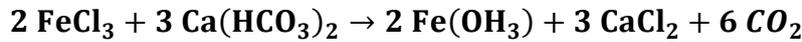
En général, les composés du fer semblent avoir de légers avantages comparativement aux autres, grâce au fait que le floc formé soit lourd et se dépose facilement sous des conditions favorables.

✓ **Le sulfate ferrique :**

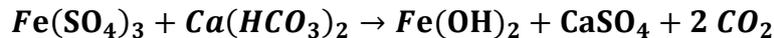
Suivant la turbidité de l'eau, la dose de sulfate ferrique sera comprise entre 10 et 50 g/m³.

✓ **Le chlorure ferrique :**

La dose de chlorure ferrique sera comprise entre 5 et 150 g/m³ pour la clarification des eaux de surface.

✓ **Le sulfate ferreux :**

Suivant la turbidité de l'eau, la dose de sulfate ferreux sera comprise entre 5 et 25 g/m³

**III.5 La floculation :****III.5.1 Le principe de phénomène :**

Après avoir été déstabilisées, les particules colloïdales ont tendance à s'agglomérer lorsqu'elles entrent en contact les autres. Le taux d'agglomération des particules dépend de la probabilité des contacts et de l'efficacité de ces derniers.

La floculation a justement pour but d'augmenter la probabilité des contacts entre les particules, lesquels sont provoqués par la différence de vitesse entre ces particules [28].

Ce phénomène est pour la formation de floes de taille plus importante. On utilise, pour ce faire, des floculants [34].

Le mélange doit être suffisamment lent afin d'assurer le contact entre les floes engendrés par la coagulation. En effet, si l'intensité du mélange dépasse une certaine limite, les floes risquent de se briser. Il faut également un temps de séjour minimal pour que la floculation ait lieu. La durée du mélange se situe entre 10 et 60 minutes.

L'expression de SMOLUCHOWSKY permet de comprendre ce phénomène. La formulation suivante :

$$\ln \frac{N}{N^0} = -\frac{4}{\pi} \alpha \Omega G t$$

Avec :

N et N⁰ : nombre de particules colloïdales libres à l'instant t et t₀.

α : facteur de fréquence de collision efficace.

Ω : volume de particules par volume de suspension.

G : gradient de vitesse.

t : temps de contact [28].

III.5.2 Les types de floculation :

Pour arriver à la décantation des particules colloïdales coagulées, il est nécessaire de les passer par une opération de floculation. Cette floculation peut être faite à l'aide d'une de ces deux méthodes suivantes :

- La floculation physique.
- La floculation chimique [23].

III.5.2.1 La floculation physique :

Elle consiste à augmenter par la création d'une différence de vitesse entre les particules colloïdales déstabilisées, la mobilité des contacts entre ces particules afin de les agglomérer en floes denses ensuite de les décanter.

Deux mécanismes assurent la mobilité des particules : le mouvement brownien (floculation préricinétique) et le brassage mécanique (floculation orthocinétique) [23].

- **La floculation préricinétique :**

La floculation préricinétique résulte de la diffusion brownienne, où l'agitation thermique favorise les rencontres entre les particules. Cette théorie repose sur le fait que toutes les particules ont la même énergie cinétique, donc les plus petites ont des vitesses plus élevées, augmentant ainsi la probabilité de collision. La vitesse de floculation, c'est-à-dire la variation du nombre de particules agrégées dans le temps, est décrite par la formule suivante :

$$F_p = \frac{dn}{dt} = -\frac{4\tau k\theta(N)^2}{3\eta}$$

N : concentration totale des particules en suspension au temps t (nombre de particules/m³)

τ : facteur qui rend compte de l'efficacité des collisions (nombre de collisions effectives/nombre de collisions totales, une collision effective étant une collision qui l'agrégation des deux particules)

k : constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J. K⁻¹)

θ : température absolue (K)

η : viscosité dynamique de l'eau (Pa. s)

Cette loi s'applique aux particules de taille inférieure à 10 μ m et décrit la formation de microflocs, en tenant compte de la densité de particules (n) et de la température [28].

- **La floculation orthocinétique :**

Est associée à l'énergie mécanique dissipée dans la zone de floculation. Cette méthode favorise la formation de floccs volumineux et séparables. Un élément crucial de son efficacité réside dans le gradient de vitesse, qui influe sur la probabilité de rencontre des microflocs.

Cependant, il est important de noter que l'augmentation excessive du gradient de vitesse n'est pas souhaitable. Des valeurs trop élevées de G entraînent un cisaillement mécanique qui peut détruire les floccs formés. Les valeurs généralement acceptées pour G sont les suivantes :

- En coagulation : 400, voire 1 000 s^{-1} ;
- En floculation : environ 100 s^{-1} , et moins dès que les floccs dépassent un millimètre de taille.

$$F_o = \frac{dN}{dt} = - \frac{2\tau G d^3 (NN)}{3}$$

d : diamètre des particules (m)

G : gradient de vitesse (s^{-1}) [28]

III.5.2.2 La floculation chimique :

La floculation chimique est un processus utilisé pour faciliter l'agrégation des particules en suspension dans l'eau. Elle est induite par l'agitation de l'eau, ce qui augmente la probabilité de collisions entre les particules et favorise leur agrégation.

Ce processus consiste en l'agglomération des particules colloïdales déstabilisées par des ponts formés à l'aide de produits chimiques spécifiques, appelés floculants. Lorsque la turbidité de l'eau est très élevée, la floculation peut être améliorée par la recirculation des boues déjà formées lors de traitements antérieurs. Les particules colloïdales déstabilisées s'attachent alors aux boues recirculées, ce qui facilite leur décantation. Ce type de floculation est connu sous le nom de floculation par voile de boue [1].

III.5.3 Les floculants utilisés :

Ce sont produits qui ont des actions inter-particules par pontage. Ces floculant sont pour la plupart constitués de polymère à haut poids moléculaire possédant des groupes réactifs de charges inverse à celle de la suspension à traiter.

Les floculants peuvent être de trois natures différent :

- Les floculants minéraux
- Les floculants organique
- Les floculants synthèse

III.5.3.1 Les floculants minéraux :

Ce sont des produits chimiques qui agissent par adsorption ou par neutralisation sur une eau brute qui ne contient pas assez de matières en suspension. Les floculants connus sont la silice activée, certaines argiles colloïdales comme la bentonite ou le charbon actif en poudre, certains hydroxydes à structure polymère comme l'alumine ou l'hydroxyde ferrique et la sable fin (micro sable).

III.5.3.2 Les floculants organique :

Ils sont hydrosolubles et qui peuvent voir une charge anionique, cationique ou neutre. On peut citer exemple l'amidon, les alginate ou les polysaccharides [23].

III.5.3.3 Les flocculants de synthèse :

Ce sont des produits fabriqués à partir de monomères à très haute masse moléculaire (entre 105 et 107). Ces polymères ont un rendement supérieur aux polymères naturels. Ils sont classés suivant leur ionicité :

- Anionique : conçu à partir de polymère d'acrylamide et de l'acide acrylique ;
- Neutre : conçu à partir de polyacrylamides ;
- Cationique : conçu à partir d'acrylamide et de méthacrylate de diméthylamino-éthyle où d'acrylate de diméthylamino-éthyle [23].

III.5.4 Aspects pratiques de la floculation :

La formation du floc étant amorcée par l'introduction du coagulant, il est nécessaire d'accroître son volume, sa masse et sa cohésion, ce qui sera favorisé par :

- ✓ Une coagulation préalable aussi parfaite que possible ;
- ✓ Une augmentation de la quantité du floc dans l'eau ; on a intérêt à mettre l'eau en contact avec les précipités déjà formés par le traitement antérieur (recirculation des boues ou lit de boue) en recherchant la plus forte concentration possible (sans toutefois dépasser une valeur optimale au-delà de laquelle la décantation ultérieure se trouverait freinée) ;
- ✓ Un brassage homogène et lent de l'ensemble afin d'augmenter les chances de rencontre des particules colloïdales déchargées électriquement avec une particule de floc ; lorsque les appareils de séparation ne comportent pas de contact de l'eau en cours de floculation avec les boues préexistantes, on fait d'abord passer l'eau dans un flocculateur (temps de contact de l'ordre de 20 min), bassin muni d'un système d'agitation (hélice, ou ensemble de pales fixées sur un arbre tournant, vertical ou horizontal), qui tourne relativement lentement pour ne pas briser les flocons déjà formés, mais suffisamment vite pour assurer le grossissement progressif du floc et éviter une sédimentation précoce ;
- ✓ L'emploi de certains produits appelés flocculants.

III.6 Les avantages et les inconvénients de coagulation floculation :

III.6.1 Les avantages

- Elle permet de réduire le temps nécessaire à la décantation des solides en suspension ;
- Très efficace pour éliminer les particules fines qui sont bien plus difficiles à éliminer avec d'autres méthodes ;
- Favorise l'élimination de nombreux protozoaires, bactéries et virus ;
- Adaptés aux installations de grandes et de moyennes tailles ;
- Offre une meilleure installation pour lutter contre la turbidité et la couleur

III.6.2 Les inconvénients :

- C'est une méthode coûteuse qui nécessite une phase expérimentale ;
- Nécessite un dosage précis de coagulants ;
- Demande un certain niveau de contrôle ;
- Les coagulants nécessitent un équipement de dosage précis ;
- Peu adaptés aux petites installations ;

Ce processus bien qu'efficace n'entraîne qu'une élimination partielle des matières organiques naturelles (2/3 en moyenne). Il nécessite donc l'appui de processus additionnels, tel que l'oxydation ou bien même la filtration. Ainsi, on garantit aux eaux brutes ou usées un traitement complet.

- La coagulation-floculation utilise des produits chimiques, ce qui peut poser des problèmes de santé à long terme pour les personnes qui consomment de l'eau traitée de cette manière, comme la présence d'aluminium résiduel peut entraîner des problèmes importants pour la santé comme l'Alzheimer et autres pathologies de ce genre. Il est donc toxique pour les écosystèmes. Cette toxicité génère plusieurs inquiétudes ou niveau du grand public [39].

III.7 Oxydation chimique :

L'oxydation chimique en phase aqueuse joue un rôle fondamental aussi bien dans le traitement des eaux de consommation que dans l'épuration de certains types d'eaux. La dégradation des micros polluants organiques et minéraux, la destruction des composés toxiques ou la transformation des produits peu biodégradables est avec la désinfection des opérations de base pour lesquelles l'oxydation chimiques peu apporter une contribution importante [40].

Les composés les plus souvent utilisés sont des agents chlorés le chlore gazeux (Cl_2), l'hypochlorite de sodium ou « eau de javel » (NaClO), le dioxyde de chlore (ClO_2), l'ozone (O_3), et le permanganate de potassium (KMnO_4).

III.7.1 Les objectifs de l'oxydation :

- En vue de la désinfection avant usage domestique ou industriel afin d'éviter tout risque de contamination bactériologique ;
- Pour favoriser la précipitation des composés dissous tels que le fer, le manganèse ou les sulfures ;
- En vue de la dégradation des composés organiques, notamment ceux responsables de la couleur, de l'odeur et du goût de l'eau, ou toxiques, qui contribuent également à la demande chimique en oxygène de l'eau ;
- Dans le but d'éliminer l'azote ammoniacal ;
- En vue de la transformation des polluants non biodégradables en substances assimilables par les bactéries lors d'un traitement biologique ultérieur.

III.7.2 Les oxydants chimique :

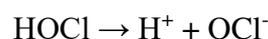
III.7.2.1 Le chlore et l'hypochlorite :

Le chlore de formule chimique Cl_2 est un gaz à température et pression normales.

Le chlore injecté dans l'eau se dismute rapidement en acide hypochloreux et acide chlorhydrique, suivant une réaction endothermique.



L'hydrolyse du chlore se produit entièrement en quelques dixièmes de seconde, suivie de la dissociation de l'acide hypochloreux.



La dissolution du chlore dans l'eau conduit donc à la formation d'acide hypochloreux et d'anion hypochlo-rite en proportions variables selon le pH et la température du milieu. À

15 °C, les concentrations relatives des deux espèces évoluent en fonction du pH comme représenté à la figure suivante :

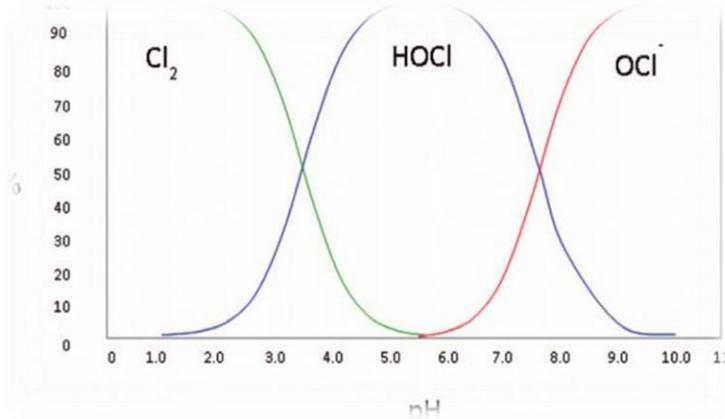
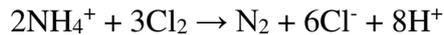


Figure III.2 : courbe de différentes proportions de Cl_2 , HOCl , ClO^-

III.7.2.2 Action sur l'azote ammoniacal :

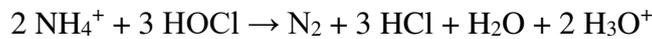
L'azote ammoniacal réagit avec le chlore pour former de l'azote



La réaction précédente suit un mécanisme complexe qui débute par la formation de chloramines :



La réaction globale à ce stade s'obtient en additionnant membre à membre les équations (éq.1) et (éq.4) :

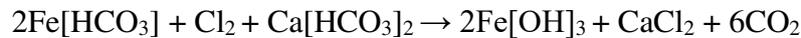


III.7.2.3 Action autres composés inorganiques :

La chloration peut générer des composés réputés nuisibles et réglementés à partir de polluants inorganiques (chloramines, ion bromate). La présence dans les eaux chlorées de ces produits secondaires dépend principalement du pH du milieu, de la dose de chlore appliquée et du temps de réaction.

➤ **Précipitation du fer :**

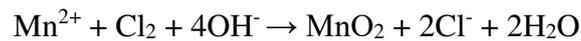
Le fer généralement présent sous forme de bicarbonate est transformé en chlorure ferrique rapidement hydrolysé en hydroxyde ferrique.



La réaction produit une diminution de pH, opérée à un pH optimum égal à 7 auquel elle est quasi-instantanée dans le cas de fer inorganique et plus difficile dans le cas de complexes organiques.

➤ **Précipitation du manganèse :**

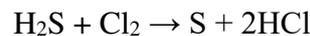
Le manganèse précipite sous forme de dioxyde de manganèse.



Le pH de réaction peut varier entre 8 et 10 avec un optimum à 10.

• **Oxydation des sulfures :**

Le sulfure d'hydrogène rencontré dans les eaux souterraines réagit très rapidement avec le chlore pour former selon le pH du sulfure ou de l'acide sulfurique.



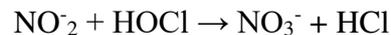
• **Oxydation des cyanures :**

Les cyanures sont oxydés par le chlore sous forme d'hypochlorite à pH > 8,5



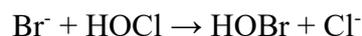
• **Oxydation des nitrites :**

L'oxydation des nitrites par le chlore implique l'acide hypochloreux.



• **Oxydation des bromures :**

La réaction a lieu à partir de l'acide hypochloreux



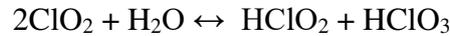
De faibles quantités de bromates peuvent être formées à pH < 7

III.7.2.4 Action sur les composés organiques :

L'action du chlore sur les polluants organiques est sélective, ciblant des sites spécifiques tels que les groupes réducteurs, insaturés et nucléophiles. Cette réaction entraîne des modifications de structure conduisant à la formation de composés plus oxydés et/ou substitués, notamment des composés organochlorés. Cela peut conduire à la présence de composés indésirables tels que des aldéhydes et des chlorophénols, qui affectent le goût et l'odeur, ainsi que des trihalométhanes et des composés organohalogénés, qui peuvent être toxiques voire potentiellement cancérigènes. La formation de ces sous-produits dépend du pH, de la dose de chlore et du temps de réaction, et est plus prononcée en présence de niveaux élevés de chlore libre, dépassant un seuil critique de traitement.

✓ **le dioxyde de chlore :**

Le dioxyde de chlore est très soluble dans l'eau. Sa solubilité dépend de la température et de la pression. Sa dissolution dans l'eau à pH neutre conduit à un mélange des acides chloreux et chlorique.



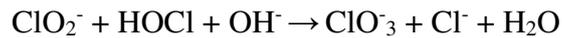
En milieu basique, le dioxyde de chlore subit une dismutation en ions chlorite et chlorate. La réaction est irréversible à pH supérieur à 11



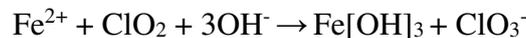
En milieu neutre ou acide, le dioxyde de chlore réagit lentement pour former l'acide chlorique.



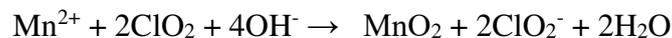
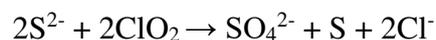
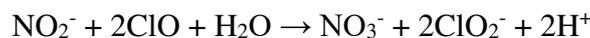
Par ailleurs, le chlore présent dans l'eau sous forme acide hypochloreux oxyde le dioxyde de chlore et l'ion chlorite en chlorates.

**Précipitation du fer :**

La réaction opère à un Ph optimum de 8 à 9

**Précipitation du manganèse :**

L'oxydation est complète pour ph de réaction supérieure à 7

**Oxydation des sulfures :****Oxydation des nitrites :**

Oxydation des cyanures :

L'oxydation des cyanures complexés au cobalt ou au nickel est très difficile et n'a pas lieu dans le cas de complexe du fer. L'oxydation ultérieure des cyanates est possible à pH neutre à acide.



- **Action sur les composés organiques :**

Par rapport aux polluants organiques, le dioxyde de chlore présente à la fois une réactivité différente du chlore et un spectre d'action plus réduit :

-Il réagit rapidement avec les dérivés du phénol, avec les amines tertiaires et secondaires, avec les com-posés organosoufrés ;

-Il est quasiment inerte vis-à-vis des composés insaturés autres que phénoliques, des produits oxygénés, des amines primaires (aminoacides).

Les produits organiques issus du traitement de l'eau avec le dioxyde de chlore sont principalement des acides carboxyliques, du glyoxal, des aldéhydes, des cétones et éventuellement des polymères. Au cours du traitement, le dioxyde de chlore est majoritairement transformé en ion chlorite alors que le dioxyde de chlore résiduel évolue en ions chlorate et chlorure. Or les chlorites sont toxiques au même titre que les nitrites (formation de méthémoglobine). C'est pourquoi la concentration totale en dioxyde de chlore, chlorite et chlorate dans l'eau de destinée à la consommation humaine est réglementée dans de nombreux pays et limite les doses employables.

Comparé à l'application du chlore en traitement d'eau destinée à la consommation humaine, le dioxyde de chlore présente l'avantage majeur de ne former ni THM, ni composés organohalogénés (TOX). En pratique, l'excès de chlore utilisé au cours de la génération du dioxyde de chlore donne quand même une faible production de TOX. C'est le réactif de choix pour l'élimination des phénols, responsables de problèmes de goût et d'odeur ; toutefois, l'emploi d'une dose de réactif insuffisante peut conduire à la formation de sous- produits organochlorés au goût médicinal.

Le dioxyde de chlore est un biocide plus efficace que le chlore. Il détruit les virus, les bactéries et les spores ainsi que les biofilms dans les canalisations.

- **L'ozone :**

L'ozone est un gaz naturellement présent dans la stratosphère sous l'action de rayonnement ultraviolet émis par le soleil sur les molécules d'oxygène. Il constitue ainsi une protection contre le rayonnement UV nuisible.

La décomposition de l'ozone dans l'eau fait intervenir un mécanisme complexe de réactions en chaîne sous l'effet de divers solutés présents dans l'eau ou libérés au cours du traitement. Ce mécanisme est :

Initié par l'ion hydroxyde (pH élevé), le peroxyde d'hydrogène (formé au cours de l'oxydation de com-posés organiques), le fer ferreux, les acides formique et glyoxylique, les substances humiques ;

Propagé par des promoteurs tels que les composés à groupement aryle, les acides formique et glyoxylique, les alcools primaires et secondaires, les substances humiques ;

Et terminé par des inhibiteurs qui consomment le radical hydroxyle : ions carbonate et bicarbonate, ion phosphate à forte concentration, acide acétique, alcools tertiaires, composés organiques à groupement alkyle, substances humiques.

Le temps de vie de l'ozone dissous est donc fonction de tous les paramètres ci-dessus décrits.

La chimie de l'ozone dans l'eau est gouvernée par deux types de réaction : soit il peut agir directement sous sa forme moléculaire, soit il peut être décomposé par différents mécanismes, conduisant à la formation du radical hydroxyle OH^\bullet , agent oxydant plus puissant que l'ozone lui-même ($E^\circ = 2,80 \text{ V}$).

L'oxydation d'un substrat M peut avoir lieu simultanément selon les deux voies réactionnelles schématisées sur la figure 94. Cependant, en pratique, l'action d'une des espèces oxydantes – radical hydroxyle ou ozone – prédomine en fonction des conditions du milieu (pH principalement), de la vitesse avec laquelle l'ozone réagit avec les composés présents, de la nature des produits formés (éventuellement capables d'accélérer ou de retarder la décomposition de l'ozone).

- Avec les composés inorganiques :

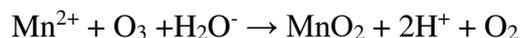
Précipitation du fer :

Le fer généralement présent sous forme de bicarbonate est un transformer en chlorure ferrique rapidement hydrolysé en hydroxyde ferrique



Les ions ferreux sont rapidement oxydés par l'ozone en hydroxydes ferrique insoluble

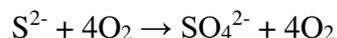
Précipitation du manganèse :



Le manganèse réagit avec l'ozone plus lentement que le fer. La vitesse d'élimination est considérablement réduite lorsque l'eau contient des substances organiques.

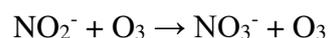
De plus l'application d'ozone en excès conduit à la formation permanganate avec développement d'une coloration rose

Oxydation des sulfates :



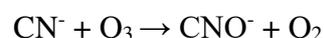
L'ozone oxyde les sulfures en sulfates. La vitesse de la réaction est diminuée lorsque le degré de protonation du soufre augmente.

Oxydation des nitrites :



Les nitrites sont très réactifs vis à vis de l'ozone

Oxydation des cyanures :



Oxydation des cyanures par la zone est réalisée en milieu basique .la convention ultérieure des

Cyanates est possible à PH alcalin. En pratique la quantité d'ozone requise pour un traitement décyanuration est supérieure à la quantité stœchiométrique du fait de la réactivité accrue des autres espèces oxydables en milieu basique.

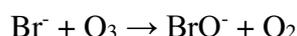
Oxydation de l'ammoniaque :



La réaction procède au milieu à PH basique avec superposition des voies d'oxydation directe et indirecte.

Oxydation des halogénures :

Sur le plan théorique, l'ozone est capable d'oxyder tous les halogénures. En pratique la vitesse de réaction est quasi-nulle avec les chlorures, très élevées avec les iodures et intermédiaire avec les bromures est transformé en ion hypobromite selon



L'hypobromite formé peut conduire à nouveau au bromure être partiellement oxydé en bromate, réagir avec la matière organique ou l'ammoniaque. La formation de bromate doit être contrôlée.

Avec les composés organiques :

L'ozone est le plus puissant désinfectant chimique utilisé en traitement d'eau. De plus, son action sur les agents pathogènes ne dépend pas du pH. En revanche, sa faible stabilité dans le milieu rend obligatoire l'utilisation secondaire d'un oxydant rémanent pour assurer la sécurité dans le réseau de distribution. L'aptitude de l'ozone à inactiver les cellules vivantes peut être étendue jusqu'à provoquer leur lyse. Cette propriété est exploitée dans le cadre du traitement Biolysis.

Tableau III.1 : action de l'ozone sur la matière organique

Composé organique	Produits d'ozonation
Alcènes	Acides, aldéhydes saturés, dioxyde de carbone.
Composés aromatiques	Phénols, quinones, acides aliphatiques, dioxyde de carbone
Amines	Hydroxylamines, amides, ammoniaque, nitrate, acides carboxyliques
Alcools	Aldéhydes, acides carboxyliques, cétones
Aldéhydes et cétones	Acides carboxyliques

Le permanganate :

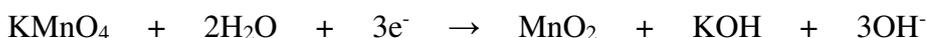
Le permanganate est un dérivé oxygéné du manganèse au degré d'oxydation + VII. Il est anionique et uti-lisé sous forme de sel de potassium de formule KMnO_4 .

Ce composé est d'autant plus soluble dans l'eau que la température est élevée. Dans le domaine du trai-tement d'eaux naturelles, il donne lieu à deux réactions principales selon le pH du milieu.

En milieu acide :



En milieu neutre ou alcalin :



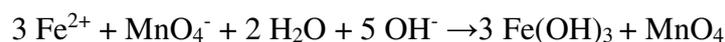
La réduction du permanganate produit du dioxyde de manganèse insoluble à pH supérieur à 3,5. Il s'ensuit qu'une séparation ultérieure du dioxyde précipité est nécessaire dans un étage de coagulation-décantation ou de filtration.

La réactivité du permanganate vis-à-vis des polluants contenus dans les eaux dépend fortement du pH. Il est en pratique recommandé de travailler entre pH 6 et 8,5. Dans ces conditions, les polluants inorganiques affectés par le permanganate sont essentiellement le fer et le manganèse dissous. L'oxydation des sulfures et des cyanures est également possible. En revanche, l'azote ammoniacal n'est quasiment pas transformé de même que les ions bromures.

III.7.2.5 Réaction avec les composés inorganiques :

Précipitation du fer :

La réaction est très rapide à PH compris entre 6 et 10. La quantité de permanganate requis est en pratique réduite par rapport à la stœchiométrie du fait de l'absorption du fer ferreux par le dioxyde de manganèse formé d'autant plus important que le PH est élevé.



Précipitation de manganèse :

La vitesse de réaction augmente avec le pH, ici encore, la capacité d'absorption du dioxyde de manganèse concourt en diminuer la dose nécessaire.



Réactions avec les composés organiques :

L'oxydation des composés organiques par le permanganate fait intervenir des mécanismes complexes. L'ordre de réactivité s'établit comme suit :

- Les composés soufrés, les amines primaires et les aldéhydes réagissent rapidement ;
- Les cétones et les composés aromatiques sont lentement convertis.

L'utilisation de permanganate ne donne pas lieu à la formation de trihalométhanes.

Enfin, il est reconnu que l'action du permanganate n'est pas suffisante pour la désinfection complète des eaux à potabiliser. Une post-désinfection est alors nécessaire.

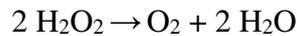
Tableau III. 2 : action le permanganate sur la matière organique.

Composé organique	Produits d'oxydation
Alcènes	Alcools
Alcools et aldéhydes	Acide carboxyliques
Sulfures	Sulfonates
Amines	Acides carboxylique, ammoniacque

Peroxyde d'hydrogène :

Le peroxyde d'hydrogène communément appelé eau oxygénée a pour formule chimique H_2O_2 .

Le peroxyde d'hydrogène est un composé métastable. Il se décompose facilement en oxygène selon un processus exothermique.

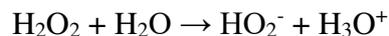


La décomposition se produit sous l'effet de nombreuses substances poreuses (telles que la pierre ponce, la mousse de platine, le dioxyde de manganèse) ou de substances dissoutes (comme les ions hydroxydes et certains métaux). Elle est plus ou moins violente selon la concentration de la solution en peroxyde.

Le peroxyde d'hydrogène est disponible en solution aqueuse de 30 % à 70 % en masse. La concentration des solutions est souvent exprimée en volume correspondant au volume d'oxygène qui peut être libéré par litre de solution et mesuré dans les conditions normales de température et de pression (0 °C et 101,325 kPa). La conversion du pourcentage massique en volume s'effectue selon :

- Volume = $3,67 \times \% \text{ massique}$ (exemple 30 % en masse égale 110 volumes).

La réactivité du peroxyde d'hydrogène dans l'eau est liée à son caractère acide faible et à son pouvoir oxydant et réducteur.

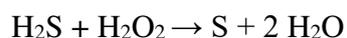


Au pH des eaux naturelles, le peroxyde d'hydrogène est présent dans l'eau sous forme moléculaire. Il est capable de réagir avec les polluants comme récapitulé dans le tableau 37.

Réaction avec les composés organiques et inorganiques :

Le peroxyde d'hydrogène reste peu employé en traitement des eaux. Son application est réservée à quelques actions spécifiques qui visent principalement l'élimination des sulfures et des cyanures.

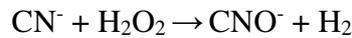
De même, ses propriétés bactéricide et algicide ne sont exploitées en traitement d'eau que dans quelques cas relatifs aux eaux de piscine ou aux eaux de circuits industriels.

Oxydation des sulfures :

Les sulfures sont rapidement oxydés par le peroxyde pour donner principalement du sulfure colloïdal. La réaction procède au mieux à PH compris entre 7 et 13 pour lequel la forme ion hydrogénosulfure devient prédominante. Oxydation des sulfures les sulfures sont rapidement oxydés par le peroxyde pour donner principalement du sulfure colloïdal. La réaction procède

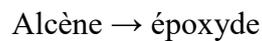
au mieux à PH compris entre 7 et 13 pour lequel la forme ion hydrogénosufle devient prédominante.

Oxydation des cyanures :

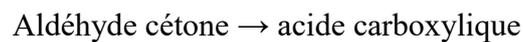


Le peroxyde d'hydrogène réagit lentement avec les cyanures. La réaction peut être accélérée en présence de cuivre ou hydrogène de sodium.

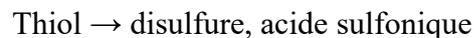
Oxydation des alcènes :



Oxydation des aldéhydes et cétones :



Oxydation des amines :



Les amines tertiaires réagissent avec le peroxyde d'hydrogène pour produire des aminoxydes. Les amines secondaires donnent des hydroxylamines et les amines primaires aromatiques conduisent à des dérivés nitrés [41].

Chapitre IV

Présentation de la station

IV Présentation de la station de « Boudouaou » :

Avant les années 1986, l'alimentation en eau potable du grand-Alger était assurée par les champs de captage du Mazafran, de Baraki et du Hamiz.

La quantité des eaux souterraines n'arrivaient plus à couvrir les besoins toujours grandissants des consommateurs. Pour combler le déficit en eau potable de la région algéroise, la station de traitement de Boudouaou a été mise en service en 1986, elle est historiquement la plus importante infrastructure de production des eaux conventionnelles alimentant la capitale.

Les travaux de réalisation de cette station ont été entamés en janvier 1983. La station de traitement se situe à 8 km du barrage Keddara, entre la ville de Boudouaou et d'Oued Moussa, et située à 8 km au sud de Boumerdès et 40 km à l'est d'Alger, elle occupe une superficie de 17 hectares.

Elle fait partie du système SPIK (système de production Isser Keddara) est alimentée à partir du barrage de Keddara (capacité 142 millions/m³). Lui-même principalement alimenté par pompage depuis le barrage de Beni Amrane (capacité 12 millions /m³) pour alimenter Alger et Boumerdès en eau potable. Elle constitue un ouvrage essentiel dans la chaîne de production d'eau à partir des eaux de surface, avec une capacité de production maximale de 540 000 m³ /j. Les objectifs de la station sont les suivants :

- Assurer et surveiller le traitement de l'eau potable
- Produire et garantir la fourniture d'eau de qualité et en quantité, à un coût acceptable en toutes circonstances, pour alimenter le grand Alger et Boumerdès en eau potable répondant aux normes de potabilité Algérienne
- Améliorer la méthode de gestion, rétablir et entretenir les installations de la station en bon fonctionnement

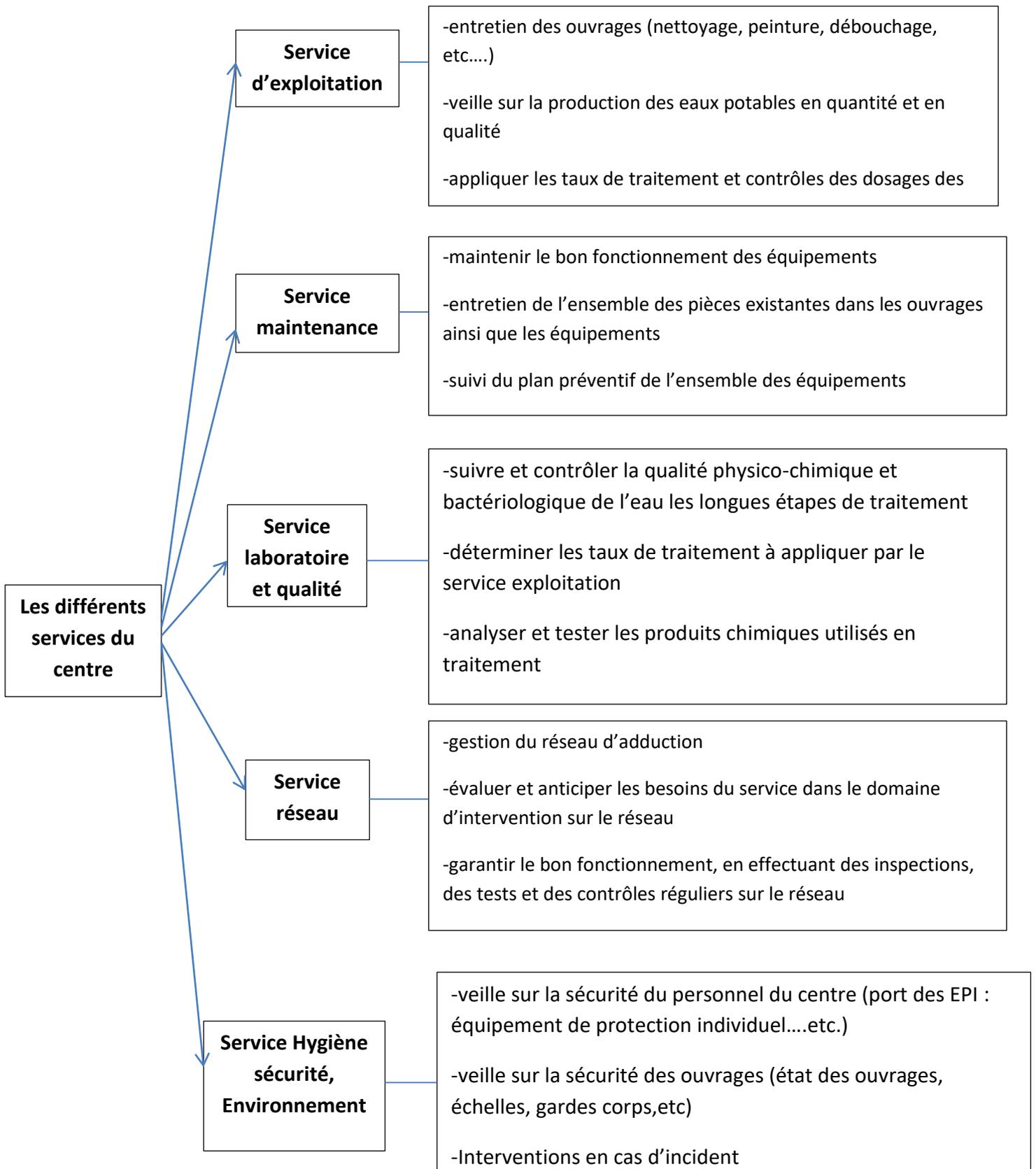
ce centre de traitement est composé des structures suivantes :

- Une station de traitement des eaux potables
- Une station de pompage SPIK pour alimenter quelques localités de la wilaya de Boumerdès
- Station de pompage de Beni Amrane qui refoule les eaux brutes vers le barrage Keddara
- Un laboratoire de procès pour surveiller et contrôler la qualité des eaux traitées de Boudouaou
- Un réseau d'adduction.



Figure IV.1: implantation de la station de traitement de l'eau potable de Boudouaou

IV.1 Présentation des différents services :



IV.2 Les produits de traitement mise en œuvre dans la station

Tableau IV.1: les produits de traitement mise en œuvre dans la station

Nom usuel	Forme chimique	Rôles dans la filière de traitement
Chlore gaz	Cl_2	Pour le traitement de : Pré-chloration, désinfection ; assurer une oxydation chimique (algues, ammonium, fer, Mn....) Désinfection : rôles bactéricide et bactériostatique
Permanganate de potassium	$KMnO_4$	Pour le traitement d'oxydation de fer et manganèse en cas de présence en fortes concentration
Hypochlorite de calcium	$Ca(Cl_2)$	Pour le traitement de : pré-chloration, désinfection ; assurer une oxydation chimique (algues, ammonium, fer, Mn....) Désinfection : rôles bactéricide et bactériostatique
Hypochlorite de sodium	$NaClO$	
Charbon active en poudre		Pour traitement d'adsorption afin de faire face à une pollution accidentelle. Son emploi c'est étendu à l'élimination de nombreux polluants et micropolluants tels que : phénol, Hydrocarbures, Détergents, Pesticides De plus, il sert à améliorer les quantités organoleptiques d'une eau en éliminant les matières organiques responsables de gout, d'odeur et de couleur
Sulfate d'alumine	$Al_2(SO_4)_3, 18H_2O$	Comme coagulant pour Assuré la coagulation (déstabilisation des particules en suspension)
Acide sulfurique	H_2SO_4	Corriger la valeur du pH de l'eau brute (diminution), ramené le pH de l'eau brute au pH optimale de coagulation-floculation
Poly-électrolyte anionique	Industriel, Synthétique	Comme flocculant pour le traitement de floculation/Augmenter la taille du floc Augmenter la vitesse de décantation Augmenter la cohésion des boues Injection en aval de la coagulation
La chaux Hydraté(Eteinte)	$Ca(OH)_2$	Lait de chaux (solution concentrée de chaux utilisée directement) : pour corriger la valeur du pH de l'eau brute (diminution), ramené le pH De l'eau traitée au PH d'équilibre

IV.3 Suivis la qualité de l'eau au laboratoire

Le laboratoire de procès au centre de traitement Boudouaou est subdivisé en deux laboratoires, un réservé à l'étude physico-chimique et l'autre réservé à l'étude bactériologique. L'étude analytique de l'eau est réalisée dans le cadre d'études et de recherches d'ordre physique, chimique et bactériologique, il est à noter que laboratoire est composé également d'une salle de pesage et deux bureaux, un pour le chef de service et l'autre pour l'équipe des chimistes. Il a pour rôle le contrôle de qualité d l'eau potable produite par cette dernière. Ce contrôle consiste à analyser l'eau brute, décantée, l'eau filtrée et l'eau traitée.

✓ Analyses physico-chimiques

Ces analyses sont effectuées pour déterminer les paramètres indicateurs de la pollution de l'eau tels que :

- les paramètres organoleptiques : couleur, odeur et gout
- les paramètres physiques : la température, pH, conductivité et turbidité
- les paramètres chimiques : le chlore résiduel, l'azote ammoniacal, les nitrites, les phosphates,...etc.



Figure IV.2 : laboratoire physico-chimique

✓ Analyse bactériologiques

Elles ont pour objectif :

- le dénombrement des germes totaux
- la recherche et dénombrement des coliformes totaux et des streptocoques fécaux

IV.4 Les différents ouvrages de traitement :

Les principaux ouvrages de la station sont divisés en 4 grandes parties

IV.4.1 L'ouvrage d'arrivée

L'ouvrage d'arrivée est constitué de l'amont vert l'aval de 3 chambres communiquant à savoir :

IV.4.1.1 Chambre des obturateurs

C'est la chambre d'arrivée des eaux provenant du barrage de Keddara par gravité avec une pression d'entrée de 5-6 bar .l'ouvrage comporte quatre obturateurs à disque « NEYRTEC » qui ont pour rôle :

- ✓ De dissiper l'énergie acquise par les eaux
- ✓ De réguler manuellement les débits
- ✓ D'oxygéner et aérées les eaux



Figure IV.3: Chambres des obturateurs

IV.4.1.2 Chambre de mélange

Il se fait l'injection des produits chimiques dans la chambre de mélange par des rampes d'injection qui sont :

- Deux rampes d'injection de chlore
- Deux rampes d'injection de l'hypochlorite de sodium
- Deux rampes de l'hypochlorite de calcium (pré chloration)
- Deux rampes d'injection de permanganate de potassium($KMnO_4$)
- Deux rampes d'injection de charbon actif en poudre (CAP)
- Une rampe d'injection de sulfate d'alumine (coagulation)

Les produits chimiques utilisés pour chaque procédé de traitement sont :

- **Pré-chloration** au chlore gaz, hypochlorite de calcium ou sodium
- **Pré-oxydation** au permanganate de potassium ,ce dernier permet l'oxydation du manganèse, ce traitement est saisonnier :
- **Adsorption** au charbon actif ,ce traitement est mis en place lors de la dégradation des goûts qui sont générés par les métabolites d'algues (saisonnier)
- **Correction du pH** au sulfate d'alumine pour la clarification
- **Coagulation** au sulfate d'alumine pour la clarification

L'eau brute arrive du barrage de Keddara gravitairement par deux conduites de diamètre nominale 1,5m ;atteint la chambre des obturateurs où il y a quatre obturateurs à disque dont le rôle est de briser la charge ;oxygéner l'eau et réguler le débit ,à ce niveau l'eau brute subit un premier traitement qui est l'aération (oxydation par l'air) , puis l'eau passe à la chambre de mélange où il y a l'ajout des produits chimiques, ensuite ;dans la chambre de répartition il se fait l'ajout du floculant (poly électrolyte) et l'eau sera répartie par les vannes murales sur les deux filières(dans chacune il y a trois décanteurs) .

IV.4.1.3 Chambre de répartition

Dans cette chambre il se fait l'injection du polyélectrolyte (floculation) afin de favoriser la décantation, ces équipements sont :

- Six vannes murales (répartition des eaux brutes dans les six décanteurs de façon identique)
- Bac d'injection de polyélectrolyte agitateur
- Indicateur des hydrocarbures (en cas de pollution)
- Armoire de l'indicateur



Figure IV.4 : Chambre de répartition

IV.4.2 Décanteurs

La station de traitement de Boudouaou est équipée de six décanteurs répartis entre deux filières chacune à trois décanteurs .le type de décanteur utilisé est le décanteur pulsateur lamellaire.

Chaque décanteur a les dimensions suivantes :

- longueur = 37m
- largeur = 1930m

-hauteur = 4.75m
-surface = 714.1m²

Chaque décanteur est équipé de :

- ✓ D'une conduite d'amenée de l'eau coagulée dans la cloche centrale de l'ouvrage
- ✓ D'un réseau ramifié en amiante-ciment, en fond d'ouvrage, pour la distribution de l'eau coagulée sur l'ensemble du radier
- ✓ De tranquillisateurs en V, également en amiante-ciment, au-dessus du réseau ramifié
- ✓ De packs lamellaires en partie supérieure de l'ouvrage
- ✓ D'un réseau de collecte (caniveaux béton) de l'eau décantée
- ✓ D'une cloche abritant un ventilateur de mise sous vide et de vannes automatiques assurant les pulsations (mise sous vide puis cassage du vide)
- ✓ D'un réseau de purges de boues à partir des concentrateurs à boues, de vannes de vidange de la cloche

L'eau arrive gravitairement de la chambre de répartition puis passe par une cloche à vide composée d'un pulsateur dont le rôle est la chasse-aspiration .ensuite, l'eau passe par une conduite de ramification (perforée) surmontées de tranquillisateurs qui stabilisent l'eau pour ne pas perturber le lit de boue. De là; l'eau traverse le lit de boue qui sépare entre le solide et le liquide et passe par les modules lamellaires qui sont des piègeurs et empêchent la pénétration des rayons solaires et finit par arriver aux goulottes d'eau clarifiée.



Figure IV. 5 : Décanteur pulsateur

IV.4.3 Filtre AQUAZUR «V»

La station de traitement de Boudouaou est équipée de (16) filtres répartis entre deux filières chacune à huit(8) filtres. Le type de filtre utilisé est «filtre AQUAZUR» de type «V». Chaque filtre AQUAZUR «V» a les dimensions suivantes :

-longueur=16.30m

-largeur=5*2m

-surface=163m²

L'eau est généralement distribuée au-dessus du sable par le déversoir d'entrée .elle traverse le sable où les matières en suspension sont retenus. Les buselures s'équipant le plancher collectent l'eau uniformément dans une chambre située sous le plancher et reliée au régulateur de niveau. Lorsque l'accumulation des impuretés conduit à une valeur préétablie de charge dans le lit filtrant, le filtre doit être lavé.

Il existe deux méthodes de lavage du filtre AQUAZUR'V'

- ✓ Manuelle assistée
- ✓ Semi-automatique

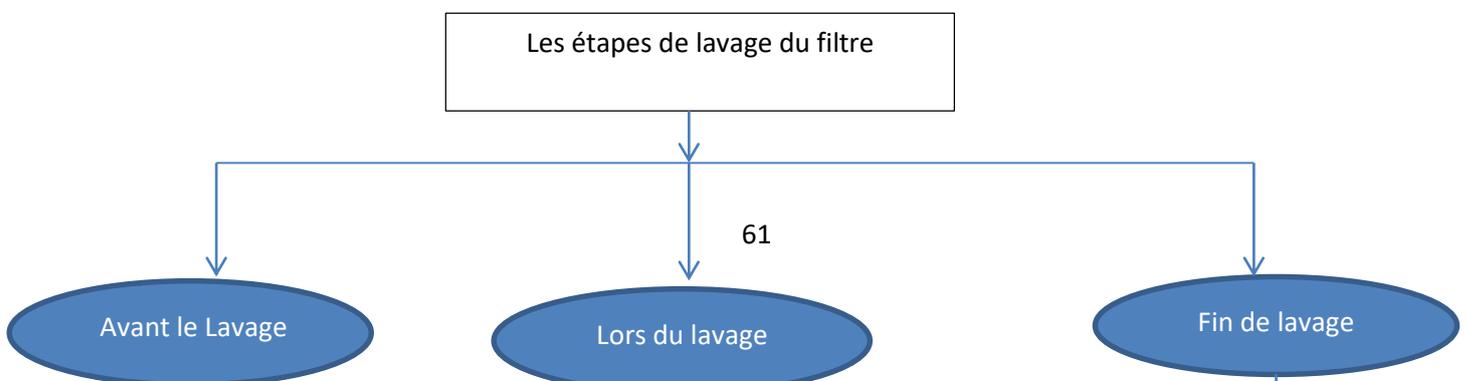
Le lavage du filtre est un lavage par retour simultané d'eau et d'air surpressé, il se fait comme suit :

- Abaissement du volume de l'eau au niveau du déversoir et donc vidange du filtre
- Détachement et évacuation des impuretés agglomérées grâce à l'air compressé et l'eau distribués par les buselures placées au-dessous de la couche sableuse
- Rinçage ou balayage de surface au moyen d'une goulotte latérale en 'V' qui permet de pousser à l'égout les eaux de lavage
- les eaux de rinçage sont recyclées afin d'économiser les produits chimiques
- l'eau filtrée est directement transformée vers les galeries des filtre.



Figure IV.6 : Filtre AQUAZU

IV.4.3.1 Les étapes de lavage du filtre



Réservoirs de stockage

IV.4.4 Réservoirs :

La station dispose de quatre(04) réservoirs semi-enterrés dont deux(02) avec une capacité de 50.000 m³ chacune qui sont destinés à stocker l'eau traité de la station de boudouaou

- Et deux (02) autres réservoirs de 25.000 m³ chacun qui accueillent les eaux de TAKSEBT (traitées au niveau de la station d'eau potable de Tizi-Ouzou)

Tableau IV. 2 : les données hydrauliques des réservoirs de stockage

Étapes de traitement	Ouvrages	Conditions opérationnelles	Remarques
Désinfection finale et stockage des eaux traitées	Deux compartiments de contact chicané Volume=2*50 000 m ³	Tps séjour = 6 h – 4,7 h	Injection de chlore (injection chaux sur la chambre de répartition vers les deux compartiments de réservoir)

Chapitre V

Matériel et méthodes

V Matériel et méthodes

Introduction

Ce chapitre présentera les réactifs, produits chimiques et matériels utilisés dans notre étude, ainsi que la méthodologie expérimentale adoptée. Les procédures de préparation des solutions, les techniques de mesure et d'analyse utilisées pour évaluer la qualité physico-chimique des eaux avant et après le traitement. L'effet du prétraitement et des conditions opératoires, tels que la concentration initiale des produits (coagulant, floculant,) et le pH, turbidités ont également été étudiés. En conclusion, nous décrivons les essais de jars test réalisés pour étudier l'élimination de l'aluminium et de l'oxydation de la matière organique

V.1 Les appareillages et les méthodes d'analyse

Différents méthodes d'analyse ont été utilisées pour étudier divers paramètres. Les caractéristiques physico-chimiques de ces eaux sont déterminées à l'aide des méthodes d'analyse standard décrites dans les protocoles de laboratoire du centre de traitement Boudouaou. Afin d'optimiser les essais de coagulation-floculation, plusieurs méthodes d'analyse ont été employées pour évaluer différents paramètres

V.1.1 Mesure du pH

La mesure du pH permet de déterminer l'acidité ou l'alcalinité d'une solution. Un pH mètre est composé d'une électrode de verre, de référence au calomel-KCl saturé et d'un dispositif potentiométrique.



Figure V.1: pH mètre

Mode opératoire

- ❖ Etalonner l'appareil avant la mesure, avec des solutions tampons à pH=7, pH=4 et après avoir rincé l'électrode en verre avec l'eau distillée
- ❖ Prendre environ 100 ml d'eau à analyser dans un bécher, tremper l'électrode dans le bécher. Laisser stabiliser un moment avec une faible vitesse d'agitation et noter le pH.

V.1.2 Spectrophotomètre

Le spectrophotomètre est un appareil qui mesure l'absorbance qui est définie par le ratio entre la lumière incidente I_0 qui traverse un milieu à une longueur d'onde λ et la lumière transmise I exprimé en logarithme de base 10



Figure V.2: Spectrophotométrie UV-visible

Mode opératoire

La mesure de l'absorbance sur spectrophotomètre se réalise selon les actions suivantes :

- ❖ Mettre en marche le spectrophotomètre on /off.
- ❖ Sélectionner le on mode absorbance(λ).
- ❖ Introduire la cuve référence (blanc) dans la porte cuve, et mettre à zéro l'absorbance.
- ❖ Programmer la longueur d'onde désirée.
- ❖ Enlever la cuve de référence.
- ❖ Introduire une à une les cuves des échantillons a mesuré et lire l'absorbance.

V.1.3 Turbidité

La mesure de la turbidité permet de préciser les informations visuelles sur l'eau, elle traduit la présence des particules en suspension dans l'eau (organismes microscopiques, argile). Cette mesure se fait avant et après chaque phase de traitement (Jar test, décantation, filtration...) par un turbidimètre

Mode opératoire

- ❖ Rincer la cellule de mesure avec l'échantillon à analyser (avant mesure).
- ❖ Remplir la cuve sans faire de bulle, visser le bouchon et sécher la cuve
- ❖ Insérer la cuve dans le puits de mesure en plaçant la flèche de la cuve face au repère
- ❖ Fermer le capot de l'appareil, appuyer sur (**ENTRER**) et lire la valeur



Figure V.3: turbidimètre

V.1.4 Jar test

Procédure d'essais de coagulation floculation (Jar test) pour la détermination des doses optimales du coagulant et floculant. Ce test permet en outre de visualiser la floculation et de connaître ses effets aussi bien sur l'eau décanté que sur la boue

Mode opératoire

A des volumes identiques d'eau à traiter, on injecte des quantités croissantes de coagulant de façon à déterminer la dose permettant d'obtenir une eau de meilleure qualité possible

Une fois la dose optimale de coagulant obtenue, à des volumes identiques d'eau (avec dose optimale de coagulant) à traiter, on injecte des quantités croissantes de floculant de façon à déterminer la dose permettant d'obtenir une eau clarifiée de meilleure qualité possible

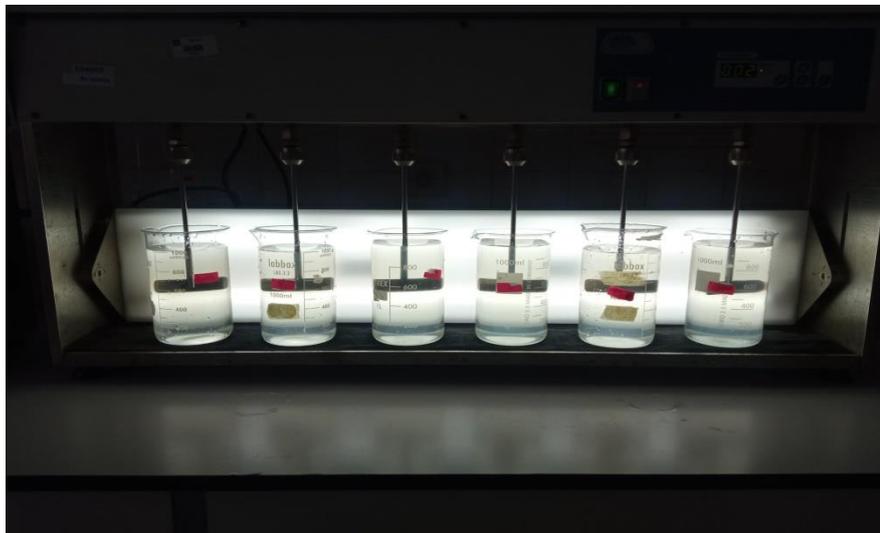


Figure V.4: Essaie de jar test

V.1.4.1 Détermination de la dose optimale en coagulant :

- Mettre le Jar test dans un endroit protégé du soleil, de la chaleur, des courants d'air et des vibrations

- Agiter l'échantillon prélevé et remplir chaque bécher du Jar test d'un litre d'eau à tester, mettre les pales d'agitation en place
- Noter la température, pH, turbidité, conductivité, UV de l'eau brute
- A l'aide d'une pipette graduée, ajouter le coagulant le plus rapidement possible et de manière reproductible dans chaque bécher
Les doses appliquées dans chaque bécher sont croissantes de façon à «encadrer» la dose optimale présumée
L'écart entre deux doses successives, le coagulant doit être suffisant pour obtenir des variations significatives de la qualité de l'eau décantée (exemple : une différence de 10 mg /l entre chaque bécher...)
- Démarrer l'agitation à la vitesse de 180 tours/min les pales et leur vitesse de rotation doivent être identiques dans tous les béchers
- Déclencher le chronomètre($t=0$)
- Après 2 min ($t=2\text{min}$) d'agitation rapide (dispersion du réactif, coagulation), réduire la vitesse de rotation des pales à 40 tours/min (agitation lente). Dans tous les cas, la durée d'agitation (rapide puis lente) ne doit pas excéder 20 min
- Au temps $t=20$ min, relever les pales des agitateurs (doucement en prenant soin de ne pas casser les floccs formés) en respectant un décalage de 15 à 30 s entre chaque bécher
- Attendre 45 min de décantation .ce temps doit être suffisant pour obtenir une bonne décantation des floccs mais pas trop long pour conserver de la qualité des eaux traitées(en particulier la turbidité)
- Prélever, à l'aide d'un siphon 100 ml dans chaque bécher suivant le schéma suivant en veillant à ne pas siphonner la surface de l'eau
- Homogénéiser (mélanger manuellement) chaque échantillon d'eau siphonner et procéder aux analyses suivantes selon les objectifs du traitement :
Pour les eaux après coagulation :
 - turbidité
 - pH après coagulation
 - UV₂₅₄

V.1.4.2 Détermination de la dose optimale en flocculant

- Vider les béchers, rincer et remplir chacun avec un litre d'eau à analyser
- Injecter la dose optimale de coagulant obtenue dans chaque bécher
- Déclencher le chronomètre($t=0$)
- Démarrer l'agitation à la vitesse de 180 tours/ min pendant 90 secondes. Les pales et leur vitesse de rotation doivent être identiques dans tous les béchers
- Arrêter l'agitation et injecter le flocculant le plus rapidement possible et de manière reproductible dans chaque bécher
Les doses appliquées dans chaque bécher sont croissantes de façon à «encadrer» la dose optimale présumée
L'écart entre deux doses successives de flocculant doit être suffisant pour obtenir des variations significatives de la qualité de l'eau décantée (exemple: une différence de 0.025 mg/l entre chaque bécher)

- Redémarrer l'agitation à 180 tours/ min pendant 30 secondes, puis réduire la vitesse à 40 tours/ min (agitation lente). dans tous les cas, la durée d'agitation (rapide puis lente) ne doit pas excéder 20 min
- Au temps $t=20$ min, relever les pales des agitateurs (doucelement en prenant soin de ne pas casser les flocs formés) en respectant un décalage de 15 à 30 s entre chaque bécber
- Homogénéiser (mélanger manuellement) chaque échantillon d'eau siphonner et procéder aux analyses suivantes selon les objectifs du traitement :
Pour les eaux après floculation:
 - turbidité
 - pH après floculation
 - UV₂₅₄

V.2 Autres équipements

Nous avons utilisé d'autres matériels et accessoires pour les manipulations et la précision des mesures

- Une balance électronique
- Les bécbers
- Pipette, pissette
- Erlenmeyer

V.3 Suivi de l'élimination de l'aluminium :

Afin de suivre l'élimination de l'aluminium lors des essais de coagulation-floculation, nous avons effectué les préparations et les essais suivants :

V.3.1 Les réactifs :

- **Préparation de la solution mère de sulfate d'alumine**

Une solution mère de 1 g par 100 ml est préparée périodiquement par dissolution du sulfate d'alumine ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3, 18\text{H}_2\text{O}$) dans l'eau distillée.

- On pèse 1 g de sulfate d'alumine.
- On prend une fiole de 100 ml, la remplir d'eau distillée, puis transvaser dans un bécber.

- **Préparation de la solution mère de poly-électrolyte**

Une solution mère de 0.5 g par 100 ml est préparée périodiquement dans l'eau distillée, puis réaliser une dilution de 1 /100

- On pèse 0.5 g de polymère.
- On prend une fiole de 100 ml, la remplir d'eau distillée, puis la transvaser dans un bécber.
- On fait dissoudre les 0.5 g de polymère dans l'eau distillée à l'aide d'un agitateur magnétique.
- On prélève 1 ml de cette solution à l'aide d'une pipette graduée et l'injecter dans une fiole de 100 ml, puis compléter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.

V.3.2 Appareillage :

- ✓ Matériel courant de laboratoire (fioles, pipettes, bécher)
- ✓ spectrophotomètre
- ✓ turbidimètre
- ✓ pH mètre
- ✓ Jar test
- ✓ Balance électronique de précision

Les essais d'élimination d'aluminium par coagulation floculation «jar test» sont réalisés en suivant trois étapes

- Une agitation rapide de 2 minutes à une vitesse de 180 tr/ min
- Une agitation lente durant 18 minutes à une vitesse de 40 tr/ min
- Une phase de décantation de 45 min

V.3.3 Les expériences pour éliminer l'aluminium

Après avoir déterminé les doses optimales du coagulant et du floculant (poly électrolyte), nous allons déterminer le pH optimale correspondant à plus faible concentration d'aluminium résiduel.

V.3.3.1 Recherche du pH optimale de coagulation-floculation :

- ✓ Prendre 6 béchers de jar test et remplir à 1000 ml de l'eau brute.
- ✓ Fixer le pH (6, 6.5, 7, 7.2, 7.5 ,8), en utilisant le H₂SO₄ (0,1 N) et le NaOH (0,1 N)
- ✓ On injecte la dose optimale 110 mg/l de coagulant (sulfate d'alumine)
- ✓ On injecte la dose optimale 0.15 mg/l de floculant (polymère)

V.3.3.2 Recherche de la dose du sulfate d'alumine à pH (7, 7.2, 7.5, 8)

- ✓ Remplir les 6 béchers de jar test à 1000 ml de l'eau brute
- ✓ Fixer le pH dans les 6 béchers à pH (7, 7.2, 7.5, 8)
- ✓ Introduire des doses croissantes de sulfate d'alumine (40, 60, 80, 100, 110, 120)
- ✓ On injecte la dose 0.15 mg/ l de floculant (polymère)

V.3.4 Dosage d'aluminium par kit LCK 301 :**V.3.4.1 Principe :**

Le Chromazurol S forme avec l'aluminium en milieu tampon acétate légèrement acide une laque de coloration verte.

Préparation des échantillons

pH échantillon 2.5-3.5

V.3.4.2 Analyse de l'échantillon :

1. pipeter 2 ml de la solution A (LCK301 A) les introduire dans le tube à LCK301.
2. Pipeter 3 ml de L'échantillon, les introduire dans le tube à LCK301
3. Introduire dans le tube à LCK301, une cuillère rase du réactif B (LCK301 B)
4. Fermer la cuve et mélanger le contenu jusqu'à dissolution du lyophilisat

5. Attendre 25 min, bien nettoyer l'extérieur de la cuve et mesurer

V.3.4.3 Mesurer de l'échantillon dans le spectrophotomètre :

1. Afficher la fenêtre menu principale du spectromètre DR500
2. Introduire le tube du blanc (ZERO LCK301) dans la porte cuvette adéquate au tube de LCK301
3. Attendre quelque seconde (le spectromètre affiche L1)
4. Introduire le tube de l'échantillon, lire directement la concentration en mg/l

N.B : le spectrophotomètre est réglé automatiquement à la longueur d'onde de 620 nm pour l'analyse de l'aluminium.

N.B : pour mesurer l'aluminium résiduelle on 'a filtré 100 ml de l'échantillon sur sable .

V.4 Elimination la matière organique par le permanganate de potassium :

1^{er} essai taux d'abattement de la matière organique en fonction de différentes doses de sulfate d'alumine (40, 60, 80, 100, 110, 120) avec la dose optimale de permanganate de potassium (KMnO₄) (0,2 mg/l)

- **Mode opératoire**

- Prendre 6 béchers de 100 ml et remplir par siphonage de l'eau à analyser (après la coagulation-floculation et décantation).
- Mesurer la turbidité et le pH
- Mesurer l'indice du KMnO₄ de chaque bécher

- **Après filtration**

- Prendre les 6 béchers de l'eau traitée par coagulation-floculation et filtrer chaque bécher sur le sable.
- Nous complétons le reste de l'analyse comme mentionné précédemment.

2^{em} essai recherche de la zone du pH (5,5. 6,5. 7,5. 8) pour l'élimination de la matière organique par le permanganate de potassium (KMnO₄) (0,2 mg/l) avec la dose optimale du sulfate d'alumine (110 mg/l)

- **Mode opératoire**

- Prendre 4 béchers du jar test et remplir à 1000 ml de l'eau brute.
- Nous ajustons le pH à des valeurs croissantes (5,5. 6,5. 7,5. 8).
- Après on démarre le procédé de coagulation-floculation et décantation.
- Prendre 4 béchers de 100 ml et remplir par siphonage de l'eau à analyser (après la coagulation-floculation et décantation).
- Mesurer l'indice de KMnO₄ de chaque bécher.

- **Après filtration**

- Prendre les eaux traitées par coagulation-floculation décantation, et les filtrer sur le sable.
- Nous complétons le reste de l'analyse comme mentionné précédemment.

V.4.1 Détermination de la matière organique (l'indice du KMnO_4)

V.4.1.1 Objectif

Le protocole décrit la méthode de l'indice du KMnO_4 ou « oxydation », permettant d'évaluer la concentration en matières organiques et matières inorganiques oxydables dans des eaux naturelles.

V.4.1.2 Domaine d'application

La méthode est principalement utilisée pour des eaux destinées à la consommation humaine, eaux minérales naturelles, eaux de source, ainsi qu'aux eaux de piscine.

Elle est applicable à des eaux ayant une concentration en ions chlorures inférieure à 300 mg/l.

Les échantillons ayant un indice de permanganate supérieur à 10 mg/l doivent être dilués avant analyse.

La limite de la gamme optimale de l'essai est de 0,5 mg/l.

- Application

➤ Principe

- Chauffage d'un échantillon en présence d'une quantité connue de permanganate de potassium et d'acide sulfurique pendant une période donnée (10 min).
- Réduction d'une partie du permanganate par les matières oxydables présentes dans l'échantillon.
- Détermination de l'excès de permanganate par addition d'une solution d'oxalate, suivi par un titrage de l'oxalate en excès par le permanganate.

➤ Réactifs

- Acide sulfurique (2 mol/l)
- Permanganate de potassium (KMnO_4)
- Oxalate de sodium 10%

➤ Appareillage

- Plaque chauffante
- Agitateur mécanique
- Burette graduée
- Matériel courant de laboratoire (fioles, pipette, béchers, Éprouvette graduée)

➤ Mode opératoire

- Prendre 100 ml d'eau à analyser
- Ajouter 20 ml de H_2SO_4 (2 mol/l)
- Porter à l'ébullition pendant 10 min
- Ajouter 20 ml de permanganate de potassium (10%)
- Retirer les béchers
- Ajouter 20 ml d'oxalate de sodium (10%) jusqu'à décoloration totale
- Titrer à burette graduée avec KMnO_4 (10%) jusqu'à coloration rose claire

NB : un essai à blanc est 2 fois.

➤ Expression des résultats

$$[\text{MO}] \text{ mg/l} = (V_1 - V_0) \times F/V_2$$

V₀ : est le volume en millilitres, de la solution de permanganate consommé dans le dosage du blanc.

V₁ : est le volume en millilitres, de la solution de permanganate consommé dans le dosage de la prise d'essai.

V₂ : est le volume en millilitres, de la solution de permanganate consommé lors de la vérification de la solution titrant.

F : est le facteur correctif utilisé, compte tenu des unités pour exprimer le résultat en milligrammes d'oxygène par litre. F est égal à 1

V.5 Elimination la matière organique par le chlore actif :

1^{er} essai : Suivi du taux d'abattement de la matière organique en fonction de différentes doses de sulfate d'alumine (40, 60, 80, 100, 110, 120) avec la dose optimale de chlore (Cl₂) (1 mg/l)

- **Mode opératoire**

- Prendre 6 béchers de 100 ml et remplir par siphonage de l'eau à analyser (après la coagulation-floculation et décantation).
- Mesurer la turbidité et le pH
- Mesurer l'indice du KMnO₄ de chaque bécher

- **Après filtration**

- Prendre les eaux traitées par coagulation-floculation et décantation et les filtrer sur le sable.
- Nous continuons le reste de l'analyse comme mentionné précédemment.

2^{em} essai : Recherche de la zone du pH (5,5. 6,5. 7,5. 8) pour l'élimination de la matière organique par le chlore (Cl₂) (1 mg/l) avec la dose optimale du sulfate d'alumine (110 mg/l)

- **Mode opératoire**

- Prendre 4 béchers de jar test et remplir à 1000 ml de l'eau brute.
- Nous ajustons le pH à des valeurs croissantes (5,5. 6,5. 7,5. 8).
- Après on démarre le procédé de coagulation-floculation et décantation.
- Prendre 4 béchers de 100 ml et remplir par siphonage de l'eau à analyser (après la coagulation-floculation et décantation).
- Mesurer l'indice du KMnO₄ de l'eau de chaque bécher

- **Après filtration**

- Prendre les eaux traitées par coagulation-floculation et décantation et les filtrer sur le sable.
- Nous complétons le reste de l'analyse comme mentionné précédemment.

V.5.1.1 Détermination du chlore actif :

Le dosage de la solution d'eau javel est réalisé comme suit :

Introduire dans un Erlenmeyer :

Sous agitation :

- 100 ml d'eau distillée.
- 5 ml acide acétique pur.
- 1 g d'iodure de potassium.
- 10 ml de la solution Javellisant, coloration brune.
- Titrer avec du thiosulfate de sodium N/10 (0,1 N) jusqu'à l'obtention de la couleur jaune pâle.
- Ajouter 1 g d'amidon ou THIODENE..... coloration bleue.
- Continuer la titration jusqu'à disparition de la coloration bleue.

Expression des résultats en g/l :

La teneur en gramme par litre en chlore actif est donnée par :

$$\text{Concentration en Cl}_2 \text{ actif} = \frac{N \times V \times 35.5 \times 10}{100} \text{ (g/l)}$$

N : la normalité du thiosulfate utilisée pour le dosage.

V : le nombre de millilitres de thiosulfate utilisé pour le dosage.

35.5 : la masse molaire de Cl.

100 : prise d'essai de l'échantillon.

Expression des résultats en degré chlorométrique :

$$\frac{\text{conc Cl}_2}{3.17} = Cl$$

Chapitre 6 :

Résultats et discussions

Coagulation et Flocculation :

Caractéristique de l'eau Brute :

Tableau VI.1 : Caractéristique de l'eau brute.

Turbidité (NTU)	pH	Mat.Org (mgO ₂ /l)	UV ₂₅₄	Al ³⁺ total (mg/l)
40	7,07	5	0,263	0,026

Recherche de la dose optimale du coagulant (Sulfate d'alumine) :

Tableau VI.2 : Recherche de la dose optimale du coagulant (Sulfate d'alumine).

	1	2	3	4	5	6
Dose sulfate d'alumine (mg/l)	90	100	110	120	130	140
Turbidité (NTU)	5,4	3,12	2,07	2,31	3,1	3,25
pH			6,29			
UV ₂₅₄			0,08			
Taux d'abattement de la turbidité %	86%	92%	95%	94%	92%	92%

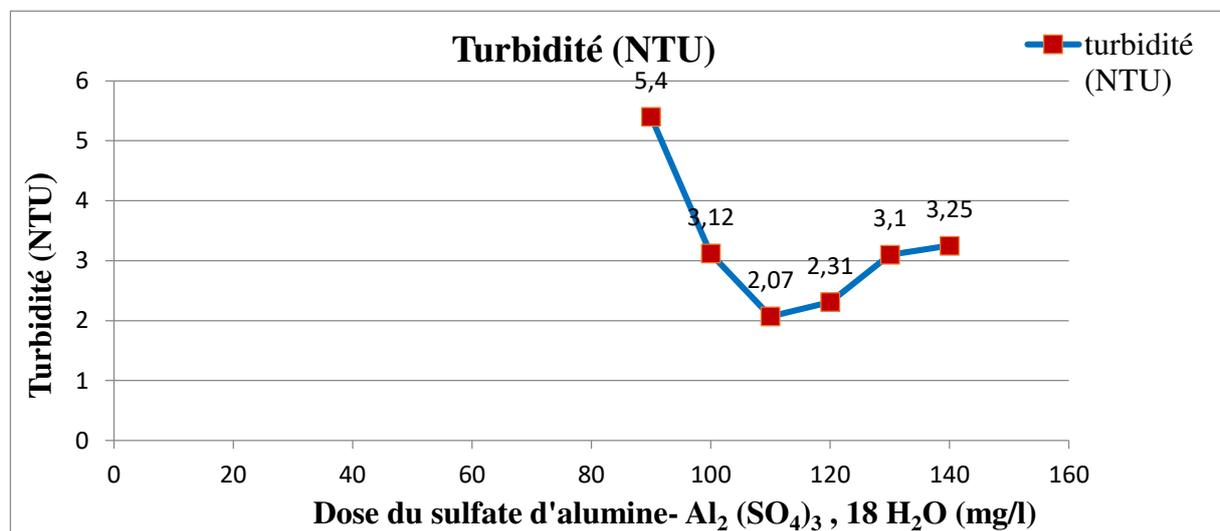


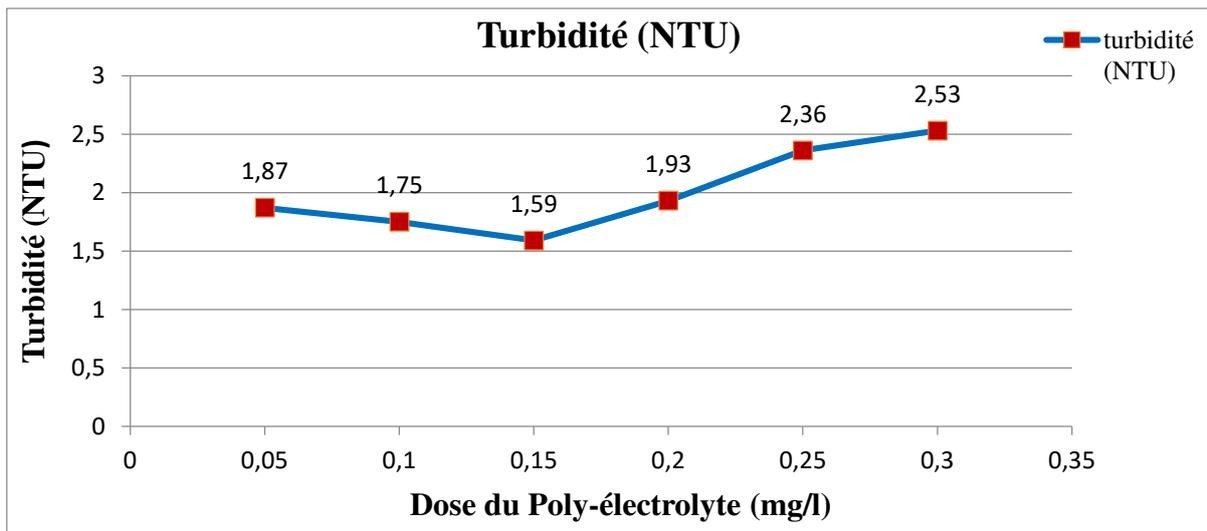
Figure VI.1 : la variation de la turbidité en fonction de la dose du sulfate d'alumine.

Interprétation :

D'après les résultats du tableau VI.2 obtenus, la dose optimale du coagulant sulfate d'alumine est de 110 mg/l, avec un très bon taux d'abattement de la turbidité (94%).

Recherche de la dose optimale du Flocculant (Poly- électrolyte) :**Tableau VI.3 :** recherche de la dose optimale du flocculant poly-électrolyte.

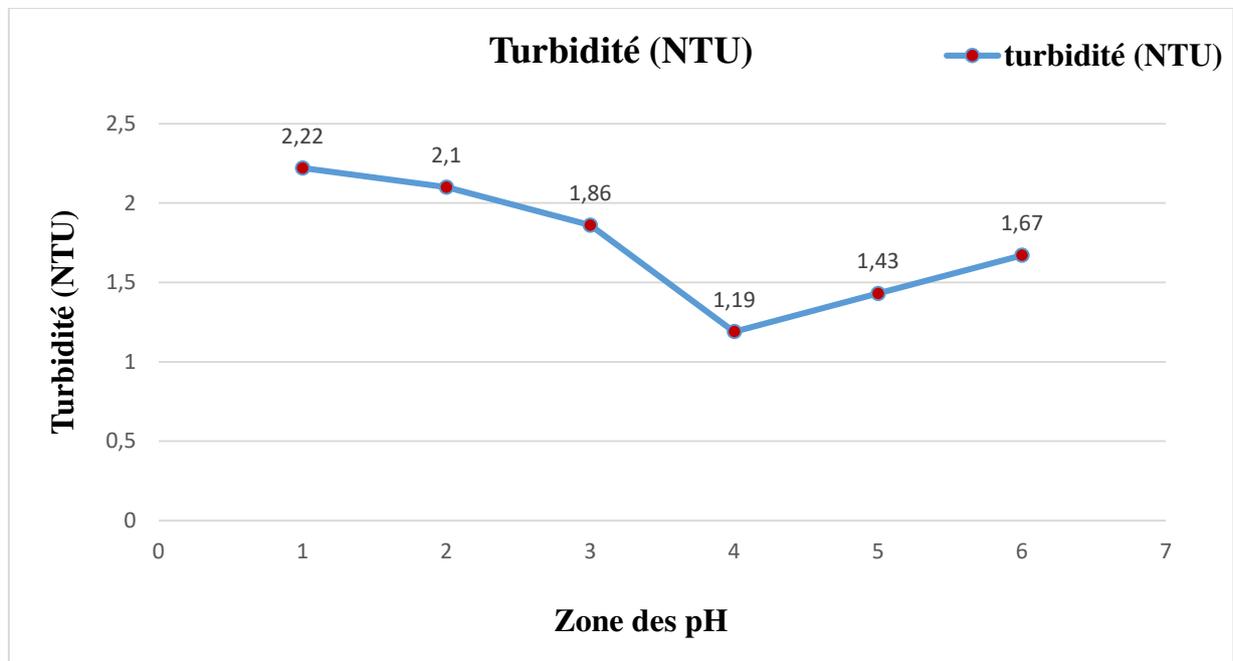
	1	2	3	4	5	6
Dose sulfate d'alumine (mg/l)	110	110	110	110	110	110
Dose Poly-électrolyte (mg/l)	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
Turbidité (NTU)	1,87	1,75	1,59	1,93	2,36	2,53
pH			6,25			
Aluminium total (mg/l)			0,309			
Aluminium résiduel (mg/l)			0,03			
UV ₂₅₄			0,074			
Matière Organique (mgO ₂ /l)			2,8			
Taux d'abattement turbidité %	95%	95%	96%	95%	94%	93%

**Figure VI.2 :** la variation de la turbidité en fonction de la dose du poly-électrolyte.**Interprétation :**

D'après les résultats du tableau VI.3 obtenus, la dose optimale du flocculant (poly-électrolyte) est de 0,15 mg/l avec une amélioration du taux d'abattement (96%).

Recherche de la zone optimale du pH de coagulation :**Tableau VI.4 :** recherche de la zone optimale du pH de coagulation.

	1	2	3	4	5	6
Dose sulfate d'alumine (mg/l)	110	110	110	110	110	110
Dose Poly-électrolyte (mg/l)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
pH	6	6,5	7	7,3	7,6	8
Turbidité (NTU)	2,22	2,1	1,86	1,19	1,43	1,67
pH final	5,8	6,2	6,36	6,45	6,53	6,55
UV ₂₅₄			0,072			
Aluminium total (mg/l)	0,369	0,326	0,058	0,268	0,298	0,392
Aluminium résiduel (mg/l)	0,023	0,037	0,018	0,062	0,079	0,09

**Figure VI.3 :** La variation de la turbidité en fonction de la dose optimale du sulfate d'alumine.

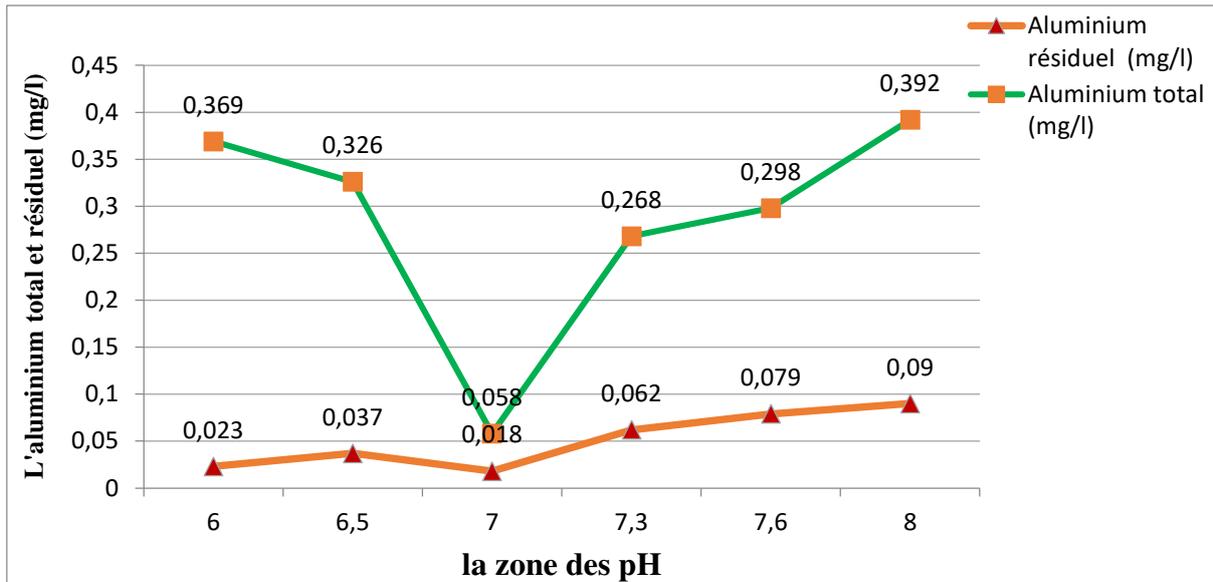


Figure VI.4: La variation de la concentration d'aluminium en fonction de pH.

Interprétation :

D'après les résultats obtenus dans le tableau VI.4, la zone optimale de pH de coagulation en fonction de l'abattement de l'aluminium c'est le pH = 7 avec une valeur d'aluminium résiduel de 0,018 mg/l, largement inférieur à la norme algérienne (0,20 mg/l).

Recherche de la dose du sulfate d'aluminium à différents pH :

A pH = 7 :

Tableau VI.5 : recherche de la dose du sulfate d'aluminium à pH = 7.

Dose sulfate d'alumine (mg/l)	40	60	80	100	110	120
Dose Poly-électrolyte (mg/l)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Turbidité (NTU)	6,53	3,24	1,73	1,5	1,77	1,47
pH final	6,73	6,52	6,41	6,33	6,31	6,23
Aluminium total (mg/l)	0,282	0,276	0,322	0,224	0,44	0,298
Aluminium résiduel (mg/l)	0,06	0,043	0,085	0,076	0,1	0,098

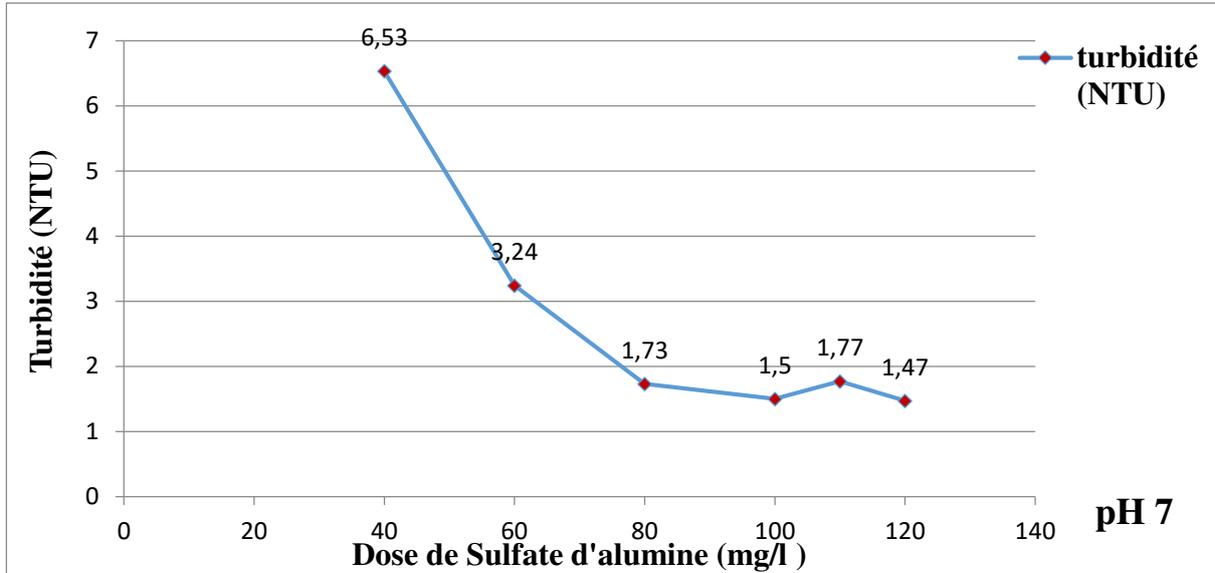


Figure VI.5 : la variation de la turbidité en fonction de la dose du sulfate d'alumine.

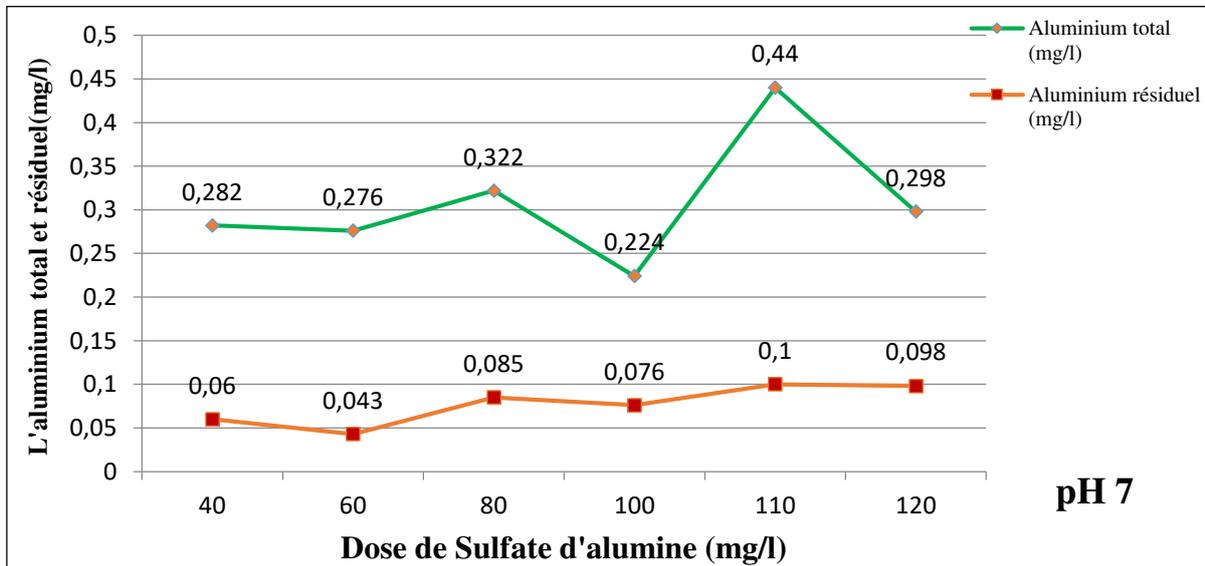


Figure VI.6 : concentration de l'aluminium totale et résiduel en fonction de dose du sulfate d'aluminium.

Interprétation :

D'après la figure VI.6 la dose optimale du sulfate d'aluminium correspondant à la concentration de l'aluminium résiduel (0,043 mg/l) est de 60 mg/l.

En effet la dose optimale du coagulant ne correspond pas à la turbidité minimale (3,24 NTU) mais reste inférieure à la valeur réglementaire (5 NTU).

A pH = 7,2 :

Tableau VI.6 : recherche de la dose du sulfate d'aluminium à pH = 7,2.

Dose sulfate d'alumine (mg/l)	40	60	80	100	110	120
Dose Poly-électrolyte (mg/l)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
pH final	6,72	6,64	6,5	6,36	6,34	6,25
Turbidité (NTU)	4,18	2,62	1,87	1,36	1,43	1,21
Aluminium total (mg/l)	0,355	0,255	0,241	0,21	0,211	0,101
Aluminium résiduel (mg/l)	0,184	0,098	0,06	0,1	0,076	0,044

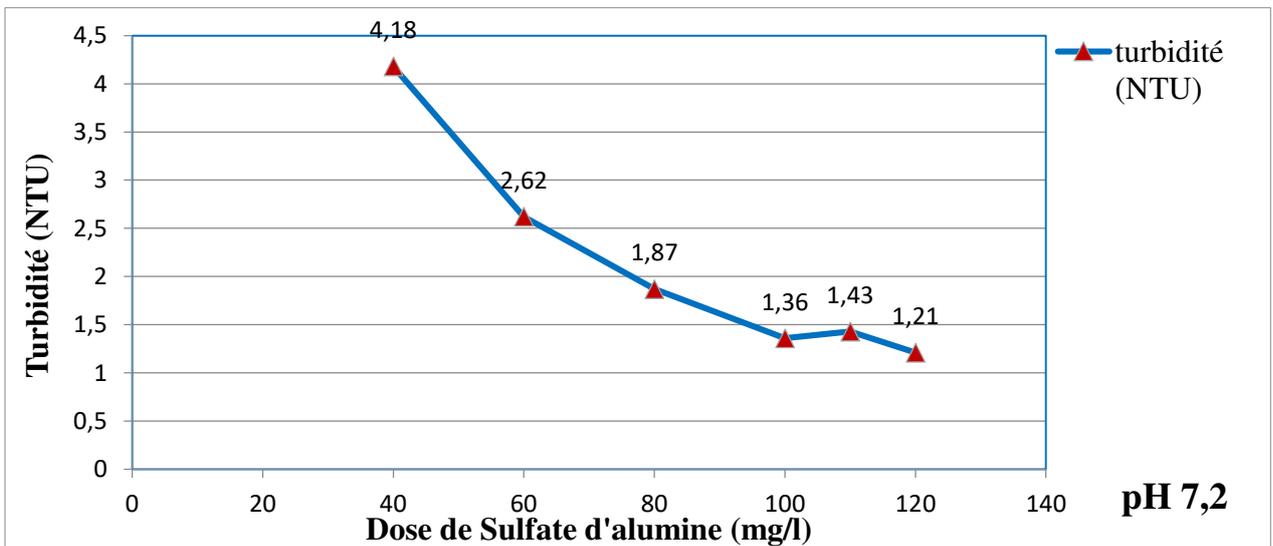


Figure VI.7 : la variation de la turbidité en fonction de la dose du sulfate d'alumine.

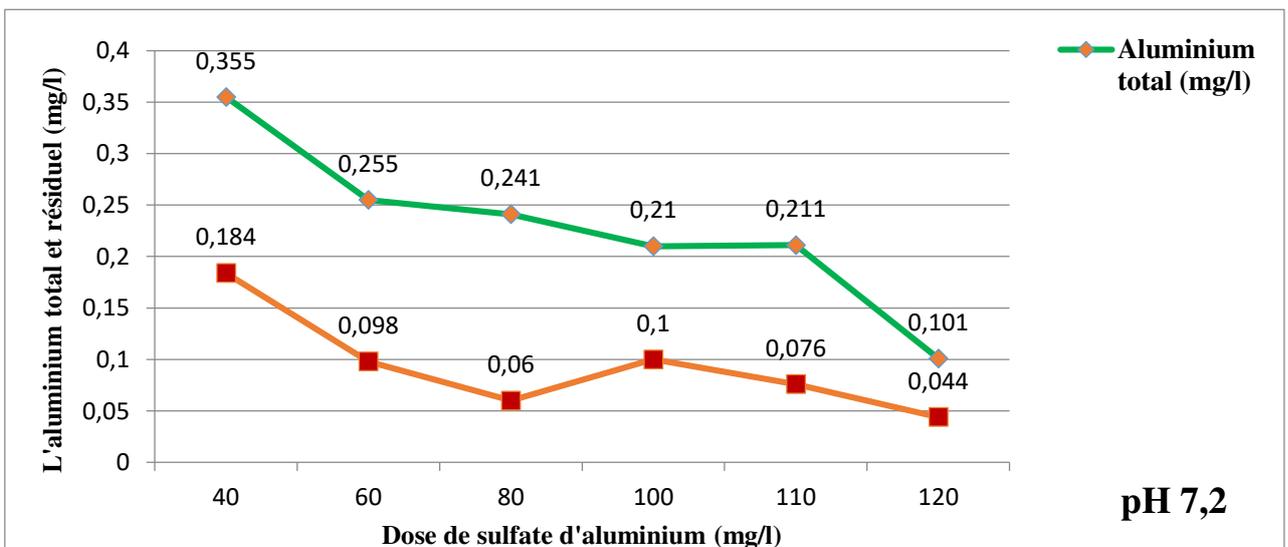


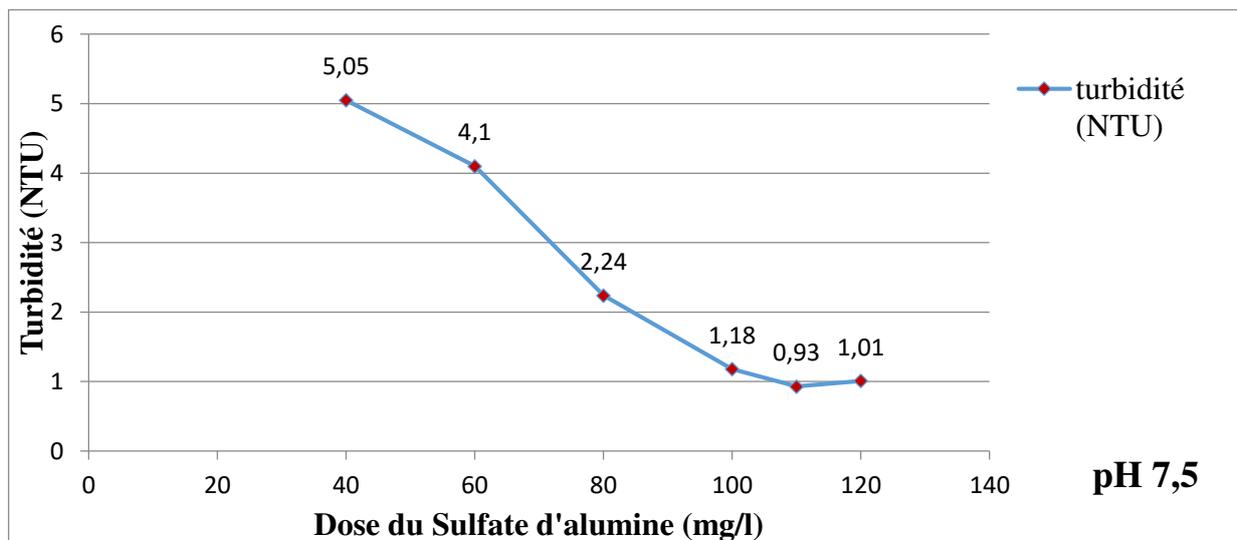
Figure VI.8 : concentration de l'aluminium totale et résiduel en fonction de la dose du sulfate d'aluminium.

Interprétation :

Pour un meilleur compromis entre la dose du coagulant et la concentration de l'aluminium résiduel, il serait plus intéressant pour des raisons économiques de travailler avec une dose du sulfate d'aluminium de 80 mg/l, correspondant à une concentration d'aluminium résiduel de 0,06 mg/l, bien que la concentration minimale de l'aluminium résiduel (0,044 mg/l) est obtenu pour une dose de coagulant de 120 mg/l.

A pH = 7,5 :**Tableau VI.7 :** recherche de la dose du sulfate d'aluminium à pH= 7,5.

Dose sulfate d'alumine (mg/l)	40	60	80	100	110	120
Dose Poly-électrolyte (mg/l)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Turbidité (NTU)	5,05	4,1	2,24	1,18	0,93	1,01
Aluminium total (mg/l)	0,46	0,418	0,342	0,317	0,23	0,21
Aluminium résiduel (mg/l)	0,078	0,063	0,042	0,04	0,037	0,036

**Figure VI.9 :** la variation de la turbidité en fonction de la dose du sulfate d'alumine.

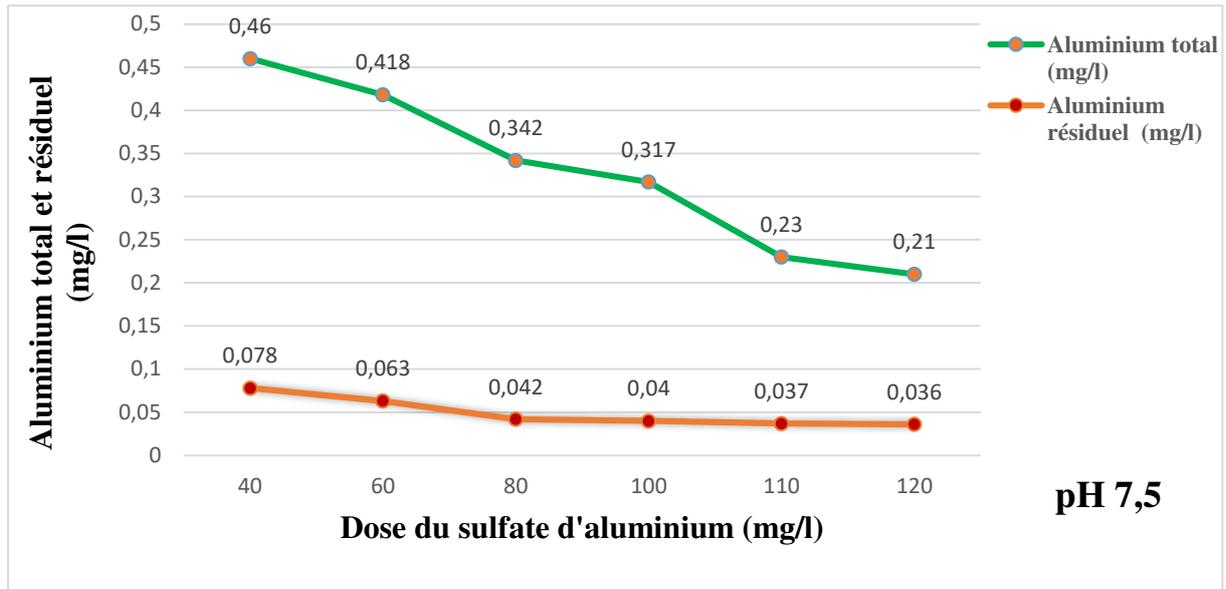


Figure VI. 10 : concentration de l'aluminium totale et résiduel en fonction de dose du sulfate d'aluminium.

Interprétation :

A partir de la figure VI.10, on remarque qu'à partir de la dose du sulfate d'alumine de 80 mg/l, on obtient des concentrations d'aluminium résiduel très proches entre 0,042 et 0,036 mg/l. Pour cela et pour des raisons économiques, il est préférable de travailler avec une dose de coagulant de 80 mg/l.

A pH = 8 :

Tableau VI.8 : recherche de la dose du sulfate d'aluminium à pH= 8.

Dose sulfate d'alumine (mg/l)	40	60	80	100	110	120
Dose Poly-électrolyte (mg/l)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Turbidité (NTU)	1,48	0,77	0,84	0,8	0,8	0,71
Aluminium total (mg/l)	0,351	0,365	0,396	0,359	0,542	0,331
Aluminium résiduel (mg/l)	0,052	0,044	0,055	0,054	0,07	0,056

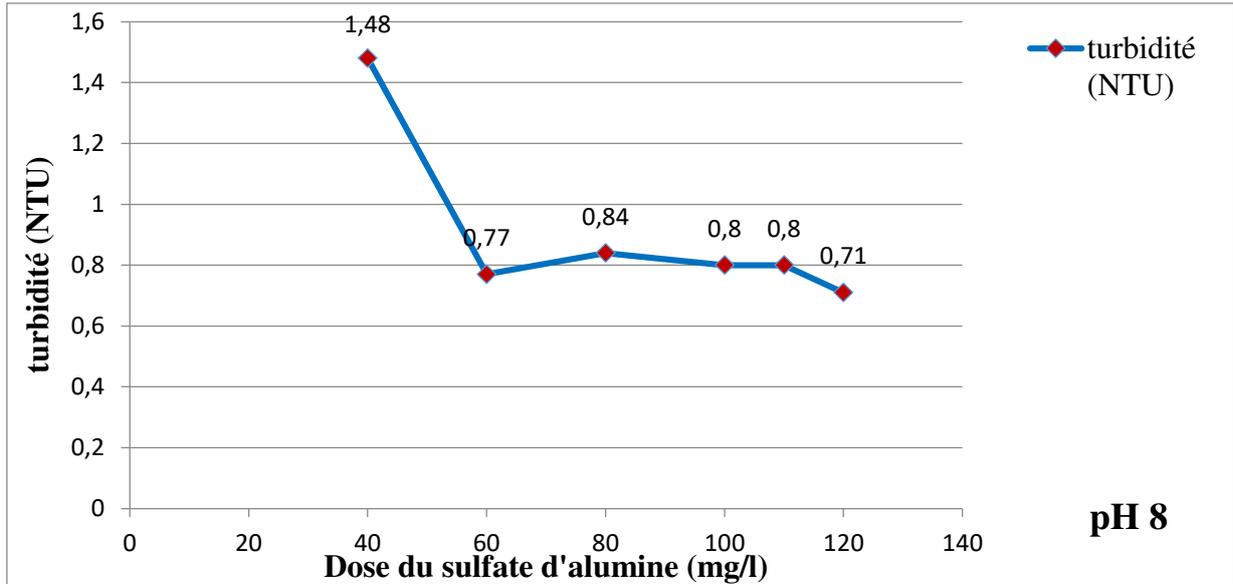


Figure VI.11: la variation de la turbidité en fonction de la dose du sulfate d'alumine.

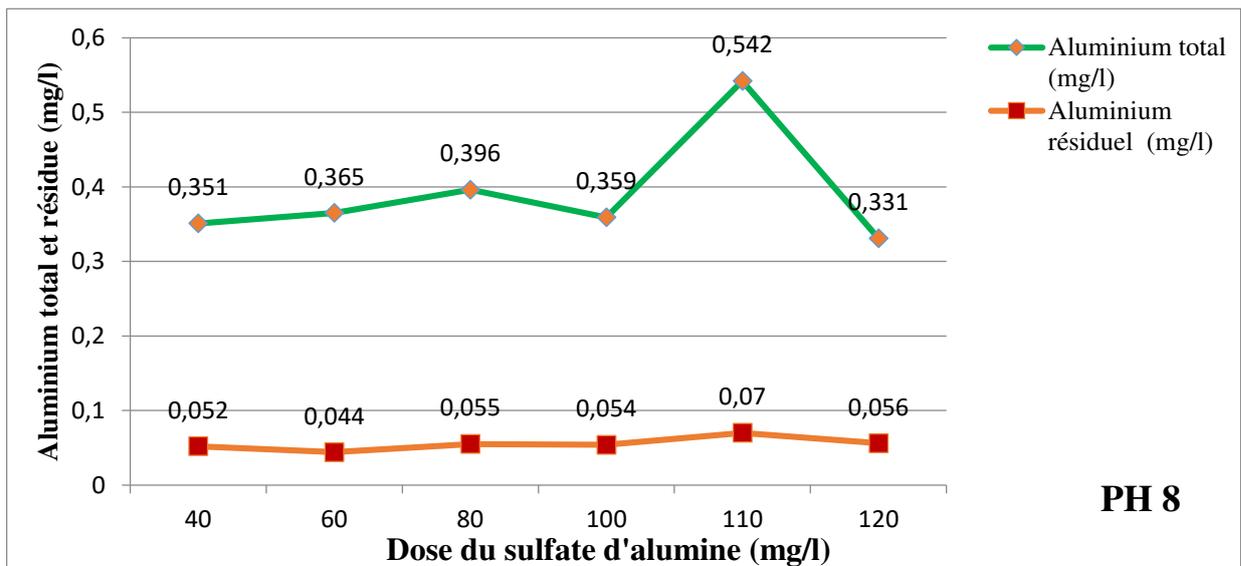


Figure VI.12 : concentration de l'aluminium totale et résiduel en fonction de la dose du sulfate d'aluminium.

Interprétation :

Nous remarquons dans ce cas que la dose optimale de coagulant (60 mg/l) correspond à la concentration minimale de l'aluminium résiduel (0,44 mg/l) et a une très faible turbidité (0,77NUT).

Oxydation la matière organique :

Par le chlore actif :

Recherche la dose optimale de chlore actif :

Tableau VI .9 : recherche la dose optimale du chlore actif.

Dose sulfate d'alumine (mg/l)	110	110	110	110	110	110
Dose Poly-électrolyte (mg/l)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
La dose de Cl ₂ (mg/l)	1	1,5	2	2,5	3	3,5
Turbidité (NTU)	2,3	1,3	0,9	1,6	1,3	1,2
pH final	6,4	6,37	6,35	6,36	6,37	6,36
Matière Organique (mgO ₂ /l)	1,96	2,24	2,71	2,66	2,33	3,01
Matière Organique après filtration	1,81	2,18	1,96	2,56	2,71	2,99

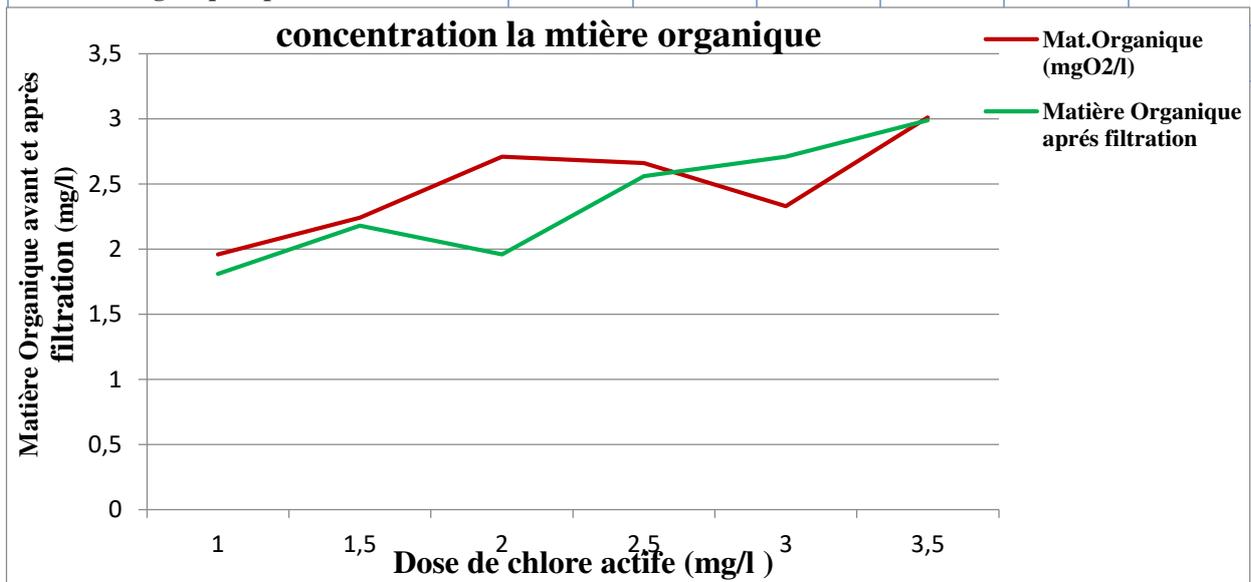


Figure VI.13 : la variation la matière organique en fonction du la dose du chlore actif.

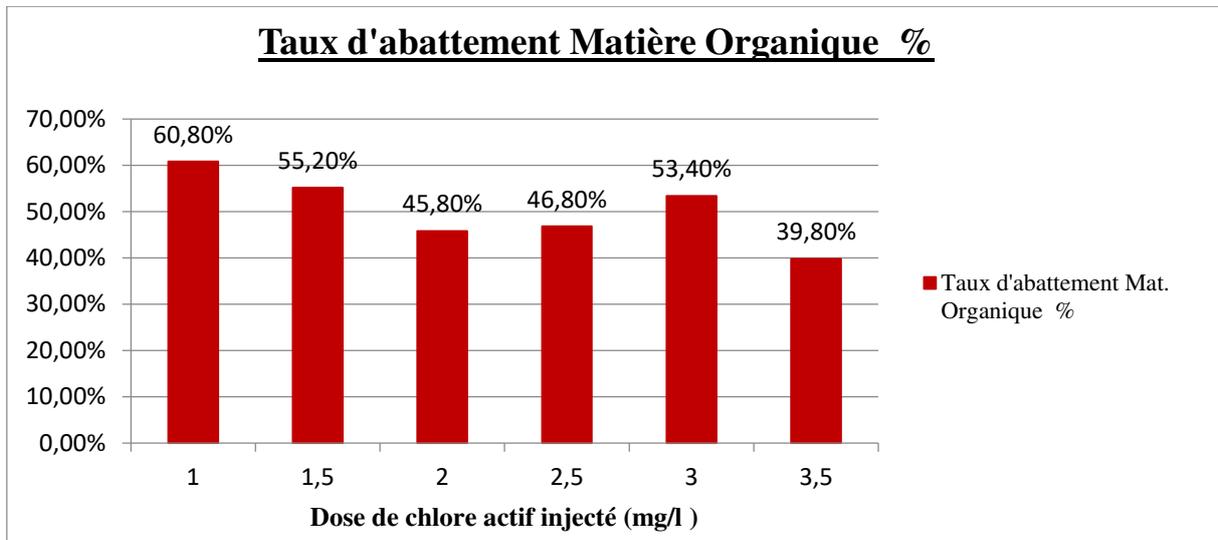


Figure VI.14 : taux d'abattement de matière organique en fonction les dose du chlore actif.

Interprétation :

L'utilisation du chlore actif pour l'oxydation de la matière organique peut conduire à la formation de sous-produits de la chloration (SPC) qui sont des composés organochlorés qui peuvent nuire à la santé humaine, surtout les trihalométhanes (THM) qui sont potentiellement cancérigène.

En effet lors de l'ajout de Cl₂ ce dernier peut interférer lors de l'analyse de la matière organique en réagissant avec l'oxalate de sodium qui a un caractère réducteur et qui va fausser les résultats. Pour cela, pour la suite de notre étude, nous travaillerons avec la dose minimale de chlore actif (1 mg/l).

Taux d'abattement de la Matière Organique en fonction de différentes doses de sulfate d'alumine avec la dose optimale du chlore actif :

Tableaux VI.10 : Taux d'abattement de la Matière Organique en fonction des différentes doses du sulfate d'alumine en présence du chlore actif (1mg/l).

Dose sulfate d'alumine (mg/l)	40	60	80	100	110	120
La dose optimale de Cl ₂ (mg/l)	1	1	1	1	1	1
pH final	6,76	6,76	6,5	6,38	6,41	6,31
Turbidité (NTU)	3,58	2,9	1,96	2,05	1,46	1,68
Matière Organique (mgO ₂ /l)	1,75	3,3	2,9	2,2	2,98	3,75
Matière Organique après filtration (mgO ₂ /l)	1,5					
Taux d'abattement Matière Organique %	65%	34%	60%	56%	40,40%	25%

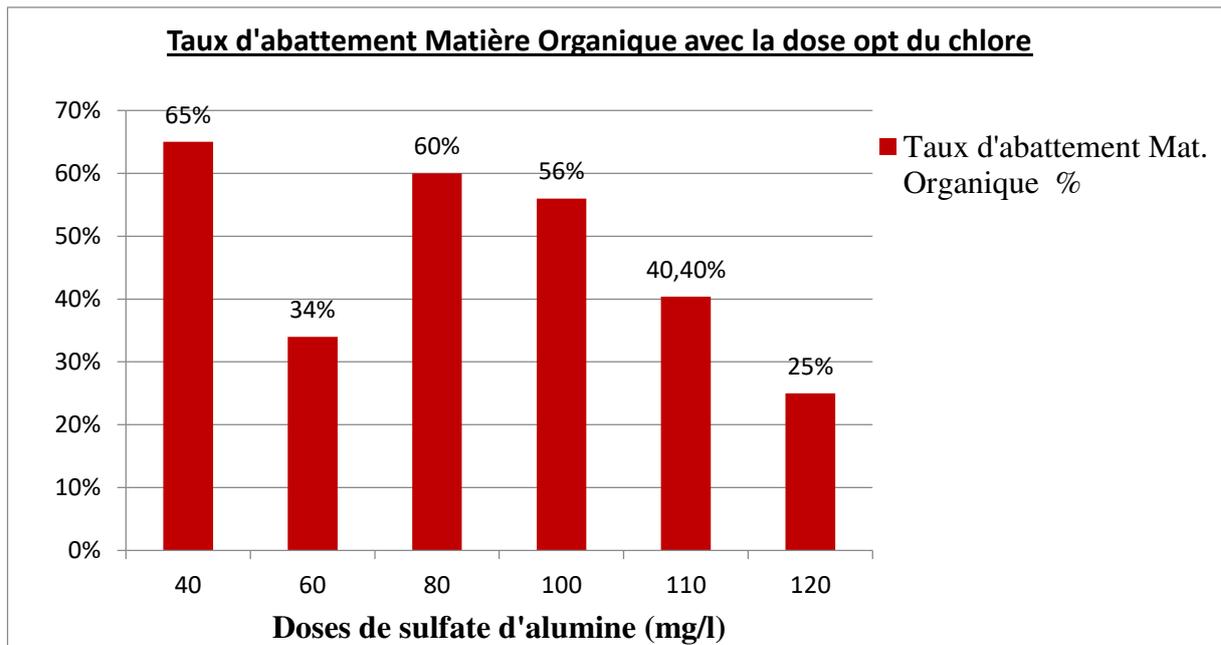


Figure VI.15 : taux d'abattement de matière organique en fonction des doses du sulfate d'aluminium.

Interprétation :

D'après la figure VI.15 la dose optimale du sulfate d'aluminium est de 40 mg/l, car elle permet d'assurer le meilleur taux d'abattement de la matière organique (65%).

On peut expliquer ce meilleur taux d'abattement par le fait qu'en plus de la matière organique éliminée par oxydation chimique, une partie de la matière organique particulaire est bien éliminée lors de l'utilisation de cette dose du sulfate d'aluminium (40 mg/l).

Recherche de la zone du pH pour l'élimination de la Matière Organique :

Tableaux VI.11 : Recherche de la zone du pH pour l'élimination de la Matière Organique.

Dose sulfate d'alumine (mg/l)	110	110	110	110
Dose Poly-électrolyte (mg/l)	0,15	0,15	0,15	0,15
pH initial	5,5	6,5	7,5	8
La dose de Cl ₂ (mg/l)	1	1	1	1
Matière Organique (mgO ₂ /l)	1,6	1,83	2,99	3,13
Matière Organique après filtration (mgO ₂ /l)	0,91	2,44	1	1,76

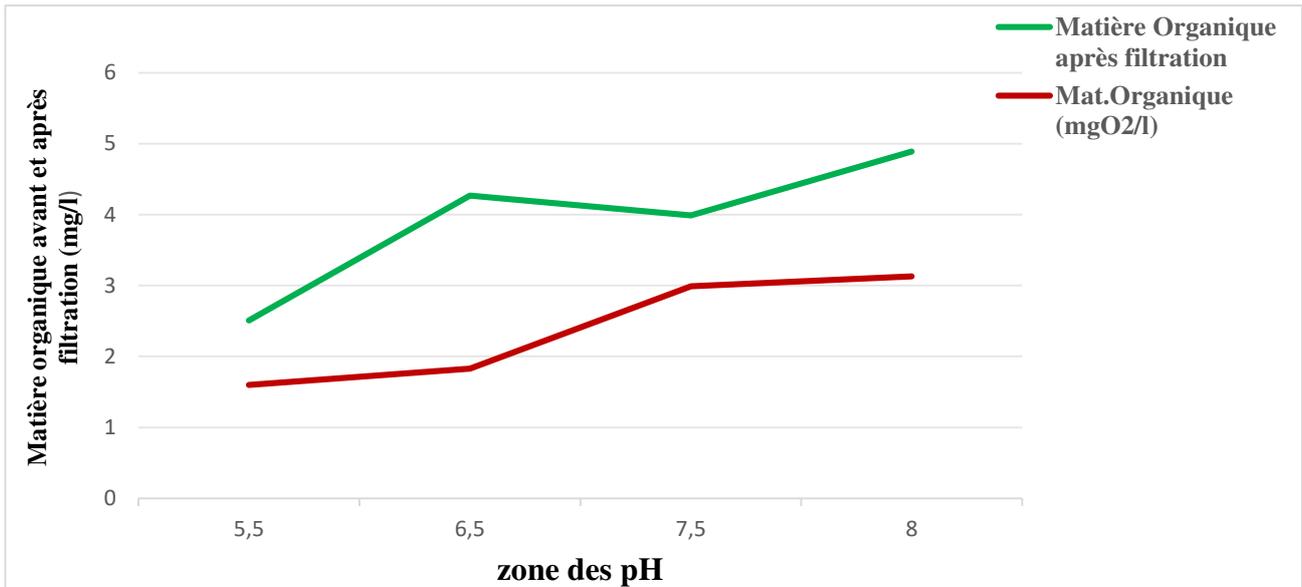


Figure VI.16 : la variation de la matière organique en fonction de la zone du pH.

Interprétation :

D'après les résultats de la figure VI.16, nous constatons que le meilleur pH = 5,5. Car il permet d'avoir la concentration minimale de matière organique (0,91 mg/l). Ce qui est logique car le pH acide favorise la formation de l'acide hypochloreux (HOCl), qui a un pouvoir oxydant plus élevé que l'ion hypochlorite (OCl⁻).

En effet on peut calculer le pourcentage de chaque forme en utilisant la formule suivante :

$$\frac{[HOCl]}{[HOCl] + [OCl^-]} = \frac{1}{1 + \frac{[OCl^-]}{[HOCl]}} = \frac{1}{1 + \frac{K_1}{[H^+]}}$$

T=20°C.

K₁=2.6×10⁻⁸ mol/l.

A pH = 8

$$\%(HOCl) = \left(\frac{1}{1 + \frac{2.6 * 10^{-8}}{10^{-8}}} \right) 100$$

$$\%(HOCl) = \left(\frac{1}{1 + 2.6} \right) 100 = 27.78\%$$

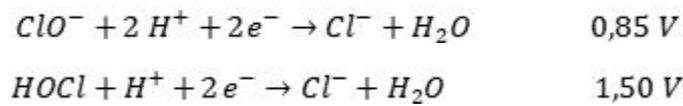
A pH = 5.5

$$\%(HOCl) = \left(\frac{1}{1 + \frac{2.6 * 10^{-8}}{10^{-5.5}}} \right) 100$$

$$\%(HOCl) = (0.99) * 100 = 99\%$$

Ainsi à pH 5,5 on a 99% de la forme la plus oxydante.

En effet



Par le permanganate de potassium :

Suivi de l'oxydation de la matière organique par les doses croissantes de permanganate du potassium KMnO₄ :

Tableau VI.12 : Recherche la dose optimale de permanganate de potassium KMnO₄.

Dose sulfate d'alumine (mg/l)	110	110	110	110	110	110
Dose Poly-électrolyte (mg/l)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Dose de permanganate de potassium (mg/l)	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2
Turbidité (NTU)	5,11	1,97	1,2	1,4	1,5	1,66
pH final	6,29	6,28	6,25	6,28	6,44	6,38
Matière Organique (mgO ₂ /l)	1,83	3,16	2,44	3,21	2,6	2,98
Matière Organique après filtration (mg/l)	1,3					
Taux d'abattement Matière Organique %	63,40%	36,80%	51,20%	35,80%	48%	40,40%

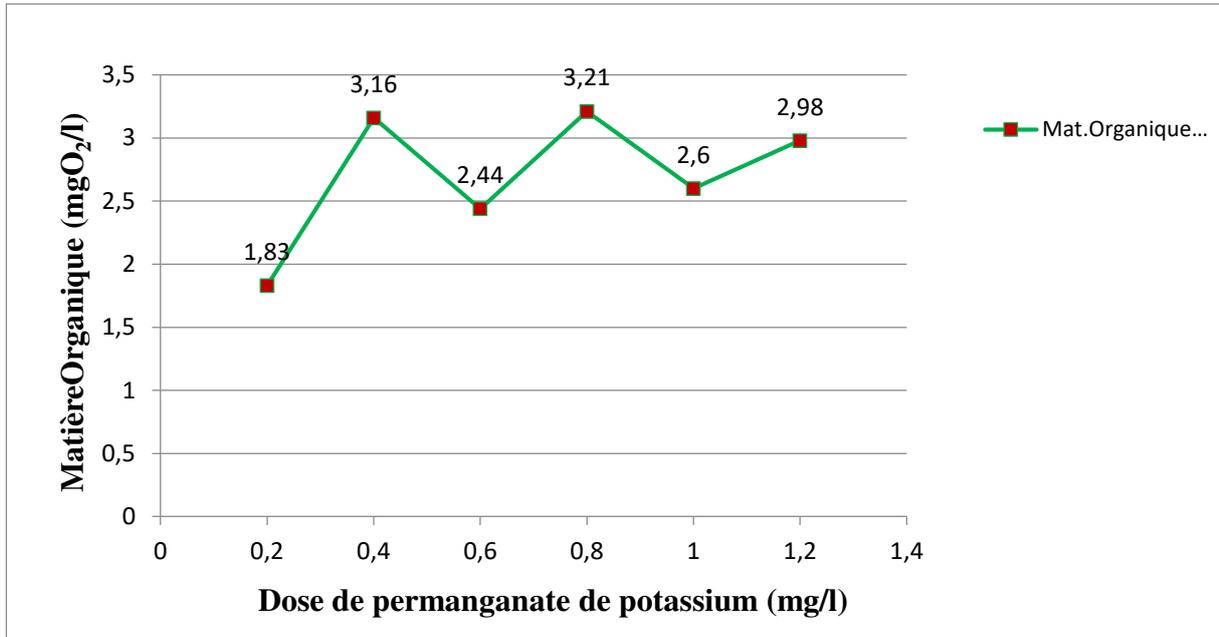


Figure VI.17 : la variation de la matière organique en fonction des doses du KMnO₄.

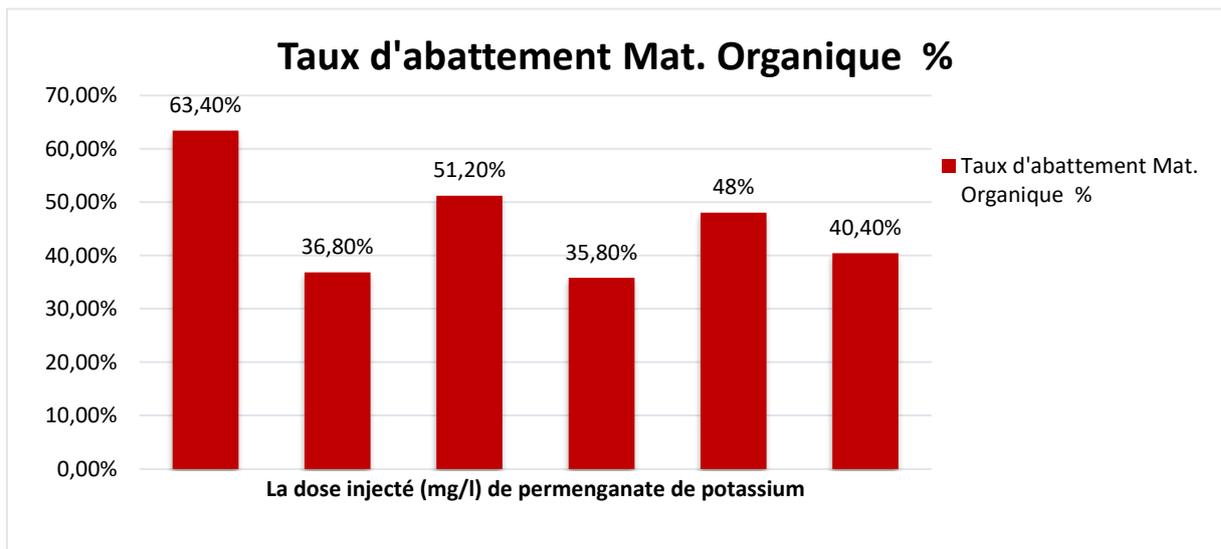


Figure VI.18 : taux d'abattement de la matière organique en fonction des doses du Permanganate de potassium.

Interprétation :

Le suivi de l'oxydation de la matière organique par le permanganate de potassium, nous nous a pas permis de conclure sur l'influence de l'utilisation des doses croissantes de KMnO₄ sur l'oxydation de la matière organique.

En effet dans ce cas le kMnO₄ ajouté va interférer avec le KMnO₄ utilisé pour l'analyse de la matière organique.

Ainsi, pour la suite de la notre étude, nous travaillerons avec la dose minimale du KMnO_4 (0,2 mg/l).

Taux d'abattement de la Matière Organique en fonction de différentes doses de sulfate d'alumine avec la dose optimale du KMnO_4 :

Tableau VI.13 : taux d'abattement de la matière organique en fonction des différentes doses du sulfate d'aluminium.

Dose sulfate d'alumine (mg/l)	40	60	80	100	110	120
Dose de permanganate de potassium (mg/l)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Turbidité (NTU)	3,46	1,75	1,29	1,09	1,19	1,34
pH final	6,77	6,6	6,5	6,36	6,31	6,26
Matière Organique (mgO_2/l)	3,13	2,37	2,6	2,75	2,14	2,53
Matière Organique après filtration	1,87					
Taux d'abattement Matière Organique %	37,4%	52,6%	48%	45%	57%	49%

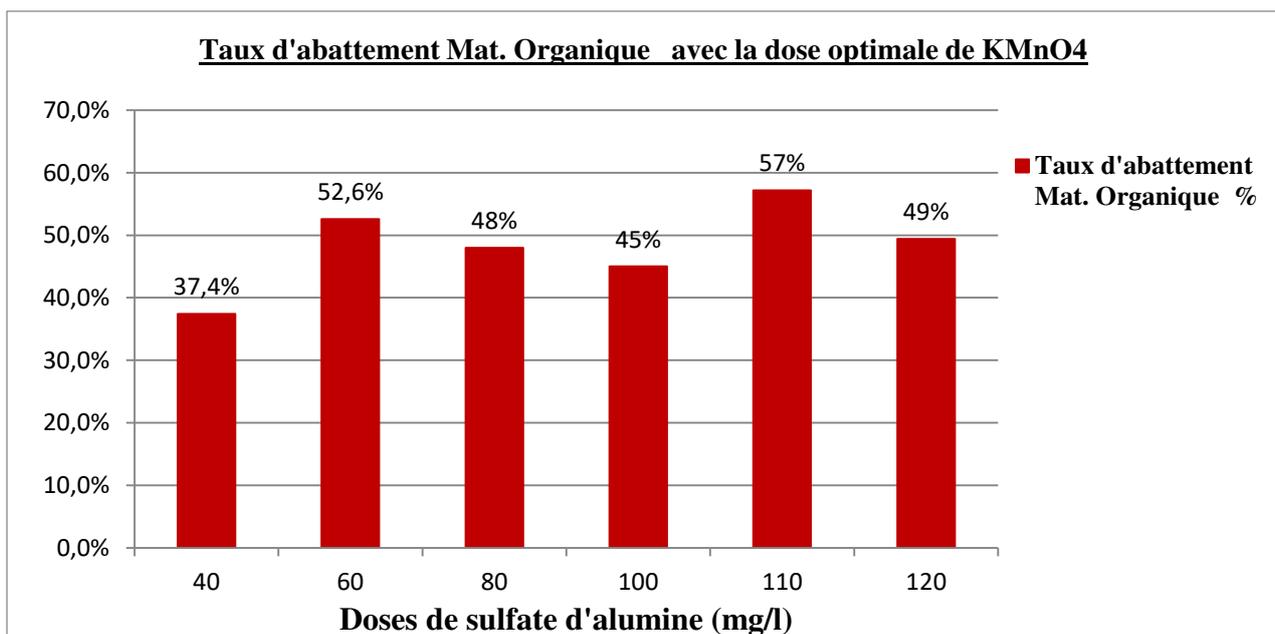


Figure VI.19 : taux d'abattement de la matière organique en fonction des doses du sulfate d'aluminium.

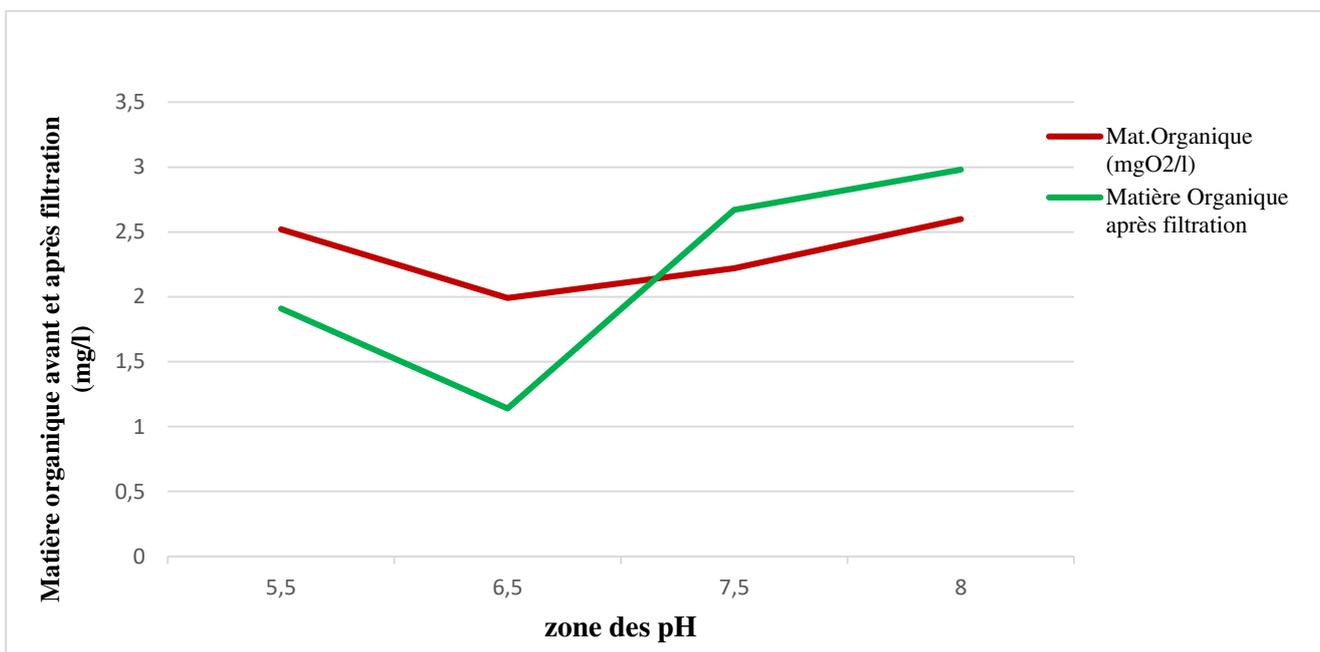
Interprétation :

D'après la figure VI.19, la dose du sulfate d'alumine de 110 mg/l, permet d'assurer le meilleur taux d'abattement de la matière organique (57%).

On peut dire que la dose de 110 mg/l du coagulant permettrait une meilleure élimination de la matière organique particulaire.

Recherche de la zone du pH pour l'élimination de la Matière Organique :**Tableau VI. 14 :** recherche de la zone du pH pour l'élimination de la matière organique.

Dose sulfate d'alumine (mg/l)	110	110	110	110
Dose Poly-électrolyte (mg/l)	0,15	0,15	0,15	0,15
pH initial	5,5	6,5	7,5	8
Dose de permanganate de potassium (mg/l)	0,2	0,2	0,2	0,2
Matière Organique (mgO ₂ /l)	2,52	1,99	2,22	2,6
Matière Organique après filtration (mgO ₂ /l)	1,91	1,14	2,67	2,98

**Figure VI.20 :** la variation organique avant et après filtration en fonction le pH.**Interprétation :**

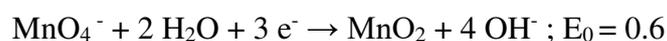
D'après la figure VI.20, nous constatons que le meilleur pH (6,5). Car il permet d'avoir la concentration minimale de la matière organique (1,14 mg/l).

En effet plusieurs réactions entrent en jeu lors de l'oxydation de la matière organique, qui dépend du pH, du potentiel des réactions d'oxydation, de leurs cinétiques, ainsi que de l'état de la matière organique (nature, charges...).

En milieu acide nous pouvons avoir les réactions suivantes :



Dans un milieu alcalin, la demi réaction est :



Comparaison entre le chlore actif (eau de Javel) et KMnO_4 :

Tableau VI.15 : comparaison économique entre le chlore actif et le permanganate de potassium du l'étude économique

	volume de production m^3/mois	taux de traitement (mg/l)	prix unitaire DA/Kg	consommation tonne	Montan total DA
Chlore actif (eau de Javel)	2 500 000	1	11	2,5	27500
Permanganate de potassium (KMnO_4)	2 500 000	0,2	895	0,5	447500

- Bien qu'économiquement le chlore actif est le plus intéressant, sur le plan environnemental, le KMnO_4 est meilleure car il permet une oxydation de la matière organique en évitant la formation de composés toxiques comme les organochlorés.
- En générale il est préconisé de commencer la pré-oxydation par le KMnO_4 suivi par le Cl_2 , afin de concilier l'avantage environnementale du KMnO_4 et l'avantage économique du Cl_2 .

Conclusion

Conclusion :

La présence de l'aluminium résiduel dans les eaux potables après traitement, peut poser un grand problème de santé public, pour cela nous avons étudié tous les paramètres qui nous permettent d'avoir le minimum d'aluminium résiduel.

Les principaux résultats de notre étude :

La dose optimale du coagulant sulfate d'alumine est de 110 mg/l, avec un taux d'abattement de la turbidité de 94%.

La dose optimale du floculant (poly-électrolyte) est de 0.15 mg/l, avec un taux d'abattement de 96%

La zone optimale de pH de coagulation en fonction de l'abattement de l'aluminium résiduel c'est le (pH=7) avec une concentration d'aluminium résiduelle de 0.018 mg/l

Les doses optimales de coagulant pour différents pH (pH=7,7.2, 7.5, 8) sont respectivement (60.80.80.60 mg/l).

On n'a pas pu suivre l'effet du chlore actif sur la matière organique car il pourrait y avoir une interférence lors du dosage de la matière organique par l'indice de permanganate de potassium

Pour une dose 1 mg/l de Cl₂, on a trouvé une meilleur élimination de la matière organique (65%) pour une dose du coagulant de 40 mg/l.

On a trouvé que le meilleurs pH pour l'élimination de la matière organique par oxydation au Cl₂ est le pH de 5.5, ce qui est logique car à ce pH la forme la plus oxydante (HOCl) est présente à 99%.

Comme dans le cas du chlore actif on n'a pas pu suivre l'effet des doses croissantes de KMnO₄, car ce dernier interfère avec le KMnO₄ utilisé pour le dosage des matières organique ce qui peut fausser les résultats.

On a aussi trouvé que la dose du sulfate d'alumine de 110 mg/l permet lors d'utilisation de 0.2 mg/l de KMnO₄ d'assurer le meilleurs taux d'élimination de la matière organique (57%)

Le KMnO₄ dépend du pH du milieu, de l'état de la matière organique, des cinétiques de réaction d'oxydation. Pour les pH étudiés, le pH (6.5) est le meilleur pH, car il permet d'avoir la concentration minimale de la matière organique.

Il est plus intéressent de commencer, la pré-oxydation par le KMnO₄ suivi par le Cl₂, afin de concilier l'avantage environnementale du KMnO₄ (pas de formation d'organochlorés) et l'avantage économique de Cl₂.

Recommandations :

- Pour un bon suivi de l'oxydation de la matière organique il serait intéressant de suivre l'élimination de la matière organique par la mesure du COT (Carbone organique totale).
- Il pourrait être intéressant de suivre une molécule représentative de la matière organique naturelle, afin de bien étudier l'efficacité des deux oxydant (KMnO_4 , Cl_2)
- Afin de minimiser les concentrations en fer et aluminium dans les eaux potables, il serait préférable de développer des coagulants naturels qui ne contiennent pas d'éléments toxiques comme le fer ou l'aluminium.