



Licence Sciences et Techniques (LST)

Techniques d'Analyse et Contrôle Qualité

TACQ

PROJET DE FIN D'ETUDES

**Optimisation du traitement par coagulation
floculation des eaux du BARRAGE BAB LOUTA**

Présenté par :

◆ **AMZAD Mohamed**

Encadré par :

◆ **Pr. CHTIOUI Hicham (FST)**

◆ **Mlle. SBAI Ghita (ONEE)**

Soutenu Le 15 Juin 2015 devant le jury composé de:

- **Pr. CHTIOUI Hicham**
- **Pr. AMEZIANE HASSANI Chakib**
- **Pr. HAUDI Amal**

Stage effectué à ONEE

Année Universitaire 2014 / 2015

Remerciements

Avant de commencer la présentation de ce rapport, 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.

Je tiens à remercier vivement :

Mon encadrant à la FST, **Pr. H.CHTIOUI** pour son suivi et ses recours durant ce stage et pour la rédaction, la présentation et la mise au point du présent travail. Je le remercie également pour la patience qu'il m'a accordée pour élaborer ce travail.

Mr. le Chef de secteur de production **Fès-Séfrou-Taza** et le Directeur d'unité de production de TAHLA **Y. BAHRI** de m'avoir permis de passer ce stage de projet de fin d'études dans leur établissement et dans des bonnes conditions.

Mes remerciements à mon encadrant au laboratoire de la station de traitement des eaux Mlle **G. SBAI** qui m'a accueilli, conseillé et soutenu le long de ce stage.

Je remercie également les membres de jury **Pr. H. CHTIOUI, Pr. C. AMEZIANE HASSANI** et **Pr. A. HAUDI** d'avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie également tous le personnel qui m'ont prêté main forte durant toute la période de stage.

Table de matières

Introduction.....	1
I. L'office national de l'eau et d'électricité (branche eau).....	2
1. Historique.....	2
2. Les missions de l'ONEE-Branche eau.....	2
3. Les axes stratégiques.....	2
II. Les différentes étapes de traitement dans la station de traitement BAB LOUTA	2
1. Description de la station de traitement.....	2
2. Les étapes de traitement de l'eau du barrage BAB LOUTA.....	4
a. Injection de chlore.....	4
b. L'aération.....	4
c. Débourbage.....	4
d. Coagulation Floculation.....	5
e. Décantation.....	5
f. Filtration.....	6
g. Désinfection.....	6
III. Les différentes analyses physico-chimiques effectuées au laboratoire de la station de traitement.....	6
1. Turbidité.....	6
2. Potentiel hydrogène pH.....	7
3. Conductivité électrique.....	7
4. Chlore résiduel.....	7
5. Détermination de l'alcalinité de l'eau TA et TAC.....	8
6. Titre hydrotimétrique TH.....	8
7. Oxydabilité (indice permanganate).....	9
8. Oxygène dissout.....	9
9. pH de saturation pHs.....	10
10. Paramètres mesurés par kit.....	10
11. Demande en chlore.....	11
IV. Optimisation de traitement par coagulation floculation (jar-test).....	13
1. Jar-test.....	13
2. Partie expérimentale.....	14
2.1 Essai (1) : Effet de la concentration du coagulant sulfate d'aluminium sur la coagulation.....	14
a. Résultats de l'effet de la concentration du coagulant sulfate d'aluminium sur la coagulation.....	15
b. Interprétation des résultats.....	16

Projet de fin d'études

2.2 Essai (2) : Effet de l'ajout du flocculant sur la coagulation floculation.....	17
a. Résultats de l'effet de l'ajout de flocculant sur la coagulation floculation.....	18
b. Interprétation des résultats.....	19
2.3 Essai (3) : Effet de la nature de coagulant chlorure ferrique sur la coagulation floculation.....	20
a. Résultats obtenus de l'effet de chlorure ferrique sur la coagulation floculation.....	20
b. Interprétation des résultats.....	21
2.4 Essai (4) : Effet du pH sur la coagulation floculation.....	22
a. Résultats obtenus de l'effet du pH sur la coagulation floculation.....	23
b. Interprétation des résultats.....	24
Conclusion.....	25
Références bibliographiques.....	26
Annexes.....	27

Liste des figures

Nom de figure	page
Figure 1 : Les étapes de traitement d'eau du barrage BAB LOUTA	3
Figure 2: Cascade d'aération	4
Figure 3: Décanteur	5
Figure 4 : Filtres à sable	6
Figure 5 : Turbidimètre	6
Figure 6 : Comparateur en lumière du jour	7
Figure 7 : Oxymètre	10
Figure 8: Variation du chlore résiduel en fonction du chlore injecté	12
Figure 9: Appareil jar-test	13
Figure 10: Variation de la turbidité en fonction de la dose du coagulant (sulfate d'aluminium).	15
Figure 11: Variation du pH de l'eau filtrée en fonction de la dose du coagulant sulfate d'aluminium	16
Figure 12 : Variation de la turbidité en fonction des doses de polymère injecté	18
Figure 13 : Variation du pH en fonction de doses injectées de polymère	19
Figure 14: Variation de la turbidité en fonction de doses injectées de Chlorure ferrique	21
Figure 15 : Variation du pH en fonction de doses injectées de chlorure ferrique	21
Figure 16 : Variation de la turbidité en fonction du pH utilisés	23

Liste des tableaux

Nom des tableaux	Pages
Tableau 1: Chlore injecté et chlore résiduel	12
Tableau 2: Caractéristique de l'eau brute	14
Tableau 3: Résultats de l'effet des doses du coagulant sur la coagulation floculation	15
Tableau 4: Caractéristiques de la dose choisi du coagulant sulfate d'alumine	17
Tableau 5: Caractéristiques de l'eau brute	17
Tableau 6: Résultats de l'effet d'ajout de floculant sur la coagulation floculation	18
Tableau 1: Caractéristiques qui correspond à la dose choisie du floculant	19
Tableau 2: Caractéristiques de l'eau brute	20
Tableau 3: Résultats de l'effet de la nature de coagulant sur la coagulation	20
Tableau 4: Caractéristiques qui correspondent à la dose optimale du chlorure ferrique	22
Tableau 5: Résultats de l'effet de pH sur la coagulation floculation	23
Tableau 6: Caractéristiques qui correspondent à la dose du pH choisi	24

Liste d'abréviations :

C.L : Collectivités locales

DPD : Di-éthyleparaphénylène diamine

EC : Conductivité électrique

EDTA : Ethylène Diamine Tétracétique

MES : Matière en suspension

ONEE : Office national de l'eau et d'électricité

REIP : Régie d'exploitation installation et planification

RADEETA : Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Electricité de Taza

TA : Titre alcalimétrique

TAC : Titre alcalimétrique complet

TH : Titre hydrotimétrique

Introduction

L'eau constitue un élément vital, pour le développement et le maintien de la vie sur notre planète, la préservation de cette eau est donc nécessaire afin de fournir à l'homme une quantité suffisante pour ces besoins avec une qualité adéquate, de nombreux contrôles sont donc obligatoires.

Afin de contrôler la qualité d'une eau il est nécessaire d'effectuer des analyses qui révèlent la présence de gaz, de matières minérales et de matières organiques en suspension ou en solution et éventuellement des micro-organismes.

De ces faits l'office national d'eau et d'électricité ONEE (branche eau) prend en charge la planification, la gestion de l'ensemble des ressources en eau et le contrôle de qualité de cette source naturelle.

Ce stage a été réalisé au sein de laboratoire de station de l'ONEE pour le traitement de l'eau pompé à partir du barrage BAB LOUTA.

Ce travail se situe dans le cadre de connaissance de toutes les étapes de traitement de la station et particulièrement l'optimisation de traitement par coagulation floculation des eaux du Barrage BAB LOUTA.

Ce rapport est organisé de la façon suivante :

Dans la première partie on donne une présentation de l'office national de l'eau et d'électricité branche eau.

Dans la deuxième partie on donne les différentes étapes de traitement des eaux du barrage BAB LOUTA

Dans la troisième partie on définit les différentes analyses physico-chimiques effectuées dans le laboratoire de la station de traitement BAB LOUTA

Enfin on présente l'optimisation du traitement par coagulation floculation des eaux du barrage BAB LOUTA en jouant sur plusieurs paramètres à savoir : la nature du coagulant, les doses, et le pH...

I. L'office national de l'eau et d'électricité (branche eau)

1. Historique

L'ONEP est un établissement public créé en 1972, à un caractère industriel et commercial doté de la personnalité et de l'autonomie financière.

La création de l'ONEP par dahir a été en 1929 sous le nom REIP (régie d'exploitation installation et planification), puis (régie d'exploitation et de planification), le nom ONEP depuis 1972 jusqu'à 2013 ou l'apparition de l'ONEE après la fusion entre l'ONE et l'ONEP.

2. Les missions de l'ONEE-Branche eau

- ✓ Planification de l'approvisionnement en eau potable à l'échelle nationale
- ✓ Production de l'eau potable
- ✓ Distribution de l'eau potable pour le compte des collectivités locales C.L
- ✓ Gestion de l'assainissement liquide pour le compte de C.L.
- ✓ Contrôle de la qualité d'eau

L'alimentation en eau potable de la ville de Taza est assurée par l'ONEE, alors que la distribution est assurée totalement par la RADEETA (Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Electricité de Taza).

3. Les axes stratégiques

- ✓ Sécuriser et améliorer l'approvisionnement en eau potable en milieu urbain.
- ✓ Généralisation de l'accès en eau potable.
- ✓ Prendre en charge la gestion du service assainissement liquide.

II. Les différentes étapes de traitement dans la station de traitement BAB LOUTA

1. Description de la station de traitement

La station de traitement BAB LOUTA permet de traiter les eaux du barrage situé à 9 km de la station. Cette dernière assure l'alimentation de la ville de TAZA en eau potable.

L'eau brute est issue du barrage BAB LOUTA d'une capacité de 35500 millions de m³.

L'eau est acheminée vers la station de traitement de façon gravitaire à partir du réservoir qui se trouve à Smiàa.

Projet de fin d'études

La station a une superficie environ 3,2 ha et elle est constituée d'une complexe de traitement et d'un laboratoire doté d'un équipement moderne qui lui permet de procéder à la détermination de plusieurs paramètres

Le personnel du laboratoire assure la surveillance du réseau d'approvisionnement en eau potable de la prise d'eau brute jusqu'aux points de livraison aux consommateurs. Cette surveillance, destinée à protéger la santé du consommateur, est basée sur des normes et règlements nationaux en vigueur régissant la qualité de l'eau potable avec recours, au besoin, aux directives international.

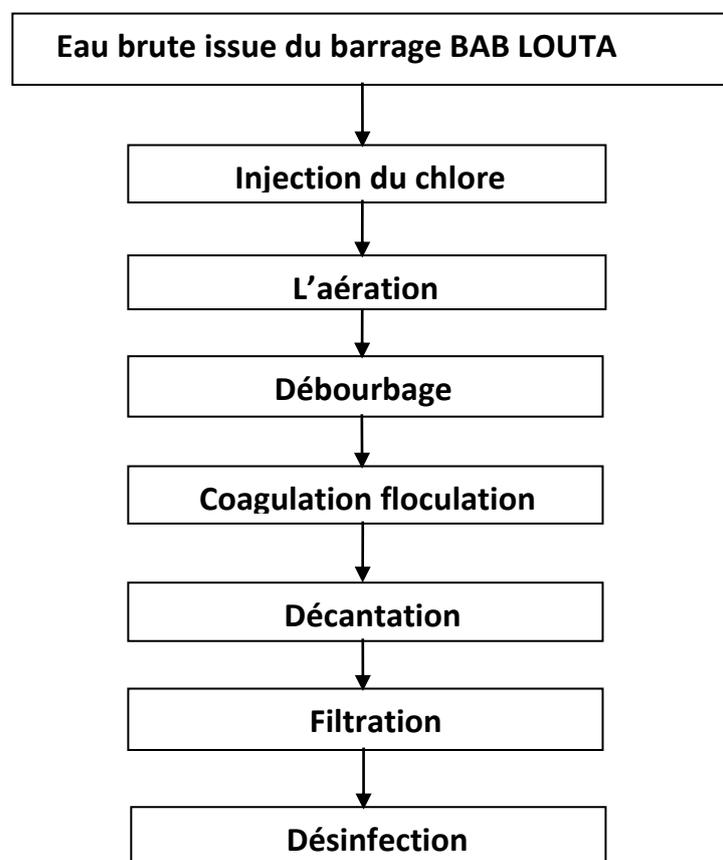


Figure 1 : Les étapes de traitement d'eau du barrage BAB LOUTA

2. Les étapes de traitement de l'eau du barrage BAB LOUTA

a. Injection de chlore

Après l'arrivée de l'eau brute au bassin de contact, un prétraitement est effectué par une pré-chloration qui vise à détruire toutes substances non admissibles (bactéries, virus ...) et assurer l'oxydation de la matière organique.

Ensuite l'eau est acheminée vers le bassin de contact (30 min de temps de séjour) pour assurer l'homogénéisation entre l'eau et le chlore.

La réaction du chlore dans l'eau est la suivante :



b. L'aération

C'est une opération qui consiste à mettre en contact l'eau et l'air dans le but d'augmenter la concentration en oxygène et encore pour assurer l'oxydation de certains corps réducteurs (Fer, Mn,...) qui précipitent et peuvent alors être éliminé par filtration.



Figure 2: Cascade d'aération

c. Débourage

C'est une étape préliminaire de dégrossissage, elle sert à débarrasser l'eau d'une grande partie de la matière décantable. Cette étape est nécessaire lorsque les MES Dans l'eau brute dépassent les 2 g/L, pour éviter le risque d'engorger le décanteur par le volume excessif de boue apporté par l'eau brute.

d. Coagulation Flocculation

Les colloïdes sont des particules de très faible diamètre et sont notamment responsables de la couleur et de la turbidité de l'eau de surface. En raison de leur très faible vitesse de sédimentation, la solution plus efficace pour éliminer les colloïdes est de procéder à une coagulation et une flocculation.

Le principe de coagulation repose sur la déstabilisation des particules en suspension par une agitation rapide et de faciliter leur agglomération.

Elle se fait soit par l'addition de sulfate d'aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) ou par l'ajout de chlorure ferrique ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).

La flocculation consiste à agiter l'eau beaucoup plus lentement pour agglomérer les fines particules neutres formées lors de la coagulation par l'ajout d'un flocculant pour obtenir des éléments plus volumineux, ou floccs, qui se séparent de l'eau par décantation.

Dans la station de traitement BAB LOUTA le coagulant utilisé est le sulfate d'aluminium et la réaction caractéristique est la suivante :



e. Décantation

La décantation est une opération effectuée dans un décanteur lamellaire, elle a pour objectif l'élimination des floccs déjà formés et d'obtenir une eau clarifiée appelée l'eau décantée. Celle-ci est ensuite collectée par des conduites perforées vers les goulottes qui alimentent les filtres.



Figure 3: Le décanteur

f. Filtration

La filtration consiste à faire passer l'eau à travers un matériau poreux afin d'éliminer les matières en suspension restantes.

Le type de filtration utilisé dans la station de traitement **BAB LOUTA** est la filtration sur sable. L'eau à filtrer passe donc à travers le lit de sable et se débarrasse de floccs non éliminés par la décantation.



Figure 4 : Filtres à sable

g. Désinfection

Du fait de la consommation du chlore ajouté au début du traitement, une deuxième chloration est nécessaire pour assurer l'élimination des micro-organismes pathogènes et garantir une eau potable depuis la sortie de la station de traitement, en traversant les conduites de transport jusqu'aux point d'utilisation.

III. Les différentes analyses physico-chimiques effectuées au laboratoire de la station de traitement :

1. La turbidité

La turbidité est une propriété qui renseigne sur la limpidité d'une eau. Elle dépend des matières colloïdales présentes dans l'eau.

La turbidité est mesurée par un turbidimètre et s'exprime en NTU.

➤ *La valeur maximale admissible :*

- < 5 NTU pour l'eau décantée.
- < 0,5 NTU pour l'eau traitée.



Figure 5 : Turbidimètre

2. Potentiel hydrogène pH

Le pH, qui est une indication de la tendance de l'eau à être acide ou alcaline, est déterminé par mesure potentiométrique à l'aide d'une électrode de verre (pH-mètre) qui permet de déterminer l'activité des ions hydrogènes présents dans l'eau.

3. Conductivité électrique

La conductivité électrique (EC) est une expression numérique de la capacité d'une solution à conduire le courant électrique. Ce paramètre a pour but de donner une idée sur la salinité d'eau puisque les sels minéraux en solution sont de bons conducteurs, la conductivité électrique s'exprime en micro siemens/cm.

4. Chlore résiduel

Le test du chlore sert à détecter par un dosage colorimétrique la quantité du chlore résiduel dans l'échantillon, à l'aide du DPD (di-éthyleparaphénylène diamine), sous forme de comprimé donne en présence de chlore résiduel une coloration rose. Des disques colorés étalonnés spécifiques pour chaque réactif et un comparateur en lumière du jour sont utilisés pour la déduction des différentes teneurs en chlore.

- ✓ Pour l'eau traitée sa valeur varie entre 0,1 et 1 mg/L.
- ✓ En cas d'une coloration qui dépasse la valeur on utilise la dilution.



Figure 6 : Comparateur en lumière du jour

5. Détermination de l'alcalinité de l'eau TA et TAC

L'alcalinité des eaux est essentiellement due à la présence des carbonates (HCO_3^-), bicarbonates (CO_3^{2-}) et des hydroxydes (OH^-).

Titre alcalimétrique

Le TA correspond au dosage de la moitié des ions carbonates (CO_3^-) et la totalité des ions hydroxydes (OH^-) à un pH supérieur à 8.3.

Mode opératoire

Dans un échantillon de 100 mL, on ajoute 2 gouttes de phénophtaléine, si le pH de l'échantillon est :

<8,3 : l'échantillon ne se colore pas alors $\text{TA} = 0$

>8,3 : l'échantillon est de couleur rose, donc le TA est déterminé par dosage par l'acide chlorhydrique de 0,1 N jusqu'à décoloration.

Titre alcalimétrique complet (TAC)

Le T.A.C correspond à la neutralisation des ions hydroxydes, carbonates et hydrogénocarbonates par un acide fort. La mesure de TAC succède à celle de TA, Dans l'échantillon

On ajoute 2 gouttes d'hélianthine et on réalise le dosage par HCL (0,1 N) jusqu'à la zone de virage rose/ orange.

Le T.A.C s'exprime en méq/l ou degré français (tombée de burette *5) suivant la relation :

$$\text{TAC} = \text{Ve (méq/L)} : \text{Ve est le volume à l'équilibre (annexe 1)}$$

6. Titre hydrotimétrique TH

La dureté totale ou le TH d'une eau est la concentration totale en ions calcium, magnésium et autres cations bivalents et trivalents dans cette eau.

Mode opératoire :

A 100 ml d'eau à analyser, on ajoute 5 mL de la solution tampon ammoniacal, une petite spatule d'indicateur de noire d'ériochrome. On dose au moyen de la solution EDTA (0,02M) jusqu'à l'obtention d'une couleur bleu.

$$\text{Expression des résultats :} \quad \text{TH (méq/L)} = \text{Ve} * 0.4 \text{ (annexe 2)}$$

7. L'oxydabilité (indice permanganate)

L'indice permanganate d'une eau correspond à la quantité d'oxygène exprimée en mg/l cédée par l'ion permanganate (MnO_4^-) et consommée par les matières oxydables contenues dans un litre d'eau.

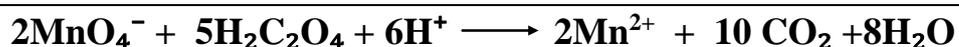
➤ Méthode en milieu acide et à chaud

Les matières oxydables contenus dans l'eau à analyser sont oxydées par un excès de permanganate de potassium en milieu acide et à chaud pendant 13min, ensuite le KMnO_4 est réduit par l'acide oxalique en excès, et on effectue un dosage en retour de cet excès par KMnO_4 .

Les réactions de dosage effectués sont :



La réaction globale est :



Mode opératoire :

Dans un ballon à col rodé, on introduit successivement 100 mL d'échantillon, 2 mL de H_2SO_4 concentré et 10 mL de KMnO_4 (N/100). Le mélange est ensuite chauffé dans un bain marie à 105°C pendant 13 min. Après, on ajoute 1 mL d'acide oxalique (0.1N) et on effectue un dosage avec KMnO_4 (N/100). La solution prend une couleur rose au point d'équilibre.

L'oxydabilité est évaluée à l'aide de la formule suivante :

$$[\text{O}_2] = V_e * 0.8 \text{ (mg/L)} \quad (\text{annexe 3})$$

➤ **La valeur maximale admissible : 2 mg/L**

8. Oxygène dissout

Dans les eaux naturelles, l'oxygène dissout est un facteur écologique essentiel car sa présence permet la respiration des êtres vivants aquatiques

La quantité d'oxygène dissout est mesurée par un oxymètre et exprimée en $\text{mg d'O}_2/\text{L}$.

La norme : $5 < \text{O}_2 < 8 \text{ (mg/L)}$



Figure 7 : Oxymètre

9. *pH de saturation pHs*

C'est un paramètre qui permet de déterminer l'agressivité de l'eau.

Dans un flacon, on verse 25 mL de l'échantillon à analyser et on mesure leur pH, ensuite on ajoute 0,25 g de CaCO_3 poudre. Après agitation magnétique de 3h suivi d'une décantation pendant 24h, on filtre la solution à l'aide d'un papier filtre et on mesure le pH du filtre (pHs).

L'indice de saturation est exprimé par la relation suivante :

$$I_s = \text{pH} - \text{pHs}$$

La norme : $-0,3 < I_s < 0,3$

- $\text{pHs} - \text{pH} < 0$: eau agressive
- $\text{pHs} - \text{pH} > 0$: eau entartrant

10. *Paramètre mesuré par kit*

➤ Test d'aluminium :

C'est un test qui sert à détecter l'absence ou la présence d'aluminium dans l'eau traitée.

En Prend 5 mL de l'échantillon, on ajoute une spatule de (AI-1A) et 1,2 mL de (AI-2A) et 4 gouttes de (AI-3A), La lecture finale des résultats se fait après 7min.

Chaque couleur correspond à une valeur et La variation des couleurs varie entre : jaune, verte, bleu

La valeur maximale admissible : 0,2 mg/L

Projet de fin d'études

➤ Test de Fer

C'est un test sert à détecter la présence ou l'absence du Fer dans l'eau traitée.

On Prend 6mL de l'échantillon et on ajoute 3 gouttes du réactif (**Fer-1**) et on laisse 3min ensuite on fait la comparaison du couleur

La valeur maximale admissible : **0,3 mg/L**

- **La présence faible du fer est due à la conduite.**

➤ Test de manganèse

C'est un test qui sert à détecter la présence ou l'absence du manganèse dans l'eau brute.

On remplit le tube jusqu'à trait du jauge et on ajoute 8 gouttes de (**Mn-1A**) plus 4gouttes de (**Mn-2A**) et on laisse 2min, ensuite on ajoute 4 gouttes de (**Mn-3A**) et on laisse reposer 5min après on compare les couleurs

La valeur maximale admissible : **0,5 mg/L**

La couleur varie entre beige et marron

La présence faible du manganèse peut disparaître à la présence du chlore

➤ Test d'ammonium

Comme les tests précédant le test d'ammonium permet de détecter la présence ou l'absence de NH_4^+ dans l'échantillon.

On remplit le tube de 20 mL de l'échantillon et on ajoute 5gouttes de (**NH₄-1**), 5gouttes de (**NH₄-2**) et 5gouttes de (**NH₄-3**) et en laisse reposer 3min puis on compare les couleurs

La valeur maximale admissible : **0,5 mg/L**.

N.B : les noms des réactifs utilisés dans les paramètres mesurés par kit ne sont pas connu.

11. Demande en chlore

La demande en chlore correspond à la dose nécessaire pour obtenir la teneur résiduelle recommandée, après le temps de contact nécessaire. Cette dose est déterminée par la méthode de break point.

Au laboratoire avant de déterminer le break point, il faut d'abord faire le titrage de l'eau de javel.

Titrage de l'eau de javel

Dans un erlenmeyer de 250 mL, on introduit 1 ml de l'eau Javel, 10 mL d'acide acétique (9N) et 10mL de KI (9N). L'iode formé est dosé avec le thiosulfate de sodium (0.1N).

Projet de fin d'études

La concentration en chlore dans l'eau de javel est donnée par l'équation :

$$C \text{ (g/l)} = Ve * 3.55 \text{ (annexe 4)}$$

- On fait la dilution de l'eau de javel titré pour préparer une solution de 100 mL de $C = 0,1 \text{ g/L}$

Injection de la solution (eau de javel)

On met dans des flacons bruns 100 mL de l'eau brute et on injecte des quantités croissantes de l'eau de javel titré :

0,5 mg/L, 1 mg/L, 1,5 mg/L, 2 mg/L, 2,5 mg/L, 3 mg/L, 3,5 mg/L, 4 mg/L

On met les flacons bruns qui contiennent l'eau brute et l'eau de javel à l'obscurité pendant 30min puis on détermine le chlore résiduel, ensuite on trace la courbe du chlore résiduel en fonction de la quantité de chlore injecté, à partir de laquelle on déduit le break point qui correspond à la dose du chlore optimale pour une désinfection efficace.

La figure ci-dessous montre un exemple d'illustration d'un test de demande en chlore régulièrement effectué au laboratoire :

Chlore injecté (mg/L)	Chlore résiduel (mg/L)
0,5	0,3
1	0,6
1,5	1,3
2	1,6
2,5	2,6
3	2,4
3,5	2,9
4	4

Tableau 7:Chlore injecté et chlore résiduel

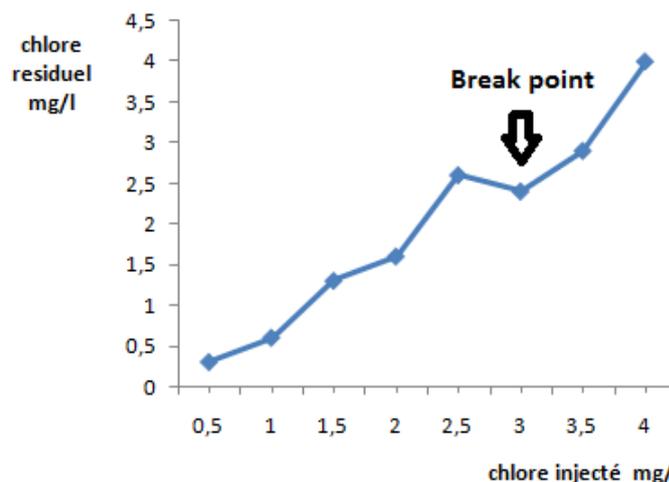


Figure 8: Variation du chlore résiduel en fonction du chlore injecté

IV. Optimisation de traitement par coagulation floculation (jar-test)

1. Jar-test

Les essais sont réalisés selon la procédure expérimentale bien connu du "Jar-test" qui permet de déterminer les conditions optimales de coagulation (doses, pH, nature de coagulant...)

La détermination de ces grandeurs en laboratoire est réalisée par l'appareil jar-test. Il consiste en une rangée de 6 béchers alignés sous un appareillage permettant de tous les agiter à la même vitesse

Selon l'expérience réalisée on peut varier les différents paramètres : pH, doses du coagulant, nature du coagulant..., et à la fin de l'expérimentation, on détermine la valeur optimale du paramètre qu'on est entrain d'étudier



Figure 9: Appareil jar-test

Mode opératoire :

Avant d'entreprendre le Jar-test, un certain nombre de mesures doivent être effectuées sur l'eau brute. Celles-ci concernent :

- La turbidité, Le pH, la Conductivité, L'oxydabilité, La demande en chlore...

Ces déterminations permettent de donner une idée sur les réactifs à employer et aussi sur l'efficacité des réactifs par comparaison avec les résultats obtenus après traitement.

- ✓ Prendre 6 béchers d'un lit de 1L d'eau pré chloré.
- ✓ Agitation rapide 120tr/min pendant 2 min pour assurer l'homogénéité entre le chlore et l'eau.
- ✓ Ajout des doses croissant ou fixe de coagulant utilisé dans les 6 béchers selon l'expérience étudiée.
- ✓ Agitation rapide 120tr/min pendant 2min (coagulation)

Projet de fin d'études

- ✓ Agitation lente 40tr/min pendant 20 min (floculation)
- ✓ Sédimentation pendant 30 min (décantation)
- ✓ Détermination de la turbidité d'eau décantée.
- ✓ Filtration sur un papier filtre
- ✓ Mesure des différents paramètres (turbidité, pH,...) sur l'eau filtrée.

Critères de choix de la dose de traitement (dose optimale) :

- Turbidité de l'eau décantée < 5 NTU.
- Turbidité de l'eau filtrée < 0.5 NTU
- pH de floculation entre 6.50 et 8.50.
- Oxydabilité par KMnO_4 < 2 mg/L.
- [Al résiduel] < 0.2 mg/L.

Avant de faire l'essai de jar-test il faut déterminer la dose nécessaire du chlore injecté au cours de l'opération.

2. Partie expérimentale :

2.1 Essai (1) : Effet de la concentration du coagulant sulfate d'aluminium sur la coagulation

La détermination de la concentration du coagulant est un paramètre essentiel pour la déstabilisation des colloïdes. Il faut d'abord préciser la concentration optimale du coagulant ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) qui donne la meilleure élimination des matières en suspension.

Avant de faire l'essai de la détermination de la dose optimale du coagulant, plusieurs analyses physico-chimiques ont été effectuées sur l'eau brute et ils sont présentés dans le tableau suivant :

Turbidité	8,9 NTU
pH	8,16
Conductivité	215 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Oxygène dissout	8,45 mg/L
Concentration d'aluminium	0 mg/L
Concentration de Fer	0 mg/L
Concentration d'ammonium	0 mg/L
Concentration de magnésium	0 mg/L
Oxydabilité par KMnO_4	2,64 mg/L

Tableau 8 : Caractéristiques de l'eau brute

Projet de fin d'études

On varie la concentration du coagulant ajouté de 15 à 40 mg/L pour l'échantillon d'eau pré-chloré et on lance l'agitation. Après on mesure pour chaque bécher la turbidité et le pH et la quantité d'aluminium résiduel.

a. Résultats de l'effet de la concentration du coagulant sulfate d'aluminium sur la coagulation

N° de béchers	1	2	3	4	5	6
Doses injectés (mg/l)	15	20	25	30	35	40
Turbidité de l'eau décantée (NTU)	1,78	0,9	0,88	0,8	0,77	0,77
Turbidité de l'eau filtrée (NTU)	0,98	0,55	0,5	0,41	0,4	0,4
pH	7,92	7,81	7,71	7,38	7,37	7,31
Test d'aluminium (mg/l)	0	0	0	0,07	0,07	0,07
Chlore résiduel (mg/l)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4
Taux d'abattement pour l'eau décantée (%)	80	89,8	90,1	91	91,34	91,34
Taux d'abattement pour l'eau filtrée (%)	88,9	93,8	94,3	95,3	95,5	95,5

Tableau 9 : Résultats de l'effet des doses du coagulant sulfate d'aluminium sur la coagulation floculation

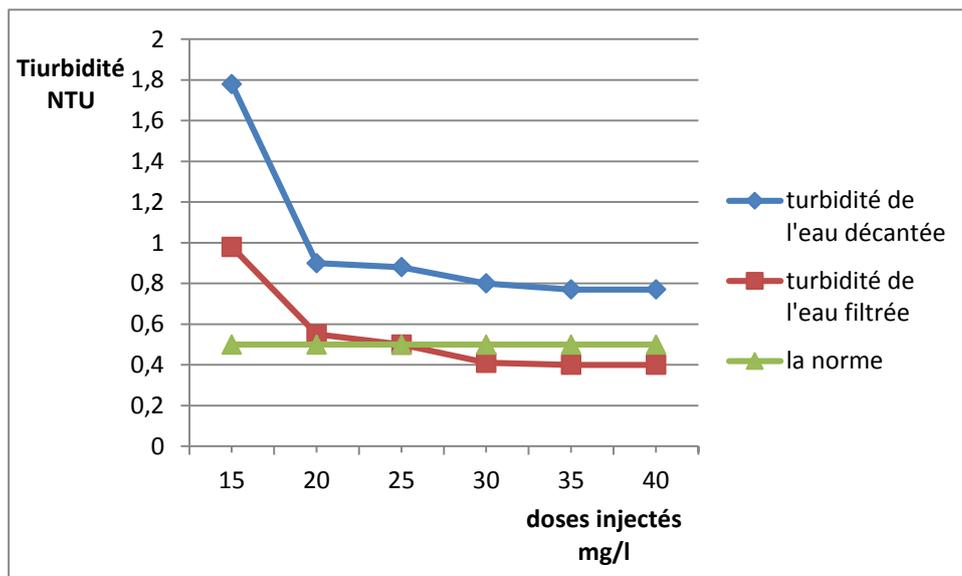


Figure 10: Variation de la turbidité en fonction de la dose du coagulant (sulfate d'aluminium).

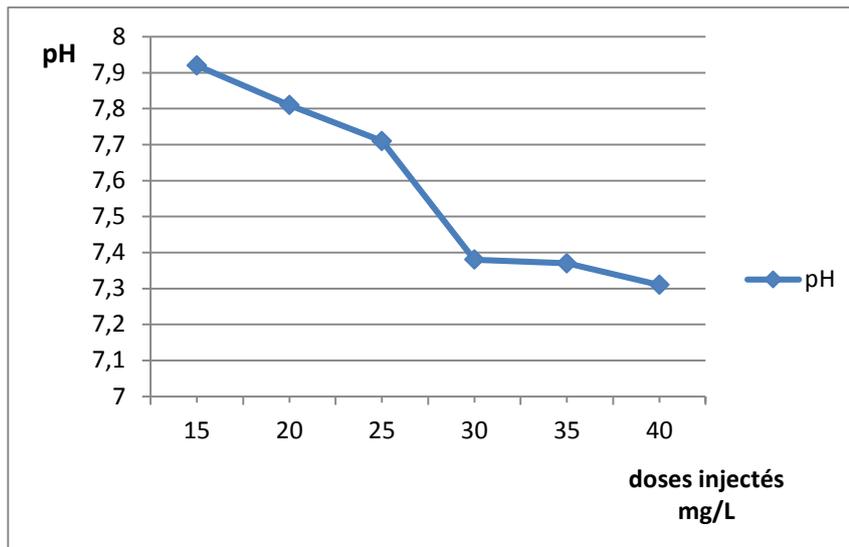


Figure 11: Variation du pH de l'eau filtrée en fonction de la dose du coagulant(sulfate d'aluminium)

b. Interprétation des résultats

On remarque bien que l'addition de **15 mg/L** du coagulant a provoqué la diminution de la valeur de la turbidité de **8,9 NTU** de l'eau brute à **0,98 NTU** après filtration, et avec une augmentation de la concentration du coagulant ces valeurs de turbidité continuent à diminuer, ce qui traduit par une augmentation de taux d'abattement de la turbidité avec la concentration du coagulant.

Cela est dû à ce que les particules du coagulant déstabilisent les colloïdes négativement chargés présents dans l'eau à traiter, en neutralisant la charge de ces colloïdes.

Arrivant à une concentration de **30 mg/L** de coagulant, nous avons remarqué que la valeur de la turbidité a atteint **0,41 NTU** (taux d'abattement de 95,3%) et elle reste presque la même pour la concentration **35 mg/L** et **40 mg/L** de coagulant.

On remarque aussi qu'avec l'augmentation de la concentration du coagulant la valeur du pH subit une diminution de **7,92** à **7,31** cela est dû à l'acidité du coagulant sulfate d'aluminium.

D'après les critères de choix de la dose optimale :

- La turbidité filtrée des 2 premiers béchers est supérieur à la norme :
(**0,98 NTU**, **0,55 NTU**) > **0,5 NTU** donc à éliminer
- Les 4 derniers béchers répondent aux critères de choix donc on va choisir le bécher 3 puisqu'il contient moins de coagulant (raison économique) : **30 mg/L**

Donc la dose optimale du coagulant est 30 mg/L

Projet de fin d'études

Les caractéristiques qui correspondent à la dose choisie :

	Eau filtrée	Eau brute	La norme
pH	7,38	8,16	6,5<pH<8,5
Turbidité (NTU)	0,41	8,9	< 0,5
Concentration d'aluminium (mg/L)	0,07	0	< 0,2
TH (titre hydrotimétrique) (méq/L)	2,92	—	—
TA (titre alcalimétrique) (méq/L)	0	0	—
TAC (titre alcalimétrique complet) (méq/L)	1,6	—	—
Oxydabilité par KMnO₄ (mg/L)	0,84	2,64	< 2

Tableau 10 : Caractéristiques de la dose choisie du coagulant sulfate d'aluminium.

2.2 Essai (2) : Effet de l'ajout de flocculant sur la coagulation floculation

Pendant cette expérience on a utilisé un flocculant : polymère pour étudier leur effet sur la coagulation floculation.

➤ Analyse de l'eau brute :

Eau brute utilisée	
Turbidité	9,84 NTU
pH	8,02
Conductivité	217µS/cm
Oxygène dissout	7,85mg/L
Concentration d'aluminium	0mg/L
Concentration de Fer	0 mg/L
Concentration d'ammonium	0 mg/L
Concentration de magnésium	0 mg/L
Oxydabilité par KMnO₄	2,64 mg/L

Tableau 11 : Caractéristiques de l'eau brute

Dans cet essai nous avons injectés dans l'eau pré-chlorée des doses croissantes de sulfate d'aluminium de **20 à 30 mg/L**, dans les 2 premiers béchers nous avons ajouté le coagulant sans flocculant, et dans les trois derniers béchers on a ajouté à la présence de sulfate d'aluminium, le flocculant (polymère) à des doses croissantes de **0,1 à 0,3 mg/L**

Projet de fin d'études

a. Résultats de l'effet de l'ajout de floculant sur la coagulation floculation

N° de béchers	1	2	3	4	5
Doses injectés (mg/L)	20 mg/L de SA	30 mg/L de SA	20 mg/L de SA + 0,1 mg/L de P	20 mg/L de SA + 0,2 mg/L de P	20 mg/L de SA + 0,3 mg/L de P
Turbidité de l'eau décantée (NTU)	1,46	1,2	0,67	0,55	0,6
Turbidité de l'eau filtrée (NTU)	0,77	0,46	0,47	0,4	0,52
pH	6,97	7,04	7,24	7,39	7,55
Test d'aluminium (mg/L)	0	0,07	0,07	0,07	0,07
Chlore résiduel (mg/L)	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4
Taux d'abattement pour l'eau décantée (%)	85,16	87,8	93,5	94,4	93,9
Taux d'abattement pour l'eau filtrée (%)	92,17	95,32	95,22	95,93	94,7

Tableau 12 : Résultats de l'effet d'ajout de floculant sur la coagulation floculation

SA :Sulfate d'alumine
P :Polymere

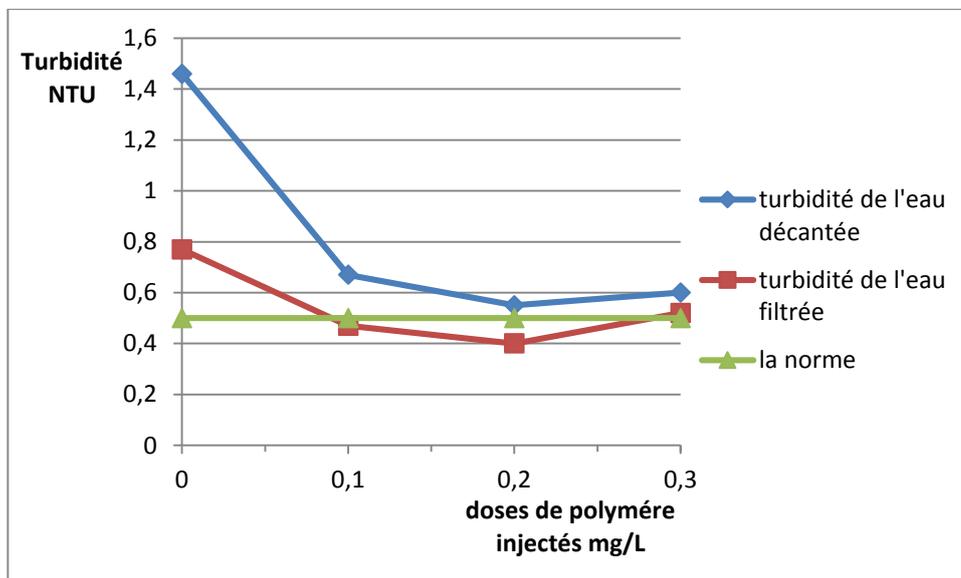


Figure 12 : Variation de la turbidité en fonction des doses de polymère injectés

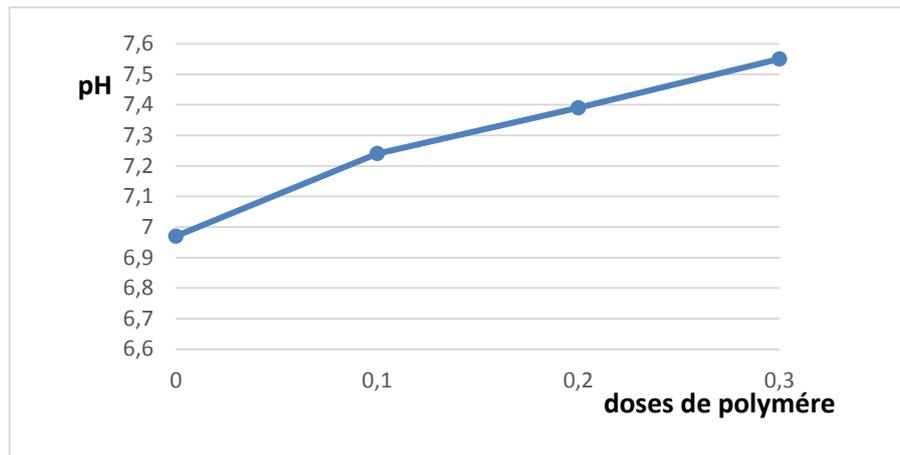


Figure 13 : Variation du pH en fonction de doses injectées de polymère

b. Interprétation des résultats

D'après les résultats présentés ci-dessus, on remarque qu'en cas de traitement sans ajout de floculant (béchers 1 et 2), la turbidité diminue en fonction de l'augmentation progressive de la concentration du coagulant pour atteindre **0,46 NTU** pour **30 mg/L** de coagulant.

Cependant dans le cas où nous avons ajouté le floculant (béchers 3, 4 et 5), l'élimination est plus efficace et la dose optimale elle atteint **0,4 NTU** pour la turbidité ce qui se traduit par une augmentation de taux d'abattement de la turbidité avec l'ajout de floculant.

On remarque aussi qu'avec l'augmentation de la concentration du floculant la valeur du pH subit une augmentation de **6,97 à 7,55** cela est dû à la basicité du floculant : polymère

Alors l'utilisation de **0,2 mg/L** du polymère nous permet d'économiser **10 mg/L** de : $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
Donc d'après les critères de choix de la dose optimale, on va choisir le bécher 3 par ce qu'il répond aux conditions optimales : turbidité = **0,4 NTU** ; pH = **7,39**

La caractéristique qui correspond à la dose choisie :

	Eau filtrée	Eau brute	La norme
pH	7,39	8,02	6,5 < pH < 8,5
Turbidité (NTU)	0,4	9,84	< 0,5
[Al³⁺] (mg/l)	0,07	0	< 0,2
TH (titre hydrotimétrique) (méq/l)	2,95	—	—
TA (titre alcalimétrique) (méq/l)	0	0	—
TAC (titre alcalimétrique complet) (méq/l)	1,95	—	—
Oxydabilité par KMnO₄ (mg/l)	0,82	2,6	< 2

Tableau 13 : Caractéristiques qui correspond à la dose choisie du floculant

2.3 Essai (3) : Effet de la nature du coagulant chlorure ferrique sur la coagulation floculation

➤ Analyse de l'eau brute :

Eau brute utilisée	
Turbidité	6,56 NTU
pH	8,19
Conductivité	215 μ S/cm
Oxygène dissout	7,89 mg/L
Concentration d'aluminium	0 mg/L
Concentration de Fer	0 mg/L
Concentration d'ammonium	0 mg/L
Concentration de magnésium	0 mg/L
Oxydabilité par KMnO₄	2,5 mg/L

Tableau 14 : Caractéristiques de l'eau brute

Dans cet essai nous avons changé la nature du coagulant utilisée dans la station de traitement, le sulfate d'aluminium par le chlorure ferrique (FeCl_3) et nous avons étudiés l'effet de ce dernier sur la coagulation floculation.

Nous avons varié la concentration du chlorure ferrique ajouté de 2 à 10 mg/l pour l'échantillon d'eau pré-chloré, après l'agitation nous avons mesuré la turbidité, le pH et la concentration de fer résiduel.

a. Résultats obtenus de l'effet de chlorure ferrique sur la coagulation floculation :

N° de béchers	1	2	3	4	5
Doses injectés (mg/L)	2	4	6	8	10
Turbidité de l'eau décantée (NTU)	2,98	1,85	1,5	1,19	0,83
Turbidité de l'eau filtrée (NTU)	1,83	0,62	0,6	0,5	0,43
pH	8,13	8,13	8,05	7,96	7,95
Test de Fer (mg/L)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Chlore résiduel (mg/L)	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3
Taux d'abattement pour l'eau décantée (%)	54,5	71,7	77,1	81,8	87,3
Taux d'abattement pour l'eau filtrée (%)	72,1	90,5	90,8	92,3	93,4

Tableau 15 : Résultats de l'effet de la nature de coagulant chlorure ferrique sur la coagulation

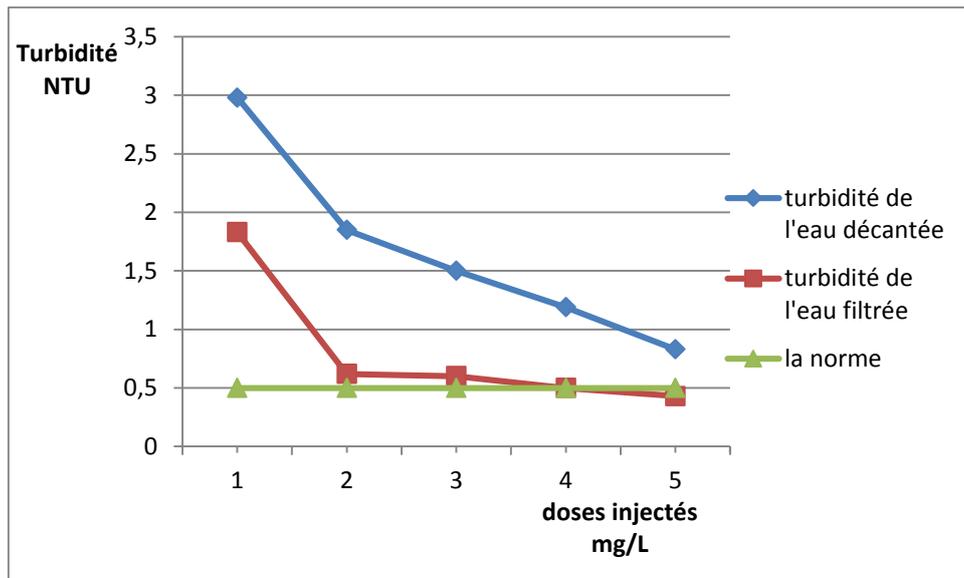


Figure 14: Variation de la turbidité en fonction de doses injectées de Chlorure ferrique

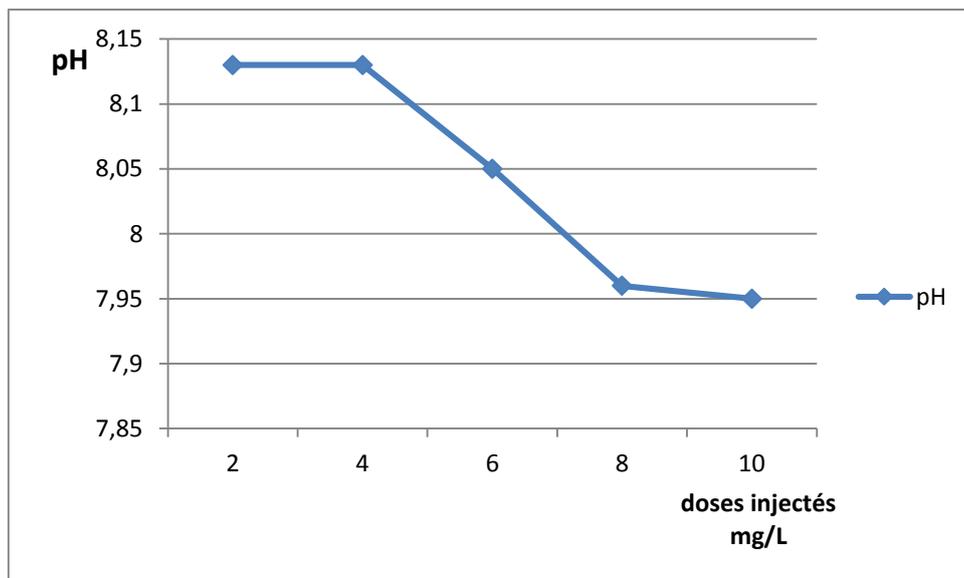


Figure 15 : variation du pH en fonction de doses injectées de chlorure ferrique

b. Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus on observe que la turbidité diminue en fonction de l'augmentation progressive de la concentration du coagulant (FeCl_3) pour atteindre **0,43 NTU** pour **10 mg/L** de coagulant, ce qui est expliqué par l'augmentation de taux d'abattement de la turbidité avec la concentration du chlorure ferrique.

On remarque aussi qu'avec l'augmentation de la concentration du coagulant la valeur du pH subit une diminution de **8,13 à 7,95** cela est dû à l'acidité du coagulant (FeCl_3)

Projet de fin d'études

Donc d'après les critères de choix de la dose optimale de coagulant utilisé la dose choisie est **10 mg/L** qui correspond à la turbidité **0,43 NTU**.

Les caractéristiques qui correspondent à la dose choisie :

	Eau filtrée	Eau brute	La norme
pH	7,95	8,19	6,5<pH<8,5
Turbidité (NTU)	0,43	6,56	< 0,5
Concentration de Fer (mg/l)	0,2	0	< 0,3
TH (titre hydrotimétrique) (méq/l)	2,8	—	—
TA (titre alcalimétrique) (méq/l)	0	0	—
TAC (titre alcalimétrique complet) (méq/l)	1,9	—	—
Oxydabilité par KMnO₄ (mg/l)	0,8	2,5	< 2

Tableau 16: Caractéristiques qui correspondent à la dose optimale du chlorure ferrique

2.4 Essai (4) : Effet de pH sur la coagulation floculation

Le pH est un des paramètres qui affecte beaucoup plus la coagulation-floculation. Son contrôle est donc conseillé.

La marge acceptable du pH de sulfate d'aluminium comprise entre **6,5** et **8,5**

L'accroissement du pH réduit aussi progressivement l'efficacité du chlore comme désinfectant

➤ Analyse de l'eau brute :

Eau brute utilisée	
Turbidité	8,43NTU
pH	8,16
Conductivité	219 µS/cm
Oxygène dissout	7,98 mg/L
Concentration d'aluminium	0 mg/L
Concentration de Fer	0 mg/L
Concentration d'ammonium	0 mg/L
Concentration de magnésium	0 mg/L
Oxydabilité par KMnO₄	3,2 mg/L

Tableau 17: caractéristiques de l'eau brute

Projet de fin d'études

En essayant de voir l'effet du pH. Le prélèvement d'un échantillon d'eau brute a été traité par $Al_2(SO_4)_3$, et on fixe ce dernier à une dose de **30 mg/L**.

Nous avons ajusté le pH des échantillons d'eau pré-chlorés de 6,5 à 7,75 grâce à une solution de HCl à **0,1N** puisque le pH de l'eau brute est **8,16**

a. Résultats obtenus de l'effet du pH sur la coagulation floculation :

N° de béchers	1	2	3	4	5	6
Doses injectés (mg/L)	30	30	30	30	30	30
pH utilisés	6,5	6,75	7	7,25	7,5	7,75
Turbidité de l'eau décantée (NTU)	1,48	1,4	1,24	0,95	0,74	0,7
Turbidité de l'eau filtrée (NTU)	0,47	0,44	0,42	0,35	0,45	0,47
Test d'aluminium (mg/L)	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
pH après filtration	6,4	6,52	6,73	7,01	7,29	7,36
Chlore résiduel (mg/L)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Taux d'abattement pour l'eau décantée (%)	82,4	83,3	85,3	88,9	91,2	91,6
Taux d'abattement pour l'eau filtrée (%)	94,4	94,7	95	95,8	94,6	94,4

Tableau 18: Résultats de l'effet de pH sur la coagulation floculation

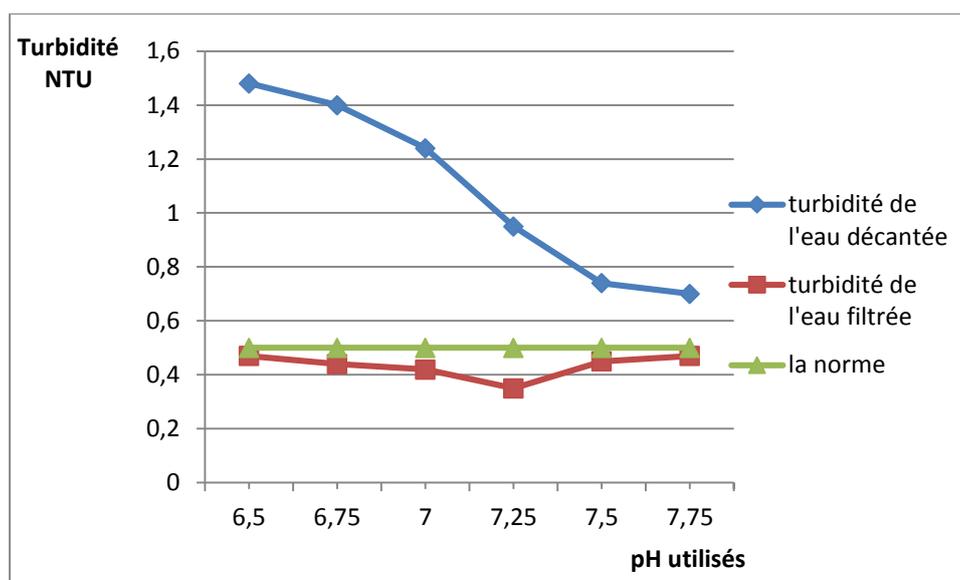


Figure 16 : variation de la turbidité en fonction du pH utilisés

b. Interprétation des résultats :

Les résultats obtenus montrent que la turbidité de l'eau filtrée initialement a diminué jusqu'à **0,35 NTU** pour un **pH = 7,25**. Par la suite, et avec l'augmentation du pH, la turbidité commence à augmenter jusqu'à 0,47 pour un **pH = 7,75**. Donc il existe une gamme optimale de pH pour une meilleure turbidité.

Ces résultats sont montrés par le taux d'abattement quand sa valeur a atteint 95,8% pour un pH de **7,25** pour l'eau filtrée

Ce test a donné la preuve que le sulfate d'aluminium avait la meilleure performance de la coagulation pour un pH de **7,25**

Les caractéristiques qui correspondent à la dose choisie :

	Eau filtrée	Eau brute	La norme
pH	7,01	8,16	6,5<pH<8,5
Turbidité (NTU)	0,35	8,43	< 0,5
Concentration d'aluminium (mg/L)	0,07	0	< 0,2
TH (titre hydrotimétrique) (méq/L)	2,8	—	—
TA (titre alcalimétrique) (méq/L)	0	0	—
TAC (titre alcalimétrique complet) (méq/L)	2,4	—	—
Oxydabilité par KMnO₄ (mg/L)	0,85	3,2	< 2

Tableau 19: Caractéristiques qui correspondent à la dose du pH choisi

Conclusion

Les eaux destinées directement à la consommation humaines doivent être saines et sans danger pour la santé du consommateur à court comme à long terme et ne doivent pas se dégrader lors de leurs transport dans les réseaux de distribution.

L'étude expérimentale que nous avons menée a été consacrée à l'élimination, par coagulation-floculation, les matières en suspensions et les colloïdes existants dans l'eau brute de la station de traitement des eaux du barrage BAB LOUTA.

Des essais Jar-test ont été effectués en variant le type de coagulant (sulfate d'aluminium, chlorure ferrique), leur concentration, la concentration du floculant (polymère) et le pH.

Les résultats obtenus ont montré que :

La détermination de la concentration du coagulant est un paramètre essentiel pour la déstabilisation des colloïdes, pour le sulfate d'aluminium la concentration optimale obtenue est de 30mg/l, avec un taux d'abattement de 95,3% en turbidité, et pour le chlorure ferrique la concentration optimale obtenue est de 10mg/l, avec un taux d'abattement de 93,4% en turbidité.

Les essais effectués en fonction de la dose en floculant (polymère), améliore la qualité des eaux traitées, la dose optimale de floculant utilisé est de 0,2mg/l avec un taux d'abattement de 95,93% en turbidité.

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, l'étude de pH a été effectuée sur des échantillons d'eau brute utilisant le sulfate d'aluminium comme coagulant à une dose de 30mg/l (dose optimale déjà déterminée) a montré que le coagulant sulfate d'aluminium avait la meilleure performance de la coagulation pour un pH de 7,25 avec un taux d'abattement de 95,8% en turbidité.

Enfin on signale qu'une expérience concernant l'effet de l'agitation sur la coagulation floculation a été réalisée pendant le stage mais elle n'a pas été introduite dans le manuscrit. Cette expérience est mal effectuée à cause d'une estimation inadéquate de la vitesse d'agitation lente utilisée on peut proposer une utilisation de cette vitesse entre 20 et 60 tr/min pour la détermination de la valeur optimale de ce paramètre pour une prochaine étude.

Références bibliographiques

- Manuel des analyses physico-chimiques de l'ONEE (branche eau)
- Manuel des Normes marocaines relatives aux eaux d'alimentation humaine
- BOULAALA Mohammed Amine ; 2014 ; rapport de stage sous le thème traitement et production de l'eau potable à la station de traitement BAB LOUTA
- LAKEHAL-SENHAJI-Mohammed ; 2014 ; PFE ; L'optimisation des adjuvants dans le traitement de l'eau potable ; ONEE Meknès ; FST
- <http://fr.wikipedia.org/wiki/Coagulation-floculation>
- www.memoireonline.com/02/09/1994traitement-des-eaux-quot-traitement-de-de-leau-de-source-bousfer-ORAN.html

Annexes

Annexe 1 :

➤ *La démonstration de la relation du titre alcalimétrique complet*

$$\text{TAC} = V_e \text{ (még/l)}$$

Au cour de l'expérience on réalise un dosage par HCL (0,1N)

On a $N_a \cdot V_a = N_b \cdot V_b$

Donc $N_a = N_b \cdot V_b / V_a$

⇔ $N_a = 0,1 \cdot V_b / 100$.

⇔ $N_a = 10^{-3} \cdot V_b \text{ (éq/l)}$.

⇔ $N_a = V_b \text{ (még/l)}$

V_b : volume à l'équilibre de HCl.

N_b : normalité de HCl (0,1N).

V_a : volume de la prise d'essai 100ml.

N_a : normalité des alcalins

Donc $N_a = \text{TAC} = V_b \text{ (még/l)}$

Annexe 2 :

➤ *La démonstration de la relation du titre hydrotimétrique :*

$$\text{TH (még/l)} = V_e \cdot 0.4$$

Soient :

N_a : Normalité d'EDTA.

V_e : volume à l'équilibre d'EDTA

N_b : La somme de la Normalité des ions Ca^{2+} et Mg^{2+}

V_b : Volume de l'échantillon ($V_b = 100 \text{ ml}$).

A l'équilibre :

$$N_a \cdot V_e = N_b \cdot V_b$$

$$N_b = N_a \cdot V_e / V_b$$

On a: $N_a = \text{Ca} \cdot 2$

$$N_b = (0,2 \cdot 2 \cdot V_e) / 100$$

$$N_b = 0,0004 \cdot V_e \text{ (éq/l)}$$

Donc : $Nb = 0,4 * Ve$ (méq/l)

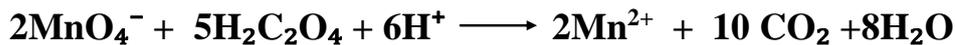
Donc : $TH = 0,4 * Ve$ (méq/l)

Annexe 3 :

c. La démonstration de la relation de l'oxydabilité :

$$[O_2] \text{ mg/l} = 0,8 * Ve$$

Avec Ve le volume à l'équilibre de $KMnO_4$



On a d'après la réaction du dosage:

$$n(MnO_4^-) / 2 = n(C_2O_4^{2-}) / 5$$

$$n(MnO_4^-) = (n(C_2O_4^{2-}) * 2) / 5 \quad \text{on a } n(C_2O_4^{2-}) = 2n(O_2)$$

$$n(MnO_4^{2-}) = (2n(O_2) * 2) / 5$$

$$n(O_2) = (n(MnO_4^{2-}) * 5) / 4$$

$$n(O_2) = (C * Ve * 5) / 4$$

on a : $C = N/P$

$$n(O_2) = (Ve * 5) / (4 * 100 * 5)$$

$$C = 1 / (100 * 5)$$

$$m(O_2) / M(O_2) = Ve / (4 * 100)$$

avec: $M(O_2) = 32 \text{ g/mol}$

$$m(O_2) = (32 * Ve) / (4 * 100)$$

$$m(O_2) / V_{\text{éch}} = (8 * V_{\text{tb}}) / (100 * V_{\text{éch}})$$

$$C_m(O_2) = 8 * 10^{-3} * 10^{-1} * Ve \text{ (g/l)}$$

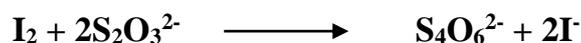
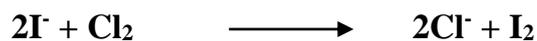
$$C_m(O_2) = 0,8 * Ve \text{ (mg/l)}$$

Annexe 4 :

d. La démonstration de la relation de la demande en chlore :

$$C \text{ (g/l)} = Tb * 3.55$$

Les réactions mises en jeu :



Soient :

N_a : Normalité de Cl_2 .

V_a : Volume de l'échantillon ($V_a = 1\text{ml}$).

N_b : Normalité de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$.

V_e : volume à l'équilibre de thiosulfate de sodium V_e .

A l'équilibre :

$$N_a \cdot V_a = N_b \cdot V_e$$

$$N_a = N_b \cdot V_e / V_a$$

$$N_a = 10^{-1} * V_e \text{ (éq/l)}$$

On a : $[\text{Cl}_2] = 10^{-1} * V_e / 2$

Donc : $[\text{Cl}_2] = 5 \cdot 10^{-2} * V_e \text{ (mol/l)}$

On a : $[\text{Cl}_2]' = [\text{Cl}_2] * M_{\text{Cl}_2}$ (avec $M_{\text{Cl}} = 35,5 \text{ g/mol}$)

$$[\text{Cl}_2]' = 5 \cdot 10^{-2} * V_e * 71$$

Donc : $C = 3,55 * V_e \text{ (g/l)}$.