

Université de Bouira
Akli Mohand Oulhadj



جامعة البويرة
أكلي محمد أولحاج

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj (Bouira)

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie des Procédés
Laboratoire des Matériaux et Développement Durable

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master par

MOUSSI Ferroudja

FODIL PACHA Yamina

Spécialité : Génie des Procédés
Option : Science et Génie de l'Environnement

THEME

Effet de la coagulation- floculation sur la qualité des eaux de barrage de la station TILES DIT de Bouira

Soutenu le : 23/09/2017

Devant le jury composé de :

Akila MERAKCHI	Maître Assistante A	Université de Bouira	Présidente
Souhila BETTAYEB	Maître Assistante A	Université de Bouira	Examinatrice
Hakim LOUNICI	Professeur	Université de Bouira	Promoteur

Remerciements

Avant de commencer la présentation de ce projet, nous profitons l'occasion pour remercier du fond du cœur toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Un remerciement à :

- Notre promoteur **Mr LOUNICI Hakim** professeur à l'université de Bouira, département Génie des procédés pour son suivi et ses recours durant ce stage et la mise au point du présent travail.
- Le Chef de laboratoire d'unité de production **TILESDIT** qui nous a permis de passer ce stage de projet de fin d'études dans leur structure et dans des bonnes conditions.

Un remerciement à **Mme BAZUCHE Malika** qui nous a aidés le long de ce stage.

Un grand remerciement également aux membres de jury: **Mme MERAKCHI Akila**, **Mme BETTAYEB Souhila** d'avoir accepté de juger ce travail.

MERCI ! MERCI ! MERCI !

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	2
CHAPITRE I : Généralité sur les eaux	4
1. CYCLE DE L'EAU DANS LA NATURE	4
2. RESSOURCES HYDRIQUES NATURELLES	4
2.1. Eaux souterraine	5
2.2. Eaux de surface	5
2.3. Eaux des mers et océans	6
3. PROPRIETES DE L'EAU	7
3.1. Propriétés chimiques	7
3.2. Propriétés physiques	7
a. Masse volumique	7
b. La viscosité	7
c. La tension superficielle	7
d. Température d'ébullition	7
e. La conductivité électrique	7
3.3. Propriétés biologique	8
4. CARACTERISTIQUES DE L'EAU	8
4.1. Paramètres organoleptiques	8
a. Turbidité	8
b. La couleur	9
c. Goût et odeur	9
4.2. Les paramètres en relation avec la structure de l'eau	10
a. La température	10
b. Le pH (potentiel hydrogène)	10
c. L'oxygène dissous	10
d. La conductivité	11
e. La dureté (Titre hydrotimétrique TH)	11
f. L'alcalinité	12
g. Sodium et potassium	12
h. Les chlorures	12
i. Les sulfates	13
4.3. Les paramètres indésirables	14

a. La matière organique.....	14
b. L'azote organique ou azote Total Kjeldal (NTK)	16
c. Certains métaux	17
4.4. Les paramètres toxiques	18
4.5. Les caractéristiques biologiques	18
5. POLLUTION DES EAUX	19
6. TRAITEMENT DE POTABILISATION DES EAUX DE SURFACE	19
6.1. Processus de potabilisation des eaux de surface	20
a. Prétraitement	20
b. Pré-oxydation	20
c. Clarification.....	20
d. Désinfection	21
e. Affinage	21
6.2. Objectif de traitement	21
CHAPITRE II : Coagulation-floculation	22
1. COAGULATION-FLOCULATION	22
1.1. But de la coagulation-floculation.....	22
1.2. Caractéristiques des particules à enlevé.....	23
a. Les matières en suspension	23
b. Les matières colloïdales	23
c. Les matières dissoutes.....	23
1.3. Caractérisation des colloïdes	25
a. Les particules hydrophiles.....	25
b. Les particules hydrophobes.....	25
1.4. Stabilité des particules (Théorie de la double couche).....	25
1.5. Potentiel Zéta	27
2. LA COAGULATION	28
2.1. Déstabilisation des particules colloïdales	28
a. Compression de la double couche	28
b. Adsorption et neutralisation des charges.....	29
c. Emprisonnement des particules dans un précipité	29
d. Adsorption et pontage entre les particules.....	29
2.2. Le Coagulant.....	30
a. Les types de coagulants	30

2.3. Les paramètres influençant sur le fonctionnement du procédé de coagulation	32
a. L'influence du paramètre <i>pH</i>	32
b. L'influence de la dose de coagulant.....	32
c. L'influence de la température	32
d. L'influence de la turbidité	33
3. LA FLOCCULATION	33
a. Flocculation péricinétique	33
b. Flocculation orthocinétique.....	34
3.1. Flocculant.....	35
a. Flocculants naturels.....	35
b. Flocculants synthétiques.....	35
4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE COAGULATION-FLOCCULATION	36
4.1. Avantages.....	36
4.2. Inconvénients	37
CHAPITRE III : Description et fonctionnement de la station.....	38
1. STATION DE TRAITEMENT DES EAUX POTABLE TILES DIT	38
1.1. Implantation du barrage et la station de traitement	38
1.2. Description de la station et présentation de la chaîne de traitement.....	39
a. Ouvrage d'entrée	39
b. Cascade d'aération.....	39
c. Préchloration	40
d. Ouvrage de répartition du débit	40
e. Coagulation	41
f. flocculation	41
g. Canal bay-passe	42
h. Décantation	42
i. Filtration.....	42
j. Réservoir d'eau filtrée	43
k. La désinfection	43
l. Réservoir d'eau traitée	44
CHAPITRE IV: Matériels et méthodes.....	46
1. MATERIELS ET METHODES	46
1.1. Verreries et appareillage.....	46

1.2. Mesure de pH.....	46
a. Principe	46
b. Réactifs	47
1.3. Mesure de la température.....	47
a. Principe	47
1.4. Mesure de la conductivité	47
1.5. Mesure de la turbidité	48
1.6. Le Jar Test	48
a. Description des essais de floculation	49
b. Préparation des coagulants	49
c. Flocculant	51
d. Protocole de Jar-Test.....	51
1.7. Détermination de l'oxydabilité au permanganate de potassium en milieu acide	52
1.8. Détermination de la concentration en fer total résiduel	54
1.9. Détermination de la concentration de l'aluminium résiduel	55
CHAPITRE V: Résultats et discussions	57
1. RESULTAS ET DISCUSSIONS	57
1.1. Résultats	57
1.2. Discussions	59
a. Influence de la dose de coagulant sur le pH	59
b. Effet de la dose du coagulant et le pH sur la turbidité.....	60
c. Effet de la dose du coagulant et le pH sur la concentration de la matière organique ...	68
d. Effet de la dose du coagulant et le pH sur la concentration de l'aluminium résiduel et la concentration du fer total.....	71
CONCLUSION GENERALE.....	75
BIBLIOGRAPHIE	77

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 : La Chaîne Biologique des Transformations de L'eau	4
Figure I.2: Chaîne de traitement classique.....	20

Chapitre II

Figure II.1 : Phénomène de la coagulation -floculation.....	22
Figure II.2 : Nature et gamme de taille des particules colloïdales dans l'environnement.....	24
Figure II.3 : Théorie de la double couche.....	26
Figure II.4 : Stabilité d'une suspension colloïdale.....	27
Figure II.5 : Action des polymères vis-à-vis des particules.....	33
Figure II-5 : Emprisonnement des particules dans les floccs pendant la décantation.....	29
Figure II-6 : Adsorption et pontage à l'aide de polymères.....	30
Figure II.7 : Action des polymères vis-à-vis des particules.....	34

Chapitre III

Figure III.1 : Cascade d'aération	40
Figure III.2 : Décantation lamelle.....	42
Figure III.3 : Filtre à sable.....	43

Chapitre IV

Figure IV.1: pH mètre de paillasse HACH (sensION) de laboratoire de l'unité.....	47
Figure IV.2: Multi-éléments de paillasse WTW de laboratoire de l'unité.....	48
Figure IV.3 : Turbidimètre HACH 2100 AN IS de laboratoire d'unité.....	48
Figure IV.4 : Flocculateur à 6 agitateurs (AQUA LYTIC) de laboratoire de l'unité.....	49
Figure IV.5 : plaque chauffante STUART de laboratoire de l'unité.....	54
Figure IV.6 : Spectrophotomètre UV-Visible DR 5000 de laboratoire de l'unité.....	55

Chapitre V

Figure V.1 : Variation du pH de l'eau décantée en fonction de la dose du coagulant (Sulfate d'aluminium).....	59
Figure V.2: Variation du pH de l'eau décantée en fonction de la dose du coagulant (Chlorure ferrique).....	59
Figure V.3: Variation de la turbidité et la couleur de l'eau décantée en fonction de la dose du coagulant (sulfate aluminium).....	60
Figure V.4: Variation de rendement d'élimination de la turbidité et la couleur de l'eau décantée en fonction de la dose du coagulant (sulfate aluminium).....	61

Figure V.5: Variation de la turbidité et la couleur de l'eau décantée en fonction de la dose du coagulant (chlorure ferrique).....	61
Figure V.6: Variation de rendement d'élimination de la turbidité et la couleur de l'eau décantée en fonction de la dose du coagulant (chlorure ferrique).....	62
Figure V.7: Variation de la turbidité de l'eau décantée et l'eau filtrée en fonction de la dose du coagulant (sulfate d'aluminium) à pH= 6.5.....	62
Figure V.8: Variation de rendement d'élimination de la turbidité de l'eau décantée en fonction de la dose du coagulant (sulfate d'aluminium) à pH= 6.5.	63
Figure V.9: Variation de la turbidité de l'eau décantée et l'eau filtrée en fonction de la dose du coagulant (Chlorure ferrique) à pH=6.5.....	63
Figure V.10: Variation de rendement d'élimination de la turbidité de l'eau décantée en fonction de la dose du coagulant (chlorure ferrique) à pH= 6.5.....	64
Figure V.11: Variation de la turbidité de l'eau décantée et l'eau filtrée en fonction de la dose du coagulant (sulfate d'aluminium) à pH =5.....	64
Figure V.12: Variation de rendement d'élimination de la turbidité de l'eau décantée en fonction de la dose du coagulant (sulfate d'aluminium) à pH =5.....	65
Figure V.13: Variation de la turbidité de l'eau décantée et l'eau filtrée en fonction de la dose du coagulant (Chlorure ferrique) à pH =5.....	65
Figure V.14: Variation de rendement d'élimination de la turbidité de l'eau décantée en fonction de la dose du coagulant (sulfate d'aluminium) à pH =5.....	66
Figure V.15: Variation de la concentration de la matière organique en fonction de la dose du coagulant (sulfate d'aluminium) à pH= 6.5.....	68
Figure V.16: Variation de la concentration de la matière organique en fonction de la dose du coagulant (chlorure ferrique) à pH= 6.5.....	68
Figure V.17: Variation de la concentration de la matière en fonction de la dose du coagulant (sulfate d'aluminium) à pH =5.....	69
Figure V.18: Variation de la concentration de la matière en fonction de la dose du coagulant (chlorure ferrique) à pH =5.....	69
Figure V.19: Variation de la concentration de l'aluminium résiduel et la concentration du fer total en fonction de la dose du coagulant (sulfate d'aluminium).....	71
Figure V.20: Variation de la concentration de l'aluminium résiduel et la concentration du fer total en fonction de la dose du coagulant (Chlorure ferrique).....	71
Figure V.21: Variation de la concentration résiduelle de l'aluminium et du fer en fonction de la dose du coagulant (sulfate d'aluminium) à pH =6.5.....	72

Figure V.22: Variation de la concentration de l'aluminium et du fer résiduel en fonction de la dose du coagulant (chlorure ferrique) à pH =6.5.....	72
Figure V.23: Variation de la concentration résiduelle de l'aluminium et du fer total en fonction de la dose du coagulant (Sulfate d'aluminium) à pH=5.....	73
Figure V.24: Variation de la concentration résiduelle de l'aluminium et du fer en fonction de la dose du coagulant (chlorure ferrique) à pH=5.....	73

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I.1 : Principales différences entre eaux de surface et eaux souterraines5-6

Tableau I.2 : Normes de qualité de l'eau de consommation humaine (paramètres avec valeurs indicative)13

Tableau I.3 : Normes de qualité de l'eau de consommation humaine (paramètres avec valeurs indicative)18

Chapitre II

Tableau II.1 : Dérivés des sels d'aluminium et de fer.....30

Chapitre III

Tableau III.1: Propriétés physico-chimiques de l'eau brute du barrage Tilesdit (données de l'année 2017).....44-45

Tableau III.2 : Propriétés physico-chimiques de l'eau traitée de la station Tilesdit (données de l'année 2017).....45

Chapitre V

Tableau V.1 : Résultats des analyses physico-chimiques effectué le 22 /05 /201757

Tableau V.2 : Résultats des analyses physico-chimiques effectué le 27 /05 /201758

Tableau V.3 : Résultats des analyses physico-chimiques effectué le 07 /06 /201758

Résumé

RESUME

L'eau destinée à la consommation humaine peut contenir des substances polluantes, c'est pourquoi, elle a besoin d'être traitée.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés plus particulièrement à l'élimination de la pollution liée à la turbidité et à la matière organique des eaux de la station de traitement.

A fin d'améliorer la qualité des eaux de la station, nous avons utilisé, d'une part, le sulfate d'aluminium et le chlorure ferrique comme coagulants et d'autre part, le polymère anionique comme aide coagulant (floculant). Les résultats obtenus montrent que:

- La meilleure clarification est obtenue avec le sulfate d'aluminium comme coagulant.
- Le traitement avec le chlorure ferrique exige une filtration poussée pour l'élimination de la couleur qui reste après la décantation (une filtration sur charbon actif granulaire).
- L'utilisation de sulfate d'aluminium et de chlorure ferrique comme coagulant est efficace à pH 6.5 à 7.5 pour ce type d'eau de surface.
- Dans le milieu acide le rendement est meilleur pour l'élimination de la turbidité.

Mots-clés: Coagulation-floculation, Turbidité, Sulfate d'aluminium, Chlorure ferrique.

ABSTRACT

The water intended for human consumption can contain polluting substances, this is why, it needs to be treated.

In this work, we were interested more particularly in elimination of pollution related to the turbidity and organic matter of water of the station of treatment.

In order to improve the water quality of the station, we have used, on the one hand, aluminium sulphate and ferric chloride as coagulants and on the other hand, the anionic polymer as a coagulant aid (flocculant). The results obtained show that:

- The best clarification is obtained with aluminium sulphate as coagulant.
- Treatment with ferric chloride requires extensive filtration to eliminate the color that remains after decanting (granular activated carbon filtration).
- The use of aluminum sulphate and ferric chloride as a coagulant is effective at pH 6.5 to 7.5 for this type of surface water.
- In the acid medium the yield is better for the elimination of the turbidity.

Key words: Coagulation-flocculation, Turbidity, Aluminium sulphate, Ferric chloride

INTRODUCTION GENERALE

Les ressources en eau douce sont très inégalement réparties et ne représentent qu'environ 2,5% du volume d'eau existant sur la Terre. Or, les besoins en eau douce sont de plus en plus importants. Une solution intéressante consiste à traiter l'eau de surface; on vise la production d'une eau potable à partir d'une eau brute plus ou moins polluée qui ne peut être traitée qu'au cas par cas par des traitements appropriés à sa nature et à son degré de pollution.

Pour ce faire, on soumet cette eau brute à divers étapes de traitement réalisées dans une usine de traitement des eaux.

Le traitement des eaux de surface pour la distribution a pour objet de réduire les impuretés dissoutes ou en suspension d'origine naturelle ou humaine. Pour les rendre conforme à des valeurs fixées par des normes et d'assurer une sécurité parfaite par désinfection.

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, dans le but de faciliter leur agglomération. En pratique, ce procédé consiste à l'injection et la dispersion de produits chimiques, appelés coagulants. La floculation a pour but 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 pourra facilement éliminer par décantation.

Les coagulants les plus couramment employés sont les sels d'aluminium et de fer; leur utilisation fait partie des procédés de purification des eaux depuis quelques décennies. En 1843 SIMPSON expérimenta l'aluminium en Angleterre avant l'étape de filtration, mais cette technique n'a pas été immédiatement pratiquée à l'échelle industrielle. La première application date de 1885, par la compagnie des eaux de Somerville et Raritan dans le Newjerzey.

Ces dernières années on s'est inquiété des répercussions négatives que pourrait avoir sur la santé humaine, l'aluminium, présent dans l'eau traitée par les sulfates d'aluminium. L'efficacité de cette étape de traitement est rattachée à la variable pH, type et dose du coagulant ainsi qu'à la nature des particules et des matrices minérales et organiques.

Le but de notre travail étant une contribution expérimentale qui cherche à comparer entre les coagulants chlorure ferrique et le sulfate d'alumine et le rendement de la coagulation-floculation sur l'élimination de la turbidité, la concentration résiduelle de coagulant utilisé et par conséquent, la variation des conditions optimales de formation des

Introduction générale

flocs en fonction des caractéristiques physico chimiques des particules solides dispersés dans l'eau.

Pour ce faire, nous avons utilisé le sulfate d'aluminium et le chlorure ferrique comme coagulants sur un échantillons d'eau brute du barrage Tilesdit; des expériences ont été menées en premier lieu sur jar-test au laboratoire de la station Tilesdit afin de déterminer les conditions optimales de coagulation-floculation, en second lieu le dosage des concentrations résiduelles de chaque coagulants ajoutés lors de l'essai de jar-test aux différentes valeurs de pH, afin d'apprécier l'influence de la nature et l'origine des particules sur l'efficacité de traitement dans un processus à débit continu et de produire une eau potable sans toutefois compromettre la santé humaine, ni nuire à l'environnement et qui répond au norme de qualité fixé par l'Organisation Mondial de la Santé (OMS).

Afin d'apporter une contribution à cette problématique, nous avons organisé notre travail en cinq chapitres distincts :

Chapitre I : résume les principales caractéristiques, les normes de potabilité et le traitement de potabilisation des eaux.

Chapitre II : donne une vue générale sur le phénomène de coagulation- floculation.

Chapitre III : ce chapitre est consacré à la description et au fonctionnement de la station de potabilisation « Tilesdit Bechloul » de la wilaya de Bouira.

Chapitre IV : décrit le matériel et la méthodologie suivie au cours de cette étude.

Et un dernier chapitre V : nous décrivons les résultats des protocoles expérimentaux mis en œuvre au cours de processus de coagulation-floculation effectués au laboratoire de l'unité, en essayant de remplacer le coagulant utilisé fréquemment dans le traitement des eaux (sulfate d'aluminium), par le chlorure ferrique et l'interprétation des les résultats expérimentaux enregistrés.

Et enfin, une conclusion générale est donnée pour résumer notre travail.

1. CYCLE DE L'EAU DANS LA NATURE

L'eau sous ses différents états suit dans la nature un vaste cycle que résume le schéma de la figure I.1.

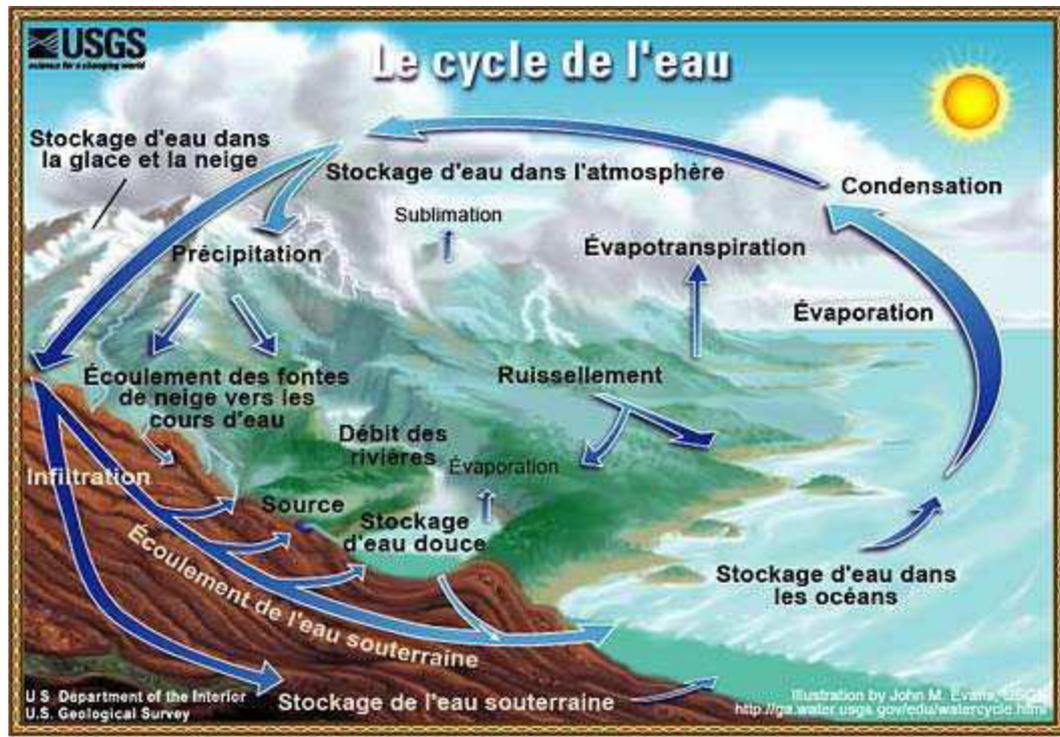


Figure I.1 : La Chaine Biologique des Transformations de L'eau

Les différentes étapes de ce cycle sont les suivantes :

- * L'évaporation: chauffée par le soleil, l'eau des océans, des rivières, des lacs s'évapore et monte dans l'atmosphère.
- * La condensation: au contact des couches d'air froid de l'atmosphère, la vapeur d'eau se condense en minuscules gouttelettes qui, poussées par les vents se rassemblent et forment les nuages.
- * Les précipitations: les nuages déversent leur contenu sous forme de pluie, neige ou grêle.
- * Le ruissellement: la plus grande partie de l'eau tombe dans les océans. Le reste s'infiltré dans le sol ou ruisselle pour aller grossir les rivières qui, à leur tour vont alimenter les océans et le cycle recommence. [1]

2. RESSOURCES HYDRIQUES NATURELLES

Les réserves disponibles d'eaux naturelles sont constituées des eaux souterraines (infiltration, nappes), des eaux de surface retenues ou en écoulement (barrages, lacs, rivières) et des eaux de mer.

CHAPITRE I : Généralités Sur Les Eaux

2.1. Eaux souterraines

De point de vue hydrogéologique les couches aquifères se divisent en :

- Nappes phréatiques ou alluviales : Peu profondes et alimentées directement par les précipitations pluvieuses ou les écoulements d'eau en dessus,
- Nappes captives : Plus profondes que les premières et séparées de la surface par une couche imperméable, l'alimentation de ces nappes est assurée par l'infiltration sur leurs bordures [2].

La nature du terrain sous lequel se trouvent ces eaux est un déterminant de leurs compositions chimiques, cependant elles sont appelées aussi les eaux propres car ils répondent 'en général' aux normes de potabilité. Pourtant, ces eaux sont moins sensibles aux pollutions accidentelles, elles perdent totalement leur pureté originale dans le cas de contamination par des polluants.

Quand une eau souterraine contient une concentration en certains minéraux dépassant les normes de potabilité, mais elle représente des propriétés thérapeutiques on la distribue en bouteilles avec parfois un traitement bien défini, ces eaux sont dites eaux minérales [3].

2.2. Eaux de surface

Ce type des eaux englobe toutes les eaux circulantes ou stockées à la surface des continents (rivières, lacs, étangs, barrages,...). La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par ces eaux durant leurs parcours dans l'ensemble des bassins versants. Ces eaux sont le siège, dans la plupart des cas, d'un développement d'une vie microbienne à cause des déchets rejetés dedans et de l'importante surface de contact avec le milieu extérieur. C'est à cause de ça que ces eaux sont rarement potables sans aucun traitement [3].

Tableau I.1 : Principales différences entre eaux de surface et eaux souterraines [3].

Caractéristique	Eaux de surface	Eaux souterraines
Température	variable suivant saisons	relativement constante
Turbidité, MES (vraies ou colloïdales)	variable, parfois élevée	faible ou nulle (sauf en terrain karstique)
Couleur	liée surtout aux MES (argiles, algues...) sauf dans les eaux très douces et acides (acides humiques)	liée surtout aux matières en solution (acides humiques par exemple)
Minéralisation	variable en fonction des terrains, des	sensiblement constante en général

CHAPITRE I : Généralités Sur Les Eaux

globale	précipitations, des rejets...	nettement plus élevée que dans les eaux de surface de la même région
Fe et Mn divalents (à l'état dissous)	généralement absents, sauf en profondeur des pièces d'eau en état d'eutrophisation	généralement présents
CO ₂ agressif	généralement absent	souvent présent en grande quantité
O ₂ dissous	le plus souvent au voisinage de la saturation. Absent dans le cas d'eaux très polluées	absent la plupart du temps
H ₂ S	généralement absent	souvent présent
NH ₄	présent seulement dans les eaux polluées	présent fréquemment sans être un indice systématique de pollution bactérienne
Nitrates	peu abondants en général	teneur parfois élevée
Silice	teneur en général modérée	teneur souvent élevée
Micropolluants minéraux et organiques	présents dans les eaux de pays développés, mais susceptibles de disparaître rapidement après suppression de la source	généralement absents, mais une pollution accidentelle subsiste beaucoup plus longtemps
Éléments vivants	bactéries (dont certaines pathogènes), virus, plancton (animal et végétal)	ferrobactéries fréquentes
Solvants chlorés	rarement présents	souvent présents
Caractère eutrophe	fréquent Accentué par les températures élevées	non

2.3. Eaux des mers et océans

Les mers et les océans constituent des énormes réservoirs d'eau, elles représentent près de 97.4% du volume d'eau existant actuellement sur notre planète, le reste est la part des eaux continentales (eaux souterraines et superficielles). Les eaux de mers sont caractérisées par une grande salinité, elles sont dénommées aussi « eaux saumâtres », ce qui rend leur utilisation difficile, notamment leur coût très élevé pour leur traitement [4].

3. PROPRIETES DE L'EAU

Sur la terre, l'eau existe dans les trois états phases : liquide (eau proprement dite), solide (glace) et gazeux (vapeur d'eau). Ces trois phases coexistent dans la nature, toujours observables deux à deux, et plus ou moins en équilibre : eau-glace, eau- vapeur, glace- vapeur selon les conditions de température et de pression [5].

3.1. Propriétés chimiques

L'eau est un liquide, constitué des éléments oxygène et hydrogène. L'eau est une molécule bipolaire elle possède deux pôles et grâce à ce caractère bipolaire et à sa constante électrique, l'eau présente une forte aptitude à solubiliser un grand nombre de substance. Qu'elles soient ionisable ou qu'il s'agisse de molécule non électrolytes, mais à caractère plus ou moins polaire, susceptible de s'associer aux molécules d'eau par attraction électrostatiques et ponts hydrogène, donc l'eau est facilement polluée. Et grâce à son excellente conductivité l'eau occupe une grande place dans l'industrie [6].

3.2. Propriétés physiques

Les propriétés physiques plus particulièrement intéressantes pour le traitement de l'eau sont :

- a. **Masse volumique** : la masse volumique ρ de l'eau varie avec la température et la pression, mais aussi avec la teneur en sels dissous. L'eau a une masse volumique. avec $\rho=0.999973 \text{ g/cm}^3 \approx 1 \text{ g/cm}^3$.
- b. **La viscosité** : elle diminue lorsque la température croit ; par contre, elle augmente avec la teneur en sels dissous. Contrairement aux autres liquides, une pression modérée, rend l'eau moins visqueuse aux basses températures [7].
- c. **La tension superficielle** : elle est définie comme une force de traction qui s'exerce à la surface du liquide en tendant toujours à réduire le plus possible l'étendue de cette surface. Elle est extrêmement élevée ; égale à $72.7 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$ à 20°C [8].
- d. **Température d'ébullition** : la température d'ébullition dépend de la pression l'eau peut être conservée à l'état liquide à des températures supérieure à 100°C à condition d'opérer sous vide partiel [7].
- e. **La conductivité électrique**: l'eau est légèrement conductrice. Cette conductivité très faible, mais jamais nulle est expliquée par une légère dissolution de la molécule d'eau selon l'équation chimique :



Elle est exprimée en $\mu\text{s/cm}$

3.3. Propriétés biologique

L'eau, l'oxygène et le dioxyde de carbone contribuent à créer des conditions favorables au développement des être vivants [9]. Il existe un cycle biologique, cycle au cours duquel s'effectue une série d'échanges ; l'eau entre pour une grande part dans la constitution des êtres vivants. La présence de certains microorganismes dans les eaux polluées en ont fait un vecteur de transmission de maladies graves qu'il fallu identifier et combattre. [8]

4. CARACTERISTIQUES DE L'EAU

4.1. Paramètres organoleptiques

Il s'agit de la saveur, de la couleur, de l'odeur et de la transparence de l'eau. Ils n'ont pas de signification sanitaire mais, par leur dégradation, peuvent indiquer une pollution ou un mauvais fonctionnement des installations de traitement ou de distribution.

a. Turbidité

La turbidité est la mesure de l'aspect trouble de l'eau .C'est la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes. Elle est causée, dans les eaux, par la présence de matières en suspension (MES), comme les argiles, les limons et les micro-organismes. Une faible part de la turbidité peut être due également à la présence de matières colloïdales d'origine organique ou minérale [10,11].

La turbidité résulte de la diffusion de la lumière qui est ainsi déviée dans toutes les directions. Ce sont des particules en suspension dans l'eau qui diffusent la lumière. Leur origine peut être extrêmement variable : érosion des roches, entraînement des matières minérales ou organiques du sol, déversement d'eaux usées domestiques ou industrielles riches en matières en suspension grossières.

Pour mesurer la turbidité on utilise certains instruments [12,13].

- Le turbidimètre de Jackson (méthode visuelle).
- L'opacimètre
- Le turbidimètre de Hellige
- Le néphélémètre de Hach

La turbidité est mesurée par trois unités qui sont équivalentes :

Unité J.T.U (Jackson turbidity unit) = Unité F.T.U (Formazine turbidity unit)=Unité N.T.U (Néphélémétric turbidity unit)

La mesure de la turbidité, très utile pour le contrôle d'un traitement, ne donne pas d'indications sur la nature, la concentration et la taille des particules en suspension qui en sont responsable.

CHAPITRE I : Généralités Sur Les Eaux

Cette turbidité doit être éliminée pour améliorer l'aspect esthétique de l'eau de consommation mais aussi pour permettre une désinfection efficace et éviter les dépôts dans l'usine ou dans le réseau. En effet, les MES peuvent servir de support aux microorganismes qui seront ainsi partiellement protégés de l'action des désinfectants et qui pourront ensuite se développer dans les réseaux et entraîner des problèmes sanitaires [11].

b. La couleur

Les eaux naturelles sont toujours plus ou moins colorées. Leur couleur varie du jaune paille à peine perceptible au brun rougeâtre, selon la nature et la concentration des matières colorantes. Ces matières sont le plus souvent d'origine naturelle et proviennent de la dégradation de matières végétales. Le degré de couleur dépend non seulement de la concentration en matières colorantes, mais aussi du pH et de la turbidité [14].

La mesure de la couleur d'une eau naturelle se fait par comparaison avec une échelle artificielle de couleur. La substance de référence choisie est le chloroplatine de potassium (K_2PtCl_6) dans une solution de chlorure de Cobalt ($CoCl_2$). L'unité de couleur est le Hazen correspondant à un mg/l de platine sous forme de (K_2PtCl_6). On l'appelle aussi unité platino-cobalt ou unité de couleur vraie (UCV). Pour une eau potable, le degré de couleur maximale est de 15 UCV [12,15].

c. Goût et odeur

L'odeur peut être définie comme étant l'ensemble des sensations perçues par l'organe olfactif en flairant certaines substances volatiles.

Le goût est défini comme l'ensemble des sensations gustatives, olfactives et de sensibilités chimiques communes perçues lorsque l'aliment ou la boisson est dans la bouche [12].

Ces deux paramètres sont regroupés et font appel aux mêmes types de traitement (adsorption, oxydation,...). La saveur et l'odeur anormales sont causées par la présence dans l'eau des matières organiques dissoutes provenant de la décomposition des matières organiques végétales, de résidus agricoles, de rejets urbains ou industriels et les métabolites de certains microorganismes vivant dans l'eau comme certaines algues ou champignons microscopiques, et aussi certains sels minéraux donnent des goûts particuliers à l'eau.

Dans le cas d'une eau potable, l'apparition ou le changement de goût et d'odeur peuvent être signe d'activité microbienne et de lacune dans le traitement ou de contamination dans le réseau de distribution. Par ailleurs, une eau traitée peut avoir un goût plus prononcé qu'une eau non potable du fait du chlore résiduel [11, 12, 14].

4.2. Les paramètres en relation avec la structure de l'eau

a. La température

Il est primordial de connaître la température d'une eau. En effet, elle joue un rôle très important dans la solubilité des sels et surtout des gaz, et la détermination du pH.

La mesure de la température est très utile pour les études limnologiques et le calcul des échanges. Elle agit aussi comme un facteur physiologique agissant sur le métabolisme de croissance des micro-organismes vivant dans l'eau [16].

b. Le pH (potentiel hydrogène)

Le pH, par définition, une mesure de l'activité des ions H^+ contenue dans une eau, variant de 0 à 14 en solution aqueuse il permet de donner une indication de sa tendance à être acide ou alcaline, il s'agit de la mesure de potentiel existant entre une électrode de mesure et une électrode de référence. Selon la loi de Nernst le $PH = -\log(H^+)$.

Dans le domaine de l'eau, le pH joue un rôle primordial à la fois dans :

- Les propriétés physico-chimiques (acidité, agressivité)
- Les processus biologiques dont certains exigent des limites très étroites des pH ;
- L'efficacité de certains traitements (coagulation, adoucissement, contrôle de la corrosion, chloration).
- Les mécanismes de la coagulation

La détermination du pH est donc la mesure que l'on doit effectuer le plus fréquemment. Pour mesurer le pH, on utilise un pH mètre [12,17].

c. L'oxygène dissous

Quantité d'oxygène qui est en solution dans l'eau, et est disponible pour la respiration végétale et animale. Sa mesure est réalisée à l'aide d'un oxymétrie. Comme tous les gaz, l'oxygène se dissout dans l'eau, mais cette solubilité est limitée à une valeur seuil, appelée concentration standard ou teneur à saturation, qui varie en fonction de la pression atmosphérique et de l'encombrement du maillage moléculaire de l'eau (provoqué par des substances dissoutes).

Plus la température est élevée, plus la solubilité de l'oxygène dans l'eau est faible.

On peut exprimer la teneur en oxygène dans l'eau soit en concentration

(C en mg/L ou ppm), soit en pourcentage de saturation (%S) :

$$\%S = 100 \times C/Cs.$$

Le pourcentage de saturation donne donc une indication sur le degré d'équilibre (pour l'oxygène) entre l'air et l'eau. Lorsque $\%S < 100\%$, l'eau est sous-saturée en oxygène et lorsque $\%S > 100\%$, l'eau est sursaturée en oxygène [18].

d. La conductivité

La conductivité, caractéristique physico-chimique de l'eau liée à la concentration des substances dissoutes et à leur nature.

La conductivité électrolytique est une expression numérique de la capacité d'une solution à conduire le courant électrique. La conductivité électrique d'une eau (γ) est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm^2 de surface et séparées l'une de l'autre de 1 cm. Elle est l'inverse de la résistivité électrique (ρ). [12]

La mesure de la conductivité de l'eau nous permet d'apprécier la quantité des sels dissous dans l'eau (chlorures, sulfates, calcium, sodium, magnésium...) [16]

e. La dureté (Titre hydrotimétrique TH)

Le degré hydrotimétrique est un indicateur de la minéralisation de l'eau. Il correspond à la somme des concentrations en ion calcium et magnésium auxquels s'ajoutent quelquefois les concentrations en fer, aluminium, manganèse. [12]

On peut distinguer différents types de dureté:

- **La dureté totale** : correspond à la somme des concentrations en ions calcium et magnésium dans l'eau. elle est exprimé en différentes unités : milliéquivalent par litre, milligramme par litre de CaCO_3 , et en degré français. [20]
- **Dureté calcique** : concentration globale en calcium ;
- **Dureté magnésienne** : concentration globale en magnésium

Les ions calcium et les ions magnésium sont positifs, donc dans l'eau, ils peuvent se lier à d'autres ions négatifs ; de ce fait on peut diviser la dureté en deux catégories :

- **Dureté permanente ou non carbonatée** : dureté qui persiste après ébullition de l'eau et qui correspond uniquement aux sels de calcium et de magnésium solubles à chaud, sous forme de chlorures et de sulfates, car les hydrogencarbonates sont décomposés et précipitent sous forme de carbonate de calcium ;

La dureté carbonatée aussi appelée dureté temporaire, elle correspond aux taux de bicarbonates de calcium dissous dans la solution. C'est une sous partie de la dureté totale.

$$\text{TH}_{\text{perm}} = \text{TH}_{\text{tot}} - \text{TH}_{\text{temp}}$$

$$1^\circ\text{F} = 0.2 \text{ meq/l}$$

$$1^\circ\text{F} = 4 \text{ mg/l de Ca ou } 2.43 \text{ mg/l de Mg ou } 10 \text{ mg/l de CaCO}_3.$$

- Une TH :
- entre 0 et 10 °F \Rightarrow eau très douce.
 - entre 10 et 20 °F \Rightarrow eau douce.
 - entre 20 et 30 °F \Rightarrow eau moyennement dure.
 - entre 30 et 40 °F \Rightarrow eau dure.

$> 40 \text{ }^{\circ}\text{F}$ \Rightarrow eau très dure

f. L'alcalinité

L'alcalinité d'une eau correspond à la présence d'ions hydrogénocarbonates ou bicarbonates, carbonates et hydroxydes provenant du cycle du carbone minéral présent dans la nature sous deux formes prépondérantes :

- à l'état de carbonates (roches calcaires) ;
- et surtout à l'état gazeux qui représente la forme circulante du carbone inorganique.

Les concentrations des ions hydroxydes (OH^-), carbonates et bicarbonates de l'eau sont déterminées par les titres alcalimétriques simple **TA** et **TAC**, qui s'expriment en $^{\circ}\text{F}$ ou meq/l [21].

Autrement dit, on est amené à considérer deux types d'alcalinité qui correspondent, encore une fois à deux bornes de pH :

- **Alcalinité au virage du rouge de méthyle** : elle correspond à l'alcalinité totale au pH de 4.5, ce qui revient à déterminer les ions HCO_3^- , CO_3^{2-} et OH^- . Cette alcalinité se nomme également titre alcalimétrique complet TAC.

- **Alcalinité au point de virage de la phénophtaléine** (alcalinité composite) : elle correspond à l'alcalinité entraînée par les ions OH^- et à la moitié des ions CO_3^{2-} . Cette alcalinité composite est nulle pour une eau dont le pH est inférieur ou égal à 8.3. L'alcalinité composite se nomme également titre alcalimétrique

(TA) [12, 14,17].

g. Sodium et potassium

Le sodium et le potassium les 6^{ème} et 7^{ème} éléments les plus abondants à l'état naturel sont en proportions très variables.

Aucune norme ne limite la concentration en sodium (ou en potassium) dans les eaux potables .On peut également signaler que le sodium joue un rôle important en agriculture, pour l'irrigation, du fait de son action sur la perméabilité des sols.

Le potassium, beaucoup moins abondant que le sodium, et rarement présent dans l'eau à des teneurs supérieures à 20 mg/l .Il ne représente aucun inconvénient particulier bien que le K soit une des sources possibles de radioactivité de l'eau [13.22].

h. Les chlorures

L'eau contient presque toujours des chlorures, mais en proportion très variable. D'ailleurs, la teneur en chlorures augmente généralement avec le degré de minéralisation d'une eau.

CHAPITRE I : Généralités Sur Les Eaux

Il peut être analysé par titrage d'AgNO₃ en présence de K₂CrO₄ (10), le virage de jaune vers le rouge brique [12,23].

i. Les sulfates

Les eaux naturelles contiennent pratiquement des sulfates, en proportion très variables. Leur présence résulte de la solubilité des sulfates de calcium des roches gypseuses et de l'oxydation des sulfures répandus dans les roches (les pyrites par exemple). Les eaux traitées au sulfate d'aluminium ajouté lors du traitement en mesurant la teneur en sulfates avant et après la coagulation, bien qu'une légère fraction d'ions SO₄⁻² soit entraînée par adsorption avec le floc [24].

Ces ions sont analysés par des méthodes gravimétriques par l'ajout de (BaCl₂) il se précipite sous forme BaSO₄.

Tableau I.2 : Normes de qualité de l'eau de consommation humaine (paramètres avec valeurs indicative) [25]

Groupe De Paramètres	Paramètres	Unités	Valeurs Limites
Paramètres organoleptiques	Couleur	mg/l Platine	15
	Turbidité	NTU	5
	Odeur à 25°C	Taux dilution	4
	Saveur à 25°C	Taux dilution	4
Paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle des eaux	Alcalinité	mg/l en CaCO ₃	500
	Calcium	mg/l en CaCO ₃	200
	Chlorure	mg/l	500
	Concentration en ions hydrogène	unité pH	≥ 6.5 et ≤ 9
	Conductivité à 25°C	µs/cm	2800
	Dureté	mg/l en CaCO ₃	200
	Potassium	mg/l	12
	Résidu sec	mg/l	1500
	Sodium	mg/l	200
	Sulfates	mg/l	400
Température	°C	25	

4.3. Les paramètres indésirables

Sont dites indésirables certaines substances qui peuvent créer soit un désagrément pour le consommateur : goût et odeur (matières organiques, phénols, fer...), couleur (fer, manganèse...), soit causer des effets gênants pour la santé (nitrates, fluor...). On surveille donc prioritairement la contamination des eaux par des matières organiques (mesurée par l'oxydabilité au permanganate de potassium), la concentration en ammonium, la présence de nitrites et de nitrates et la concentration en fer.

a. La matière organique

La matière organique naturelle (MON) est un ensemble de macromolécules provenant de la dégradation de débris animaux et végétaux ainsi que de la production primaire du phytoplancton dans les eaux naturelles. Elle constitue une partie des MES, sous forme dissoute, elle est principalement composée d'atome de carbone, auxquels sont associés des atomes d'hydrogène, oxygène et d'azote (CHON)

Il est cependant possible de donner des valeurs moyennes de concentrations de MON rencontrées dans les eaux utilisées pour la production d'eau potable : pour une eau de surface, la concentration varie de 2 à 10 mg/l pour le COT, et de 2 à 20 mg/l pour la DBO5. La valeur moyenne du COT pour une eau souterraine se situe en général entre 0,5 et 1 mg/l.

La matière organique est à l'origine de dégradations de la qualité de l'eau, ainsi :

- Elle influence directement les propriétés organoleptiques de l'eau (odeur et goût);
- Elle peut être la cause d'une certaine toxicité acquise au cours du traitement, via la métabolisation de certains composés, comme la formation de THM induite par une oxydation, plus particulièrement par une chloration ;
- Elle influence directement la stabilité biologique de l'eau dans le réseau de distribution. [26]

☞ La teneur d'une eau en matière organique est généralement estimée au moyen de paramètres globaux suivant

- **L'oxydabilité au permanganate de potassium $KMnO_4$ (ou indice de permanganate)** : correspond à l'oxydation des matières organiques par du permanganate de potassium de concentration connue en milieu acide selon un protocole normalisé (10 minutes à ébullition). Le résultat est exprimé en mg/l d' O_2 . Les eaux de bonne qualité, pauvres en matière organique, ont une oxydabilité ≤ 1 mg/l d' O_2 . Les eaux de surface présentent en générale une oxydabilité comprise entre 3 et 12 mg/l d' O_2 , la limite pour les eaux brutes est de 10 mg/l d' O_2 . la référence de qualité est de 5 mg/l d' O_2 [27].

CHAPITRE I : Généralités Sur Les Eaux

- **Carbone organique total (COT) et dissous (COD) :** Correspond à une mesure globale de la matière organique-particulaire et dissoute-présente dans l'eau. Le COT des eaux superficielles comprend en moyenne 90 à 95 % de carbone organique dissous (COD) et 5 à 10% de carbone organique particulaire (COP). la mesure du COT fait intervenir une aération de l'eau (pour éliminer le CO₂ dissous) puis une acidification pour déplacer les formes carboniques et enfin une minéralisation par oxydation ou combustion. Le COD représente la matière organique restante après filtration sur des membranes de 0,45µm. Il existe une corrélation entre le COD et l'absorbance UV : $UV (1 \text{ cm}, 254 \text{ nm}) / COD = 0,03 \text{ à } 0,04$ pour des eaux de surface.

Les eaux superficielles présentes des valeurs comprises entre 2 et 12 mg/l (voir plus pour les eaux eutrophisées). La référence de qualité est de 2 mg/l.

L'indice de permanganate et le COT sont considérés par la réglementation comme «paramètres indicateurs de qualité témoin du fonctionnement des installations de production et de distribution d'eau».

- **Carbone organique dissous biodégradable (CODB) :** Il est estimé à partir de la décroissance du COD après une longue période d'incubation (28 jours) en présence d'une suspension de bactéries (AFNOR T 90-318) ou d'une biomasse fixée (AFNOR T 90- 319). Pour les eaux de surface, la valeur du CODB est en général au maximum de 30% du COD.

- **L'absorbance UV :** Cette méthode de mesure est très pratique, mais certains éléments minéraux représentent une source d'interférences ; en outre, les résultats peuvent dépendre de la nature de la matière organique analysée. Une densité optique de 1 pour des cuves de 1 cm équivaut à une valeur approximative de 30 à 45 mg O₂/l de l'oxydabilité au KMnO₄ en milieu acide.

- **Demande biochimique en oxygène (DBO₅) :** correspond à la quantité d'O₂ qu'il faut fournir à un échantillon d'eau pour minéraliser la matière organique par voie biologique (oxydation bactérienne). Elle représente la matière organique biodégradable. La durée d'incubation de l'échantillon est de 5 jours à une température de 20 °C. Elle est exprimée en mg O₂/l [27].

- **Demande chimique en oxygène (DCO) :** représente tout ce qui peut être oxydé dans l'eau (y compris certains sels minéraux oxydables tels que les sulfures ou sulfites). Il correspond à la quantité d'oxygène nécessaire pour dégrader la totalité de la matière organique par voie chimique. Pour cela on réalise une oxydation par le dichromate de potassium (Cr₂O₇) en présence d'acide sulfurique à chaud. La DCO correspond à la somme de

CHAPITRE I : Généralités Sur Les Eaux

la matière organique biodégradable et de la matière « résistante », qui ne pas être dégradée par voie biologique.

La DBO₅ et la DCO sont des paramètres très utilisés dans le domaine de l'environnement, notamment en tant qu'indicateur de pollution. À ce titre, ils sont utilisés pour définir les limites au delà desquelles les eaux de surface sont trop polluées pour être utilisées pour l'alimentation en eau potable [27].

b. L'azote organique ou azote Total Kjeldal (NTK)

Est également un paramètre descripteur de pollution. Il est dosé après minéralisation en milieu sulfurique à chaud et distillation en milieu basique de l'ammoniaque ainsi obtenu. C'est un paramètre à surveiller, car il réagit avec le chlore pour former des composés organochlorés pouvant être responsable du mauvais goût de l'eau. On retrouve l'azote organique dans les eaux superficielles à des concentrations comprises entre 0.5 et 3 mg/l. mais c'est sous forme d'azote minéral que l'azote est essentiellement présent dans le milieu hydrique.

Azote minéral : l'ammoniaque se trouve dans les eaux de surface essentiellement sous la forme d'ion NH_4^+ . Deux méthodes de dosage des ions ammonium sont applicables pour la gamme de concentrations caractéristique des eaux naturelles et des eaux traitées : la méthode par spectrophotométrie et celle de réactif de Nessler. La concentration en ammoniaque est d'autant plus élevée que les eaux sont de mauvaise qualité. La valeur limite pour les eaux brute est de 4 mg/l. la référence de qualité est de 0.1 mg/l. on n'en retrouve généralement pas dans les eaux souterraines, dans les autres cas, l'autoépuration qui intervient dans le milieu transforme l'ammoniaque en nitrite NO_2^- puis en nitrate NO_3^- qui est la principale forme de l'azote assimilable par les plantes, sa présence dans les eaux de consommation contribue au développement des micro-organismes dans le réseau et les réservoirs de distribution.

Les nitrites : sont présents dans les eaux de surface à raison de 0.03 à 1 mg/l, leur valeur doit être inférieure à 0.1 mg/l en sortie des installations de traitement. La limite de qualité est de 0.5 mg/l.

Les nitrates : constituent une espèce très mobile, qui rejoint les nappes d'eaux souterraines, notamment dans les zones géographiques où l'agriculture est intensive. La limite de qualité pour les eaux brute est de 50 mg/l pour les eaux superficielles et de 100 mg/l pour les eaux souterraines. La limite de qualité au robinet du consommateur est de 50 mg/l. plusieurs méthodes d'analyse sont utilisées pour la recherche des ions nitrite et nitrate dans les eaux. Le dosage automatique par spectrométrie d'adsorption moléculaire et par chromatographie ionique permettent d'analyser les deux ions. [27]

c. Certains métaux

- Le manganèse est généralement associé au fer mais en quantité plus faible. C'est le Mn^{2+} qui est soluble dans les eaux naturelles bien que le manganèse présente de nombreux autres états d'oxydation.

La teneur en Mn est limitée à 0,05mg/l dans les eaux potables pour le goût qu'il peut communiquer, pour les taches et les dépôts qu'il peut occasionner et aussi parce qu'il favorise la croissance de certains micro-organismes. (La teneur souhaitable est inférieure ou égale à 0,01mg/l [12,22].

- Le Cu ou le Zn présentent peu d'inconvénients, du moins lorsque les concentrations sont faibles. D'autres comme le cadmium, le chrome, le mercure, le plomb ou le sélénium ont un caractère toxique marqué et leurs concentrations maximales acceptables dans l'eau potable sont très faibles [23].

- L'aluminium Reconnu comme un métal non essentiel, l'aluminium a longtemps été considéré comme ayant une innocuité pour l'homme du fait notamment de sa très faible absorption intestinale par voie orale. L'aluminium est le troisième élément le plus abondant de la surface terrestre et est contenu de façon naturelle dans de nombreux milieux. Il est également utilisé dans le traitement des eaux et comme additif alimentaire...etc, on trouve naturellement des quantités variable d'aluminium dans les eaux de surface, elle varie entre 0.012 et 2.25 mg/l.

D'après Driscoll et Laterman, lorsque l'aluminium est ajouté à l'eau brute lors du traitement, l'aluminium subit diverses transformations, selon la quantité ajoutée, le pH, le type et la concentration de matières dissoutes. Une augmentation par un facteur de cinq du niveau de l'aluminium total était manifeste après ajout de coagulant. Les concentrations à l'entrée d'eau étaient relativement faibles et augmentent après traitement.

La directive européenne n°98/83/CE relative à la qualité des eaux destinée à la consommation humaine a retenu pour la concentration en aluminium le niveau guide de 50 $\mu\text{g/l}$ et fixée la concentration maximale admissible (CMA) à 200 $\mu\text{g/l}$. [28]

- Le fer est, lui aussi, un élément essentiel à la santé de l'homme; certaines eaux souterraines en contiennent une forte proportion. Le fer ferreux est soluble dans l'eau alors que le fer ferrique est très peu et tend à précipiter sous forme d'hydroxyde. Le fer contenu dans l'eau provient des roches et des sols mais aussi, bien souvent, des tuyauteries lors de l'échantillonnage ; ce qui peut fausser considérablement les résultats de l'analyse. Dans l'eau

CHAPITRE I : Généralités Sur Les Eaux

potable, la teneur maximale acceptable est de 0,3 mg/l et l'objectif est inférieur à 0,05 mg/l [14,29].

Pour ces derniers, les valeurs des concentrations doivent être inférieures ou égales aux valeurs indiquées dans le tableau ci-après :

Tableau I.3 : Normes de qualité de l'eau de consommation humaine (paramètres avec valeurs indicative). [25]

Groupe De Paramètres	Paramètres	Unités	Valeurs Limites
Paramètres Chimique	Aluminium	mg/l	0.2
	Ammonium	mg/l	0.5
	Fer total	mg/l	0.3
	Manganèse	µg/l	50
	Nitrate	mg/l	50
	Nitrite	mg/l	0.2
	Oxydabilité	mg/lO ₂	5
	Phosphore	mg/l	5

4.4. Les paramètres toxiques

Une pollution industrielle du captage ou une dégradation des réseaux de distribution peut entraîner la présence d'éléments toxiques dans l'eau, dangereux pour la santé en cas de consommation régulière.

Les matières toxiques sont constituées de micropolluants minéraux (métaux lourds : chrome, cadmium, nickel...) ainsi que de substances telles que les cyanures, ou des molécules organiques présentant une action d'inhibition des mécanismes biologiques.

4.5. Les caractéristiques biologiques

L'eau potable ne doit contenir aucun microorganisme pathogène et être exempte de toute bactérie indiquant une pollution par excréments. Le principal indicateur bactérien recommandé pour suivre la pollution humaine est constitué par l'ensemble des microorganismes du groupe coliformes. Une eau qui est porteuse d'un seul Escherichia Coli par 100 ml devient potentiellement dangereuse. Ce point est important, car le critère de

potabilité de l'eau se fixe à partir de la présence ou de l'absence de ces germes témoins [29,15].

5. POLLUTION DES EAUX

La pollution des eaux peut être définie comme une dégradation de celle-ci par les éléments qu'elle a accumulés de son utilisation. Ces éléments indésirables proviennent des excréments chimiques, des rejets provenant d'industries divers, du lessivage des terrains traversés.

Le problème de la pollution des eaux représente sans aucun doute l'un des aspects les plus inquiétants de la dégradation du milieu naturel.

☞ Origine de la pollution

Les eaux de surface sont rarement potables sans aucun traitement et sont toujours plus ou moins polluées par divers rejets :

- **d'origine urbaine** : les rejets provenant de la collecte des ERU, même après leur traitement en station d'épuration ;
- **d'origine industrielle** : polluants et micropolluants organiques (hydrocarbures, solvants, produits de synthèse, phénols) ou inorganiques (métaux lourds, ammoniac, produits toxiques),
- **d'origine agricole** : engrais et produits pesticides (herbicides, insecticides, fongicides), entraînés par les eaux de pluie et le ruissellement ; dans les zones d'élevage intensif, rejets riches en composés de l'azote et du phosphore ainsi qu'en pollution organique,
- **pollution bactériologique** : d'origines humaine et animale. [7]

6. TRAITEMENT DE POTABILISATION DES EAUX DE SURFACE

L'eau dont nous disposons dans la nature n'est pas directement utilisable pour la consommation humaine ni pour l'industrie, car elle n'est pas, sauf, de rares cas, suffisamment pure : lors de sa circulation dans le sol, à la surface de la terre ou même dans l'air, l'eau se pollue et se charge de matières en suspension ou en solution : particule d'argile, déchets de végétation, organisme vivants (plancton, bactéries, virus), sels divers (chlorure, sulfates, carbonates de sodium, de calcium, fer, manganèse,...), matières organiques (acide humique, fluviatique,...).

La présence de ces nombreuses impuretés de différentes natures impose le traitement des eaux avant utilisation pour les rendre aptes aux applications envisagées ou après utilisation pour éviter tout dommage à notre environnement. [9].

6.1. Processus de potabilisation des eaux de surface

Le schéma classique d'une station de potabilisation d'une eau de surface est généralement comporte cinq grandes étapes : prétraitement, pré-oxydation, clarification, désinfection et affinage [31]

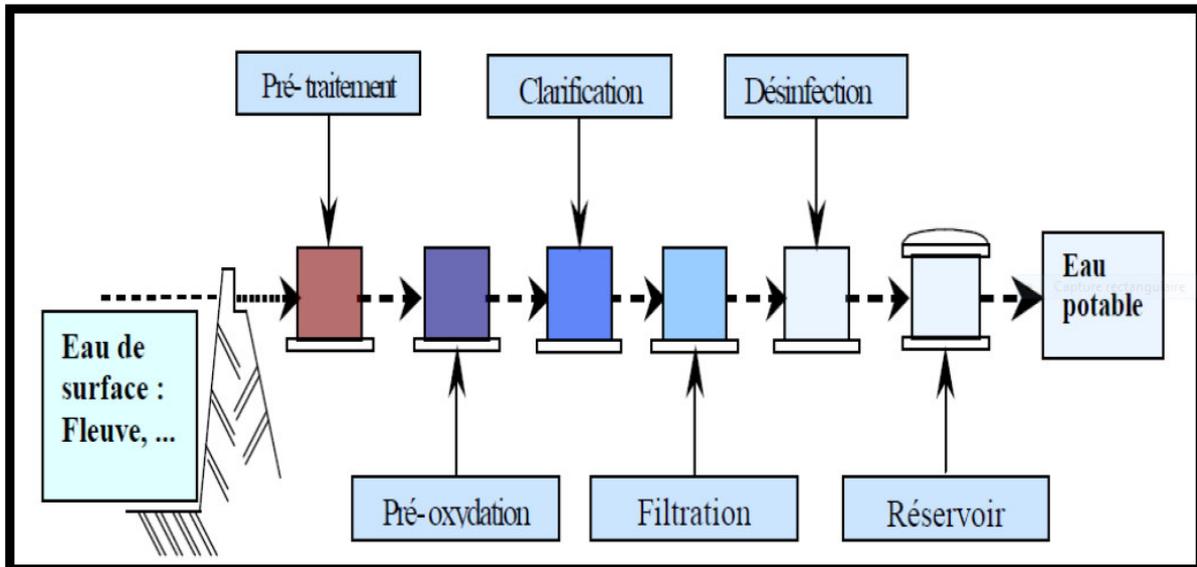


Figure I.2: chaîne de traitement classique

a. Prétraitement

Une eau, avant d'être traitée, doit être débarrassée de la plus grande quantité possible d'éléments dont la nature et la dimension constitueraient une gêne pour les traitements ultérieurs. Pour cela, on effectue des prétraitements de l'eau de surface [32]. Dans le cas d'une eau potable, les prétraitements sont principalement de deux types:

- Le dégrillage,
- Le tamisage.

b. Pré-oxydation

L'oxydation est une opération essentielle à tout traitement des eaux. Elle est toujours incluse en fin de filière au niveau de la désinfection.

Celle-ci peut être faite de trois façons différentes :

- ✚ Ajout de Chlore (préchloration)
- ✚ Ajout de dioxyde de chlore
- ✚ Ajout d'ozone (préozonation)

c. Clarification

La clarification est l'ensemble des opérations permettant d'éliminer les matières en suspension (MES) d'une eau brute ainsi que la majeure partie des matières organiques. La

clarification comprend les opérations de coagulation-floculation, de décantation et de filtration.

d. Désinfection

Le but de la désinfection est d'éliminer tous micro-organismes pathogènes présents dans l'eau et maintenir le chlore résiduel dans les conduites afin d'empêcher le développement de maladies hydriques.

Divers agents désinfectants peuvent être utilisés tels que le chlore et ses dérivées, l'ozone, les rayons ultra-violets. Mais le chlore est l'agent le plus utilisé comme désinfectant final, avant refoulement de l'eau dans le réseau ; il permet d'achever la désinfection de l'eau et de protéger le réseau contre les développements bactériens vu son effet rémanent [33,34].

e. Affinage

Pour un perfectionnement de la qualité de l'eau traitée, on procède à l'affinage visant à éliminer les micropolluants qui existent déjà dans l'eau ou qui se sont formés au cours du traitement et qui n'ont pas été totalement abattus par la coagulation-floculation.

Cet affinage est réalisé par le phénomène d'adsorption, généralement sur du charbon actif. Celui-ci est mis en œuvre soit en poudre au cours de la floculation et sera par la suite évacué avec la boue, soit sous forme de grains, habituellement utilisé après filtration sur sable [3,17].

6.2. Objectif de traitement

L'eau destinée à la consommation humaine doit répondre à trois principaux objectifs :

- **La santé publique** : une eau sans risques pour la santé, exempte de germes pathogènes et des substances toxiques.
- **L'agrément du consommateur** : afin de susciter l'agrément du consommateur, le traitement doit également améliorer les qualités organoleptiques de l'eau; c'est-à-dire distribuer une eau agréable à boire, claire et équilibrée en sels minéraux.
- **La protection des infrastructures** : Protection du réseau de distribution d'eau et des installations des usagers (robinets, chauffe-eaux, chaudières,...) contre l'entartrage et la corrosion [16].

1. COAGULATION-FLOCCULATION

Le mot coagulation vient du latin coagulare qui signifie «agglomérer». La couleur et la turbidité d'une eau de surface sont dues à la présence de particules de très faible diamètre « les colloïdes ». Leur élimination ne peut se baser sur la simple décantation. En effet, leur vitesse de sédimentation est extrêmement faible. Le temps nécessaire pour parcourir 1m en chute libre peut être de plusieurs années.

La coagulation et la floculation sont les processus qui permettent l'élimination des colloïdes. La coagulation consiste à les déstabiliser. Il s'agit de neutraliser leurs charges électrostatiques de répulsion pour permettre leur rencontre. La floculation rend compte de leur agglomération en agrégats éliminés par décantation et/ou filtration [35].

1.1. But de la coagulation-floculation

L'opération de coagulation-floculation a pour but la croissance des particules (qui sont essentiellement colloïdales) par déstabilisation des particules en suspension puis formation de floccs par absorption et agrégation [35]. Les floccs ainsi formés seront décantés et filtrés par la suite.

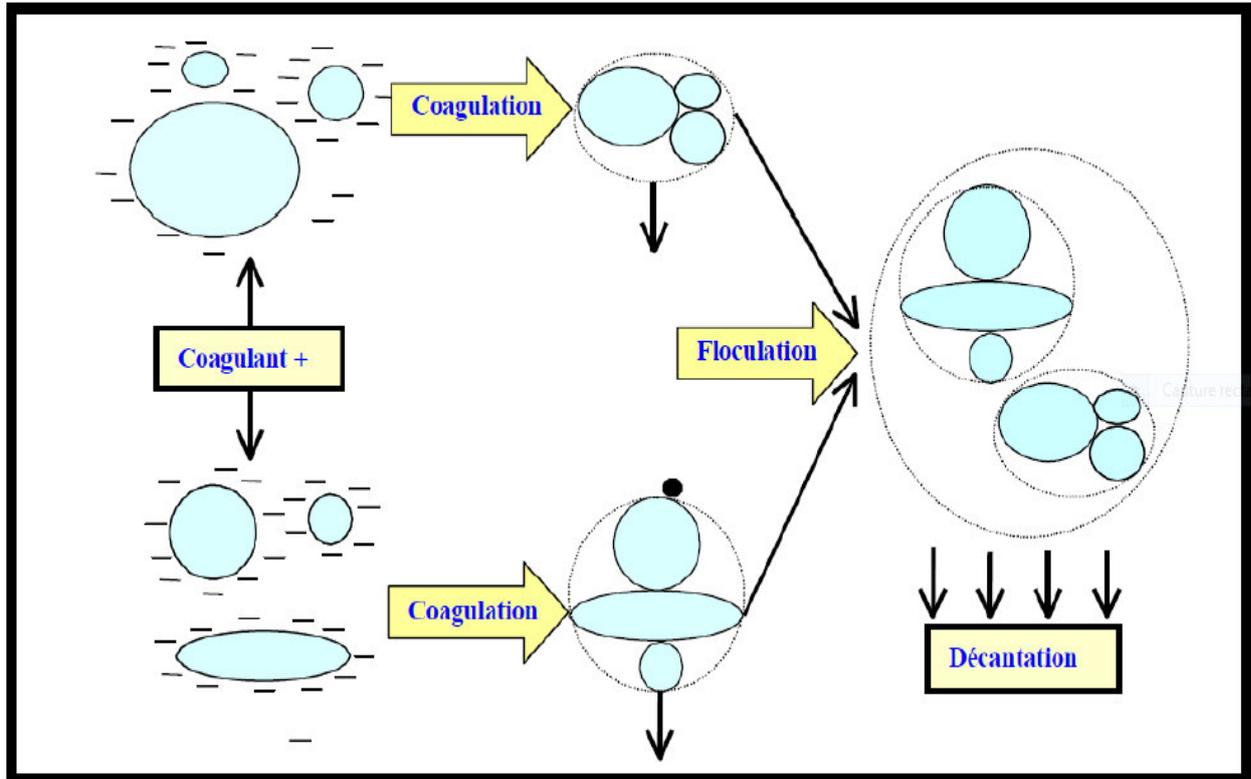


Figure II.1 : Phénomène de coagulation -floculation

1.2. Caractéristiques des particules à enlevé

Les composés retrouvés dans l'eau sont généralement regroupés dans trois catégories : les matières en suspension (**MES**), les matières colloïdales et les matières dissoutes. [9]

a. Les matières en suspension : sont d'origine minérale (sables, argiles, hydroxydes minéraux...) ou organique (acides humiques ou fulviques, réactifs ou sous-produits d'une activité industrielle...) ainsi que des micro-organismes (algues, bactéries...) et possèdent un diamètre supérieur à $1\mu\text{m}$. Leur temps requis pour décanter d'un mètre varie de quelques dixièmes de secondes à plusieurs jours selon leur diamètre et leur densité.

b. Les matières colloïdales : sont des MES de même origine mais de diamètre inférieur à 1 micron. Leur vitesse de décantation est faible. Les matières colloïdales d'origine minérale ont une densité relative de l'ordre de **2,65** alors que celles d'origine organique ont une densité relative beaucoup plus faible, soit de l'ordre de **1.1**.

c. Les matières dissoutes : quant à elles, sont généralement des cations ou anions de quelques nanomètres de diamètre, elles décantent donc encore plus lentement.

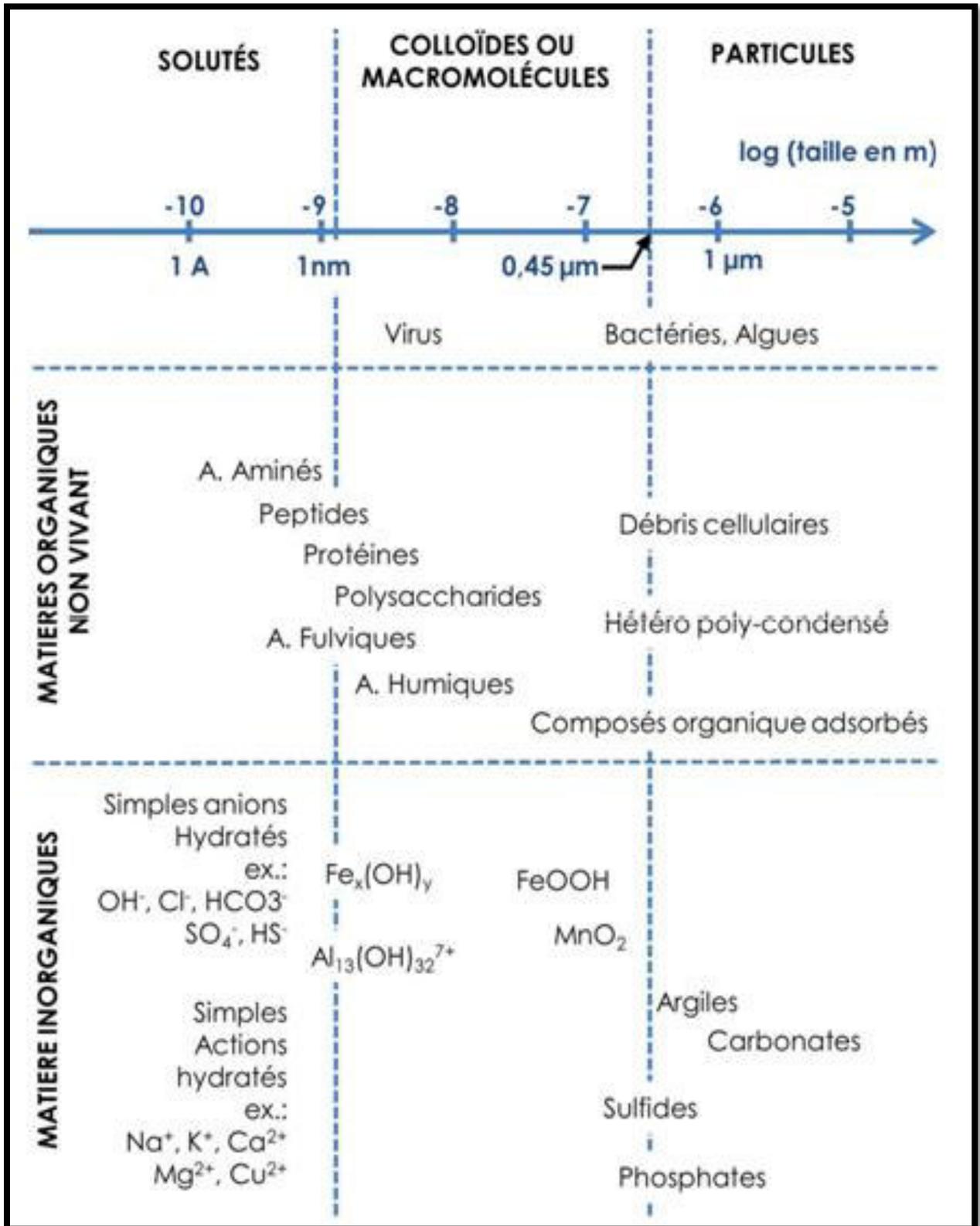


Figure II.2 : Nature et gamme de taille des particules colloïdales dans l'environnement [36].

1.3. Caractérisation des colloïdes

Béchac et al [13] classent quant à eux les colloïdes en deux catégories en fonction de leur affinité vis-à-vis de l'eau. Ils distinguent les colloïdes hydrophiles et les colloïdes hydrophobes.

a. Les particules hydrophiles

Les particules hydrophiles présentent une grande affinité avec l'eau. Ces particules sont entourées par une enveloppe de molécules d'eau fixées par des liaisons physico-chimiques à certains groupements de la matière tels que $-\text{COOH}$, $-\text{NH}_2$ ou OH .

Les particules hydrophiles sont le plus souvent de nature organique, parmi les substances de cette nature, on peut citer les protéines, les savons, les détergents et la matière organique naturelle qui constitue la principale source des eaux de surface.

Les colloïdes hydrophiles sont plus difficiles à déstabiliser que les solutions hydrophobes, car il faut agir d'abord sur l'eau qui les entoure c'est à dire les dissolvanter pour permettre leur agglomération.

b. Les particules hydrophobes

Les particules hydrophobes n'ont aucune affinité pour l'eau. Leur stabilité est due à la charge électrique que portent ces particules qui engendre une répulsion mutuelle empêchant toute agglomération [37].

Ce sont en général des particules minérales telle que la silice, les argiles, qui sont la principale cause de la turbidité des eaux brutes.

1.4. Stabilité des particules (Théorie de la double couche)

Les particules colloïdales dans l'eau possèdent une charge électrique qui est généralement négative. Comme elles ont toutes la même charge, elles se repoussent et n'ont pas tendance à former des agrégats plus gros et donc plus facile à éliminer. Elles demeurent donc stables. Une particule typique est représentée dans la figure II.3 :

Les ions positifs présents dans l'eau neutralisent la charge à la surface de la particule et forment une « couche liée » (**théorie de Helmholtz**). Cette couche se déplace avec la particule. Cette couche attire à son tour des ions négatifs inégalement répartie et formant «La couche diffuse» (**théorie de Gouy-Chapman**). Cette dernière ne se déplace pas avec la particule d'où l'inégalité dans la densité et la répartition des ions la composant. **Théorie de STERN** qui fait un rassemblement des deux théories, communément appelée théorie de la

CHAPITRE II : Coagulation-Floculation

"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. [38]

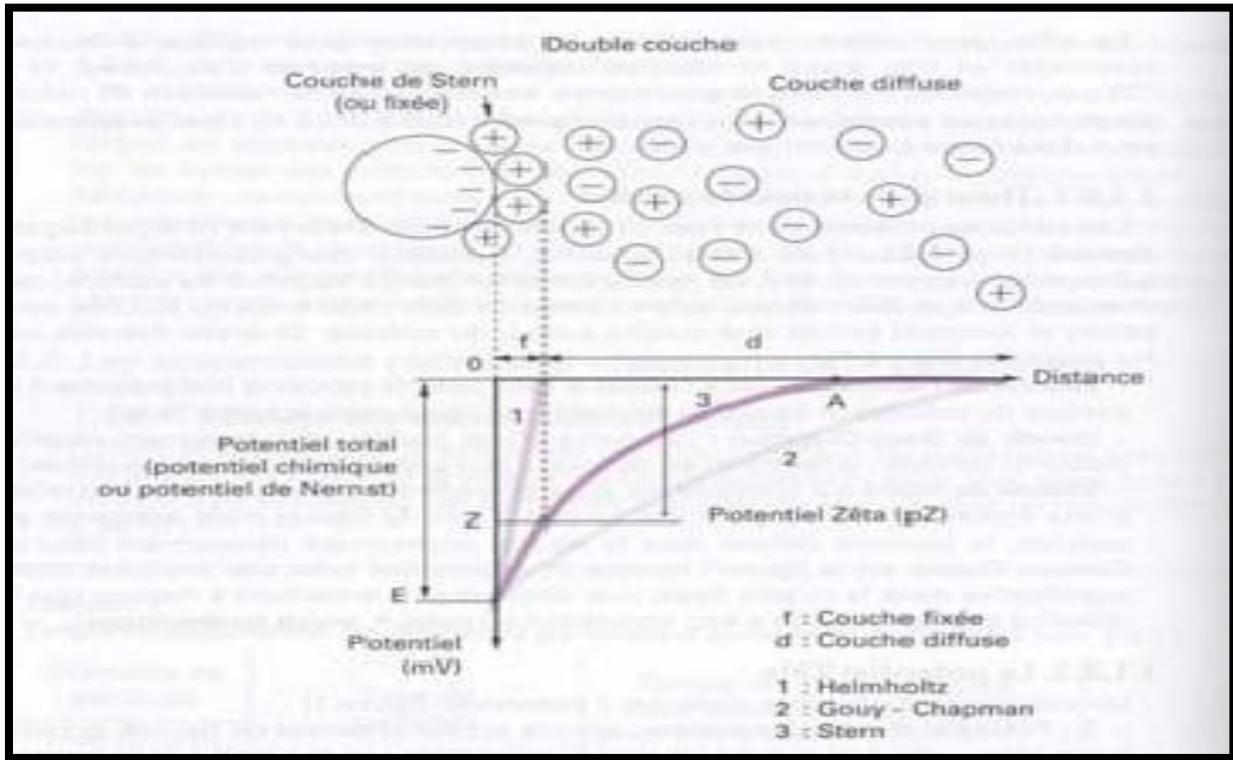


Figure II.3 : théorie de la double couche

Lorsque deux particules sont sur le point d'entrer en contact, elles sont essentiellement soumises à deux forces: la force d'attraction de van **der Waals**, et la force de répulsion **électrostatique**. Le potentiel de répulsion est défini par E_b , et le potentiel d'attraction est défini par E_a . La résultante des deux potentiels, E , traduit l'interaction énergétique nette qui existe entre les deux particules [38] telle que décrite dans la figure II.4.

Si le potentiel de répulsion est plus élevé que le potentiel d'attraction, la particule est dite électrostatiquement stabilisée et doit subir un traitement pour être déstabilisée. La déstabilisation dans ce cas se ferait en diminuant les forces de répulsion électrostatique.

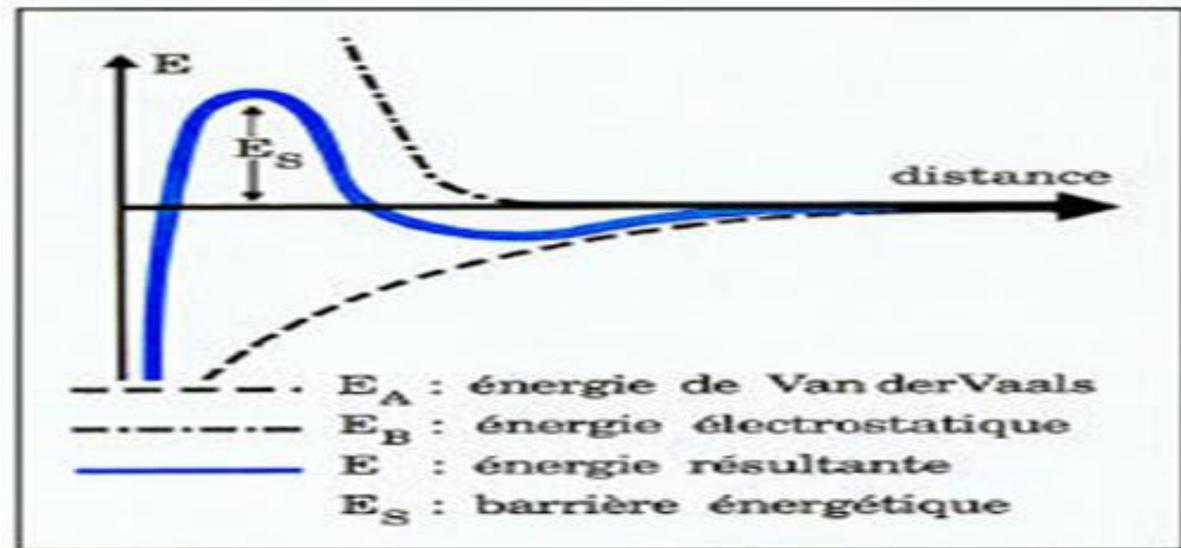


Figure II.4 : stabilité d'une suspension colloïdale

I.5. Potentiel Zéta

Le potentiel électrostatique diminue à mesure où l'on s'éloigne de la particule. Le potentiel Zéta se situe à la limite extérieure de la couche liée. C'est ce potentiel qui persiste lorsque la particule se déplace. Lorsqu'un champ électrique est appliqué, les particules ayant un potentiel Zéta négatif se déplacent en direction de l'électrode positive. [38]. Le potentiel Zéta est important car il définit le comportement électrocinétique des particules et par voie de conséquence leur stabilité dans la solution. L'annulation du potentiel Zéta est l'objectif de la coagulation. Cela permet de déstabiliser les particules et de favoriser leurs agglomérations.

$$\eta = \frac{4 \times \pi \times \mu \times U}{D}$$

η : Viscosité dynamique du liquide ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) ;

U : mobilité de la particule ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) ;

D : Constante diélectrique du milieu.

Le potentiel électrostatique est influencé par la force ionique I de l'eau.

$$I = \frac{1}{2} \sum C_i \times Z_i^2$$

I : Force ionique.

C_i : Concentration de l'ion i (mole/l).

Z_i : Valence de l'ion i.

2. 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.

2.1. Déstabilisation des particules colloïdales

Quatre mécanismes sont proposés pour expliquer la déstabilisation des particules et leur agglomération :

- a) compression de la double couche;
- b) adsorption et neutralisation des charges;
- c) emprisonnement des particules dans un précipité;
- d) adsorption et pontage.

a. Compression de la double couche

L'augmentation de la force ionique de l'eau réduit le volume et l'épaisseur de la couche diffuse. Les forces de répulsion sont considérablement réduites alors que les forces d'attraction de van der Waals ne sont pas affectées. La force ionique est représentée par l'équation suivante:

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

μ : force ionique

C_n : concentration de l'ion n (mol/L)

Z_n : valence de l'ion n

CHAPITRE II : Coagulation-Floculation

b. Adsorption et neutralisation des charges

Ce mécanisme repose sur l'ajout suffisant de cations afin de neutraliser la charge négative des particules stables par adsorption des cations sur leur surface. Par contre, la surdose de coagulant, source de cations, peut résulter en une adsorption trop importante de cations et inverser la charge des particules qui devient alors positive. Les particules seraient ainsi restabilisées [39].

c. Emprisonnement des particules dans un précipité

Lorsque des quantités suffisantes de coagulant comme le $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ou le FeCl_3 , sont ajoutées, ils forment un précipité possédant généralement une charge positive.

Le pH de l'eau doit se situer dans une plage où la solubilité des sels est minimale. Le précipité formé, appelé floc, entre en contact avec les particules de charge négative et les emprisonne. Les particules sont ensuite entraînées lors de la décantation [39].

La figure II.5 ci-dessous résume bien ce mécanisme décrit:

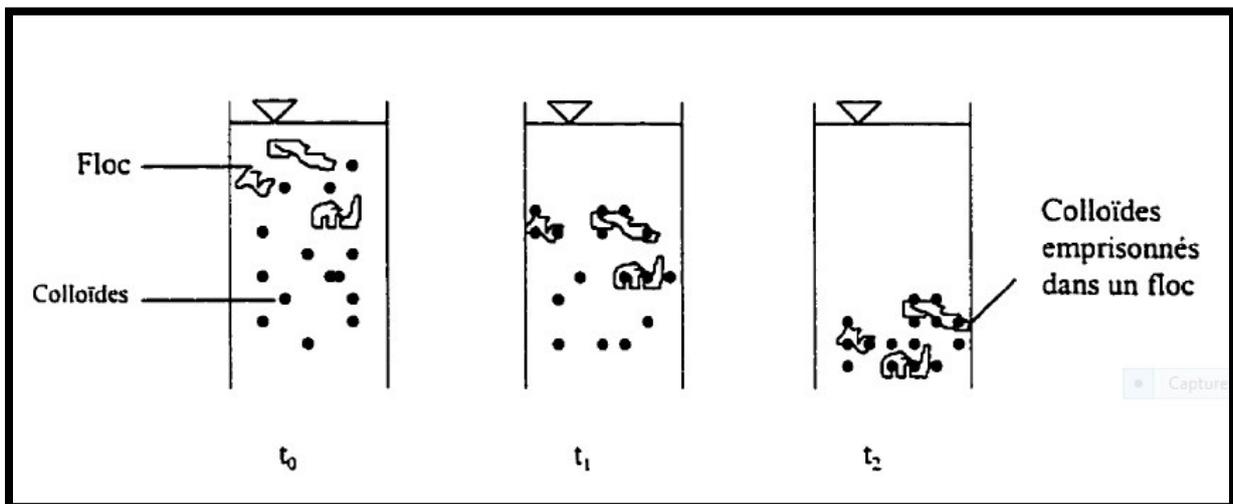


Figure II-5 : Emprisonnement des particules dans les floes pendant la décantation

d. Adsorption et pontage entre les particules

Ce mécanisme implique l'utilisation de polymères cationiques, nonanioniques ou anioniques ayant une masse moléculaire élevée et une structure longitudinale. Un polymère en présence d'un colloïde l'adsorbe à une de ses extrémités à l'aide d'un de ces groupes fonctionnels. Les autres extrémités demeurent libres et peuvent adsorber un autre colloïde. Ce mécanisme permet donc l'agglomération des particules par "pontage" des polymères. Par contre, une concentration de polymères trop élevée peut restabiliser les colloïdes. Les polymères verront alors chacune de leurs extrémités être adsorbées par la même particule, d'où une restabilisation. La figure II.6 décrit le processus.

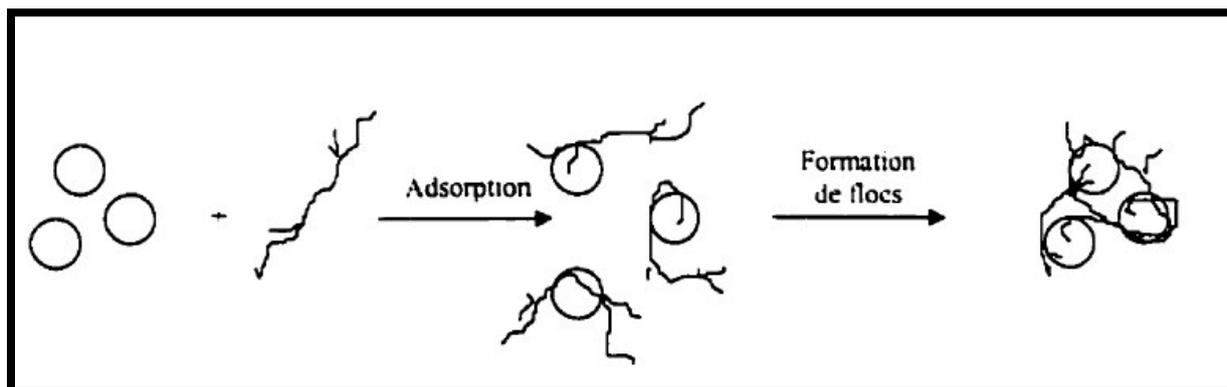


Figure II-6 : Adsorption et pontage à l'aide de polymères

2.2. Le Coagulant

C'est une substance chimique qui cause l'agglomération des particules fines et permet de former un précipité gélatineux dans l'eau brute pouvant ensuite être retiré.

a. Les types de coagulants

Les coagulants les plus utilisés sont des sels d'aluminium (sulfate d'aluminium) ou les sels de fer (chlorure ferrique) ou des polymères organiques. Les phénomènes physico-chimiques lors de la mise en œuvre de ces produits ne sont pas simples, et de nombreux laboratoires poursuivent des recherches d'optimisation de ces produits et de leur mode d'application.

L'efficacité de la clarification dépend d'abord du coagulant utilisé. Les plus efficaces sont des sels de métaux, à bases d'aluminium ou de fer. Ils sont cités dans le tableau 2.1.

Tableau II.1 : Dérivés des sels d'aluminium et de fer.

Les sels		Formule chimique
Sels d'aluminium	Sulfate d'aluminium	$Al_2(SO_4)_3$
	Chlorure d'aluminium	$AlCl_3$
	Aluminate de sodium	$NaAlO_2$
Sels de fer	Chlorure ferrique	$FeCl_3$
	Sulfate ferrique	$Fe_2(SO_4)_3$
	Sulfate ferreux	$FeSO_4$

CHAPITRE II : Coagulation-Floculation

Caractéristiques de sulfate d'aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) MM 666

Le sulfate d'aluminium est un réactif de coagulation et de précipitation des métaux lourds et des phosphates. La concentration du produit commercial est exprimée en terme de teneur en Al_2O_3 . La teneur normale en Al_2O_3 est de 17%.

Le sulfate d'aluminium en solution aqueuse est un acide faible. Le pH de la solution saturée est compris entre 2.5 et 3. La solubilité augmente avec la température

Le procédé de fabrication des coagulants à base d'aluminium repose sur la dissolution de la bauxite par une solution de soude caustique il en résulte une solution alcaline d'aluminate qui contient 50% en poids de Al_2O_3 , cette solution est ensuite acidifier pour donner le sulfate d'alumine acide [40].

La mise en solution se déroule en deux étapes. Les réactions peuvent être représentées de la façon suivante :



L'**étape 1** est une phase d'hydrolyse. Des intermédiaires polychargés positifs se forment, ces intermédiaires polychargés positifs sont très efficaces pour neutraliser la charge primaire négative des colloïdes. Il s'agit de la véritable forme coagulante qui déstabilise les particules chargées négativement.

L'**étape 2** permet la formation du précipité $\text{Al}(\text{OH})_3$. Elle dépend de l'agitation du milieu. Ce précipité est l'élément qui assure le pontage et la coalescence entre les colloïdes déstabilisés : c'est la forme floculante.

Caractéristiques de chlorure ferrique

Le chlorure ferrique est un produit cristallin $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, de masse molaire (MM 270) .la masse spécifique de ce produit caractérisé par une humidité de 60% s'inscrit entre 900 et 1540 kg/m^3 . La masse spécifique d'une solution aqueuse à 40% de chlorure ferrique est de 1.425 kg/l à 20°C. Ce qui est représente une concentration de 570g de FeCl_3 par litre.

Le chlorure ferrique est généralement hexahydraté, obtenu en dissolvant du fer avec de l'acide chlorhydrique et en oxydant la solution avec du chlore.

Ce sel se dissocie au contact de l'eau pour donner l'hydroxyde de fer.



Ce coagulant est aussi employé comme agent de précipitation du phosphate et comme agent de conditionnement de la boue.

Le chlorure ferrique est un acide fort il tache les surface poreuses et nuit aux contacts électriques. Se rince à l'eau.

2.3. Les paramètres influençant sur le fonctionnement du procédé de coagulation

a. L'influence du paramètre pH

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

b. L'influence de la dose de coagulant

La dose de réactif est un paramètre à prendre en compte. Le coagulant qui est habituellement fortement acide a tendance à abaisser le pH de l'eau. Pour se placer au pH optimal, il est possible d'ajouter un acide ou une base. Une dose de coagulant excessive entraîne une augmentation du coût d'exploitation, tandis qu'un dosage insuffisant conduit à une qualité de l'eau traitée insuffisante. La quantité de réactifs ne peut pas se déterminer facilement.

La difficulté principale est de déterminer la quantité optimale de réactif à injecter en fonction des caractéristiques de l'eau brute.

c. L'influence de la température

La température joue un rôle important. En effet, une température basse, entraînant une augmentation de la viscosité de l'eau, crée une série de difficultés dans le déroulement du processus : la coagulation et la décantation du floc sont ralenties et la plage du pH optimal diminue. Pour éviter ces difficultés, une solution consiste à changer de coagulant en fonction des saisons.

d. L'influence de la turbidité

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

Quand la turbidité de l'eau est trop faible, on peut augmenter la concentration en particules par addition d'argiles. Dans le cas de fortes pluies, l'augmentation des matières en suspension (MES) favorise une meilleure décantation. Enfin, pour grossir et alourdir le floc, on ajoute un adjuvant de floculation. [35]

3. LA FLOCCULATION

La floculation est l'ensemble des phénomènes physico-chimiques menant à l'agrégation de particules stabilisées pour former des flocons ou « flocs ». Ce phénomène est réversible, c'est à dire que l'on peut casser ces agrégats, par exemple en agitant fortement le liquide, pour retrouver la solution de colloïdes initiale.

Deux mécanismes assurent la mobilité des particules : le mouvement brownien (floculation péricinétique); et le brassage mécanique (floculation orthocinétique).

a. Floculation péricinétique

Durant ce type de floculation, le mouvement brownien des particules est fonction de la température de l'eau. Lorsqu'elles entrent en contact, les particules ont tendance à s'agglutiner les unes aux autres. Le nombre total de particules varie donc selon l'équation suivante :

$$\frac{dN}{dt} = -4 \frac{\Gamma k \theta (N)^2}{3\eta}$$

Où

N = nombre de particules par m^3

Γ = facteur tenant en compte l'efficacité des collisions

k = constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$)

θ = température (K)

η = viscosité dynamique de l'eau ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)

Le taux de variation du nombre de particules, lors de la floculation péricinétique est important lorsque la taille des particules est inférieure à 1 micron. Au-delà de cette taille, d'autres mécanismes doivent être utilisés afin d'assurer un taux d'agrégation des particules raisonnable.

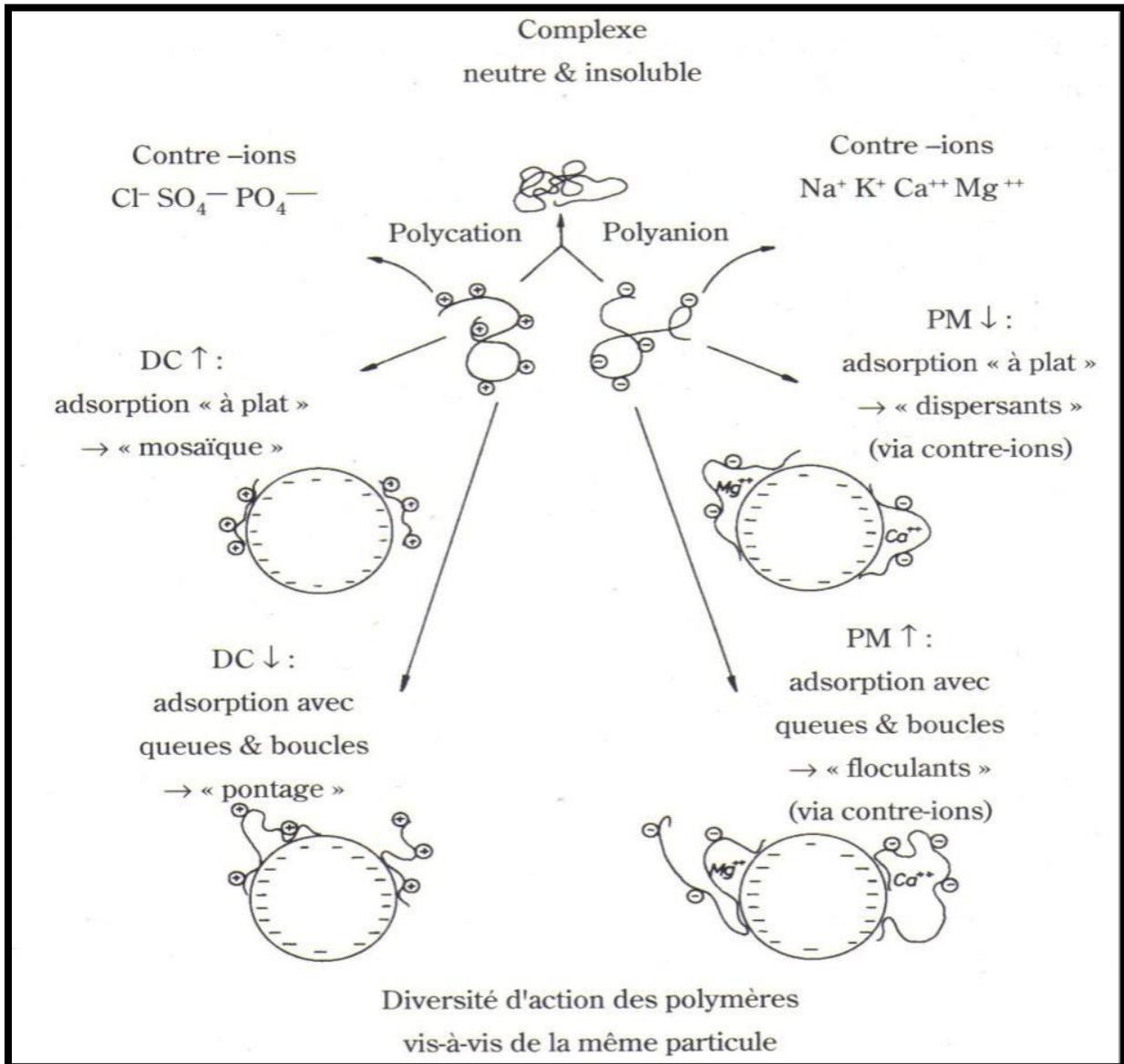


Figure II.7.: Action des polymères vis-à-vis des particules [41].

b. Floculation orthocinétique

Ce type de floculation est fonction de l'énergie dissipée dans le fluide. Elle est donc causée par le brassage de l'eau qui permet d'augmenter les chances de contacts entre les particules. La vitesse du fluide varie dans l'espace et dans le temps et est caractérisée par le gradient de vitesse, G . L'efficacité du processus est exprimée selon l'équation suivante lorsque le régime est turbulent :

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{2}{3} \Gamma G d^3 N^2$$

Où

G = gradient de vitesse (s^{-1})

d = diamètre des particules (m)

CHAPITRE II : Coagulation-Floculation

Le gradient de vitesse est défini selon l'équation (Camp et Stein, 1943) :

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

Où

P = puissance réellement dissipée (W)

V = volume du bassin m^3

μ = viscosité dynamique de l'eau ($kg/m*s$)

Selon le degré de floculation désiré, une agitation plus ou moins énergétique doit être effectuée.

3.1. Flocculant

C'est un polymère qui emprisonne les matières colloïdales agglomérées et forme ainsi des flocons volumineux qui se déposent par gravité. Il est ajouté après la coagulation pour augmenter d'avantage la taille et la cohésion des flocons.

Les types des flocculants

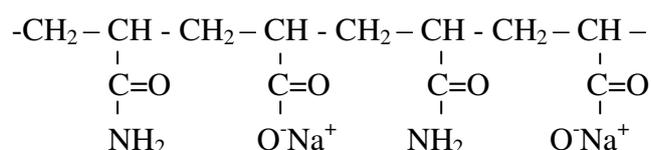
Les flocculants sont des composés agissant par pontage. Il s'agit de polymères à haut poids moléculaire présentant des groupes réactionnels de charge inverse de celle de la suspension à traiter. On distingue des flocculants naturels et synthétiques.

- a. **Flocculants naturels** : ceux de nature organique comme l'alginate ou aqualgine extraits des algues et l'amidon G 60 issu de la pomme de terre ou du tapioca et ceux de nature minérale telles que lac silice activée, l'alumine et la bentonite. *Laminaria digitata* est l'algue la plus utilisée pour la production d'alginate.
- b. **Flocculants synthétiques** se répartissent en polyanions, polycations, non ioniques et amphotères. Ce sont des polymères de type polyacrylate. Toutes ces molécules se définissent par leur poids moléculaire (PM). Un PM élevé est caractéristique de polymères à longue chaîne. Les polymères chargés, ou polyélectrolytes, se définissent également par leur densité de charge (DC). De nombreuses charges électriques neutralisantes procurent une forte DC.

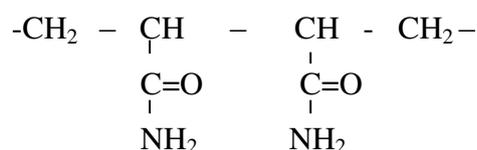
Les flocculants synthétiques sont très nombreux. On peut obtenir des fabricants la formule que l'on désire. Ils se regroupent en trois grandes catégories.

CHAPITRE II : Coagulation-Floculation

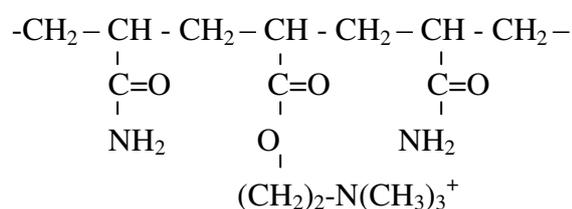
Polymères anioniques obtenus par polymérisation d'un acrylamide ou d'un acide acrylique :



Polymères neutres qui regroupent essentiellement des polyacrylamides:



Polymères cationique ou copolymères d'acrylamide avec monomères cationiques:



Leur poids moléculaire est compris entre 105 à 20.106 daltons, leurs chaînes polymérisées de longueur maximale 40µm, peuvent être linéaires, spiralées en zigzag ou branchées. Ces polymères peuvent être préparés sur mesure : toutes les valeurs de PM et de DC sont possibles. Les produits agréés pour l'utilisation en eau potable doivent contenir moins de 500ppm d'acrylamide libre [42].

4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE COAGULATION-FLOCCULATION

4.1. Avantages

- L'utilisation de ce procédé chimique est très répandue, il y a donc beaucoup d'équipement déjà existant et une multitude d'agents chimiques disponibles;
- Les systèmes de coagulation-floculation chimique sont généralement automatisés et demandent donc peu de surveillance et d'entretien. Une main-d'œuvre hautement qualifiée n'est souvent pas nécessaire;
- La présence de composés toxiques dans l'effluent à traité n'est pas gênante
- Le système est stable lorsque soumis à des températures variables;
- Contrairement au système biologique un système de coagulation-floculation chimique peut accommoder une grande variété de charges et de débits. La complexité dans la charge de l'effluent à traiter et l'intermittence dans le débit ne constituent pas un problème;

CHAPITRE II : Coagulation-Floculation

- Contrairement aux systèmes biologiques, un système chimique de traitement primaire requiert moins d'espace et les coûts d'installation sont moins importants;
- Une réduction quasi complète du phosphore est obtenue, de même qu'une importante réduction en azote;
- Une réduction significative est obtenue en terme de micropolluants, de métaux lourds, de bactéries et de virus;
- Les systèmes chimiques de coagulation-floculation peuvent être conçus afin d'obtenir un produit à valeur ajoutée.

4.2. Inconvénients

- Puisqu'il y a plusieurs réactions en compétition dans ce type de système chimique et plusieurs degrés d'alcalinité en plus des autres facteurs influençant le procédé, il est particulièrement difficile d'établir les bons dosages. Beaucoup d'essais à l'échelle laboratoire sont donc nécessaires pour trouver un traitement optimal. Une surdose de coagulant chimique peut diminuer l'efficacité du système;
- Les coagulants utilisés sont souvent corrosifs, des normes de sécurité doivent être respectées afin que les travailleurs manipulent ces substances avec précaution;
- De grandes quantités de substances chimiques doivent être acheminées à l'usine de traitement;
- 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. Le fer aussi est toxique pour la faune. Cette toxicité génère plusieurs inquiétudes au niveau du grand public;
- L'utilisation de l'aluminium, à cause de son interaction avec les substances alcalines provoque une réduction importante du pH;
- En eau froide, le processus est peu efficace;
- Pour les pays en voie de développement, les coagulants chimiques peuvent être trop coûteux. [43]

1. STATION DE TRAITEMENT DES EAUX POTABLE TILES DIT

Avant l'année 1987, l'alimentation en eau potable en Algérie était assurée par les champs de captage (Forage), la capacité des eaux potable n'arrive pas à couvrir les besoins des consommateurs qui est en agrandissement toujours. Pour combler le déficit en cet élément vital, un système d'approvisionnement a été mis en service à partir de 1987, et ce qui consiste à mobiliser les eaux de surface (barrage).

1.1. Implantation du barrage et la station de traitement

Le barrage Tilesdit est situé sur la rive droite de l'oued Eddous. Dans la partie centrale septentrionale de l'Algérie à 18 km environ à l'est de la ville de Bouira.

Sur le plan topographique. Le site du barrage est le seul favorable sur l'oued Eddous permettant la création d'une retenue de 167 millions m³ d'eau.

La région du barrage de Tilesdit se caractérise par un été chaud et sec et un hiver relativement tiède. La température annuelle moyenne d'air est de 15.1 à 18.8°C [44].

Le barrage de Tilesdit est destiné à l'alimentation en eau potable de la ville de Bouira et les communes limitrophes comme il assure l'irrigation du plateau d'El-Esnam et la vallée du sahel dans la région de M'chedallah.

La station de traitement d'eau potable de Bechloul est implantée en aval du barrage, elle est prévue pour traiter un débit moyen d'eau brute de 3632 m³/h soit 72000 m³/j qui arrive à la station via une conduite DN 1200 mm dont l'écoulement est gravitaire, alimente une population estimée à 230000 habitants avec une capacité de stockage de 67000 m³.

La station de traitement se compose de trois structures qui veillent sur la production, maintenance et le contrôle de la qualité de l'eau brute et traitée ainsi le suivi de l'efficacité du traitement.

Pour cela, divers analyses physico-chimique et bactériologique sont effectuées régulièrement sur les échantillons d'eau brute et traitées. Ce travail se limite aux paramètres physico-chimiques.

Les différents paramètres suivi au niveau du laboratoire local de la station de traitement Tilesdit sont les paramètres organoleptiques (odeur, couleur), paramètres physiques (température, pH, conductivité et turbidité), les paramètres chimiques (dureté total TH, dureté permanente Dp, titre alcalinométré total TAC, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, bicarbonates HCO₃⁻, chlore résiduel Cl₂, l'équilibre calcocarbonique), les paramètres de pollutions (NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, oxydabilité aux permanganate de potassium au milieu acide), les paramètres indésirables (Al³⁺, Fe²⁺, Mn²⁺), et les essais de traitabilités (jar-test et la demande en chlore).

1.2. Description de la station et présentation de la chaîne de traitement

L'unité de production des eaux potable Tilesdit se compose des étapes de traitement suivantes :

- Ouvrage d'entrée muni d'une vanne papillon motorisée.
- Aération par cascade et mélange des réactifs (hypochlorite de sodium NaClO (eau de javel) chlore gazeux, pour la préchloration, l'acide sulfurique ou le lait de chaux pour la correction du pH, sulfate d'aluminium pour la coagulation).
- Chambre de répartition et l'injection de poly-électrolyte.
- Une décantation lamellaire.
- Filtration à sable.
- Désinfection ou chloration final de l'eau.

a. Ouvrage d'entrée

Arrivée de l'eau brute via une conduite DN 1200 mm. Régulation et contrôle du débit d'eau brute par vanne papillon et mesure à l'aide d'un débitmètre électromagnétique.

b. Cascade d'aération

L'aération permet de mélanger l'air à l'eau pour favoriser les réactions d'oxydation, enlever les gaz dissous ou éliminer les goûts et odeurs. L'aération suit les lois de l'échange gaz-liquide, c'est-à-dire les lois de Henry, de Dalton et des gaz parfaits ainsi que les théories de Whitman et Lewis pour le transfert des solutés à travers une interface air-liquide, L'aération peut être installée en tête de la chaîne de traitement de l'eau comme étape de préoxydation. Cette aération est nécessaire lorsque l'eau présente une carence en oxygène et permet alors, soit :

- D'oxyder des éléments réduits, tels les ions ferreux;
- D'augmenter la teneur en oxygène dans l'eau (améliorer le goût, éviter la corrosion des conduites métalliques en formant une couche protectrice);
- D'éliminer des gaz indésirables (H_2S , CO_2 libre, sursaturation en oxygène, composés organiques volatils, etc.).
- L'élimination des goûts et des odeurs et l'oxydation de la matière organique.
- L'inhibition de la croissance algale dans les ouvrages de clarification.
- L'amélioration de la coagulation, floculation.

L'aération de l'eau se fait par chut sur deux cascades, constituée d'un canal central avec marches créant les chutes [9]. Et à la sortie de chaque ouvrage on a une vérification des paramètres chimique (turbidité, pH, conductivité, température).



Figure III.1 : Cascade d'aération

c. Préchloration

La Préchloration est effectuée dans le réservoir sous cascade avant le procédé de clarification, les composés les plus souvent utilisés sont des agents chlorés: le chlore gazeux Cl_2 , l'hypochlorite de sodium ou « eau de javel » (NaClO), et le l'hypochlorite de calcium (Ca(OCl_2). Cette étape à pour objectif la destruction des microorganismes, oxydation des composés azoté NH_4^+ , NO_2^- , oxydation de la matière organique. [45].

La détermination de la dose de l'oxydant se fait à l'aide d'un essai appelé demande en chlore (break –point).

d. Ouvrage de répartition du débit

Il est conçu pour répartir le débit d'eau, arrivant de la cascade d'aération, en deux lignes identiques de décantation et ainsi que l'introduction du débit de recirculation des eaux sales de lavage des filtres.

La difficulté de séparation des colloïdes présents dans une eau par simple décantation ou filtration provient du fait que ces particules, qui sont d'origine minérale (argiles), végétale (acides humiques ou flavique, algues), animale (zooplancton), humaine (suspensions graisseuses, rejets ERU) ou industrielle (eaux résiduaire diverses), se trouvent dans l'eau à l'état de particules chargées électriquement (toujours négativement dans les eaux naturelles). La répulsion mutuelle exercée par ces particules les empêche de s'agglutiner sous l'effet des forces d'attraction naturelle (appelées forces de Vander Waals) et force de répulsion

CHAPITRE III : Description et Fonctionnement de la Station

électrostatique et d'acquérir ainsi une dimension suffisante pour devenir décantables ou filtrables. On dit alors que la suspension est stable.

e. Coagulation

Consiste à ajouter à l'eau un électrolyte permettant de neutraliser les charges négatives qui sont à l'origine du maintien en suspension stable. On utilise généralement des sels d'un métal trivalent, Fe^{3+} ou Al^{3+} .

Les charges positives de l'ion métallique neutralisant les charges négatives du colloïde, les particules peuvent alors se rassembler sous l'effet des forces attractives de Vander Waals et il se produit une précipitation simultanée et conjointe, sous forme d'un gel d'hydroxyde de fer ou d'aluminium, qui adsorbe le colloïde naturel coagulé. Ce gel amorphe se présente sous la forme de flocons que l'on va ensuite s'efforcer de faire grossir progressivement pour le séparer efficacement de l'eau dans les phases ultérieures.

L'eau passe par 03 chambres successives de dimension $L \times l \times h : 5.07 \times 4.90 \times 3.60$ m et chaque chambre est équipée d'un électro-agitateur pour mieux homogénéiser :

- La première chambre sert d'injection de sulfate d'alumine et le mélange des eaux sales de lavage à l'eau brute à l'aide d'un mélangeur rapide de 5.5 kw
- La deuxième chambre sert le lieu d'introduction et de mélange des boues recerclées. Le but de cette étape est d'augmenter la teneur en MES, contribue à la diminution de la consommation des réactifs chimique et pour que les particules isolées puissent s'approcher les unes des autres et s'accrocher à un flocc. Un mélangeur rapide de 5.5 kw est installé.
- La troisième chambre sert à l'introduction du polymère et le mélanger énergiquement (le polymère est peu soluble).

À la sortie de cette dernière chambre, toutes les MES et les particules colloïdales sont déstabilisées, et les floccs formés passent à la floculation pour grossir.

f. Floculation

La floculation a pour objectif de favoriser, à l'aide d'un mélange lent, le contact entre les particules colloïdales déstabilisées. Cette étape est donc consiste sur l'agglomération de ces particules pour former un flocc qu'on peut facilement éliminer par les procédés de décantation et de filtration.

La dimension de chaque bassins de floculation est $15.85 \times 4.90 \times 5.40$ m assurent, à l'aide de deux électro-agitateurs lents, la croissance des floccs (augmentation de la taille des floccs) précédemment formés sans toutefois les casser.

CHAPITRE III : Description et Fonctionnement de la Station

g. Canal bay-passe

Il sert de passage de l'eau brute directement de la cascade d'aération vers les filtres à sable sans passer par la coagulation-floculation et décantation, il est utilisé lorsque la qualité de l'eau brute ne nécessite pas un traitement physique.

h. Décantation

La décantation est la méthode de séparation gravitaire la plus fréquente des MES et colloïdes (rassemblés sous forme de floc après l'étape de coagulation/floculation). Il s'agit d'un procédé de séparation solide/liquide basé sur la pesanteur. Cette séparation est induite par réduction de la vitesse horizontale qui doit être inférieure à la vitesse verticale (de chute, de décantation ou ascensionnelle) afin de favoriser la sédimentation des particules dans un piège. Ces particules s'accumulent au fond du bassin, d'où on les extrait périodiquement. L'eau récoltée en surface est dite décantée. La dimension de cet ouvrage est 15.8 x 6.8 m



Figure III.2 : Décantateur lamellaire

i. Filtration

La filtration est un procédé physique destiné à clarifier un liquide qui contient des MES en le faisant passer à travers un milieu poreux. Les solides en suspension ainsi retenus par le milieu poreux s'y accumulent; il faut donc prévoir un nettoyage du filtre.

La filtration, habituellement précédée des traitements de coagulation, de floculation et de décantation, permet d'obtenir une bonne élimination des bactéries, de la couleur, de la turbidité et, indirectement, de certains goûts et odeurs.

CHAPITRE III : Description et Fonctionnement de la Station

L'eau décantée se devers dans l'ouvrage de filtration de dimension 12x7m est distribuée sur six filtres à sable à l'aide d'une vanne murale située à l'entre de chaque filtre et qui assure une répartition identique du débit d'eau, et qui jeu le rôle d'isolant d'un en cas de lavage du filtre. L'eau filtrée est récoltée dans un réservoir qui est constitué d'un déversoir pour assurer le passage de l'eau vers le réservoir d'eau traitée.



Figure III.3 : Filtre à sable

j. Réservoir d'eau filtrée

En fin de filtration l'eau filtrée est ainsi s'écoule dans un réservoir situé sous les filtres appelé le réservoir d'eau filtrée. Ce réservoir est maintenu à plein grâce à un déversoir même lors de lavage de deux filtres. Ce déversoir sert de passage de l'eau filtrée vers le réservoir d'eau traitée.

k. Désinfection

La désinfection se pratique en fin de traitement et a pour but la destruction des bactéries, ainsi que le maintien sur le réseau de distribution d'un résiduel bactériostatique destiné à éviter la dégradation de la qualité de l'eau (prolifération des micro-organismes). Son efficacité dépend de plusieurs facteurs :

- Le pouvoir létal du bactéricide utilisé: chlore, bioxyde de chlore, ozone et hypochlorite de sodium (eau de javel)
- Le temps de contact avec l'eau à traiter.

CHAPITRE III : Description et Fonctionnement de la Station

- La composition physico-chimique de l'eau (pH, Température, turbidité et teneur en matières organiques).
- La qualité du traitement en amont.

On considère que l'effet désinfection est assuré s'il existe, après contact de vingt minutes, un résiduel de 0,1 ou 0,2 mg/l de chlore libre ou de dioxyde de chlore.

Cependant, la cinétique d'oxydation sera très variable selon l'eau à traiter ; il est souvent utile d'avoir un temps de contact beaucoup plus long pouvant aller jusqu'à 2 à 3 heures pour avoir un résiduel stable de chlore libre.

1. Réservoir d'eau traitée

Le réservoir d'eau traitée de capacité de 13000m³ est divisé en deux (02) compartiments. À l'entrée de chaque compartiment se trouve une chambre, dite canal de contact, réservée au mélange et au contact du chlore avec de l'eau pour un minimum de temps. L'eau ainsi chlorée passe par-dessus d'un déversoir vers chaque compartiment où est stockée l'eau traitée. Le réservoir est équipé d'un pH-mètre, turbidimètre et un conductimètre.

[46]

Tableau 1 : Propriétés physico-chimiques de l'eau brute du barrage TILESDIT (données de l'année 2017).

Paramètres	Concentration
pH	7.80
T° C	20
Turbidité (NTU)	4
Conductivité (µs/cm)	600
Sal (‰)	0.2
TH (°F)	22
Ca ²⁺ (mg/l)	40
Mg ²⁺ (mg/l)	23
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	65
Cl ⁻ (mg/l)	65
TAC (mg/l CaCO ₃)	140
HCO ₃ ⁻ (mg/l CaCO ₃)	170
NH ₄ ⁺ (mg/l)	0.3
NO ₂ ⁻ (mg/l)	0.1

CHAPITRE III : Description et Fonctionnement de la Station

PO ₄ ³⁻ (mg/l)	0.2
NO ₃ ⁻ (mg/l)	0.5
MO (mg/l O ₂)	2.5
Al ³⁺ (mg/l)	0.025
Fer total (mg/l)	0.03

Tableau 2 : Propriétés physico-chimiques de l'eau traitée de la station TILES-DIT
(données de l'année 2017).

Paramètres	Concentration
pH	7.5
T° C	20
Turbidité (NTU)	0.4
Conductivité (µs/cm)	610
Sal (‰)	0.2
TH (°F)	20
Ca ²⁺ (mg/l)	38
Mg ²⁺ (mg/l)	20
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	88
Cl ⁻ (mg/l)	68
TAC (mg/l CaCO ₃)	130
HCO ₃ ⁻ (mg/l CaCO ₃)	158
NH ₄ ⁺ (mg/l)	00
NO ₂ ⁻ (mg/l)	00
PO ₄ ³⁻ (mg/l)	00
NO ₃ ⁻ (mg/l)	0.1
MO (mg/l O ₂)	0.65
Al ³⁺ (mg/l)	0.14
Fer total (mg/l)	0.02

CHAPITRE IV : Matériel et Méthodes

Des essais expérimentaux ont été menés pour évaluer la faisabilité et l'efficacité de l'utilisation du chlorure ferrique comme coagulant en comparaison avec le sulfate d'aluminium qui est actuellement ajouté à l'eau brute de la station.

En premier lieu, une présentation des différents réactifs utilisés, de l'appareillage et de la méthodologie expérimentale adoptée qui devront permettre de juger l'efficacité du procédé de traitement étudié. Nous décrivons ensuite la méthode de coagulation-floculation basée sur les essais de jar-test et étudier les caractéristiques physico-chimiques après décantation et filtration des échantillons d'eau prélevés de la station.

Au cours de notre étude, les solutions de sulfate d'aluminium avec des doses croissantes sont ajoutées à chaque béchers à pH libre, pH=6.5 et pH=5 sont soumises pendant deux minutes à une agitation rapide de 180 tour/min puis la coagulation est améliorée par l'ajout d'une dose constante de polymère anionique avec une agitation rapide pendant deux minutes. La vitesse est par la suite est réduite à 40 tour/min pour une durée de 16min. Après une décantation de 45minutes, le surnageant est récupéré pour être filtré sous vide sur un filtre de porosité de 0.45 μm . les mêmes étapes sont suivi pour l'essai de chlorure ferrique. Le filtrat est ensuite dosé pour analyse au spectrophotomètre [45].

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Verreries et appareillage

Outre du petit matériel (béchers, pipettes, burettes, fioles, éprouvettes, filtres à membrane 0.45 μm) nous avons utilisé les appareils suivants :

- PH mètre de paillasse sensION de marque HACH
- Conductimètre de paillasse WTW
- Rampe de filtration sous vide à 6 postes
- Agitateur magnétique de type ISOLAB
- Spectrophotomètre UV visible HACH DR5000
- Plaque Chauffante STUART.

1.2. Mesure de pH

Le pH est l'un des paramètres chimique les plus importants lorsqu'il s'agit de déterminer la qualité d'une eau destinée à la consommation.

- a. **Principe :** Il s'agit de la mesure de potentiel existant entre une électrode de mesure et une électrode de référence plongeant dans la même solution.



Figure IV.1 : pH mètre de paillasse HACH (sensION) de laboratoire de l'unité

b. Réactifs

Les solutions étalons pH4, pH7, pH10, prêtes à l'emploi. [Réf : NA 751]

1.3. Mesure de la température

La température influe sur l'ensemble des processus chimique et physique, tel que la solubilité des gaz dans l'eau (oxygène dissous, gaz carbonique), le pH, la conductivité électrique, les vitesses de réaction chimique et biochimique; il est donc nécessaire de mentionner la température de l'échantillon au moment de prélèvement et la température à laquelle certaines mesure et réactions chimique sont effectuées.

Principe : La température est mesurée à l'aide d'une sonde de conductivité combinée à une sonde de température, la mesure est directe, on fait plonger la sonde dans l'échantillon jusqu'au niveau de lecture et laisser la température se stabilise. [Réf : NA 750]

1.4. Mesure de la conductivité

La détermination de ce paramètre se fait d'une manière direct, à l'aide d'un instrument approprie de la conductivité électrique (conductimètre WTW avec électrode de mesure, et une sonde de température, la conductivité électrique est une mesure du courant conduit par les ions présents dans l'échantillon d'eau.



Figure IV.2: Multi-éléments de paillasse WTW de laboratoire de l'unité

1.5. Mesure de la turbidité

La turbidité est l'effet optique causé par les phénomènes de dispersion et d'interférence des rayons lumineux, lorsqu'ils passent à travers une eau chargée de petites particules en suspension, celles-ci peuvent être constituées de matières organiques ou minérales dans les eaux. La mesure de la turbidité se fait à l'aide d'un turbidimètre HACH 2100 AN IS. Les résultats sont directement exprimés en NTU par affichage à cristaux liquide.



Figure IV.3 : Turbidimètre HACH 2100 AN IS de laboratoire d'unité

1.6. Le Jar-Test

Les essais de jar-test ont été conduits sur des eaux de barrage Tilesdit servant à l'alimentation d'usine de production d'eau potable

CHAPITRE IV : Matériel et Méthodes

L'utilisation de Jar-test remonte aux plusieurs décennies, les avantages du Jar-test sont importants; en voici quelques-uns :

- Déterminer les doses optimales de produits chimiques (coagulants et aides-coagulants), prédire la qualité de l'eau décantée.
- Déterminer le pH optimal de coagulation.
- Déterminer la solidité des floes formés.
- Déterminer les intensités de mélange optimal

a. Description des essais de floculation

Les essais de jar-test ont été réalisés sur un flocculateur à 6 agitateurs (AQUALYTIC). Cet appareil permet d'agiter simultanément le liquide contenu dans une série de béchers remplis chacun de 1 litre d'eau et leur vitesse de rotation peut varier de (0 à 200 tr/min).



Figure IV.4 : flocculateur à 6 agitateurs (AQUA LYTIC) de laboratoire de l'unité

b. Préparation des coagulants

Nous avons effectué des séries d'essais de coagulation floculation: tout d'abord avec le sulfate d'aluminium, puis avec le chlorure ferrique pour pouvoir faire une comparaison entre les deux.

b.1. Sulfate d'aluminium

Le sulfate d'aluminium disponible au niveau de la station se présente sous forme de poudre blanche, Les solutions de sulfate d'aluminium à 120 g/l sont préparées par dissolution des cristaux dans de l'eau de service, des dilutions sont préparées avant l'utilisation.

CHAPITRE IV : Matériel et Méthodes

- **Solution mère de sulfate d'aluminium $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ à 120 g/l**

***Préparation des dilutions**

☞ Solution intermédiaire de coagulant $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ de concentration **12000mg/l**

- Prendre 10ml de la solution mère (120 000 mg/l) dans une fiole de 100ml, compléter au volume avec eau de service.

☞ Solution fille de coagulant $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ de concentration **1000mg/l**

- Prendre 24 ml de la solution intermédiaire (12000mg/l) dans un bécher de 240ml et compléter le volume au 240ml.

☞ Calcul les volumes à injecter pour les différentes doses du coagulant.

Exemple de dose : 10- 15- 18- 20- 25- 30 mg/l, à partir de concentration fille 1000mg/l, et pour un volume d'eau brute de 1000ml, on calcul le volume de la solution fille à injecter pour avoir une **dose de 10mg/l. (exemple de calcul)**

$$N_1V_1=N_2V_2 \text{ donc : } 1000 \text{ mg/l. } V_1= 10 \text{ mg/l} \cdot 1000$$

$$V_1= 10 \cdot 1000 / 1000$$

$$V_1=10 \text{ ml.}$$

b.2. Chlorure ferrique FeCl_3

Le chlorure ferrique se présente sous forme de liquide de concentration 41 %, il est nécessaire aussi de préparer les dilutions justes avant son utilisation.

- **Solution mère de chlorure ferrique FeCl_3 à 41 %, $d= 1.45$ soit 594.5 g/l**

***Préparation des dilutions**

☞ Solution intermédiaire de coagulant FeCl_3 de concentration **50g/l.**

- Prendre 8.410ml de la solution mère (594.5g/l) dans une fiole de 100ml, compléter au volume avec eau de service.

☞ Solution fille de coagulant FeCl_3 de concentration 10g/l.

- Prendre 20.55ml de la solution intermédiaire (50g/l) dans une fiole de 100ml et compléter le volume au 100ml avec l'eau de service.

☞ Calcul les volumes à injecter pour les différentes doses du coagulant.

Exemple de dose : 10- 15- 18- 20- 25- 30 mg/l. À partir de concentration fille 10g/l et pour un volume d'eau brute de 1000ml, on calcul le volume de la solution fille à injecter pour avoir une **dose de 10mg/l.**

CHAPITRE IV : Matériel et Méthodes

$$N_1V_1=N_2V_2 \text{ donc } 10.1000 \text{ mg/l. } V_1= 10 \text{ mg/l} .1000$$

$$V_1= 10.1000/1000 .10= 1 \text{ ml}$$

c. Flocculant (Polymère anionique)

- Solution mère 0.2 g/l

*Préparation des dilutions

☞ Solution fille de polymère de concentration **100mg/l**.

- Prendre 50ml de la solution mère (200mg/l) dans une fiole de 100ml, compléter au volume avec eau de service.

☞ Calcul le volume à injecter pour une dose de 0.02mg/l (exemple : à partir de concentration de fille 100mg/l et pour un volume d'eau brute de 1000 ml, on calcul le volume de la solution fille à injecter pour avoir une **dose de 0.02mg/l**.

$$N_1V_1=N_2V_2 \text{ donc : } 100 \text{ mg/l. } V_1= 0.02 \text{ mg/l} .1000 \leftrightarrow V_1= 0.02.1000/100$$

$$V_1=0.2 \text{ ml.}$$

d. Protocole de Jar-Test

- Agiter l'échantillon prélevé et remplir chaque bécher du flocculateur d'un litre d'eau à tester, mettre les pales d'agitation en place.
- Noter la température de l'eau brute. L'essai doit être réalisé à la température la plus réaliste possible.
- Noter également les autres paramètres physiques de l'eau brute : ph, turbidité, conductivité.
- 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.
- 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 min) d'agitation rapide (dispersion du réactif, coagulation).
- Ajouter le polymère avec toujours l'agitation rapide.
- Réduire la vitesse de rotation des pales à 40 tours/min (agitation lente) pendant 16 mn. Dans tous les cas, la durée d'agitation (rapide puis lente) ne doit pas excéder 20 min.

CHAPITRE IV : Matériel et Méthodes

- Au temps $t=20\text{min}$ (agitation rapide + agitation lente), relever les pales des agitateurs (doucement en prenant soin de ne pas casser les floccs formés).
- Attendre 45min de décantation. Ce temps doit être suffisant pour obtenir une bonne décantation des floccs mais pas trop long pour conserver des variations significatives de la qualité des eaux traitées (en particulier la turbidité).
- Prélever, à l'aide d'un siphon, un volume dans chaque béccher en veillant à ne pas siphonner la surface de l'eau :
 - Pour les eaux après décantation :
 - Turbidité.
 - pH après coagulation.
 - Température.
 - Conductivité.
 - Pour les eaux après filtration sur membrane $0.45\ \mu\text{m}$:
 - Turbidité
 - Al_2 résiduel
 - Fer résiduel
 - Matière organique

On détermine donc **la dose optimale de coagulant (en mg/l)**.

Le rendement d'élimination de chaque paramètre est ensuite calculé par l'équation suivante

$$R\% = \frac{(X_{\text{initial}} - X_{\text{final}})}{X_{\text{initial}}} \times 100$$

X_{initial} : la concentration initiale

X_{final} : la concentration finale

Nota Bene

- ✚ L'eau brute à analyser est prélevée au moment même de l'analyse.
- ✚ Préparation et conservation des échantillons

1.7. Détermination de l'oxydabilité au permanganate de potassium en milieu acide

L'oxydation par un excès de permanganate de potassium en milieu acide et à ébullition (10mn), des matières oxydables contenues dans l'échantillon. Réduction de l'excès de

CHAPITRE IV : Matériel et Méthodes

permanganate par l'oxalate de sodium en excès et titrage en retour de l'excès d'oxalate par le permanganate de potassium [ISO 8467-1993].

➤ Réactifs utilisés

- * Solution d'acide sulfurique à 735 g/l
- * Solution d'acide sulfurique à 196g/l ;
- * Solution de permanganate de potassium KMnO_4 à 0,01N ;
- * Solution d'oxalate de sodium $\text{C}_2\text{Na}_2\text{O}_4$ à 0,01N.

➤ Echantillonnage et échantillons

Immédiatement après réception de l'échantillon au laboratoire, ajouter 5 ml d'acide sulfurique (735 g/l) par litre d'échantillon, analyser les échantillons aussitôt que possible et au plus tard 2 jours après le prélèvement, les conserver à l'obscurité entre 0°C et 5 °C.

Agiter les bouteilles utilisées pour la conservation et s'assurer que leurs contenus sont bien homogénéisés avant de prélever une prise d'essai pour analyse.

➤ Mode opératoire

- Transférer, à l'aide d'une pipette, 25 ml d'échantillon dans un erlenmeyer.
- Ajouter 5ml d'acide sulfurique à 196g/l et mélanger en agitant doucement ;
- Placer les flacons sur la plaque chauffante pendant $10\text{min} \pm 2\text{min}$;
- Ajouter 5ml de la solution de KMnO_4 , noter l'heure ;
- Après 10min ajouter 5ml de la solution d'oxalate de sodium et attendre la décoloration de la solution ;
- Titrer la solution encore chaude avec la solution de KMnO_4 à 0,01N jusqu'à l'apparition d'une coloration rose pâle persistant environ 30s. Noter le volume V échantillon ;
- Procéder à un essai à blanc dans les mêmes conditions, mais sur 25ml d'eau distillée ; soit V_0 le volume de KMnO_4 utilisé (V_0 doit être $\leq 0,2$ ml).

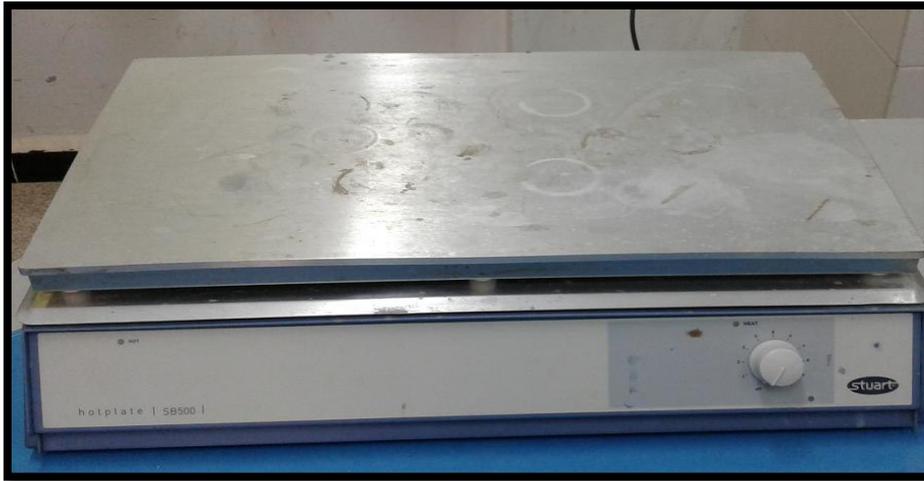


Figure IV.5 : plaque chauffante STUART de laboratoire de l'unité

➤ Expression des résultats

La quantité de matière oxydable, par le permanganate exprimée en mg/l d'O₂ est donnée par la formule suivante :

$$Q, \text{ mg/lO}_2 = f \times \frac{(V_{ech} - V_0)}{V_t}$$

$$Q, \text{ mg/lO}_2 = 16 \times \frac{(V_{ech} - V_0)}{V_t}$$

* V_o : volume de KMnO₄ consommé par l'essai à blanc ;

* V_{ech} : volume de KMnO₄ consommé par l'échantillon ;

* V_t : volume de KMnO₄ consommé par l'étalonnage.

1.8. Détermination de la concentration en fer total résiduel

Après oxydation en milieu acide, le fer Fe³⁺ est réduit à l'état ferreux Fe²⁺ et dosé par spectrophotométrie en utilisant la coloration rouge donnée par les sels ferreux avec la phénanthroline-1,10. [ISO 6332-1988].

➤ Réactifs utilisés

- Acide chlorhydrique HCl : densité=1,12 ;
- Solution de peroxodisulfate de potassium à 40 g / l ;
- Solution de chlorhydrate d'hydroxylamine à 100 g / l ;
- Solution de phénanthroline-1,10 à 0,5 % ;
- Solution tampon d'acétate d'ammonium.

CHAPITRE IV : Matériel et Méthodes

➤ Echantillonnage et échantillons

Acidifier l'échantillon, immédiatement après la prise, à pH 1 en général, 1 ml d'acide sulfurique concentré ($d=1.84$) est suffisant pour 100 ml d'échantillon

➤ Mode opératoire

- Prendre 50ml de l'échantillon acidifier à analyser ;
- Ajouter 5ml de peroxydisulfate de potassium et maintenir à douce ébullition durant environ 40 min en s'assurant que le volume ne descend pas au-dessous de 20 ml;
- Refroidir et transvaser dans une fiole jaugée de 50 ml et compléter le volume avec de l'eau distillée;
- Transvaser la solution dans une fiole de 100 ml, ajouter 1ml de la solution de chlorhydrate d'hydroxylamine et mélanger soigneusement ;
- Ajouter 2ml de la solution tampon d'acétate pour obtenir un pH entre 3,5 et 5,5
- Ajouter 2ml de la solution de phénanthroline-1,10 et conserver pendant 15min à l'obscurité ;
- Effectuer la lecture au spectrophotomètre à $\lambda=510$ nm.



Figure IV.6 : Spectrophotomètre UV-Visible DR 5000 de laboratoire de l'unité.

1.9. Détermination de la concentration de l'aluminium résiduel

Pour la détermination de la concentration de l'aluminium résiduel nous avons utilisé la méthode spectrophotométrique. le principe de cette méthode résulte que les ions d'aluminium se combinent avec le rouge d'alizarine pour former un complexe jaune-rouge qui est dosé au spectrophotomètre à la longueur d'onde $\lambda=490$ nm (méthode spectrophotométrie au rouge d'alizarine), la limite de détection par cette méthode est de 0.6 mg/l

CHAPITRE IV : Matériel et Méthodes

➤ Réactifs

- Chlorure de Calcium dihydraté ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) à 0.7 g/l
- Acide thioglycolique ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2\text{S}$) à 80%, $d=1.326$
- Solution tampon d'acétate de sodium pH=4.6
- Rouge d'alizarine ($\text{C}_{14}\text{H}_7\text{NaO}_7\text{S}$)

➤ Echantillonnage et échantillons

Acidifier l'échantillon, immédiatement après la prise, à pH entre 1 et 2 en général, 1 ml d'acide chlorhydrique (25%) est suffisant pour 500 ml d'échantillon

➤ Mode opératoire

- Introduire 25 ml de l'échantillon acidifié dans une fiole de 50 ml.
- Ajouter 2.5 ml de chlorure de calcium.
- Ajouter 1 ml de l'acide thioglycolique.
- Ajouter 5 ml de la solution tampon.
- Ajouter 1 ml rouge d'alizarine.
- Compléter le volume à 50 ml avec l'eau distillée, laisser reposer 120 mn après l'ajout des réactifs.
- Effectuer les lectures au spectrophotomètre à la longueur d'onde $\lambda=490$ nm.

CHAPITRE V : Résultats et Discussions

1. RESULTAS ET DISCUSSIONS

1.1 Résultats

Une première série d'essais de jar-test effectuée au laboratoire d'unité le 22 /05 /2017, pour déterminer les meilleurs conditions d'élimination de la turbidité et de la couleur à pH libre, après l'ajout de différentes doses des coagulants utilisés (sulfate d'aluminium et chlorure ferrique). A une température environ 25°C et un pH de l'eau brute de 7.9 nous avons effectués les analyses physico-chimiques de chaque béccher (turbidité, couleur, conductivité et pH) après décantation de 45minute, après filtration sur membrane 0.45µm on a mesurés la turbidité, les concentrations résiduelles des chaque métal (Al^{3+} , Fe^{2+}), les résultats sont regroupés dans le tableau suivant.

Tableau V.1 : Résultats des analyses physico-chimiques effectué le 22 /05 /2017

	Eau brute	Sulfate d'aluminium						Chlorure ferrique					
Dose(mg/l)	0	10	15	18	20	25	30	10	15	18	20	25	30
Paramètres													
						après décantation							
pH	7.94	7.72	7.65	7.60	7.41	7.38	7.34	7.70	7.62	7.54	7.36	7.34	7.29
Turbidité (NTU)	4.41	1.30	0.74	0.61	0.60	0.52	0.51	1.08	0.88	0.87	0.85	0.84	0.8
Couleur (mg/Pt)	31	9	6	5	6	4	4	14	18	20	20	21	22
T° (C)	19.1	21.3	21.9	22.3	22.4	22.4	22.2	20.4	20.4	20.3	20.2	21	21.1
Conductivité(µs/cm)	623	624	624	624	626	626	628	631	634	636	639	641	643
R % d'élimination de la turbidité	0	70	83	86	86	88	88	75	80	80	80	81	82
R % d'élimination de la couleur	0	71	80	84	80	87	87	54	41	35	35	32	29
						après filtration							
Turbidité (NTU)	4.41	0.84	0.64	0.51	0.41	0.35	0.25	0.55	0.37	0.4	0.45	0.44	0.31
Al ³⁺ (mg/l)	0.029	0.131	0.138	0.111	0.104	0.094	0.087	0	0	0	0	0	0
Fe ²⁺ (mg/l)	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.11	0.09	0.07	0.04	0.04	0.03

CHAPITRE V : Résultats et Discussions

Des essais de coagulation-floculation ont été réalisés sur l'eau brute à pH=6.5 et pH=5, les résultats d'analyses sont regroupés dans les tableaux 2,3

Tableau V.2 : Résultats des analyses physico-chimiques effectué le 27 /05 /2017

Paramètres \ Dose (mg/l)	Eau brute	Sulfate d'aluminium						Chlorure ferrique					
	0	10	15	18	20	25	30	10	15	18	20	25	30
PH	7.60	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
T° (C)	21.8	23.8	24.5	24.2	24	23.7	24.4	26	35.6	25.3	24.6	25.2	25
Turbidité eau decantée (NTU)	3.08	1.41	0.77	0.71	0.46	0.44	0.43	0.97	0.87	0.74	0.70	0.48	0.47
R % d'élimination de la turbidité	0	54	75	77	85	86	86	68	72	76	77	84	85
Turbidité eau filtrée (NTU)	3.08	0.86	0.64	0.53	0.41	0.41	0.35	0.74	0.6	0.43	0.53	0.47	0.35
Al ³⁺ (mg/l)	0.029	0.014	0.019	0.017	0.021	0.02	0.005	0	0	0	0	0	0
Fe ²⁺ (mg/l)	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.11	0.07	0.09	0.04	0.04	0.05
MO(mg/IO ₂)	2.5	0.96	1.92	0.96	1.6	2.24	1.28	1.28	2.24	1.6	0.32	1.28	3.84

Tableau V. 3 : Résultats des analyses physico-chimiques effectué le 07 /06 /2017

Paramètres \ Dose (mg/l)	Eau brute	Sulfate d'aluminium						Chlorure ferrique					
	0	10	15	18	20	25	30	10	15	18	20	25	30
PH	7.54	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
T° (C)	21.6	22.3	21.1	21	21.1	21.2	21.4	21.5	21.3	21.1	21	20.8	21.2
Turbidité eau décantée (NTU)	3.80	2.25	1.83	1.28	1.09	0.78	0.35	0.83	0.41	0.36	0.33	0.28	0.26
R % d'élimination de la turbidité	0	41	52	66	71	79	91	78	89	90	91	93	93
Turbidité eau filtrée (NTU)	3.80	0.38	0.33	0.29	0.28	0.27	0.24	0.35	0.31	0.28	0.27	0.27	0.24
Al ³⁺ (mg/l)	0,009	0.505	0.4	0.203	0.306	0.559	0.157	0	0	0	0	0	0
Fe ²⁺ (mg/l)	0,03	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.18	0.25	0.62	0.65	0.6	0.59
MO(mg/IO ₂)	2.25	0.96	2.24	2.2	2.24	2.24	1.6	1.28	1.6	1.6	1	2.56	1.28

1.2 Discussions

a. Influence de la dose de coagulant sur le pH :

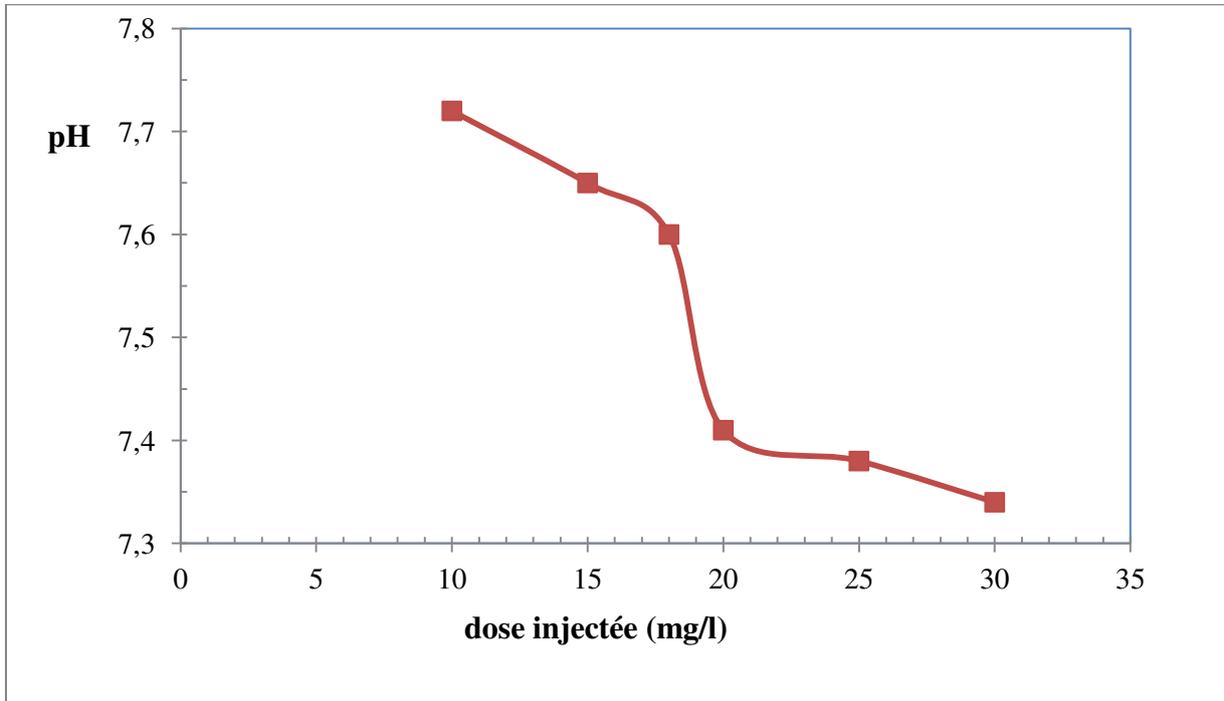


Figure V.1 : Variation du pH de l'eau décantée en fonction de la dose du coagulant (Sulfate d'aluminium).

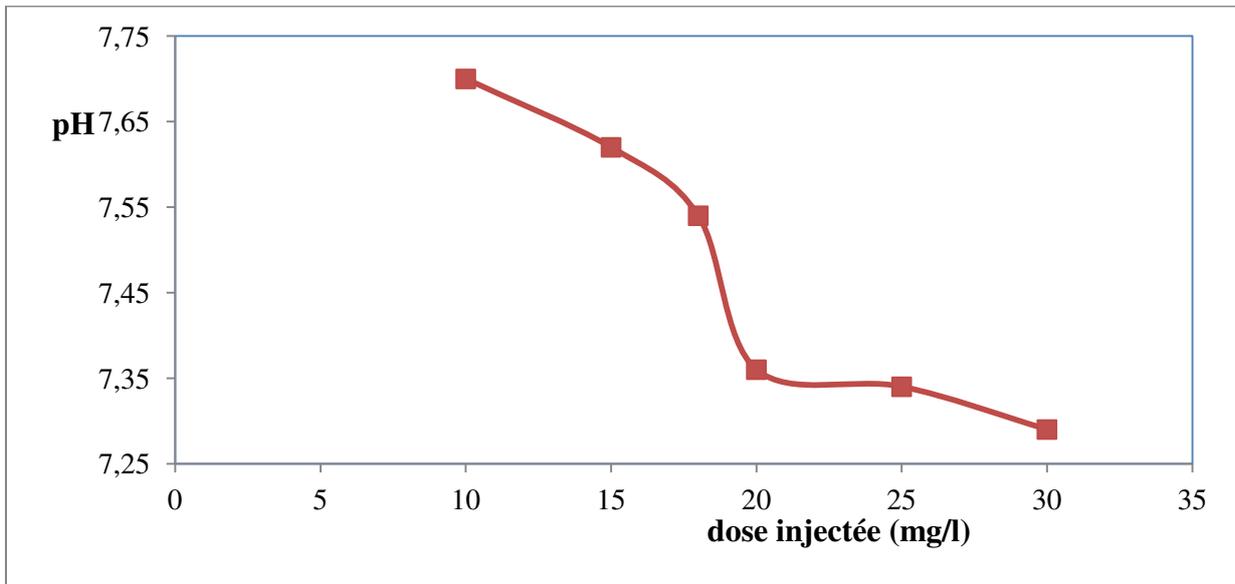


Figure V.2: Variation du pH de l'eau décantée en fonction de la dose du coagulant (Chlorure ferrique).

CHAPITRE V : Résultats et Discussions

A partir des expériences du jar-test sur l'eau brute prélevée le 22/05/2017, on a remarqué que la valeur initiale du pH est 7,94. Cette valeur a diminué progressivement en augmentant la dose du coagulant le sulfate d'aluminium ou le chlorure ferrique, mais qui reste toujours dans les normes et oscille entre 8 et 7. Il atteint sa valeur de 7,38 à la dose correspondante à 25mg/l de coagulant le sulfate d'aluminium et une valeur de 7.36 à la dose de 20mg/l de coagulant chlorure ferrique respectivement, ce qui est inhérent au caractère acide fort de chlorure ferrique.

Les résultats obtenus corroborent les résultats obtenus par FLETCHER et al. 2001 [81] LAMRINI et al. 2005[82] LIND, 1994a [83], concernant l'ajout du coagulant entraînant la formation d'hydroxyde du métal avec libération d'une certaine acidité (hydrolyse), ce qui explique la diminution de la valeur du pH



a. Effet de la dose du coagulant et le pH sur la turbidité

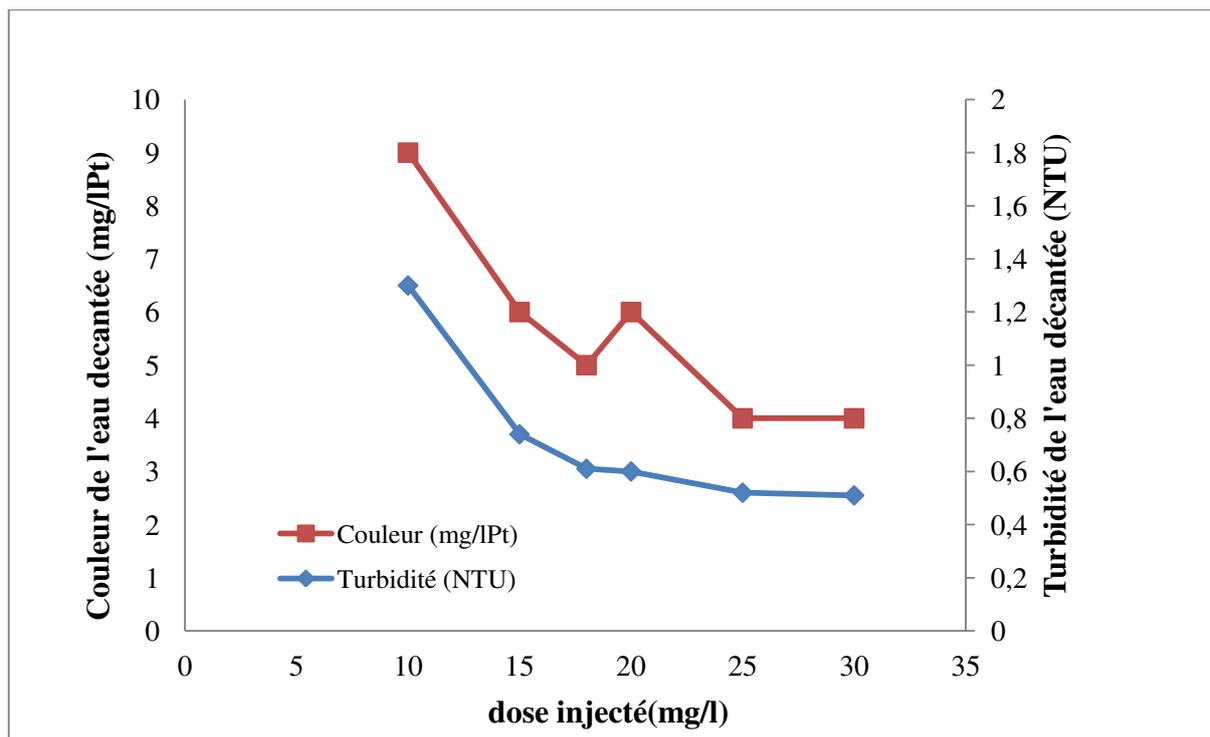


Figure V.3: Variation de la turbidité et la couleur de l'eau décantée en fonction de la dose du coagulant (sulfate aluminium).

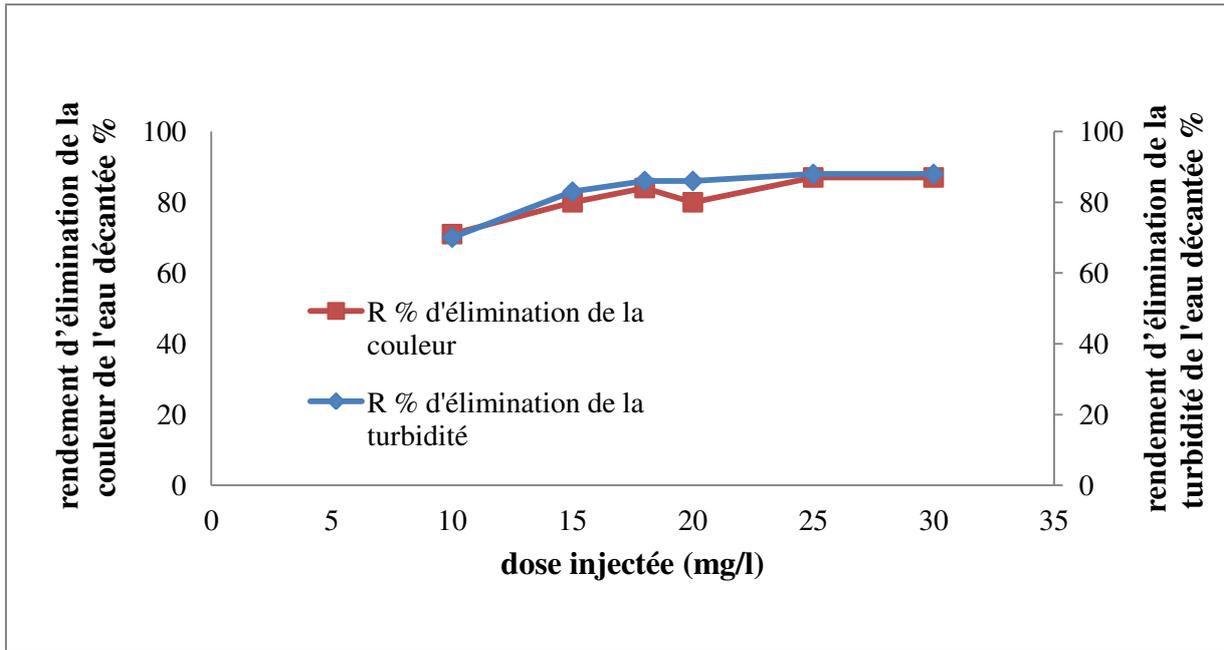


Figure V.4: Variation de rendement d'élimination de la turbidité et la couleur de l'eau décantée en fonction de la dose du coagulant (sulfate aluminium).

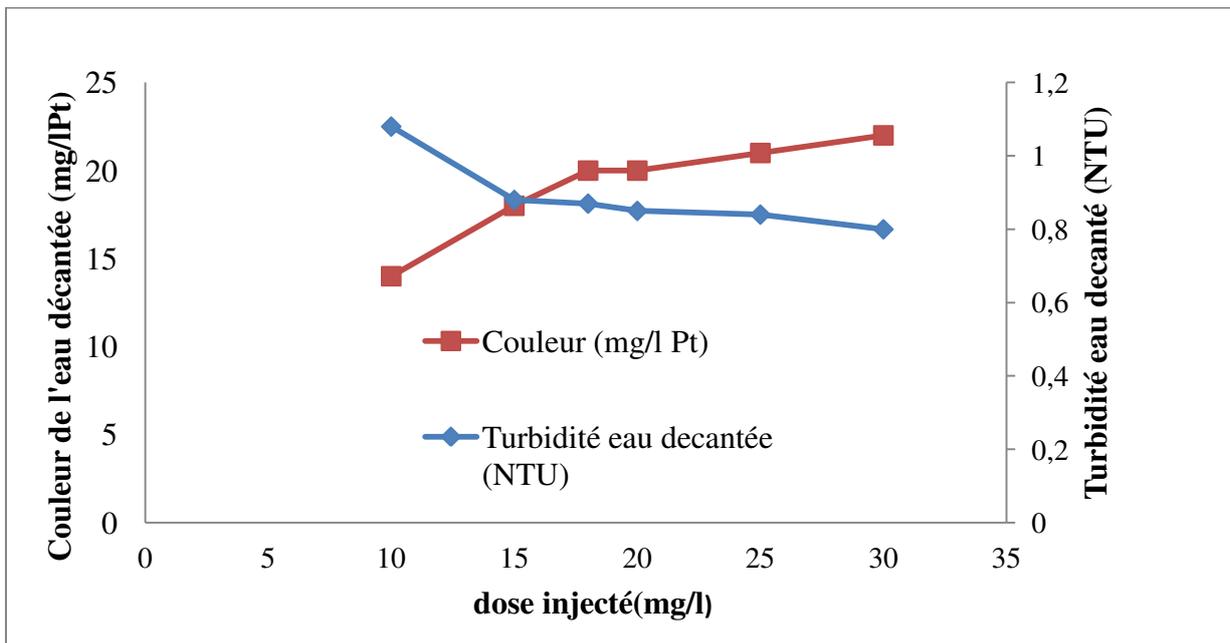


Figure V.5: Variation de la turbidité et la couleur de l'eau décantée en fonction de la dose du coagulant (chlorure ferrique).

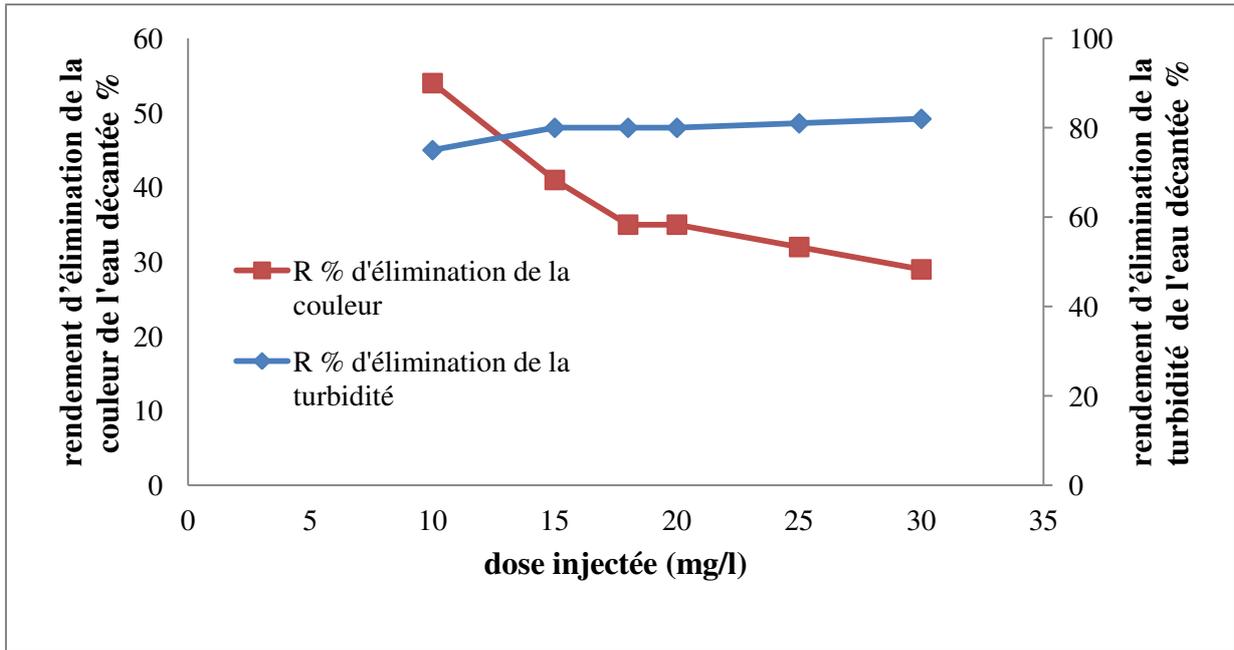


Figure V.6: Variation de rendement d'élimination de la turbidité et la couleur de l'eau décantée en fonction de la dose du coagulant (chlorure ferrique).

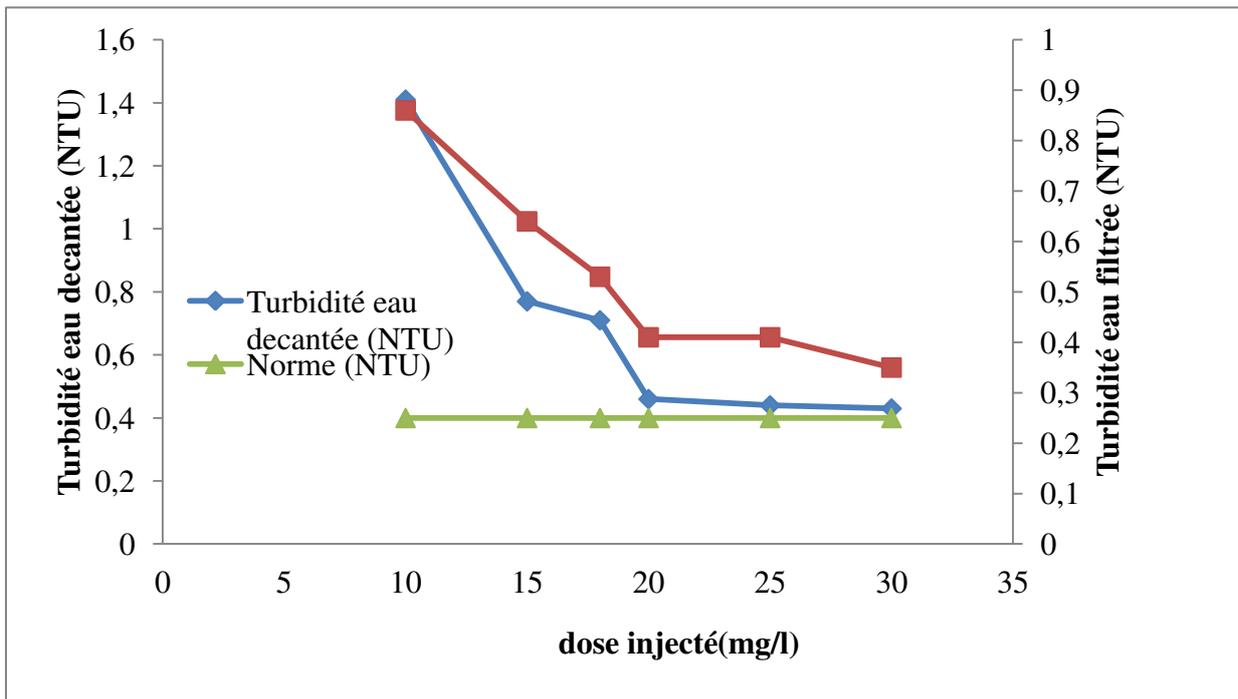


Figure V.7: Variation de la turbidité de l'eau décantée et l'eau filtrée en fonction de la dose du coagulant (sulfate d'aluminium) à pH= 6.5.

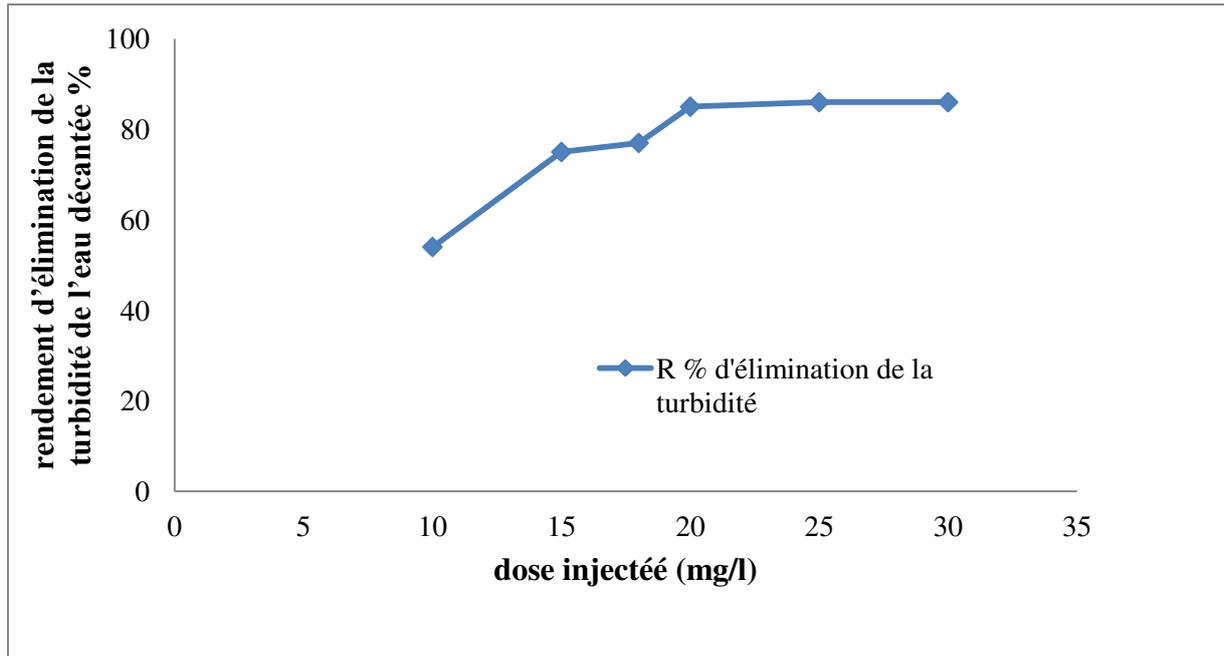


Figure V.8: Variation de rendement d'élimination de la turbidité de l'eau décantée en fonction de la dose du coagulant (sulfate d'aluminium) à pH= 6.5.

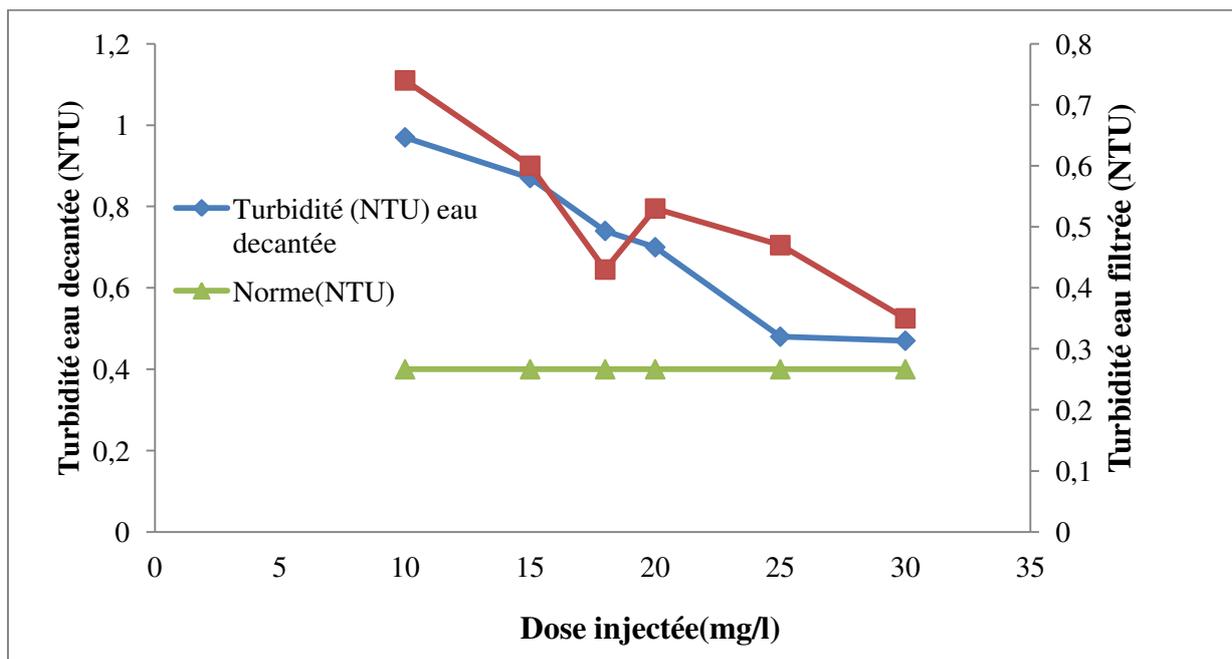


Figure V.9: Variation de la turbidité de l'eau décantée et l'eau filtrée en fonction de la dose du coagulant (Chlorure ferrique $FeCl_3$) à pH=6.5.

CHAPITRE V : Résultats et Discussions

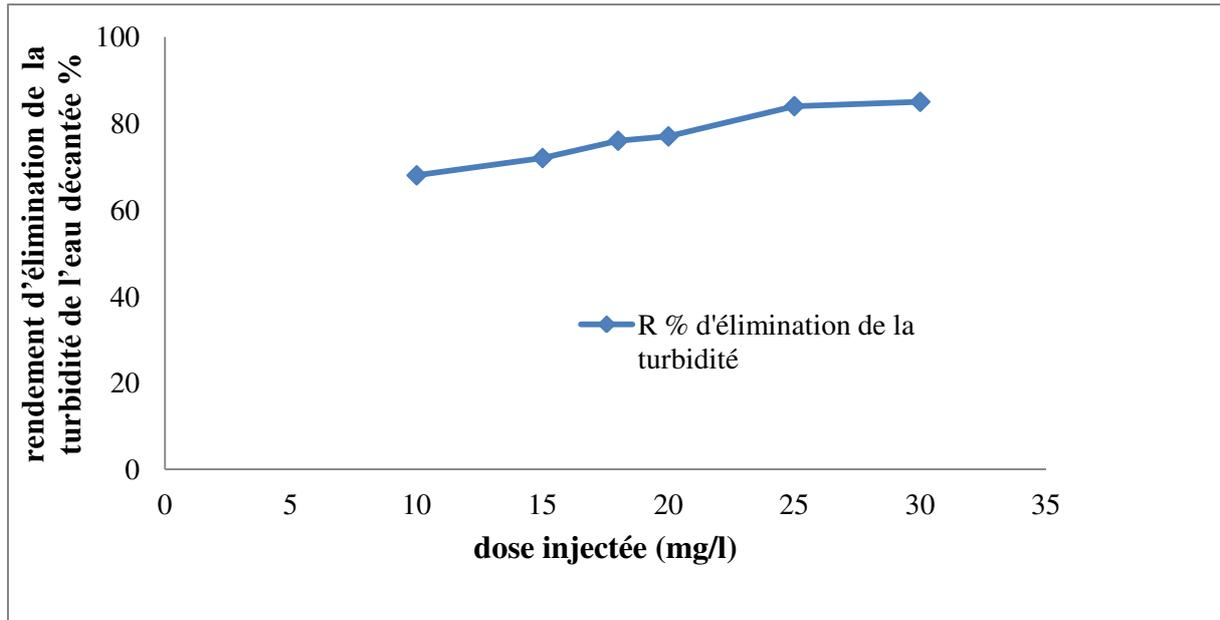


Figure V.10: Variation de rendement d'élimination de la turbidité de l'eau décantée en fonction de la dose du coagulant (Chlorure ferrique) à pH=6.5.

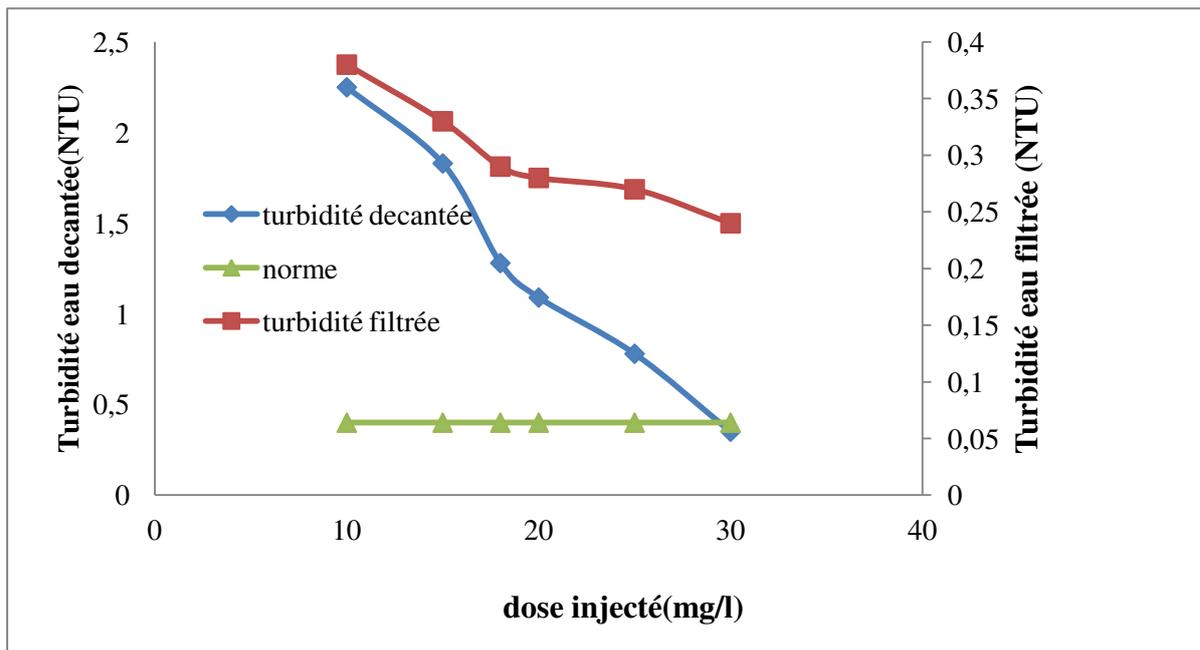


Figure V.11: Variation de la turbidité de l'eau décantée et l'eau filtrée en fonction de la dose du coagulant (sulfate d'aluminium) à pH =5.

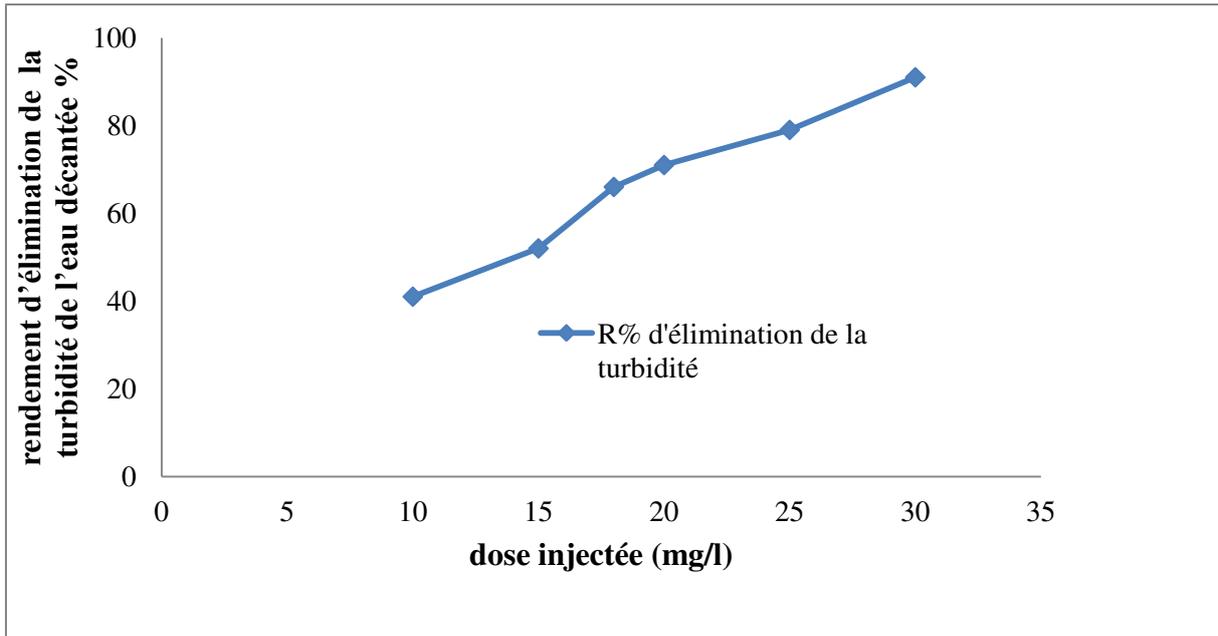


Figure V.12: Variation de rendement d'élimination de la turbidité de l'eau décantée en fonction de la dose du coagulant (sulfate d'aluminium) à pH =5.

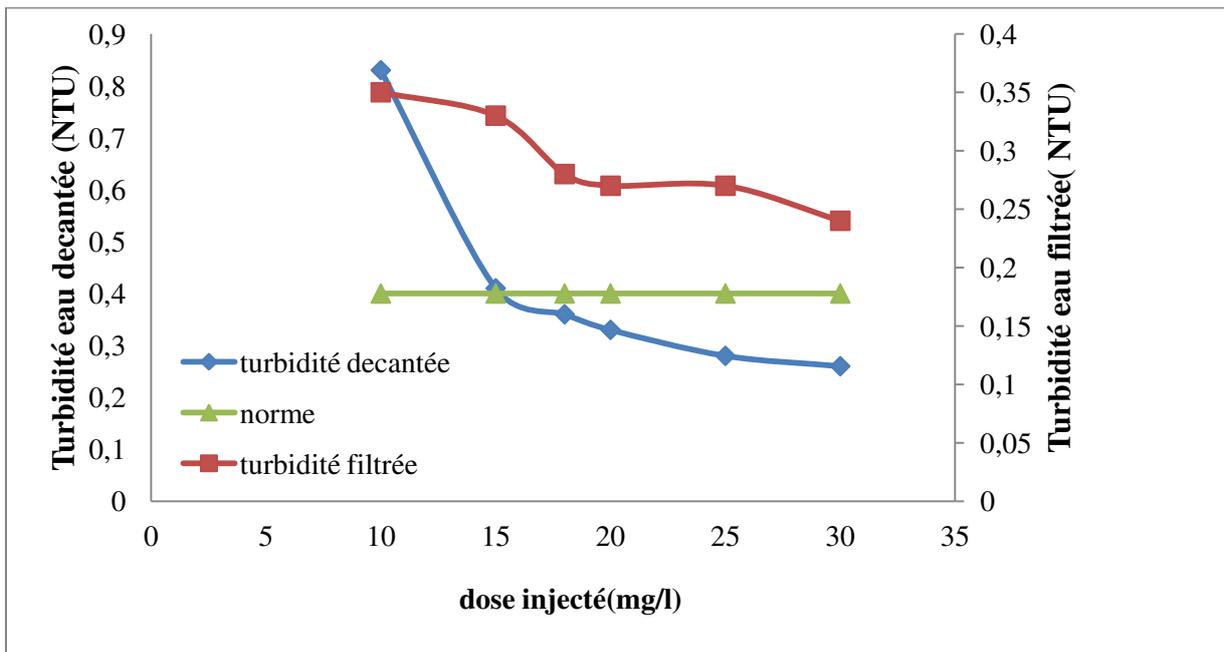


Figure V.13: Variation de la turbidité de l'eau décantée et l'eau filtrée en fonction de la dose du coagulant (Chlorure ferrique) à pH =5.

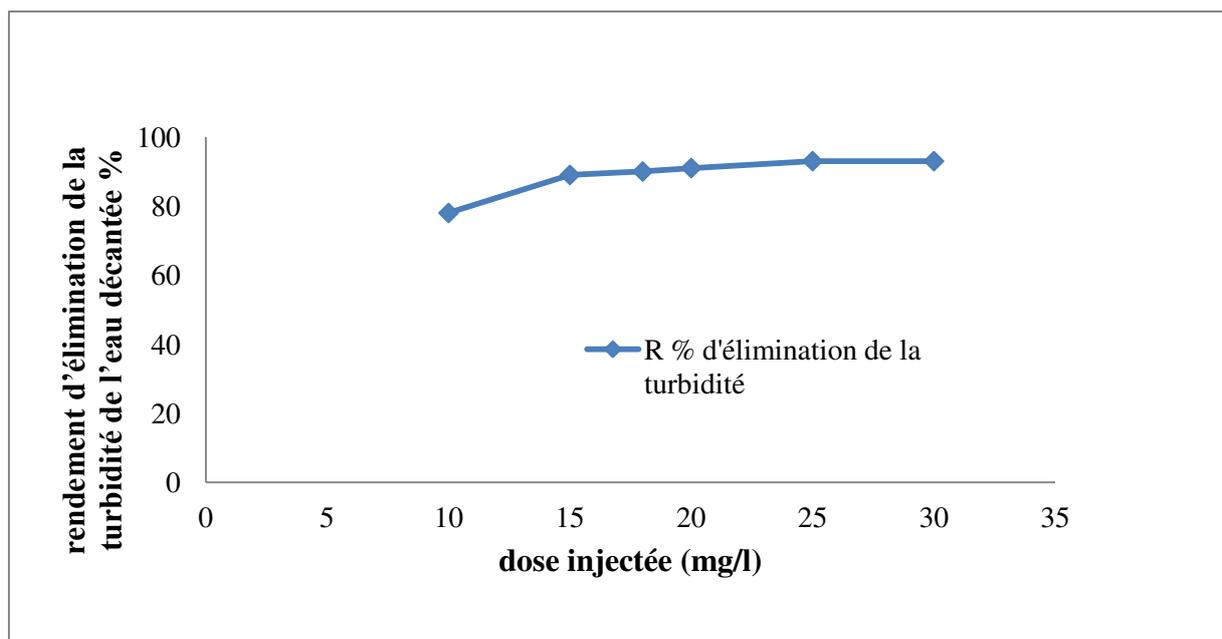


Figure V.14: Variation de rendement d'élimination de la turbidité de l'eau décantée en fonction de la dose du coagulant (Chlorure ferrique) à pH =5.

L'allure des courbes nous montre bien une diminution de la turbidité par l'ajout d'une quantité de coagulant. On remarque qu'il y a une diminution successive des valeurs de la turbidité jusqu'à qu'elle atteigne des valeurs comprises entre 0,6 et 0,5 NTU pour l'eau décantée par l'essai de jar-test.

Nous remarquons aussi une diminution rapide de la turbidité résiduelle jusqu'à l'obtention presque d'un palier constant, à une faible dose (10mg/l) le rendement d'élimination de la turbidité à pH libre de l'eau pH=7.7, il atteindra un taux d'enlèvement de la turbidité de 75% avec le chlorure ferrique et 70% avec le sulfate d'aluminium.

Dans notre cas, l'élimination plus importante de la couleur et de la turbidité avec une valeur de 0.52 NTU après décantation et 0.35 NTU après filtration sur membrane 0.45 μm à pH=7.38 avec le sulfate d'aluminium, et une turbidité de 0.84 NTU après décantation et 0.44 NTU après filtration sur membrane 0.45 μm à pH=7.34 pour le chlorure ferrique qui s'explique par la forte interaction entre les formes hydrolysées du métal et les matières en suspension.

Nous remarquons aussi une augmentation de la couleur des essais de jar-test ou le coagulant ajouté (le chlorure ferrique), un dépassement de la valeur maximale fixée par la norme algérienne (15 mg/l Pt) avec des faibles doses en coagulant (15 mg/l). par contre une diminution importante de la couleur dans le cas de sulfate d'aluminium (87%) d'abattement, Ceci est principalement dû à l'excès en chlorure ferrique qui devient lui-même une source de

CHAPITRE V : Résultats et Discussions

coloration jaunâtre et le types de particule et de composé responsable cette couleur, la figure 3.4 nous montre bien que l'addition de 10mg/l du coagulant à provoqué la diminution de la turbidité de 4.41 NTU à 1.3NTU avec le sulfate d'aluminium et à 1.08NTU avec le chlorure ferrique; l'augmentation de la dose des deux coagulants, ces valeurs de turbidité continuent à diminuer et à partir de la dose 25mg/l la turbidité varie de plus ou moins.

Donc cette valeur constitue la dose optimale dans ce type d'eau et pour cette période d'étude, donc les cations apportés par le coagulant ont englobé presque la totalité des suspensions colloïdales dans le liquide qui entraîne une clarté meilleure, cela est due que les particules du coagulant déstabilisent les colloïdes négativement chargés présents dans l'eau brute (eau de surface), en neutralisant les charges qui génèrent les forces de répulsion entre colloïdes.

Les mêmes allures des courbes de diminution de la turbidité en fonction de la dose du coagulant utilisé. La turbidité de l'eau brute, initialement entre 3 et 4.50 NTU, Nous observons que la turbidité a tendance à diminuer d'autant que les pH tendent vers les pH acides et augmente légèrement pour les pH alcalin, des solutions à été examinée en variant le pH de la solution de 5 à 8 par. Le pH de la solution a été ajusté par l'addition de 0.02N de H₂SO₄, Ces essais ont été effectués à température ambiante de 23 ± 1 °C.

Au cours de nos essais de jar test au laboratoire, on a constaté que les floccs formés à partir du chlorure ferrique sont plus grands et plus facilement décantables qui est expliqué par le poids moléculaire des floccs formés, mais occasionne un colmatage rapides des membranes de filtration .A pH 6.5 on a remarqué que l'efficacité du traitement soit nettement améliorer.

b. Effet de la dose du coagulant et le pH sur la concentration de la matière organique

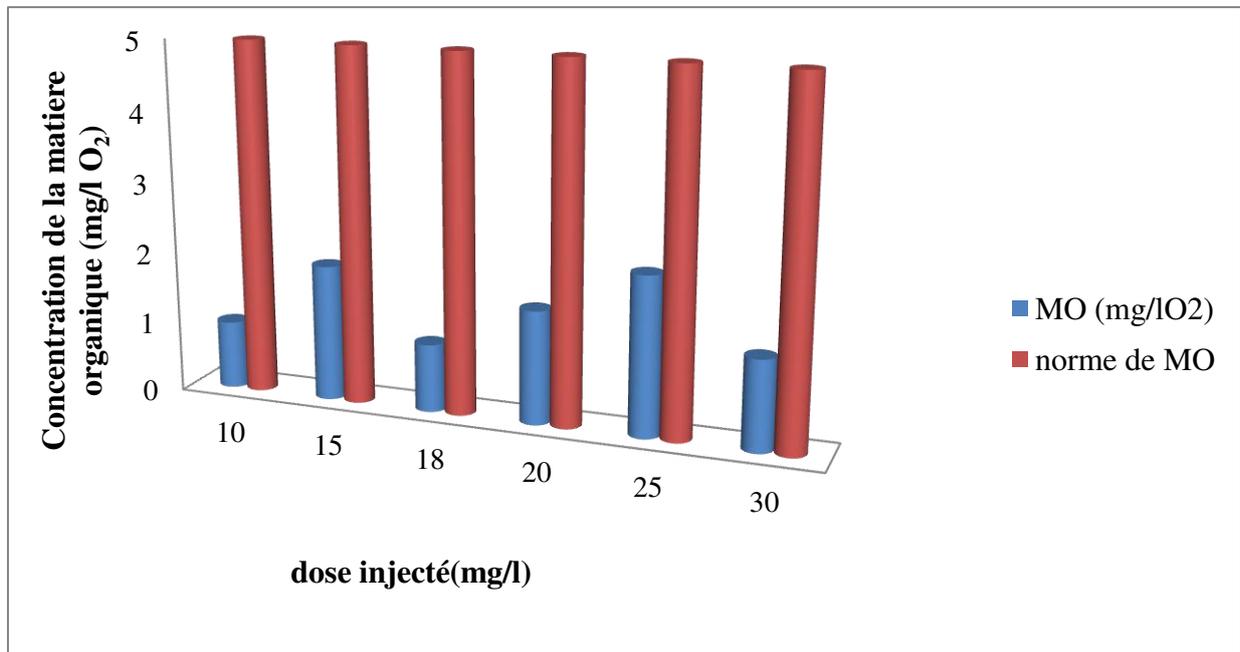


Figure V.15: Variation de la concentration de la matière organique en fonction de la dose du coagulant (sulfate d'aluminium) à pH= 6.5.

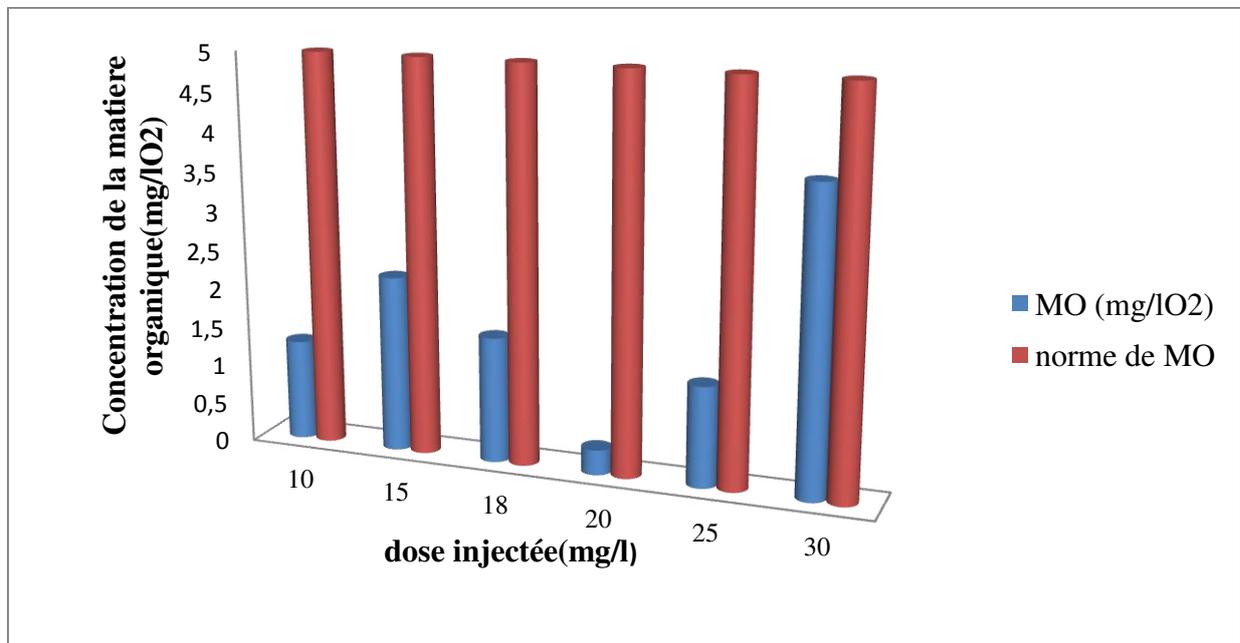


Figure V.16: Variation de la concentration de la matière organique en fonction de la dose du coagulant (chlorure ferrique) à pH= 6.5.

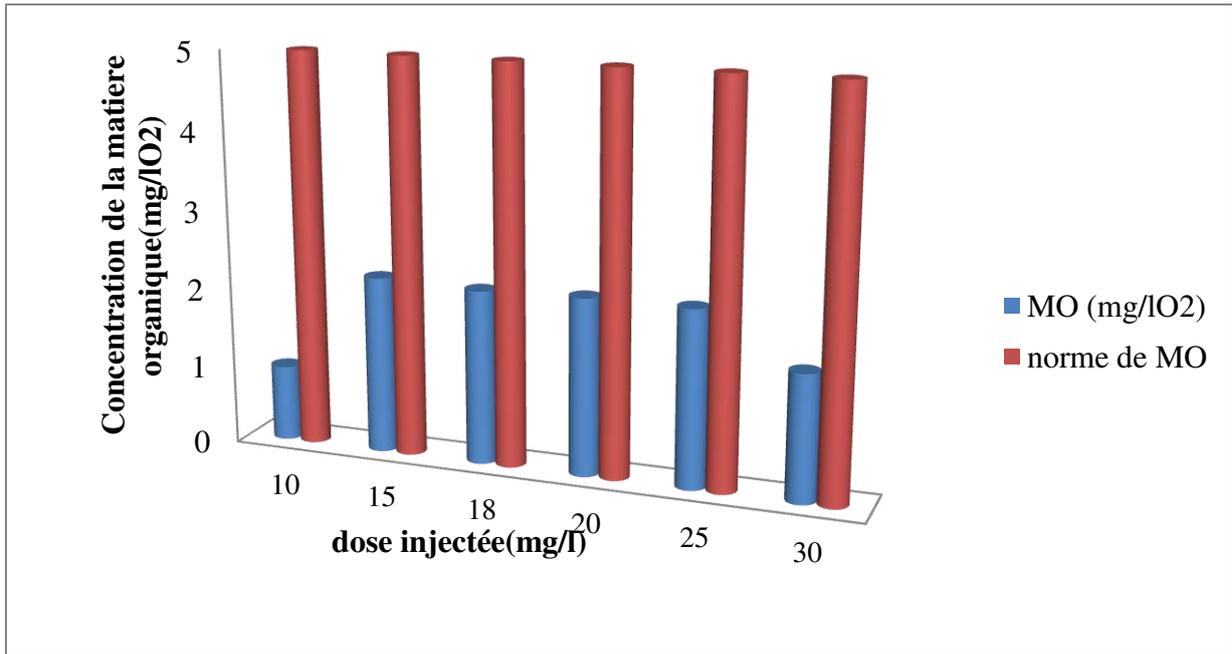


Figure V.17: Variation de la concentration de la matière en fonction de la dose du coagulant (sulfate d'aluminium) à pH =5.

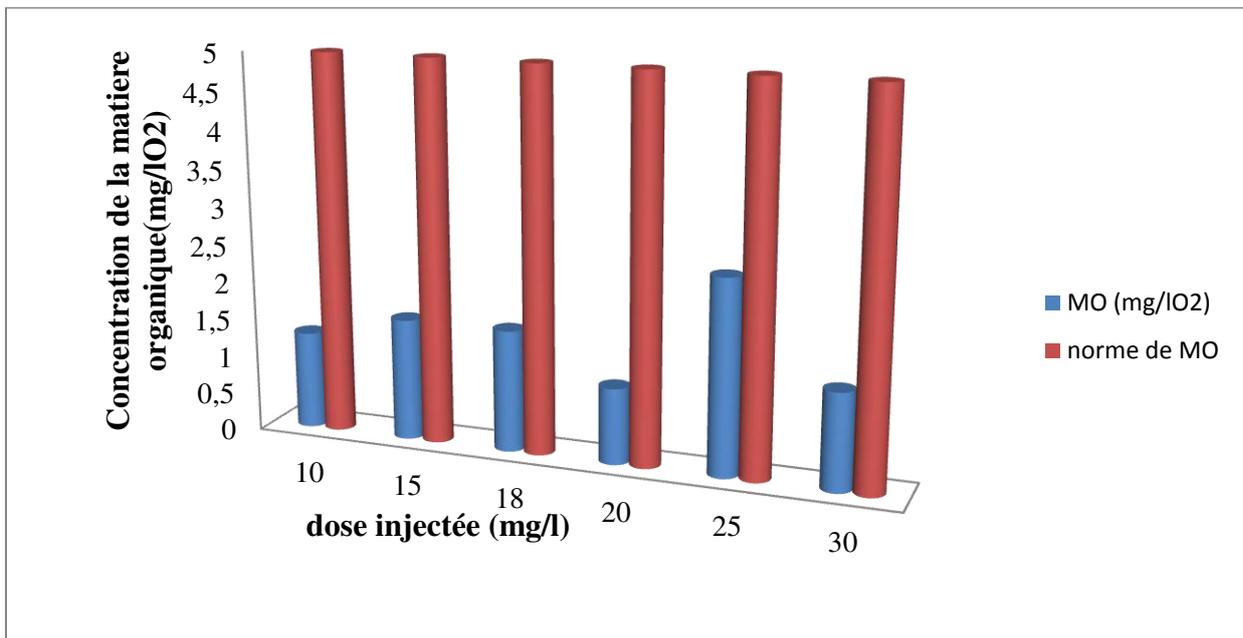


Figure V.18: Variation de la concentration de la matière en fonction de la dose du coagulant (chlorure ferrique) à pH =5.

L'élimination de la matière organique par le processus de la coagulation – floculation par les sels d'aluminium ou de fer dépend de plusieurs paramètres comme : le pH de l'eau, la dose de coagulant, la concentration initiale en matière organique, et la nature de la matrice minérale de cette eau. Les teneurs maximales en matière organique enregistrées pour l'eau

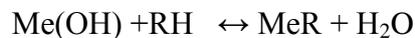
CHAPITRE V : Résultats et Discussions

filtrée et au cours du traitement et dans les divers mois restent toujours inférieures à la valeur fixée par la norme algérienne 5mg/IO₂ dans l'eau potable.

Les teneurs minimales en matière organique enregistrées est de 0,32mg/IO₂ pour l'eau filtré après coagulation par le chlorure ferrique à pH = 6.5 au mois de mai.

On remarque que les teneurs en matière organique sont élevées par rapport aux résultats enregistrés dans le traitement à débit continu, mais qui reste toujours inférieur à la norme de 5mg/IO₂, On pourrait penser à un phénomène de croissance des microorganismes présents dans l'eau brute qui n'a pas subit une préchloration avant la coagulation –floculation.

D'autre part plusieurs composés de faible masse moléculaire comme les pesticides, les phénols et les chlorophenole qui peut être présente dans l'eau brute ne sont pas éliminés par coagulation–floculation, pour ces raisons, les traitements de coagulation–floculation sont combinés avec l'injection de charbon actif en poudre. Une élimination de 57% avec une dose de 10mg/l de sulfate d'aluminium à pH 6.5 et 5 et un rendement de 87% à la dose de 20mg/l avec les sels de fer. Qui on peut expliquer que lors de l'ajout des sels de fer ou d'aluminium, les molécules organiques peut entrainer la formation d'un complexe organon-aluminique ou organon-ferrique insoluble par des mécanismes liés surtout à des réactions en surface avec les précipites amorphes d'hydroxyde du métal.



Me : métal

RH : matière organique

c. Effet de la dose du coagulant et le pH sur la concentration de l'aluminium résiduel et la concentration du fer total

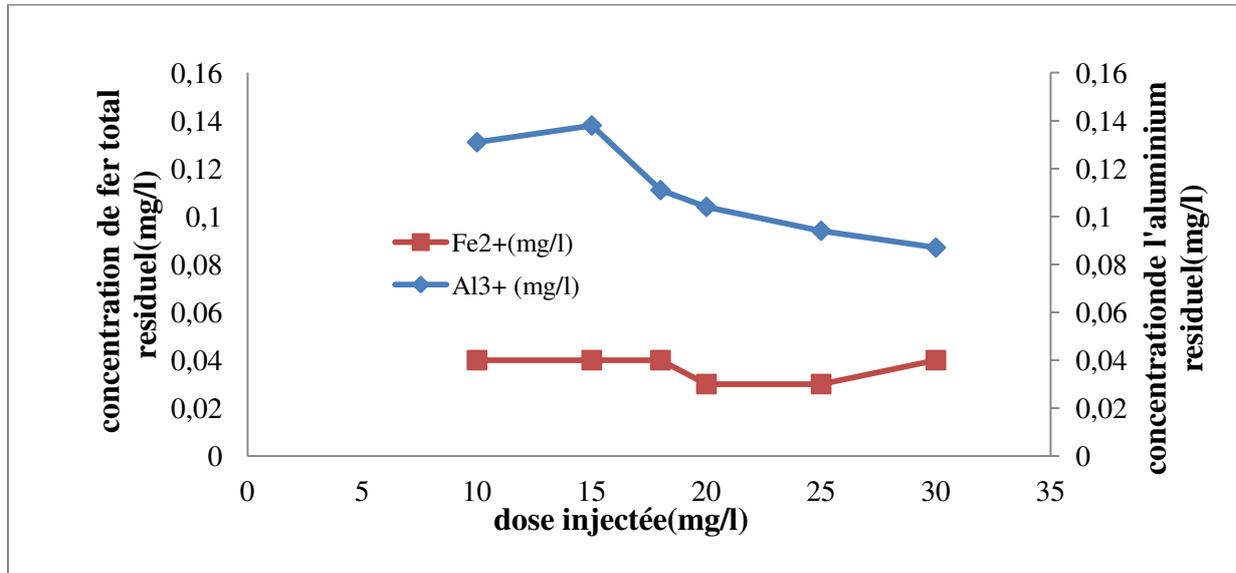


Figure V.19: Variation de la concentration de l'aluminium résiduel et la concentration du fer total en fonction de la dose du coagulant (sulfate d'aluminium).

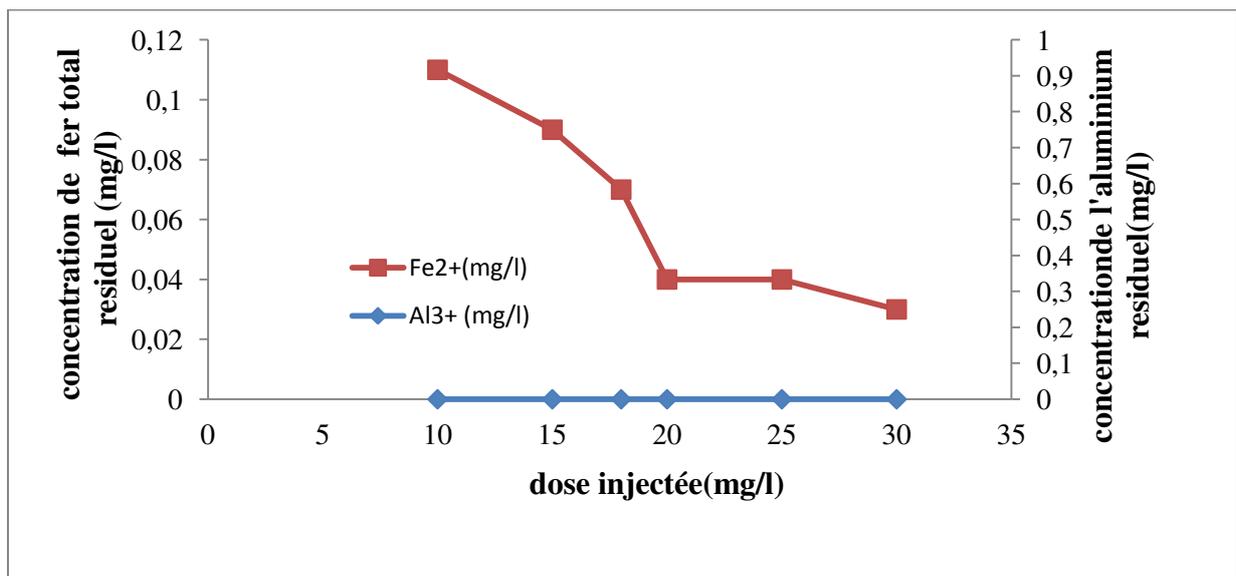


Figure V.20: Variation de la concentration de l'aluminium résiduel et la concentration du fer total en fonction de la dose du coagulant (Chlorure ferrique).

CHAPITRE V : Résultats et Discussions

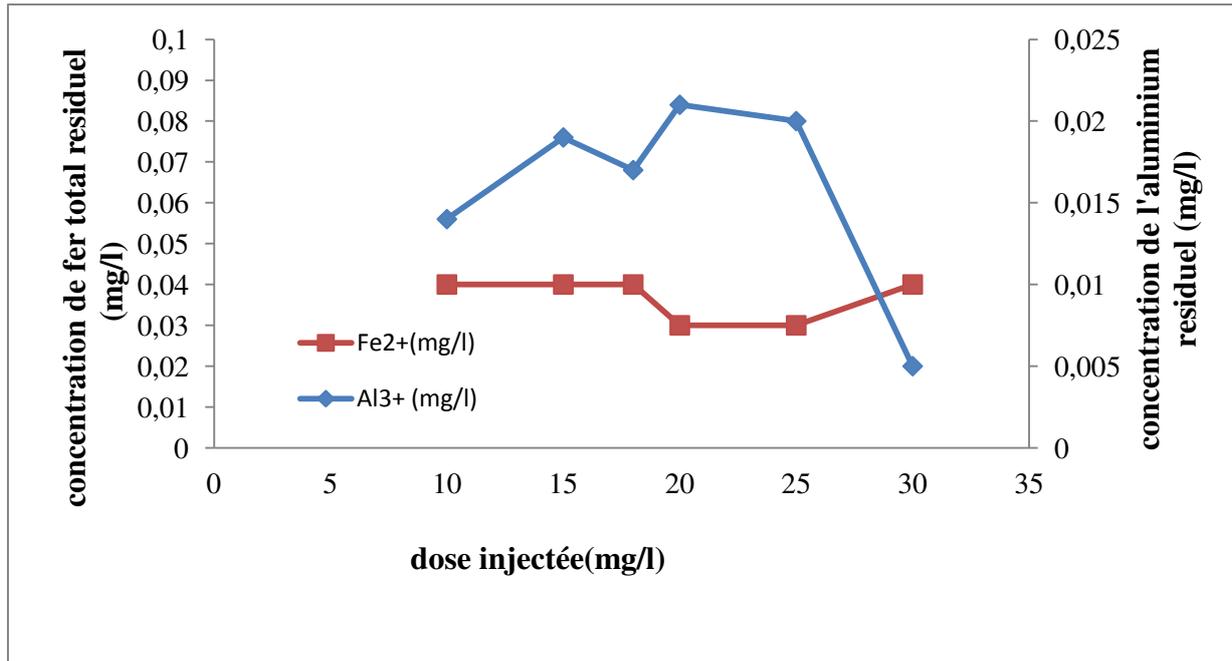


Figure V.21: Variation de la concentration résiduelle de l'aluminium et du fer en fonction de la dose du coagulant (sulfate d'aluminium) à pH =6.5.

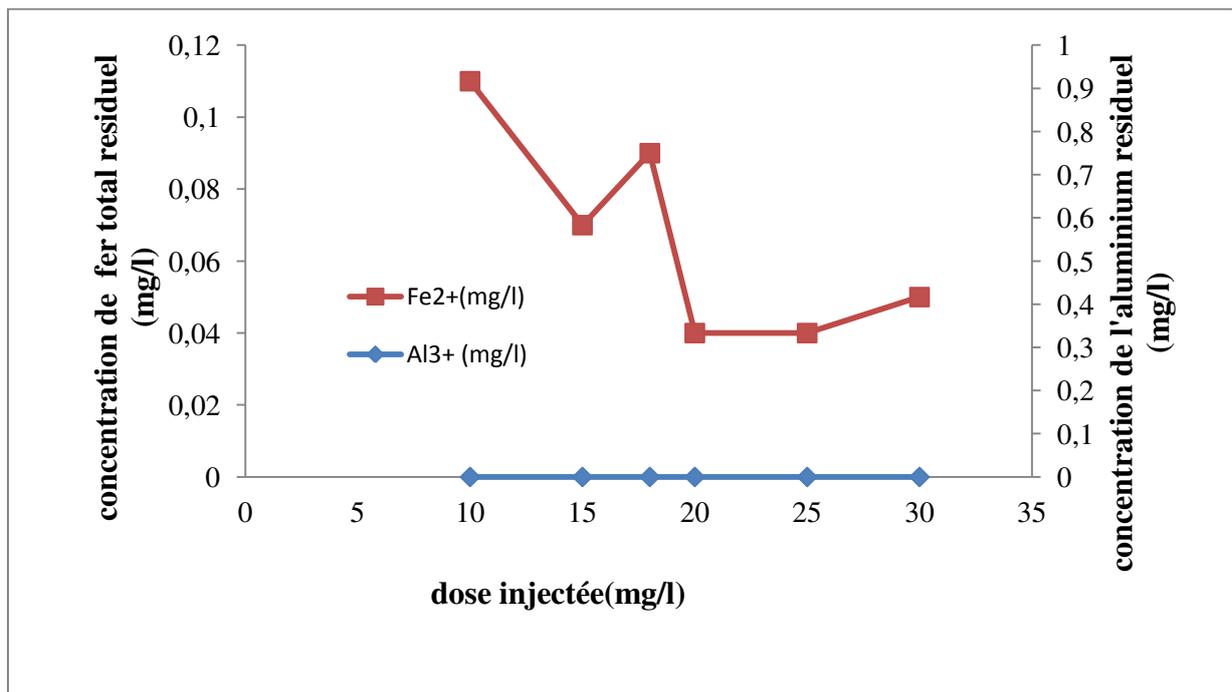


Figure V.22: Variation de la concentration de l'aluminium et du fer résiduel en fonction de la dose du coagulant (chlorure ferrique) à pH =6.5.

CHAPITRE V : Résultats et Discussions

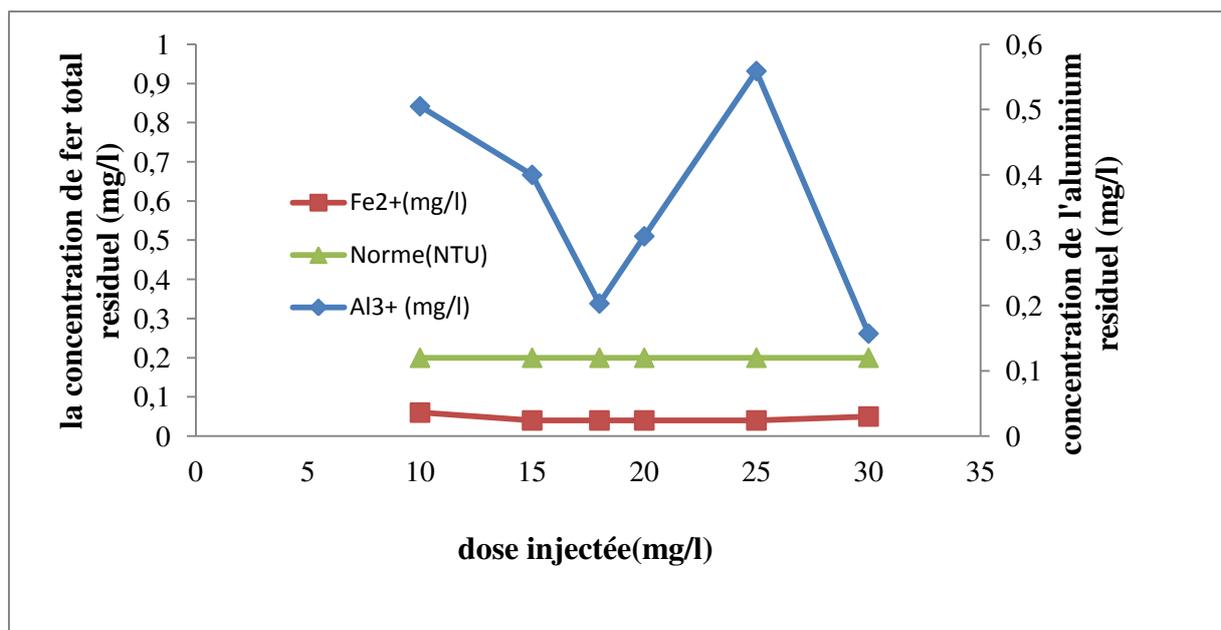


Figure V.23: Variation de la concentration résiduelle de l'aluminium et du fer total en fonction de la dose du coagulant (Sulfate d'aluminium) à pH=5.

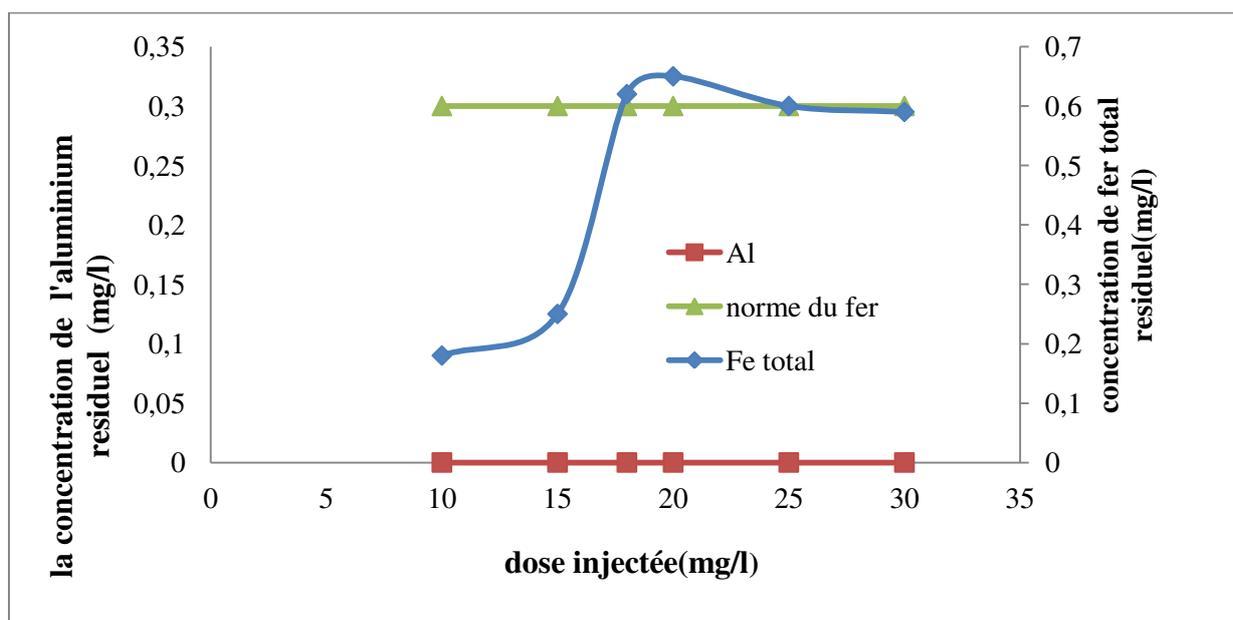


Figure V.24: Variation de la concentration résiduelle de l'aluminium et du fer en fonction de la dose du coagulant (chlorure ferrique) à pH=5.

En essayant de voir l'effet de l'utilisation de coagulants à base des sels d'aluminium ou de fer dans les traitements de l'eau qui comporte des avantages et des inconvénients, même si l'on a parfois attribué certaines affections neurologiques à la présence d'aluminium dans l'eau potable. Les sels d'aluminium et de fer sont partiellement hydrolysés, l'aluminium est un

CHAPITRE V : Résultats et Discussions

métal réactif, lorsqu'il s'agglomère dans l'eau, il entraîne d'autres substances : c'est ce qu'on appelle la coagulation. Si les conditions sont bonnes, les matières coagulées (le floculat) forment de grosses particules lourdes qui forment rapidement un dépôt dans la colonne d'eau. Il reste cependant toujours des résidus d'aluminium après dissolution. Dans l'eau traitée, la quantité totale d'aluminium peut être inférieure, mais une plus grande proportion du résidu est sous forme dissoute.

On remarque que la concentration des métaux existant dans l'eau diminue avec l'ajout des différentes doses de coagulant : de 0.131mg/l à 0.087mg/l en Al^{3+} pour des pH allant de 7.94 à 7.34 avec le sulfate d'aluminium et de 0.11mg/l à 0.03mg/l en Fe^{2+} à pH=7.29 avec le chlorure ferrique.

Les résultats obtenus dans les essais réalisés avec l'eau brute de la station de potabilisation de TILES DIT à des pH libre qui allant de 7.3 à 8 montrent que les teneurs en aluminium résiduel en présence des sels d'aluminium, varie en fonction de pH et du taux d'enlèvement de la turbidité, une faible concentration de l'ion Al^{3+} est obtenue en augmentant la dose de coagulant sulfate d'aluminium, et qui est suivi d'une diminution de la turbidité, on remarque une présence de l'ion Al^{3+} , qui de 0.13mg/l et 0.14mg/l qui correspond respectivement à des turbidité 0.84 et 0.64 NTU, donc l'aluminium à traversé les filtres à membrane sous forme dissout, contribuant à l'augmentation de la turbidité causé par les particules colloïdales fines non enlevées, mais qui reste des concentrations raisonnable toujours inférieur aux valeurs déterminées dans la normes algérienne sur l'eau potable qui est 0,2mg/l. à pH de 6.5 des concentrations résiduels presque nulles sont remarqués avec des doses croissantes de coagulant qui est exprimés par le pH optimum de coagulation-floculation et la présence de $Al(OH)_3$ comme forme prédominante. Alors que les concentrations en fer total résiduels reste toujours faible inférieur à la norme de l'eau potable (0.3mg/l) et qui oscille entre 0.07 et 0.03mg/l donc la forme $Fe(OH)$ est prédominante.

À pH acide de 5 on remarque des concentrations qui dépassent les normes de potabilité de l'aluminium et de fer résiduels donc c'est la zone ou les ions Al^{3+} et Fe^{2+} sont prédominants.

Le coagulant comporte des molécules chargées positivement, cela leur donne la possibilité de réagir comme ligands et de se complexer avec les métaux qui sont déjà présents dans l'eau à traiter. Si ces métaux sont déjà complexés avec les particules colloïdales la déstabilisation de celles-ci par effet de coagulant et de floculant implique leur intégration dans les floccs formés qui est toujours conditionné par le pH de milieu.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Le processus de coagulation-floculation a fait apparaître divers mécanismes, souvent complexes et dépendant fortement du pH de l'eau à traiter. En outre, les chercheurs s'intéressent de plus en plus à optimiser cette étape pour un meilleur abattement des polluants, notamment organiques. Certains ont porté leur choix sur l'amélioration des performances des réactifs coagulants et adjuvants de floculation. Mais la plupart des travaux s'accordent à conclure que l'optimisation et l'ajustement des paramètres physico-chimiques de l'eau par un dosage du coagulant peuvent conduire à une floculation et une élimination des matières en suspension, des matières colloïdales et des macromolécules susceptibles de communiquer à l'eau une turbidité ou une couleur indésirables. Il s'agit de matières organiques aussi bien que minérales.

L'étude expérimentale que nous avons menée a été consacrée à l'élimination, par coagulation-floculation au sulfate d'aluminium et au chlorure ferrique, de la turbidité et la matière organique existante dans l'eau brute de la station de traitement TILES DIT.

D'après les résultats expérimentaux et l'analyse, le traitement par coagulation-floculation au sulfate d'aluminium est le plus efficace pour l'eau de barrage TILES DIT.

La détermination de la dose du coagulant est un paramètre essentiel pour la déstabilisation des colloïdes.

La dose optimale du coagulant (sulfate d'aluminium) qui donne la meilleure élimination de la turbidité et de la matière organique, est de 25 à 30 mg/l. avec une dose de polymère anionique de 0.02 mg/l, Une surdose des deux produits (coagulant et floculant) produit inévitablement une déstabilisation des particules colloïdales qui sont susceptibles de changer la charge de surface.

Le pH est l'un des paramètres les plus importants qu'il faut noter, du fait qu'il joue un rôle déterminant dans la coagulation ; la valeur optimale du pH qui donne une bonne qualité d'eau traitée est de 6.5 à 7.5 pour les deux coagulants utilisés.

La température joue un rôle très important pour le pH de formation des floes.

D'après les résultats nous avons conclu que la température 20 à 23°C, est la température optimale pour avoir une bonne coagulation et une bonne décantation des eaux de la station TILES DIT.

Quant aux rendements d'élimination de la matière organique, les résultats enregistrés à l'usine sont de 96% par rapport aux résultats de jar- test qui sont de 70% qui peut être

Conclusion Générale

exprimé par à l'oxydation sur cascade et au temps de contact, et donc dans les mécanismes d'interaction entre le coagulant et la matière organique.

Il y'a généralement une relation entre la concentration initiale en substances humiques et la dose optimale de coagulant .Un des mécanismes cités est la formation de complexes insolubles entre les monomères ou les polymères métalliques cationiques et / ou anionique et la matière organique dissoute.

Divers travaux mettent en évidence que l'utilisation de matériaux adsorbants tels que le charbon actif en poudre en combinaison avec le sulfate d'aluminium et une filtration sur charbon actif granulaire dans le cas de chlorure ferrique permet l'optimisation de l'étape de clarification, et il permet d'aboutir à des abattements appréciables de la matière organique des eaux.

Nos essais, effectuées au laboratoire, et concernant l'utilisation de sulfate d'aluminium et le chlorure ferrique pour l'élimination de la turbidité, la couleur et la matière organiques pour les eaux de surfaces de la station TILES DIT et en suivant l'effet de pH.

D'après les résultats obtenus

- * L'élimination optimale est apparue pour des pH entre 6,5 à 7 pour les deux coagulants.
- * Avec ce type d'eau de surface, la diminution du pH avec les sels d'aluminium ou de fer est limitée par la solubilité du métal.
- * le pH va tout d'abord jouer sur la spéciation du fer et aluminium et donc sur son hydrolyse, donc il existe un pH de solubilité minimum autour duquel, les souilles de fer et d'aluminium augmentent, toutefois, il faut prendre avec précaution l'ajout de chlorure ferrique lui-même induit une baisse du pH.
- * la coagulation de la matière organique est beaucoup plus efficace à des pH de 7.5 qu'à pH acide d'après les résultats de l'usine
- * Toute fuite de Fe^{3+} peut entraîner une coloration rouge de l'eau et une corrosion sur le réseau de distribution du fait de l'existence des ferrobactéries et des phénomènes d'oxydoréduction
- * La coagulation-floculation avec une dose optimale du chlorure ferrique comme coagulant conduit à une élimination de la turbidité meilleure, que celle obtenue par le sulfate d'aluminium.
- * La dose optimale de coagulant varie selon la qualité de l'eau brute et la dose augmente avec l'augmentation de la turbidité.
- * L'augmentation de la concentration de la matière colloïdale, ce traduit par une augmentation de rendement d'élimination de la turbidité.

Références Bibliographiques

- [1]: C.HASLAY, H. LECLERC « Microbiologie des eaux d'alimentation ». Institut national de santé publique du Québec 2002.
- [2]: CARDOT Claude « les traitements de l'eau » Génie de l'environnement. Paris, 1999, P : 9.
- [3]: DEGREMONT. Mémento technique de l'eau, Technique et documentation, tome 1, 1989, P: 5, 24,25.
- [4]: BOEGLIN Jean-Claude. « Propriétés des eaux naturelles ». Technique de l'ingénieur, traité environnement, G1 110.
- [5]: BLIEFRT Claus. PERRAUD Robert. «Chimie de l'environnement : air, eau, sols, déchets ». p: 271,290, 291.
- [6]: Cour traitement des eaux 2004 ingénieur. Mr Bouraghda université de Boumerdes.
- [7] : MONIQUE TARDAT-HENRY avec la collaboration de JEAN-PAUL BEAUDRY : «chimie des eaux », 2^{ème} édition.
- [8] Claude CARDOT, Ellipses : GENIE DE L' ENVIRONNEMENT, «les traitements de l'eau: Procédés physico-chimique et biologiques. Cours et problèmes résolus », nouvelle édition.
- [9] : DEGREMOMT : mémento technique de l'eau ; neuvième édition Tome 1,2 1989.
- [10]: Alberta Environmental Protection. Standards and Guidelines for Municipal Waterworks, Wastewater and Storm Drainage.
- [11] : FRANCK Rejsek. « Analyse des eaux aspects réglementaires et techniques, lycée de borda ».
- [12] : RODIER J. « L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer », 7ème édition 1996.
- [13] : TARDAT-HENRY M, BEAURY J.P. « Chimie des eaux », Ed. Le Griffon d'argile INC, Canada, 1984.
- [14] : RONALAD V. « Eau, Environnement et Santé Publique », 2^{ème} édition, Ed TEC&DOC, 2003 PARIS.
- [15] : KETTAB A. « Traitement des eaux "les eaux potable" », O.P.U, Alger, 1992.

- [16] : AMMOUR. F: « Cours de Traitement des eaux » : Thèse de Magister spécialité Hydraulique urbaine, Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique (ENSH), Blida 2014.
- [17] : BEAUDRY Jean-Paul. « Traitement des eaux », Ed. Le Griffon d'argile INC, Canada, 1984.
- [18] : <https://www.vetofish.com/definition/oxygene-dissous>.
- [19] : http://lionsfamily.chez-alice.fr/page/chimie_eau_aqua.htm.
- [20] : Jean-Claude BOEGLIN, « Contrôle des eaux douces et de consommation humaine » technique de l'ingénieur, traité analyse et caractérisation, P 4210.
- [21] : POTELON J-L, ZYMAN K. « Le guide des analyses d'eau potable », la lettre du cadre territorial, 1998.
- [22] : VALIRON F, « Gestion des Eaux : alimentation en eau – assainissement », Presses de l'école Nationale des ponts et chaussées, Paris, 1989.
- [23] : PHILIPPO P, POMMERY J, THOMAS P. « Evolution d'une eau de surface au cours des traitements de potabilisation ; comportement des espèces métalliques au contact des matières humiques », J.fr.Hydrobiol, 1981.
- [25] : Journal officiel de la république algérienne N°18 du 18 Rabie Ethani 1432 /23 Mars 2011.
- [26] : Fiche technique Memotec n°25, « La matière organique dans le traitement de l'eau potable ». «www.gls.fr».
- [27] : Emmanuel JESTIN, « la production et le traitement des eaux destinées à l'alimentation et à la préparation de denrées alimentaire ».
- [28] : Anaëlle university DIN Bucuresti- Chimie, AnulXV (série noua), vol. II, page.7-14 séparation des métaux lourds existants dans les eaux usées.
- [29] : MEGHZILI B. « Suivi de la qualité des eaux de la station de traitement Hamadi-Krouma (Skikda).Essais d'optimisation ». Thèse de magister Université é de Biskra ,2002.
- [30] : MOULAI HADJ Hassiba «Etude de l'influence des particules argileuses sur le traitement des eaux» mémoire Master en Hydraulique Option : Eau, sol et aménagement 2015.
- [31]: Masson, M. H, Canu, S., Grandvalet, Y., Lyngaard-Jensen, A., Software sensor design based on empirical data, Ecological Modelling, 120, 131-139, 1999.
- [32] : DESJARDINS R. « Le traitement des eaux », 2è me édition, Ed de l'école polytechnique de Montréal, 1997
- [33] : MOUCHET P, «Les modalités de traitement des eaux brutes. STP. Pratiques », 1991, p:136,148.

- [34] : Hector Ricardo Hernández, Thèse Préparée au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS thèse de Doctoral de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse Spécialité Systèmes Automatiques De León Année 2006.
- [35] : DIHANG.M.D., 2007 : « Mécanismes de coagulation et de floculation de suspensions d'argiles diluées rencontrées en traitement des eaux ». Thèse de Doctorat en Génie des Procédés et de l'environnement, Université Paul Sabatier, Toulouse III.
- [36] : Cour coagulation floculation Mr Ouahab université de Blida 2003.
- [37] : AMIRTHARAJAH, A., O'MELLA, C.R. (1990). « Coagulation Processes: Destabilization, Mixing, and Flocculation». Chapitre 4 dans: Water quai and Treatment: a Handbook of Commzinity Water Supplies. A WWA. 4e édition, p. 269-365.
- [38] : DESJARDINS.C, 1999: « Simulation et étude au laboratoire de la floculation Lestée (ACTFILO) à l'aide d'une procédure modifiée de Jar test ». Thèse de Maitrise Des Sciences Appliquées, Département Des Génies Civil, Géologiques Et Des Mines, Université De Montréal.
- [39] : W.J.MASSCHELEIN « Procédés unitaire du traitement de l'eau potable », traduit de l'anglais par H CHEVOLET, édition CEBEDOC EDITEUR et TECDOC 1996.
- [40] : Mme Jalila BENSaid « contribution à la dépollution des eaux usés par électrocoagulation et par adsorption sur hydroxydes d'aluminium » Thèse De Doctorat D'état 2009 Université Mohammed V - Agdal Faculte Des Sciences Rabat.
- [41] : Kherifi Wahida « étude de la cinétique de cidémentation des matières en suspension dans le calcul des décanteurs » Mémoire De Magistère Université Badji-Mokhtar-Annaba 2009
- [42]: Ndabigengesere, A. et K.S.Narasiah (1998) «Quality of water treated by coagulation using Moringaoleifera seeds, Wat». Res. 32 (3): 781-791
- [43] : Manuel de conception du barrage ; Bureau d'étude Russe (ZARUBEZH Vodstroy).
- [44] : JUSTINE, 2011 : Module « production et utilisation de l'eau »Institut Universitaire Professionnel « agro-alimentaire » de Caen.
- [45] : VATECH WABAG. Manuel de description du fonctionnement et d'exploitation de la station de traitement d'eau potable de Bouira.