

LISTE DES ABREVIATIONS

d	Densité de la particule
°F	Degré français
g	Accélération de la pesanteur
MES	Matière en suspension
NED	N-diamine 1,2 éthane
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
ONEE	Office national d'électricité et de l'eau
P	Production
R	Rayon de la particule
SP	Station de pompage
TA	Titre alcalimétrique
TAC	Titre alcalimétrique complet
TH	Titre hydrotimétrique

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Classes de turbidité usuelles (NTU, nephelometric turbidity unit).	13
Tableau 2 : Regroupe les résultats des analyses de l'eau brute à traiter.....	25
Tableau 3 : la turbidité de l'eau pour les différentes étapes de clarification.	32
Tableau 4 : Le coût global pour les différents adjuvants.....	32

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Vue aérienne de la station de Tamri.....	4
Figure 2 : Barrage My. Abdellah -prise d'eau brute.....	5
Figure 3 : vis de relevage	5
Figure 4 : Croquis de la station de traitement de Tamri.	6
Figure 5 : Ouvrage d'arrivée	6
Figure 6 : Mélangeur rapide	8
Figure 7 : La bêche de mélange des boues.	7
Figure 8 : Bêche de floculation	7
Figure 9 : Décanteur à canaux creusés.	8
Figure 10 : Décanteur à lamellaire plastiques.	8
Figure 11 : Lavage automatique du filtre à sable.....	9
Figure 12 : Tableau de commande.	8
Figure 13 : Bouteilles de Chlore « désinfectant ».	10
Figure 14 : Répartiteur de chlore.....	9
Figure 15 : Filière de traitement physico- chimique de l'eau potable	15
Figure 16 : Réactions du chlore dans l'eau	16
Figure 17 : Double couche d'une particule colloïdale	17
Figure 18 : Stabilité d'une suspension colloïdale	18
Figure 19 : Essai de Jar test	20
Figure 20 : Evolution de la turbidité en fonction de la dose du flocculant	27
Figure 21 : Evolution de la turbidité en fonction de la dose en $Al_2(SO_4)_3$	28
Figure 22 : Evolution de la turbidité en fonction de la dose du $FeCl_3$	29
Figure 23 : Evolution de la turbidité en fonction de la dose de l'alginate.....	30
Figure 24 : Evolution de la turbidité en fonction de la dose de sulfate d'aluminium	30
Figure 25 : Evolution de la turbidité en fonction de la dose de $FeCl_3$	31

Sommaire

Introduction générale.....	1
I. Présentation de l'ONEE Branche d'eau:	2
1. Directions régionales de l'ONEE	2
2. Présentation de la division d'accueil (division industrielle).....	3
3. Systèmes de production de l'eau potable du grand Agadir	3
II. Présentation de la station de Tamri	4
1. Localité:.....	4
2. Création:	4
3. Objectif de la station:	4
4. Principaux étapes parcourus par l'eau avant la consommation.....	4
I. Qualités générales des eaux issues de diverses sources	10
1. Eaux de pluie	10
2. Eaux de surface	10
3. Eaux de lac	11
4. Eaux de mers et océans:	11
II. Qualité et traitement des eaux de surface	11
1. paramètres physico-chimiques de l'eau.....	12
2. Procédés de traitement des eaux brutes:	14
2.a. Prétraitement	15
2.b. pré-chloration	15
2.c. Clarification.....	16
2.d. Décantation.....	20
2.e. Filtration	21
2.f. Post chloration.....	22
I. Matériels et méthodes.....	23
II. Caractérisation physico-chimique des eaux brutes de la station de traitement De Tamri	23
III. Optimisation des étapes de la clarification.....	26
IV. Essai de coagulation-floculation 'Jar-test.....	26
I. Résultats et discussions	27
1. Dose optimale de sulfate d'aluminium $Al_2(SO_4)$	27
2. Effet de nouvel coagulant ($FeCl_3$)	28
3. Effet de nouveau flocculant (alginate)	29
II. Essai de filtration.....	31

III. Aspect économique	32
Conclusion générale	34
Références bibliographiques	
Annexes	

Introduction générale

Dans une filière classique de traitement de l'eau brute en eau potable, le procédé de coagulation-floculation, et la décantation sont d'usage assez répandu pour l'élimination des matières en suspension, et celles dites colloïdales. Ces particules sont responsables de la turbidité et de la couleur d'une eau. En effet, l'efficacité et la fiabilité d'une filière de traitement, dépendent fortement de l'optimisation et du contrôle de l'ensemble des procédés de coagulation, floculation, décantation et filtration.

Dans le site de TAMRI, et en période normale, le traitement se fait par le procédé de coagulation-floculation et filtration sur des filtres à sable des eaux en provenance du barrage de Moulay Abdellah, ayant une turbidité moyenne de 25 NTU. Cependant lors de fortes pluviométries, des valeurs de turbidité de l'ordre de 1000 NTU peuvent être enregistrées.

L'objectif général de ce travail est d'améliorer la qualité des eaux traitées, destinées à l'alimentation en eau potable du grand Agadir. Nous nous intéresserons plus particulièrement à l'élimination des différents micropolluants minéraux, tels que les matières en suspension, les matières colloïdales et plus précisément, l'argile connue sous le nom d'argile blanche ou l'argile gonflante.

La première étape de notre étude devra aboutir à une synthèse des données relatives aux caractéristiques quantitatives et qualitatives des eaux brutes d'alimentation de la station.

La seconde étape de notre travail est d'optimiser le traitement de l'eau très chargée en argile blanche ayant une turbidité supérieure à 250 NTU. A cet effet, les conditions optimales du déroulement de chaque phase de traitement sont : le type, le dosage, le mode d'introduction des réactifs et les conditions d'agitation.

De même, en vue d'améliorer les résultats obtenus, nous expérimenterons d'autres adjuvants de coagulation, tels que le chlorure ferrique (FeCl_3) et de floculation tels que l'alginate.

I. Présentation de l'ONEE Branche d'eau:

L'office national de l'Electricité et de l'eau potable (ONEE Branche d'eau) créée en 1972, est un établissement public à caractère industriel et commercial doté de la personnalité civile et de l'autonomie financière. Acteur principal dans le secteur de l'eau potable et de l'assainissement, les missions principales de l'Office vont de la planification de l'approvisionnement en eau potable jusqu'à sa distribution en passant par plusieurs phases :

- L'étude
- La conception
- La réalisation
- La gestion
- L'exploitation des unités de production, de distribution et d'assainissement liquide
- contrôle de la qualité des eaux jusqu'à la protection de la ressource.

Les efforts déployés par l'ONEE durant les trois dernières décennies ont permis d'améliorer le niveau de l'approvisionnement en eau potable en milieu urbain. Aujourd'hui l'Office s'est fixé une nouvelle stratégie visant la généralisation de l'accès à l'eau potable à l'ensemble des citoyens et l'intervention dans le secteur de l'assainissement liquide dans une vision globale et intégrée du cycle de l'eau.

1. Directions régionales de l'ONEE

Les directions régionales de l'eau potable sont réparties sur tout le royaume. En effet, il en existe 9 directions régionales et 23 directions provinciales :

- La direction Du Sud (Agadir)
- La direction Tensift (Marrakech)
- La direction Centre (Khouribga)
- La direction Nord (Ouest Kenitra)
- La direction Centre (Nord Fès)
- La direction l'Oriental (Oujda)
- La direction Centre Sud (Meknès)
- La direction Provinces Sahariennes (Laayoune)
- La direction régionale côte atlantique

2. Présentation de la division d'accueil (division industrielle)

La division industrielle se charge de toutes les activités liées à l'eau et à l'assainissement:

- la production,
- la distribution,
- la consommation au niveau des centres qui sont attachés à la Direction Régionale,
- le suivi des besoins en eau des centres,
- la programmation et la coordination des travaux d'alimentation en eau potable,
- L'exploitation de l'assainissement liquide.

Le fonctionnement de cette division est assuré par trois services :

- ✓ Service exploitation et maintenance,
- ✓ Service commercial et distribution,
- ✓ Service contrôle de la qualité.

3. Systèmes de production de l'eau potable du grand Agadir

L'Alimentation en Eau potable (AEP) du grand Agadir, est assurée par trois systèmes de production :

- ✚ **Un système de production P1** alimenté à partir de la station de traitement des eaux de Sidi Boushab avec un débit de 735 l/s
- ✚ **Un second système de production P2** alimenté à partir de ressources souterraines réparties sur plusieurs champs captant:
 - Champs captant sud constitué de 12 points de captage:8 puits et 4 forages, le débit global équipé est de 210 l/s.
 - Champs captant Admine comportant 8 forages. le débit global équipé est de 150 l/s.
 - Champs captant Est comportant 4 forages équipés pour un débit global de 75 l/s.
 - un puits de Golf équipé pour un débit de 100 l/s.
 - un puits d'Ait Melloul équipés pour un débit de 17 l/s.
 - un forage d'Inezgane équipé pour un débit de 18 l/s.
 - Le débit global équipé pour le système P2 est de 569 l/s
- ✚ **Un troisième système de production P3** alimenté à partir du barrage Moulay Abdallah. La première tranche, est équipé pour un débit de 700 l/s et pouvant être porté à 900 l/s.

II. Présentation de la station de Tamri

La station de Tamri est parmi les stations d'ONEE branche eau du grand Agadir

1. Localité:

La station de Tamri, est située à 50 Km au nord d'Agadir sur la route National (RN1) reliant Agadir et Essaouira et précisément à 4 km de la région de Tamri (figure 8).

2. Création:

La Station de traitement d'eaux potable de Tamri mise en service en mai 2007, a été financée dans le cadre d'un partenariat entre d'ONEE branche eau, et la coopération maroco-japonaise pour traité un volume d'environ de 2700 m³/h provenant du barrage My Abdellah.

3. Objectif de la station:

L'objectif de cette station est d'assurer l'alimentation en eau potable pour la population de la majorité de Grand Agadir et des douars avoisinants (aourir ,tamri tagahzout imsouane...)

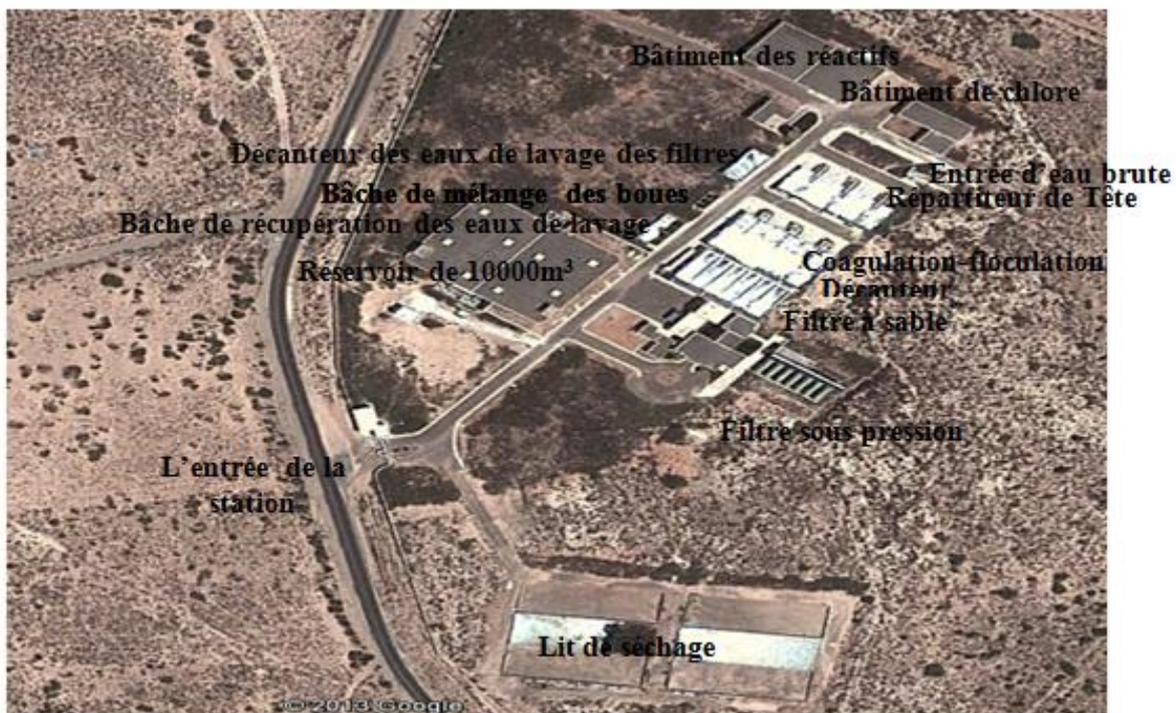


Figure 1 : Vue aérienne de la station de Tamri

4. Principaux étapes parcourus par l'eau avant la consommation.

4.1 Prétraitement:

Les eaux de barrage « Figure2 » sont acheminées par gravité (pesanteur) et par pompes dans la station à travers des conduites pour garder leur Débit. Ces conduites ont, à leur

extrémité dans le barrage, des grilles qui empêchent les poissons, les branches et autres objet de pénétrer dans les conduites. Ce prétraitement sert à éliminer les éléments les plus grossiers et en suspension. Cette opération se fait par quatre procédés :



Figure 2 : Barrage My. Abdellah -prise d'eau brute.

➤ **Ouvrage de prise :**

Cette étape se fait au niveau de barrage, les eaux sont envoyées vers la station de pompage, elles traversent une canalisation qui permet de donner un certain débit à l'eau.

➤ **station de relevage :**

Une station de relevage SP0 assurée par deux vices d'Archimède qui permettent le renforcement de débit d'écoulement de l'eau vers la station «Figure 3».



Figure 3 : vis de relevage

➤ **Dessebleur :**

L'eau poussée par les vis de relevage traverse des grilles pour éliminer les sables.

➤ **Station de pompage SP1 :**

Une installation de pompage d'eau brute (SP1) qui refoule l'eau vers le réservoir de mise en charge. Ce dernier alimente la station de traitement en régime gravitaire par une conduite de 1200 mm.

4.2 Station de traitement:



Figure 4 : Croquis de la station de traitement de Tamri.

Les principaux ouvrages réalisés au niveau de la station de traitement sont:

1. Ouvrage d'arrivée :

Après les prétraitements l'eau est arrivée à la station, pour passer par les différentes étapes suivantes.



Figure 5 : Ouvrage d'arrivée

2. Répartition de tête :

Cette étape a pour but de contrôler le débit à l'entrée et de le distribuer aux baches « Figure 5 ».

3. Elimination de boues :

Les boues sont éliminées par des déboueurs, équipées par des mélangeurs rapides « Figure 6 », et Les rejets sont envoyés vers une bache de mélange des boues «Figure 7 ».



Figure 6 : mélangeur rapide



Figure 7 : la bâche de mélange des boues.

4. Coagulation :

C'est une étape permettant de rassembler les particules fines qui sont dissous dans l'eau, elle consiste à l'injection de sulfate d'alumine après un essai au laboratoire qui détermine la nature et la doses probables du réactif permettant de clarifier l'eau.

5. Flocculation :

La flocculation permet de s'attaquer au problème du faible diamètre des colloïdes, grâce à l'ajout de **floculant** qui entraînera une agglomération des particules colloïdales, pour former des flocs qui seront se décantent «Figure 8».

Tous les flocculateurs sont équipés par des turbines de flocculation (mélangeurs)



Figure 8 : bâche de flocculation

6. Décantation :

La décantation est un processus qui a pour objet d'éliminer toutes les particules ayant une densité supérieure à celle d'eau.

L'eau flocculée s'écoulera directement vers des décanteurs à canaux creusés «Figure 9».



Figure 9 : Décanteur à canaux creusés.

L'eau décantée passera vers un décanteur équipé d'un ensemble de module lamellaire en plastiques inclinées «Figure10» qui effectue la séparation eau-floc (empêcher le retour des particules décantées)



Figure 10 : Décanteur lamellaire en plastiques.

Après le passage dans le décanteur l'eau sera transportée par des canaux creusés vers les filtres à sable.

7. Filtration à sable :

La station est munie de 6 filtres (1800 m³) à sables très sophistiqués, automatisés. Ces filtres (10 cm³ de gravite et 80-85 cm³ de sable) permettent de filtrer correctement l'eau déjà traitée dans les différentes étapes auparavant, les filtres peuvent être changés s'ils ne fonctionnent pas correctement (un système automatisé qui permet de signaler les défauts de ces filtres), si non ils doivent être lavés par une automate liée avec des moteurs à turbines. L'eau de lavage revient à la 1^{ère} étape du traitement « Figure 11 et 12»,



Figure 11 : Lavage automatique du filtre à sable.



Figure 12 : Tableau de commande.

8. Désinfection (la chloration):

C'est un traitement utilisé pour neutraliser tous les virus et les bactéries pathogènes, il peut être effectué, par le chlore (gaz, eau de Javel, bioxyde de chlore,...).

Parmi les produits, utilisés dans la station de Tamri on trouve le chlore «Figure 13» L'utilisation de 5 bouteilles du chlore permet de le convertir de l'état gazeux à l'état liquide. Le chlore est contrôlé par un système évolué « Figure 14».



Figure 13 : Bouteilles de Chlore « désinfectant ».



Figure 14 : Répartiteur de chlore.

9. Correcteurs de pH :

Les correcteurs les plus utilisés dans ce domaine sont: Lait de Chaux, carbonate de sodium, soude, acide sulfurique, acide chlorhydrique, bicarbonate de sodium, carbonate de calcium.

La station utilise le lait de chaux, et l'acide sulfurique comme correcteurs de pH.

10. Coagulants :

Plusieurs produits sont utilisés comme coagulants : Sulfate d'aluminium, chlorure ferrique, chlorosulfate ferrique, dans la station, pour coaguler les matières en suspension on injecte le Sulfate d'aluminium $[Al_2(SO_4)_3]$.

11. La distribution :

À la sortie de la station de production, l'eau traitée est stockée dans deux réservoirs d'une capacité totale de $2 \times 5000 \text{ m}^3$. Cet eau traitée est d'une excellente qualité bactériologique et ne contient que des éléments nécessaires au bien-être, notamment les sels minéraux. Pour maintenir cette qualité jusqu'au robinet et préserver l'eau de tout risque de contamination accidentelle, il est nécessaire d'y ajouter du chlore, Cet ajout se fait à faibles doses à la sortie de la station, puis en différents points du réseau de distribution d'eau. Ceci empêche la calcination aux parois des canaux (précipitation de $CaSO_4$).

I. Qualités générales des eaux issues de diverses sources

Il existe quatre sources principales d'eaux brutes: les eaux de pluie, les eaux de surface, les eaux souterraines, et les eaux de mers, et océans. Les caractéristiques générales de chacune de ces sources reflètent l'interaction eau- milieu environnant.

1. Eaux de pluie

Les eaux de pluie sont des eaux de bonne qualité pour l'alimentation humaine. Elles sont saturées d'oxygène, et d'azote, et ne contiennent aucun sel dissous, comme les sels de Magnésium et de calcium, elles sont donc très douces. Dans les régions industrialisées, Les eaux de pluie peuvent être contaminées par des poussières atmosphériques. La distribution des pluies dans le temps ainsi que les difficultés de captage font que peu de municipalités utilisent cette source d'eau [1].

2. Eaux de surface

On peut répartir eaux en trois catégories : eaux de rivière (partie amont), eaux de rivière (partie aval) et eaux du lac.

➤ Eaux de rivière (partie amont):

L'amont d'une rivière est général situé dans une région montagneuse, ou la densité de population est faible, et les industries sont pratiquement inexistantes, ces eaux sont caractérisent par:

- ✓ Une turbidité élevée, le régime des rivières étant torrentiel, les eaux transportent de grandes quantités de matières en suspension.
- ✓ Une contamination bactérienne faible, la pollution causée par l'homme ou l'industrialisation y est pratiquement inexistante.
- ✓ Une température froide, ces eaux proviennent soit de sources, soit de fonte de neige et des glaciers.
- ✓ Un indice de couleur faible, ces eaux n'ont pas eu un temps nécessaire pour dissoudre des matières végétales, principales sources de couleur.

➤ Les eaux de rivières (partie aval):

L'aval d'une rivière est en général situé dans une région où la densité de la population est élevée, l'agriculture développée et les industries sont plus ou moins nombreuses, ces eaux y sont donc habituellement de moindre qualité et plus difficiles à traiter qu'en amont, Ces eaux sont caractérisées par:

- ✓ Une contamination bactérienne élevée. Cette contamination est surtout imputable au déversement des égouts domestiques et agricoles.
- ✓ Une contamination organique et inorganique élevée. Les eaux usées domestiques, agricoles et industrielles contiennent de grandes quantités de matières organiques et inorganiques.
- ✓ Un indice de couleur pouvant être élevé. Dans beaucoup de cas, les eaux ont eu le temps de dissoudre des matières végétales qui les colorent.

On note que le débit et la qualité des eaux de rivière, (amont et aval) peuvent varier en peu de temps. C'est pourquoi les usines de purification doivent être suffisamment complexes pour réagir rapidement à toute modification des caractéristiques des eaux de rivière [1].

3. Eaux de lac

On peut considérer un lac comme un bassin naturel de décantation dont la période de rétention est longue la turbidité de l'eau est faible et la contamination bactérienne habituellement est peu importante, les caractéristiques des de lac varient très lentement au cours de l'année, à l'exception de deux courtes périodes au printemps et l'automne ,durant ces périodes, la différence de température entre les eaux de surface et les eaux profondes peut provoquer un renversement des eaux du lac et augmenter ainsi brusquement la turbidité[2-1].

4. Eaux de 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 souterraine et superficielles). Les eaux de mers sont caractérisées par une grande salinité (il varie de 33000 à 37000 mg/l), elles sont dénommées aussi « eaux saumâtres », ce qui rend leur utilisation difficile, notamment leur coût très élevé pour leur traitement [3-1].

II. Qualité et traitement des eaux de surface

Les eaux de surface ne sont pratiquement jamais potables, sans aucun traitement du fait des divers substances, d'origine naturelle, ou apportées par la pollution, pour améliorer leur qualité, elles nécessitent des traitements appropriés c'est-à-dire leur faire subir des modifications physico-chimiques ou biologiques, dans une chaîne de traitement classique. [4].

La majeure partie de la clarification de l'eau se fait au niveau de l'étape coagulation-floculation, ce qui constitue un traitement fondamental pour une eau destinée à la consommation. De plus le développement des techniques de décantation et de filtration des eaux a permis la réduction de la taille des équipements.

1. paramètres physico-chimiques de l'eau

Les analyses physico-chimiques réalisées au niveau de la station de traitement des eaux potables de Tamri sont: la température, la turbidité, la conductivité, le pH, le titre hydrotimétrique (TH), l'alcalinité (TA et TAC), l'oxydabilité, ainsi que le dosage de calcium, nitrate, nitrite, potassium, sodium et de l'ammonium.

Température de l'eau

La température joue un rôle important dans la solubilité des sels et surtout des gaz et conditionne les équilibres de dissociation, elle agit sur la conductivité électrique et le pH et permet la connaissance de l'origine des eaux souterraines et des éventuels mélanges. Elle est aussi très utile pour les études limnologiques[5].

pH

Le pH d'une eau est une indication de sa tendance à être acide ou alcaline, il est fonction de l'activité des ions hydrogènes H^+ présents dans cette eau. Dans les eaux naturelles cette activité est due à des causes diverses en particulier l'ionisation de l'acide carbonique et de ses sels. Habituellement, les valeurs du pH se situent entre 6 et 8,5 dans les eaux naturelles.

Conductivité

La conductivité électrique d'une eau dépend des substances dissoutes qu'elle contient, sa mesure permet d'évaluer la quantité totale de solides dissous dans l'eau. Celle-ci correspond à la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1cm^2 de surface et séparées l'une de l'autre de 1cm, l'unité est en micro siemens par centimètre (us/cm).

- **50 à 400** : Qualité excellente.
- **400 à 750** : Bonne qualité.
- **750 à 1500** : Qualité médiocre mais eau utilisable.
- **1500** : minéralisation excessive.

La mesure de la conductivité électrique de l'eau, à se fait soit sur le terrain, soit au laboratoire sur des échantillons d'eau prélevés sur le terrain.

Turbidité:

La mesure de la turbidité permet de préciser les informations visuelles sur l'eau, la turbidité traduit la présence de particules en suspension dans l'eau (débris organiques, argiles, organismes microscopiques...). Les désagréments causés par une turbidité auprès des usagers sont relatifs, car certaines populations sont habituées à consommer une eau plus ou moins trouble et n'apprécient pas les qualités d'une eau très claire. Cependant une turbidité forte peut permettre à des micro-organismes de se fixer sur des particules en suspension

Tableau 1 : Classes de turbidité usuelles (NTU, nephelometric turbidity unit).

NTU < 5	Eau claire
5 < NTU < 30	Eau légèrement trouble
NTU > 50	Eau trouble
NTU > 200	La plupart des eaux de surface atteignent ce niveau de turbidité

Dureté

La dureté ou titre hydrotimétrique correspond essentiellement à la présence de sels de calcium et de magnésium, elle est directement liée à la nature des terrains traversés. Ils proviennent des roches calcaires ou dolomitiques. Dans une eau naturelle, on peut distinguer différents types de dureté:

- **dureté totale** : somme des concentrations en calcium et magnésium;
- **dureté calcique** : concentration globale en calcium;
- **dureté magnésienne** : concentration globale en magnésium

Chlorures

Les chlorures sont quantitativement présents dans les eaux, où la teneur en ions chlorures dépend fortement de l'origine de l'eau, et de la nature du terrain, ils contribuent à la conductibilité électrique des cours d'eau.

Nitrates

On trouve les nitrates à l'état naturel dans certains légumes, dans les viandes en conserve, et dans le sol. Il y en a aussi les engrais commerciaux et les déjections animales, les nitrates sont nécessaires à la croissance des végétaux mais leur présence excessive dans le sol peut contaminer les sources d'alimentation en eau et soulever des préoccupations pour la santé [6].

Les nitrates NO_3^- sont presque quantitativement réduits en nitrites NO_2^- par du cadmium (Cd) recouvert d'une couche de cuivre, après traitement au sulfate de cuivre (CuSO_4). La diazotation de la sulfanilamide par les nitrites en présence du bichlorure de N-diamine 1,2 éthane (NED), donne un complexe rose susceptible d'un dosage colorimétrique à la longueur d'onde de 540 nm. La valeur maximale admissible (VMA) pour les nitrites (NO_3^-) est de l'ordre de 50 mg/l.

Sodium et potassium :

Le sodium (Na^+) est très abondant sur la terre, on le retrouve dans les roches cristallines et les roches sédimentaires (sables, argiles, évaporites), et La roche Halite (évaporite NaCl) et le sel de cuisine. Il est très soluble dans l'eau. Le sodium est par contre généralement peu présent dans les roches carbonatées. Notons que les argiles peuvent être saturées en ion Na^{2+} ,

Le potassium (K^+) est assez abondant sur la terre, mais peu fréquent dans les eaux. En effet, il est facilement adsorbé et recombinaé dans les sols (sur les argiles notamment). Les sources principales de potassium sont les roches cristallines (mais dans des minéraux moins altérables que ceux qui contiennent du sodium), les évaporites (sylvinite KCl) et les argiles.

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 SO_4^{2-} soit entraînée par adsorption avec le floc[7].

L'alcalinité:

À l'inverse de l'acidité, l'alcalinité d'une eau correspond à la présence de bases, et de sels d'acides faibles, dans les eaux, l'alcalinité résulte en générale de la présence d'hydrogencarbonates, de carbonates et d'hydroxydes.

On distingue le titre alcalimétrique simple (TA) et le titre alcalimétrique complet (TAC).

L'unité utilisée est le degré français ($1^\circ\text{F} = 10 \text{ mg.L}^{-1}$ de $\text{CaCO}_3 = 0,2$ milliequivalent L-1).

2. Procédés de traitement des eaux brutes:

Dans le souci d'en faire une eau potable, l'eau brute passe par plusieurs étapes de traitement physico-chimique. Le schéma résume les différentes étapes de traitement des eaux brutes :

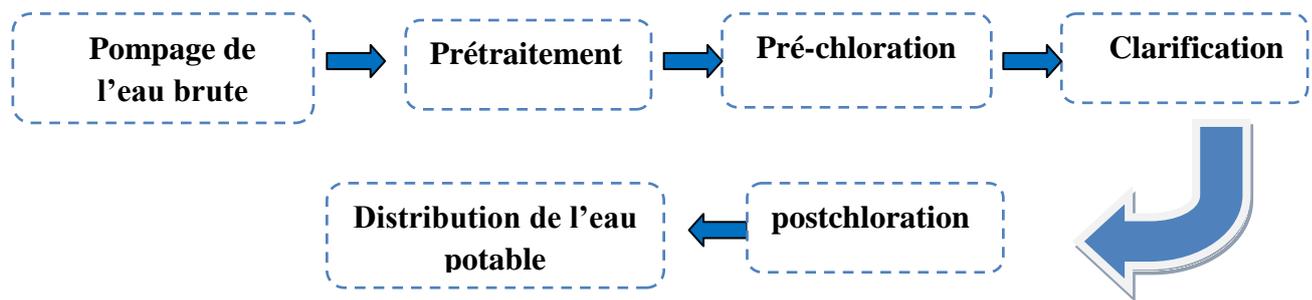


Figure 15 : Filière de traitement physico- chimique de l'eau potable

2.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 les prétraitements. Dans le cas d'une eau potable, les prétraitements sont principalement de trois types : dégrillage – tamisage – dessablage [9].

2.b. pré-chloration

Dans le traitement de potabilisation on utilise :

le chlore:

- Pour détruire l'azote ammoniacal et organique.

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



- Pour détruire les germes pathogènes et certains autres germes qui peuvent altérer les qualités organoleptiques et esthétiques de l'eau.

Tous les composés chlorés (eau de Javel, bioxyde de chlore, ...) ont un pouvoir germicide. En outre, le chlore est utilisé pour lutter contre certaines pollutions: cyanure, nitrites [9].....

Eau de Javel

Au préalable, l'eau de javel détruit l'azote ammoniacal et l'azote organique. Compte tenu des taux appliqués, elle détruit également les germes pathogènes et non pathogènes.

Le taux appliqué doit être légèrement supérieur à un point critique ou le **break point**, cela permet:

- D'éliminer la totalité de l'ammoniaque et le maximum d'azote organique.
- De limiter la teneur en dichloroamines principales responsables des saveurs
- De maintenir en permanence un résiduel de chlore libre afin de stériliser les boues dans les décanteurs et d'éviter la prolifération des germes sur les filtres.

La figure 4 montre les différentes réactions du chlore dans l'eau.

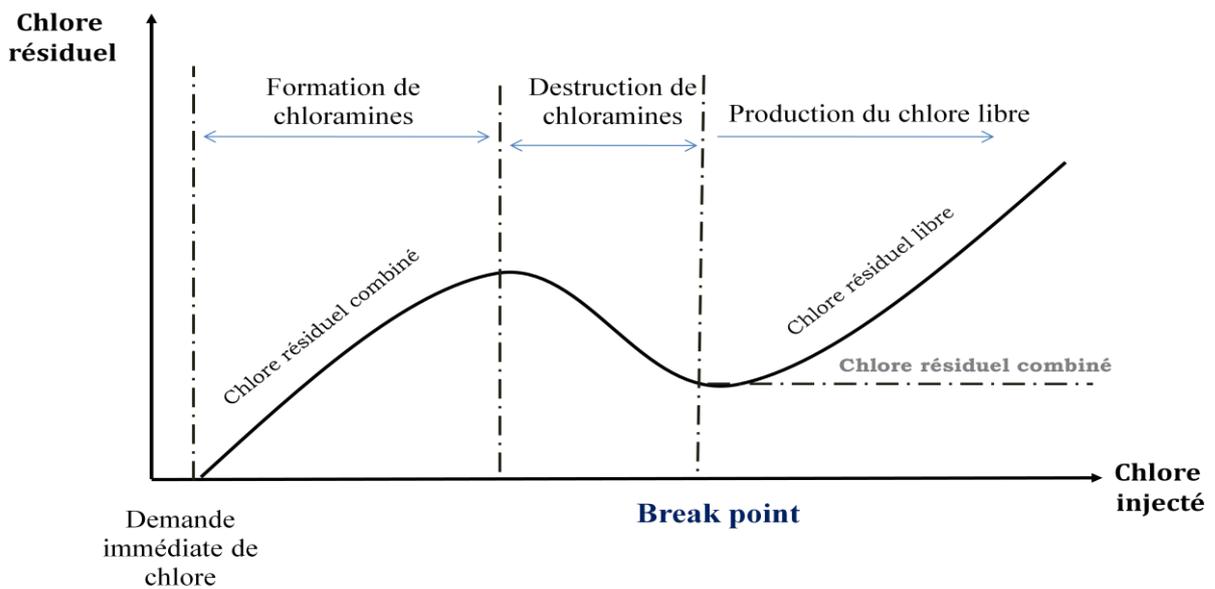
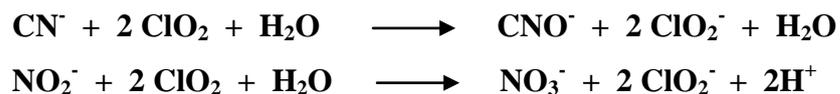


Figure 16 : Réactions du chlore dans l'eau [9].

Dioxyde du chlore: est dans certains cas plus actif que l'eau de Javel, en particulier pour éliminer certains saveurs, et odeurs provenant notamment des algues.

La mise en œuvre de ce traitement à une allure réduite, (environ $0,5 \text{ g/m}^3$) permet d'améliorer en permanence, la qualité de l'eau. Par ailleurs, cela permet de disposer en permanence d'une installation en état de marche lors d'une pollution nécessitant des taux élevés, ou lors d'une panne complète sur l'installation du chlore.

Les réactions mises en jeu, par exemple, lors de la lutte contre les nitrites et les cyanures sont des réactions d'oxydation [12] :



2.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.

➤ Coagulation-Floculation

a).Caractéristiques des particules à enlever

Les composés retrouvés dans l'eau sont généralement regroupés dans trois catégories :

- Les matières en suspension (MES);
- Les matières colloïdales;
- Les matières dissoutes.

Les matières dissoutes sont généralement des cations ou anions de quelques nm de diamètre qui ne décantent pas.

Les matières en suspension sont d'origine minérale ou organique et possèdent un diamètre supérieur à 1 μ m. Leur temps requis pour décanter d'un mètre varie de quelques dixièmes de secondes à plusieurs jours selon leur diamètre et leur densité.

Les matières colloïdales sont des MES de même origine mais de diamètre inférieur à 1 μ m. 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, Les particules colloïdales de faible densité peuvent nécessiter théoriquement jusqu'à 666000 années pour décanter d'un mètre.

L'élimination des MES et des matières colloïdales dans des délais raisonnables est faisable à l'aide d'une coagulation-floculation. Nous avons recours à de tels procédés car les particules retrouvées dans l'eau sont très stables et donc peu aptes à une décantation naturelle.

✚ Stabilité des particules

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 sont donc plus difficiles à éliminer. Elles demeurent donc stables [10]. Une particule typique est représentée dans la figure 17 :

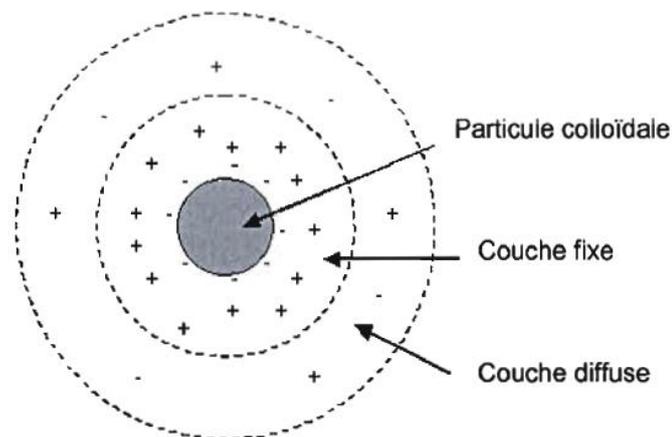


Figure 17 : Double couche d'une particule colloïdale [12]

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 répartis et formant la couche diffuse (théorie de Gouy-Chapman). La figure représentée ci-dessus est en fait un rassemblement des deux théories, communément appelée théorie de la "double-couche".

Lorsque deux particules sont sur le point d'entrer en contact, elles sont essentiellement soumises à deux forces qui sont la force d'attraction de van der Waals et celle de répulsion électrostatique, le potentiel de répulsion est défini par E_r , 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 telle que décrite dans la figure 18.

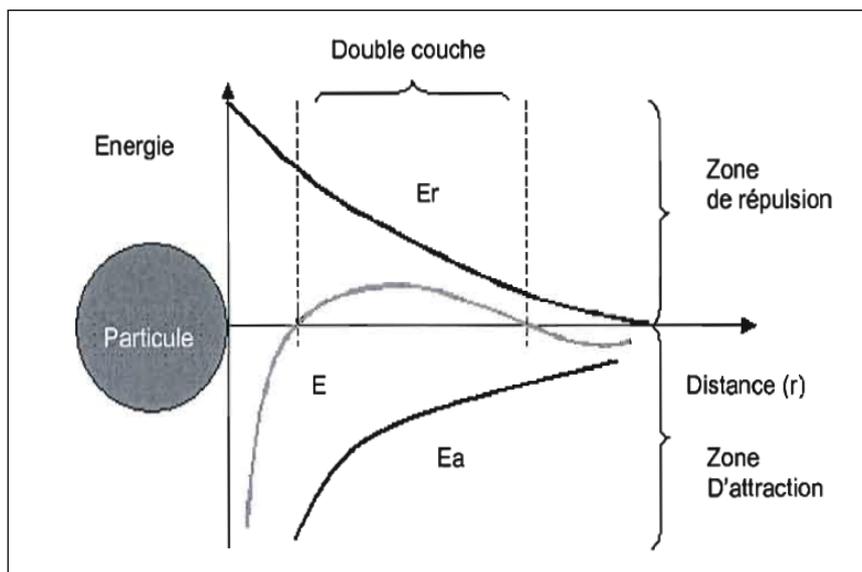


Figure 18 : Stabilité d'une suspension colloïdale [4]

Si le potentiel de répulsion est plus élevé que le potentiel d'attraction, la particule est dite électro statiquement stabilisée et doit subir un traitement pour être déstabilisée.

La déstabilisation dans ce cas se ferait en diminuant les forces de répulsion électrostatique.

⚡ Potentiel Zéta

Le potentiel électrostatique diminue à fur et 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 [10]. 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 leur agglomération.

b).Processus de coagulation

Lors du processus complexe de coagulation, il s'agit de déstabiliser les particules colloïdales et provoquer leur agglutination pour en faire des flocons qui se prêtent à la sédimentation.

Pour vaincre l'énergie d'interaction entre les particules colloïdales, il existe deux possibilités:

- la diminution du potentiel Zéta, en ajoutant des réactifs minéraux contenant des cations multivalents qui seront adsorbés au niveau de la surface colloïdale. Il va donc y avoir une neutralisation de charge électrique, appelée généralement coagulation.

- l'utilisation, comme réactif de floculation, des polymères organiques qui permettent de rassembler les colloïdes non seulement par réduction de charge électrique, mais également par des effets de pontage entre colloïdes. Ces réactifs macromoléculaires agissent à la manière d'un filet dans lequel sont emprisonnées les particules. C'est, en général, à cette forme de déstabilisation qu'on réserve le terme floculation. On distingue ainsi quatre mécanismes de base pour la déstabilisation des particules colloïdales et leur agglomération:

- compression de la double couche (coagulation électrostatique) ;
- adsorption et neutralisation des charges ;
- emprisonnement des particules dans un précipité ;
- adsorption et pontage. [12]

c). Processus de floculation

Après avoir été déstabilisées, les particules colloïdales ont tendance à s'agglomérer lorsqu'elles entrent en contact les unes avec les autres. La floculation a justement pour but d'augmenter la probabilité de contact entre les particules par ajout d'un flocculant.

Par la suite, les agglomérats formés de colloïdes appelés floes disposent d'une masse suffisante pour pouvoir se décanter.

La théorie des ponts chimiques propose que la molécule de polymère (flocculant) soit attachée à la particule colloïdale par un ou plusieurs sites. L'attachement résulte d'une attraction coulombienne si le polymère et la particule ont des charges opposées, ou d'un échange des ions, liaisons d'hydrogène, ou des forces de van der Waal's s'ils ont des charges de même signe. La queue du polymère adsorbé peut s'étaler dans la solution et se lier à un site vacant d'une autre particule formant ainsi un pont chimique ^[6]. Cette action de pontage a pour résultat la formation de flocons ayant tendance à se décanter. Si l'extension du flocculant dans la solution ne réussit pas à entrer en contact avec une autre particule, il est possible qu'elle se replie sur la même particule, ce qui stabilise cette dernière.

Une coagulation inefficace peut résulter d'une surdose du flocculant au système. En effet, une saturation des surfaces des particules colloïdales est annoncée. Ainsi, il ne reste plus de sites disponibles pour la formation des ponts de polymères. [4]

➤ **Mise en œuvre de la coagulation -floculation**

Lors de la mise en œuvre de la coagulation-floculation, deux paramètres nécessitent une attention particulière: les quantités de réactifs à ajouter et les vitesses d'agitation du milieu réactionnel.

Ces deux valeurs (une quantité de réactif et sa vitesse d'agitation associée pour la coagulation puis une quantité de réactif et sa vitesse d'agitation associée pour la floculation) sont à déterminer en fonction de la qualité de l'eau à traiter. Dans ce domaine, il n'existe pas de règle ou de formule de dimensionnement : ces valeurs ne peuvent être déterminées que de façon empirique, par optimisation des essais sur échantillons au laboratoire (Jar tests).

Jar test consiste en une rangée de béchers alignés sous un appareillage permettant de les agiter tous à la même vitesse, comme il est indiqué sur la figure 19. Les différents béchers ont reçu une dose différente et croissante de réactifs.



Figure 19 : Essai de Jar test

A la fin de l'expérimentation, nous déterminerons quels sont les couples quantités de réactifs / vitesse et temps d'agitation qui permettent d'obtenir l'eau la plus limpide, les floccs les plus gros et les mieux décantés.

Concernant les vitesses d'agitation, la seule certitude est que la coagulation nécessite une vitesse d'agitation plutôt rapide (afin de bien mélanger l'eau et que les colloïdes et les cations métalliques se rencontrent et se neutralisent). La floculation, quant à elle, nécessite une vitesse relativement lente afin de favoriser la rencontre et l'agrégation des colloïdes sans détruire les floccs déjà formés.

2.d. Décantation

La décantation est la méthode de séparation la plus fréquente de la majeure partie des matières en suspension et colloïdes : celles qui existent déjà dans l'eau brute et celles rassemblés sous forme de flocc après l'étape de coagulation floculation. Il s'agit d'un procédé de séparation solide/liquide basé sur la pesanteur.

La loi de STOCK régit la chute des particules sphériques, de vitesse de chute V est donnée par la formule suivante :

$$V = \frac{2}{9} \frac{g(d-1)}{\eta} R^2$$

Avec : g : accélération de la pesanteur(m/s)

d : densité de la particule

R : rayon de la particule (m)

Pour avoir la décantation la plus rapide, il faut avoir les particules les plus grosses (R grand) et les plus lourdes (d grand) et la viscosité la plus faible, mais on ne peut agir sur ce terme. Sachant que la viscosité varie en sens inverse de la température, c'est une des raisons pour lesquelles une eau décantera moins bien en hiver qu'en été.

Caractéristiques d'un décanteur

Les deux caractéristiques principales d'un décanteur sont les suivantes :

$$\text{Durée de décantation théorique} = \frac{\text{Volume du décanteur}}{\text{Débit de l'eau}}$$

$$\text{Vitesse de Hazen} = \frac{\text{Débit de l'eau}}{\text{Surface du décanteur}}$$

L'efficacité d'un décanteur dépend de sa vitesse de Hazen et non de sa durée de décantation.

2.e. Filtration

La filtration a pour objectif de retenir les particules qui restent en suspension dans l'eau décantée. On l'effectue en faisant passer l'eau à travers une matière filtrante qui est généralement le sable de quartz calibré (granulométrie $\approx 1\text{mm}$).

En effet, le lit de sable (épaisseur 1 à 2 m) retient les impuretés et laisse le liquide seul passer : filtrat.

Au niveau de la conception des filtres, la qualité de l'eau filtrée va dépendre de plusieurs paramètres :

- hauteur de la couche filtrante : plus la hauteur est importante, meilleure sera la qualité. En général, on choisira une hauteur de couche supérieure ou égale à 1.000 fois la taille effective du sable.

- Granulométrie effective du sable : Plus elle sera faible, meilleure sera la qualité du traitement. Un compromis devra néanmoins être trouvé en prenant en compte la fréquence des lavages, car plus la taille effective sera faible, plus le colmatage sera rapide. En général, la taille effective la plus couramment utilisée est de 0,95 mm.

- forme des grains : une forme ronde des grains améliore la qualité du traitement : ces grains de sable s'imbriquent mieux les uns dans les autres que les grains anguleux, ce qui diminue les espaces entre grains, et donc améliore l'effet tamisage. On préférera donc un sable de rivière roulé par rapport à un sable de mer broyé présentant des arêtes vives [13].

2.f. Post chloration

Le but de la post chloration est de fournir à l'eau quittant l'usine de traitement, une dose supplémentaire du chlore qui reste résiduelle pour se maintenir le plus loin possible dans le réseau.

Différents types de post-chloration peuvent être utilisés:

- Par le chlore (eau de Javel), vu sa facilité de mise en œuvre
- Par le bioxyde de chlore, vu sa stabilité dans le temps et sa bonne efficacité germicide.

I. Matériels et méthodes

Dans l'ensemble des expérimentations, nous avons utilisé :

✚ **Un flocculateur** de laboratoire type "PROLABO FLOCLAB" qui permet d'obtenir, dans six béchers de 1000 ml contenant des doses croissantes de coagulant ou du flocculant, une agitation rigoureusement identique et réglable pendant une même période grâce à une commande centrale.

✚ **Un turbidimètre** néphélométrique qui permet de mesurer la turbidité de l'eau.

Son principe de mesure est le suivant : un puissant faisceau de lumière est dirigé en ligne droite vers l'échantillon. Ainsi, cette lumière dispersée est proportionnelle à la turbidité de l'échantillon.

✚ **Eau à traiter** : tous les essais de coagulation-floculation ont été conduits sur des solutions d'eaux brutes de barrage rendues assez troubles par addition d'argile en vue d'obtention d'une turbidité importante, comprise généralement entre 200 et 300 NTU.

✚ **Coagulants**: nous avons utilisé comme réactif coagulant:

- ✓ le sulfate d'aluminium en poudre ($Al_2(SO_4)_3$).
- ✓ Le chlorure ferrique a été préparé à 10 g/L à partir de la solution mère liquide.

✚ **Flocculant**: Le flocculant utilisé est le poly-électrolyte cationique utilisé à l'heure actuelle, c'est un produit commercial en poudre, préparé par dissolution dans l'eau distillée. Une solution mère de 1g/l a été préparée. Ainsi que l'alginate de sodium qui est un polymère organique extrait à base des algues, sous forme de granules jaunes, préparé aussi à une concentration de 1g/l.

✚ **Eau de Javel** : Désinfectant, une solution de l'eau de javel a été préparée. (1 g / L de l'eau distillée).

II. Caractérisation physico-chimique des eaux brutes de la station de traitement De Tamri.

La présence de substances organiques et minérales dans les eaux d'alimentation est à l'origine de nombreux problèmes au cours de traitement de potabilisation. Leur composition permettra de faire un diagnostic efficace qui servira de base pour le choix des étapes à préconiser pour le traitement et faire le suivi des paramètres de qualité pour éviter tout risque de détérioration de cette qualité.

1 Méthodes analytiques :

- ✚ **Le pH** à été mesurée à l'aide d'un pH-mètre (pH 340i), vérifié et étalonné avec au moins deux solutions étalons (7 et 4 suivant la gamme de mesure à réaliser).
- ✚ **La conductivité** est mesurée au moyen d'un conductimètre électrique de type (conductimètre 720) donnant des mesures en $\mu\text{s}/\text{cm}$. On utilise aussi le pour mesurer la température.
- ✚ **La dureté totale et la dureté calcique** sont déterminées par la titration complexométrie à l'EDTA (0.02N).
- ✚ **le titre alcalimétrique complet TAC**, sont déterminés par acidimétrie

Mode opératoire :

Dans un erlenmeyer contenant 100 ml de l'échantillon, ajouter 2 gouttes de hélianthine, il se produit une coloration jaune. On dose le mélange par l'acide chlorhydrique (N/10), jusqu'à virage au jaune orangé de l'hélianthine. Soit V (ml), nécessaire au virage.

$$\text{D'où: TAC} = \text{V (ml)} \times 5^\circ\text{F}$$

- ✚ **oxydabilité au permanganate de potassium (KMnO₄)** : cette analyse consiste en une oxydation chimique par KMnO₄ à chaud en milieu acide.

Mode opératoire:

Dans un ballon rode, on ajoute à 100ml de l'échantillon 2ml d'acide sulfurique concentre afin de fixer l'eau. Puis 10ml de KMnO₄ (N/100). Enfin on place le ballon dans un bain-marie à 100°C pendant 13 min. Après on retire le ballon et on lui ajoute 1 ml de la solution oxalate de sodium (N/10) pour réduire le KMnO₄ qui n'a pas réagi. Après décoloration complète de l'échantillon, on le titre en retour avec KMnO₄ jusqu'à apparition d'une coloration rose persistante.

Le résultat d'oxydabilité est exprimé (prise de 100ml).

$$\text{L'Oxydabilité en O}_2 \text{ (mg de O}_2\text{/l)} = \text{V}_{\text{tombe}} \times 0.8.$$

✚ **Les chlorure :** sont dosés en milieu acide par les nitrates mercuriques en présence d'un indicateur de pH à base de diphénylcarbazone.

Mode opératoire : Dans un Erlenmeyer on introduit successivement 100ml d'un échantillon, 0.5ml d'un indicateur de pH, acide nitrique (N/3) jusqu'à l'apparition d'une coloration jaune franc et on titre par une solution de nitrates mercurique (N/10) jusqu'à l'apparition d'une teinte violette persistant $[Cl] = V_{\text{tombé}} \times 35.5 \text{ (mg/l)}$

2 Résultats des analyses physico-chimiques

Tableau 2 : les résultats des analyses de l'eau brute à traiter.

Paramètre	Eau brute	Norme Marocaine
Aspect	Trouble	Limpide
Turbidité (NTU)	290	<5
pH	7.922	6,5 – 8,5
Conductivité (µs/cm)	566	2700
TAC (°F)	21	***
TA (°F)	0	***
TH (°F)	29.4	***
Fer (mg/L)	0.04	<0.3
Aluminium (mg/L)	0	<0.20
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	152	***
MES (mg/L)	499	***
Cl ⁻ (mg/L)	24.85	750
NH ₄ ⁺ (mg/L)	1,98	0,5
Oxydabilité (mg O ₂ /l)	3.12	<2
NO ₂ ⁻ (mg/L)	0,08	0,5
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0,52	50
Sio ₃ ²⁻ (mg/L)	9.25	***

L'analyse de l'eau brute met en évidence, de façon ponctuelle, une non-conformité sur le plan physico-chimique. Cette non conformité est dû essentiellement aux paramètres de la turbidité et de la coloration.

III. Optimisation des étapes de la clarification

L'optimisation des étapes de clarification au niveau de la station de traitement de Tamri s'avère nécessaire. A travers cette recherche, nous nous sommes intéressés particulièrement à rendre la turbidité conforme aux normes marocaines de l'eau potable, du fait que ce paramètre constitue le problème le plus important de cette station surtout lors des fortes pluviométries.

En effet, l'optimisation du procédé de coagulation-floculation sera en fonction des conditions qui peuvent être inhérentes à la phase liquide: pH, nature des ions, température, ou bien la nature des particules à séparer. Elle pourra ainsi être accomplie en jouant sur le type et le dosage du coagulant/floculant, le temps de floculation, l'énergie du mélange, la géométrie du réacteur...

Au cours de cette étude, nous présenterons les résultats des essais que nous avons réalisés avec le réactif sulfate d'aluminium comme coagulant et le poly-électrolyte comme floculant, utilisés à l'heure actuelle pour le traitement de l'eau à la station, aussi le chlorure ferrique et l'alginate comme nouveaux adjuvants de coagulation et de floculation dont nous souhaitons estimer la performance au niveau de la clarification des eaux troubles moyennant leurs rendements dans l'élimination de la turbidité.

IV. Essai de coagulation-floculation 'Jar-test

Les essais ont été réalisés sur des prélèvements d'eaux brutes troubles (300 NTU environ) selon le protocole bien connu du "Jar-test". Les différentes phases de l'essai de floculation et leurs conditions optimales sont les suivantes :

► Phase d'une agitation rapide au cours de laquelle le réactif coagulant est introduit et dispersé. La vitesse de rotation des pâles de l'agitateur est de 120 tr/min et le temps d'agitation adopté est de 2 minutes du fait que la réaction d'hydrolyse du coagulant se réalise très rapidement.

► Phase d'une agitation lente durant 20 minutes à une vitesse de rotation de 40 tr/min au cours de laquelle il y a formation d'agrégats dits floes, après l'ajout du floculant.

► Phase de décantation durant 30 minutes au cours de laquelle les floes Déstabilisés sont entraînés vers le fond des béciers.

Après décantation, nous avons prélevé une certaine quantité d'eau, tout en évitant une éventuelle remise en suspension du floe ainsi formé, et nous avons déterminé les divers paramètres les plus indicatifs de cette étape qui est la turbidité.

I. Résultats et discussions

1. Dose optimale de sulfate d'aluminium $Al_2(SO_4)_3$

Il est important de rappeler que la turbidité des eaux à traiter dans tous les essais (ci-après) est comprise entre 200 et 300 NTU.

La Figure représente l'évolution de la turbidité en fonction de la dose du flocculant polymère (Poly électrolyte cationique) pour une dose de sulfate d'aluminium de concentration 45mg/L avec une concentration de l'eau de Javel à 4.35 ml/L.

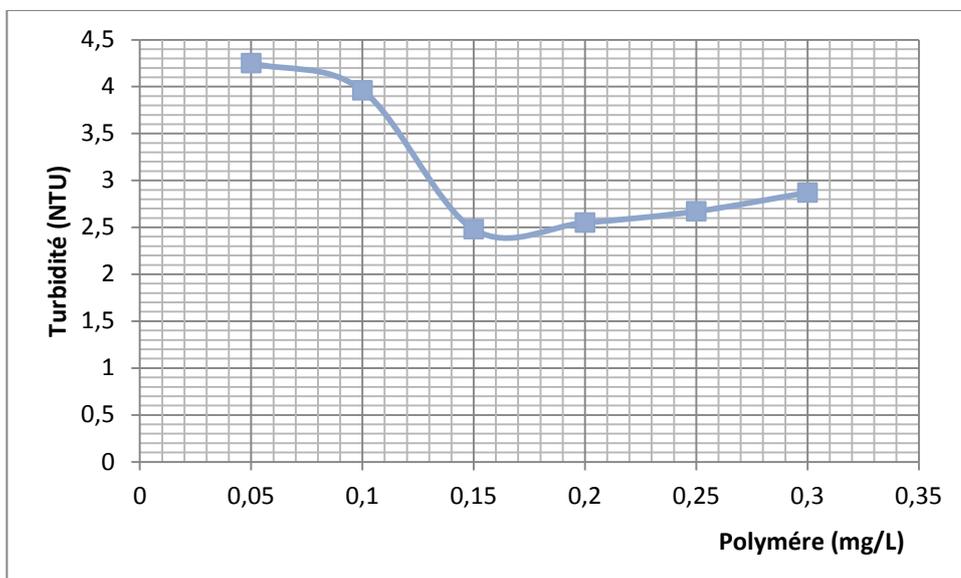


Figure 20 : Evolution de la turbidité en fonction de la dose du flocculant
(Solution : $Al_2(SO_4)_3$ à 45 mg/L; Eau de Javel à 4.35 ml/L)

Il en ressort de cette étude que la dose optimale de polymère nécessaire pour un maximum d'élimination de la turbidité est de 0,15 g/m³. (Tableau 1, annexe 5)

Pour mieux illustrer les résultats trouvés, nous avons porté sur la figure, l'évolution de la turbidité en fonction de la dose de sulfate d'aluminium.

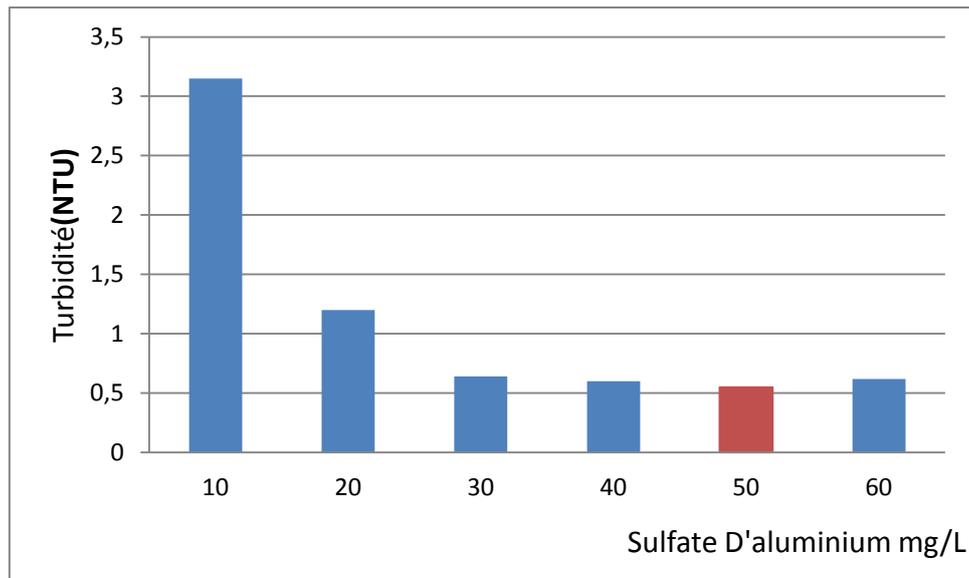


Figure 21 : Evolution de la turbidité en fonction de la dose en $Al_2(SO_4)_3$

(Solution : polymère à 0,15mg/L ; Eau de Javel à 4.35 ml/L).

Les résultats des essais de jar test montrent que les doses optimales de floculant polymère et de sulfates d'aluminium pour éliminer le maximum de la turbidité sont respectivement 0,15 mg/L et 50mg/L.

Or, ces doses ne sont pas toujours fixes et varient selon la qualité de l'eau brute, du fait qu'une eau plus trouble pourra nécessiter des doses plus importantes, ce qui exigerait à la station de traitement un contrôle continu de la turbidité. En effet, un surdosage en $Al_2(SO_4)_3$ ou en floculant polymère mène à une augmentation de la turbidité, entraînant, un surcoût inutile sur le processus de clarification.

En ce qui concerne l'appréciation visuelle, nous avons remarqué lors de la floculation, la formation des agrégats plus ou moins volumineux qui se décantent peu rapidement. Les doses optimales de polymère et de sulfates d'aluminium pour un meilleur abattement de la turbidité sont respectivement, 0,15mg/L et 50mg/L.

2. Effet de nouvel coagulant ($FeCl_3$)

Afin d'améliorer le processus de coagulation-floculation pour un rendement d'élimination de la turbidité plus important, nous nous sommes intéressés à l'emploi d'autres adjuvants de coagulations autres que $Al_2(SO_4)_3$ largement employé dans le traitement des eaux au Maroc est le $FeCl_3$.

Pour mieux comprendre le comportement de ce nouvel coagulant, on a fixé la quantité du floculant (polymère) sur la même concentration, qui est 0.15 mg/l.

Pour mieux illustrer les résultats trouvés, nous avons porté sur la figure 22, l'évolution de la turbidité en fonction de la dose de chlorure ferrique avec une dose de 0.15mg/L de polymère et l'eau de Javel à 4.35ml /L.

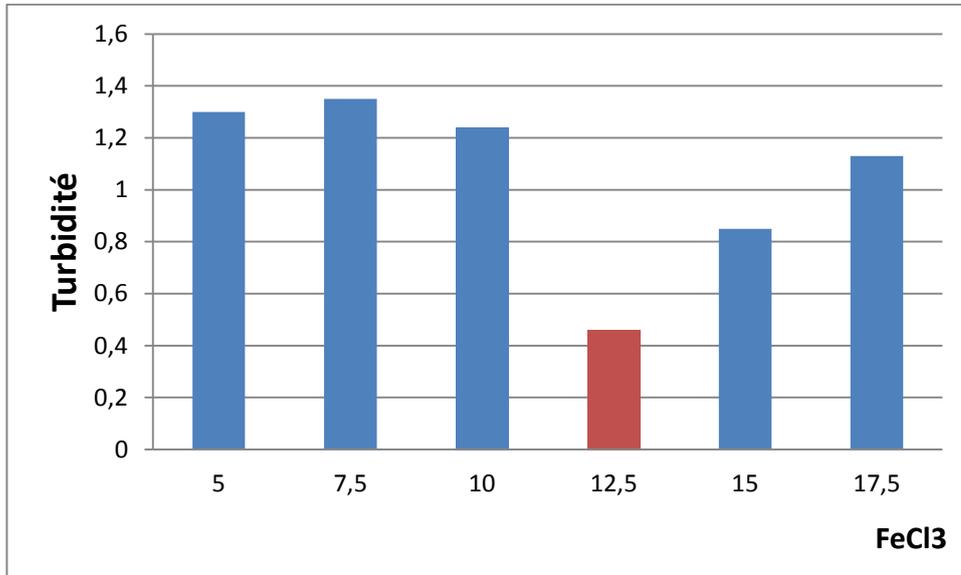


Figure 22 : Evolution de la turbidité en fonction de la dose du FeCl₃

(Solution : polymère à 0.15mg/L; Eau de Javel à 4.35 ml/l)

L'efficacité de clarification de l'eau brute a été améliorée. En effet, nous avons pu atteindre une turbidité minimale de 0.46 NTU, Notons que cette valeur est inférieure à celle obtenue dans l'essai de sulfate d'aluminium (0.55).

Le meilleur abattement de la turbidité est atteint avec des doses du floculant et de chlorure ferrique, respectivement, de 0.15 mg/L et 12.5 mg/L.

3. Effet de nouveau floculant (alginate)

Le protocole des essais de l'alginate est parfaitement identique à celui mené pour le poly-électrolyte cationique.

❖ effet de floculant alginate et le coagulant sulfate d'aluminium

Pour illustrer les résultats d'optimisation de l'adjuvant de floculation avec le coagulant $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, nous avons présenté sur la figure 23, l'évolution de la turbidité en fonction de la dose appliquée de cet adjuvant.

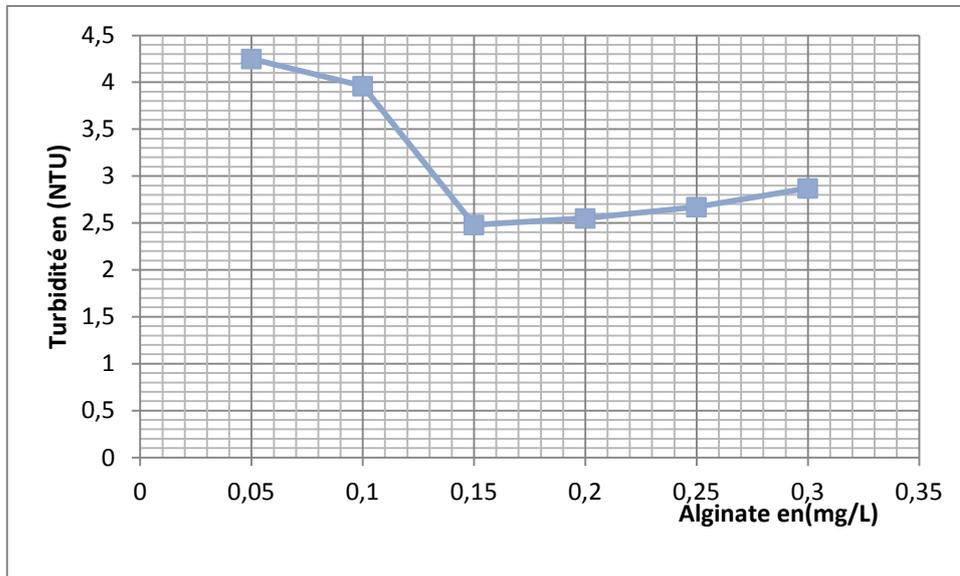


Figure 23 : Evolution de la turbidité en fonction de la dose de l'alginate

(Solution : FeCl_3 à 45 mg/L ; Eau de Javel à 4.35 ml/L)

Nous constatons que la dose optimale de floculant d'alginate est de 0.15 mg/L. En effet, nous avons pu atteindre une turbidité de l'ordre de 2.48 NTU qui correspond à 30 mg/l de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ et 0.15mg/L de floculant d'alginate.

La figure 23 illustre l'évolution de la turbidité en fonction de la dose d' $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$.

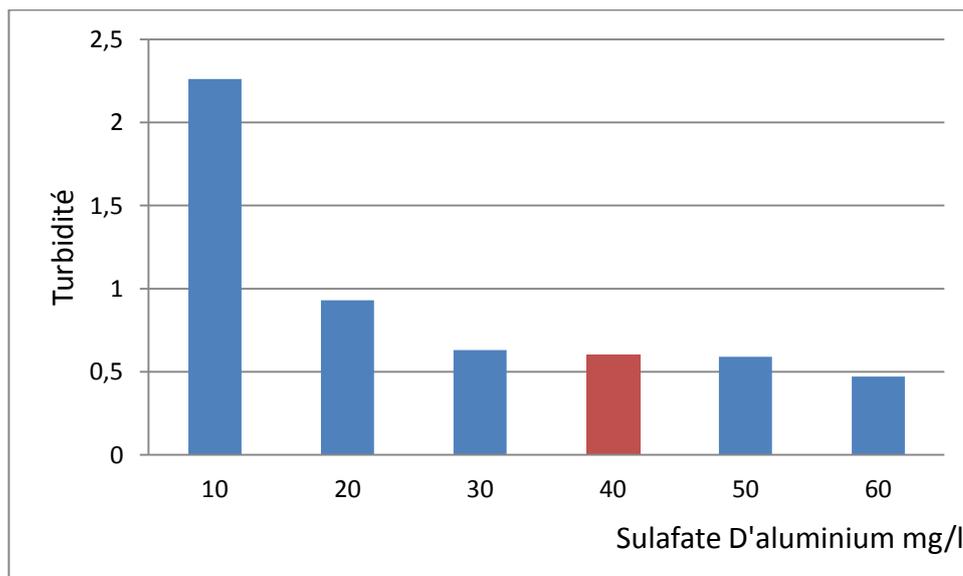


Figure 24 : Evolution de la turbidité en fonction de la dose de sulfate d'aluminium

(Solution : Algate à 0.15 mg/L; Eau de Javel à 4.35 ml/L)

Avec l'optimisation de la dose du coagulant sulfate d'aluminium, nous avons pu améliorer d'avantage le taux de clarification de l'eau brute trouble, en abattant la turbidité jusqu'à 0,60 NTU.

Le meilleur abattement de la turbidité est atteint avec des doses du flocculant et de sulfate d'aluminium, respectivement, de 0.15 mg/L et de 40 mg/L.

❖ Effet de flocculant alginate et de coagulant chlorure ferrique

Nous avons choisi aussi dans ce cas la même concentration du flocculant alginate (0.15 mg/l).

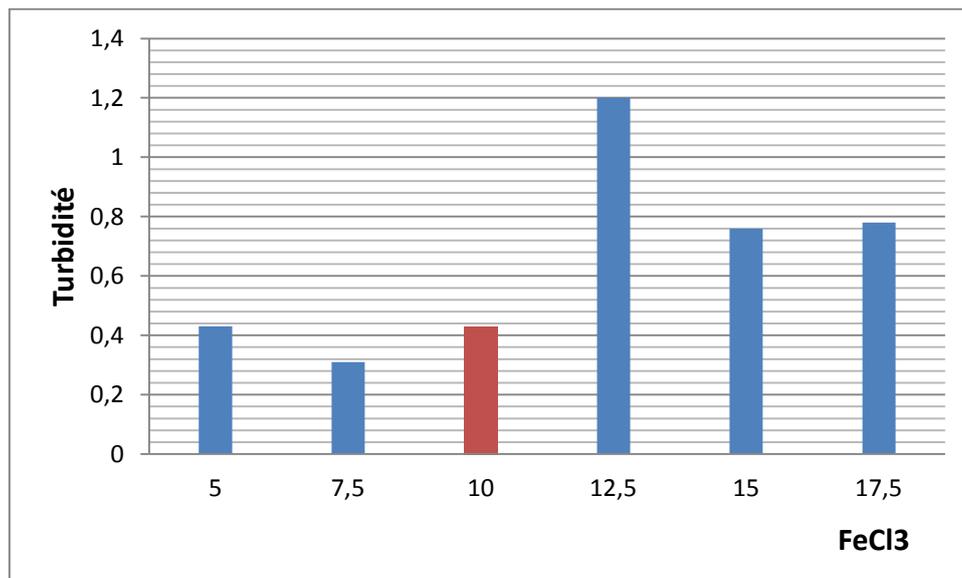


Figure 25 : Evolution de la turbidité en fonction de la dose de FeCl₃

(Solution : Flocculant à 0.15mg/L ; Eau de Javel à 4.35 ml/L).

Avec l'optimisation de la dose du coagulant FeCl₃, nous avons pu améliorer d'avantage le taux de clarification de l'eau brute en arrivant à une turbidité de 0,43 NTU. Le meilleur abattement de la turbidité est atteint avec des doses du flocculant d'alginate et du chlorure ferrique, respectivement, de 0.15 mg/L et de 10 mg/L.

II. . Essai de filtration

Le filtre à sable est un poste essentiel dans la station de traitement de l'eau potable. Une optimisation de sa performance est importante, tant au niveau de sa conception que de son exploitation, dans un objectif d'amélioration de la qualité de l'eau filtrée.

Cette amélioration sera d'autant plus nécessaire que la turbidité de l'eau traitée tend vers 1 NTU. Dans nos essais, nous avons travaillé avec des papiers filtre de porosité proche à celle des filtres à sable.

Tableau 3 : la turbidité de l'eau pour les différentes étapes de clarification.

Turbidité (NTU)				
	Coagulation par $Al_2(SO_4)_3$		Coagulation par $FeCl_3$	
floculant	polymère	alginate	polymère	Alginate
Eau brute	290	290	290	290
Eau décantée	1.45	0.94	3.91	3.89
Eau filtrée	0.55	0.60	0.46	0,43

Après une décantation pendant 30 min, suivie d'une filtration avec des papier filtres ,On remarque que la filtration améliore la qualité de l'eau, et une meilleure valeur de turbidité est obtenue dans le cas d'utilisation de l'alginate comme floculant et le chlorure ferrique comme coagulant, avec lesquelles on a pu atteindre une valeur de turbidité filtrée de l'ordre de 0,43 NTU.

III. Aspect économique

Un comparatif économique de traitement de l'eau brute en utilisant les différents réactifs est fait en calculant le coût opératoire dans chaque cas.

Le tableau 4 regroupe quelques informations relatives aux adjuvants de traitement, ainsi le coût total de chaque traitement par m^3 d'eau à traiter.

Tableau 4 : Le coût global pour les différents adjuvants

		Prix coagulant (Dh/Kg)	Prix floculant (Dh/Kg)	Dose Coagulant (g/m^3)	Dose Floculant (g/m^3)	Turbidité (NTU)	Coût total (Dh/ m^3)
Floculation par polymère	Traitement par $Al_2(SO_4)_3$	3,06	34,85	50	0.15	0.55	0,158
	Traitement par $FeCl_3$	16,5	34,85	12.5	0.15	0.46	0.211
Floculation par alginate	Traitement par $Al_2(SO_4)_3$	3,06	91,82	40	0.15	0,60	0,135
	Traitement par $FeCl_3$	16,5	91,82	10	0.15	0,43	0.178

Malgré le coût élevé du traitement par le chlorure ferrique (FeCl_3) par rapport à celui de sulfates d'aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), le traitement par le chlorure ferrique reste le plus efficace pour une meilleure clarification de l'eau brute surtout lors de fortes précipitations où l'eau présente assez de crues.

De plus, le traitement par le chlorure ferrique combiné avec l'alginate est plus efficace que celui effectué par le chlorure ferrique mélangé avec le polymère (turbidité est 0,46 NTU) malgré le prix élevé d'alginate.

Rapport-Gratuit.com

CONCLUSION GENERALE

Le processus de coagulation-floculation a fait apparaître divers mécanismes, souvent complexes et dépendent fortement de la qualité 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 la turbidité. 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 de paramètres physico-chimiques de l'eau ou du dosage du coagulant peuvent conduire à une floculation et un abattement efficace de la turbidité.

Des résultats obtenus nous permettent de conclure que les phases de clarification des eaux de la station de traitement de Tamri peuvent être améliorées, comme cela a été démontré dans les différents essais expérimentaux. L'essai de jar-test effectué sur le sulfate d'aluminium a permis d'atteindre une meilleure efficacité du procédé du traitement. L'ajout d'autre d'adjuvant tels que, le chlorure ferrique et l'alginate améliore d'avantage la potabilité d'eau en terme de turbidité.

A l'issue des essais réalisés et le diagnostic de l'état de la station de traitement du site de Tamri, nous proposons les recommandations suivantes :

- Systématiser le test de jar test en fonction de la qualité de l'eau brute pour optimiser la dose des adjuvants et l'ajuster à chaque variation significative.
- Utiliser le chlorure ferrique au lieu de sulfate d'aluminium comme réactif coagulant et l'alginate comme floculant, notamment lors de fortes précipitations, pour une meilleure clarification malgré son cout élevé.

Annexe 1

Sulfates d'alumine/ Polymère

	1	2	3	4	5	6
Coagulant (mg/l)	10	20	30	40	50	60
Floculant (mg/l)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Délai d'apparition du floc pendant l'agitation lente	0 second	0 second	0 second	0 second	0 second	0 second
Aspect du floc en fin d'agitation lente	Flocons de dimension moyenne	Flocons de dimension moyenne	Bon floc	Bon floc	Bon floc	Bon floc
Première estimation de la vitesse de sédimentation	Lente	Lente	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne

➤ Observation après décantation (temps de décantation : 30 min).

	1	2	3	4	5	6
pH	7.68	7.50	7.29	7.21	7.10	7.01
Turbidité en N.T.U	33.1	8.62	3.94	1.49	1.45	0.99
Chlore résiduel en mg/l	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15

➤ Observation après filtration :

	1	2	3	4	5	6
Turbidité en N.T.U	3.15	1.20	0.64	0.60	0.55	0.62
T.A.C en mé/l						
Al mg/l	0.12	0.12	0.12	0.16	0.16	0.16

- Agitation rapide : 2 min Rotation 120 tr/min
- Agitation lente : 20 min Rotation 45/min

Annexe 2

Sulfates d'alumine / Alginate

	1	2	3	4	5	6
Coagulant (mg/l)	10	20	30	40	50	60
Floculant (mg/l)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Délai d'apparition du floc pendant l'agitation lente	0 second	0 second	0 second	0 second	0 second	0 second
Aspect du floc en fin d'agitation lente	Petits points	Petits points	Petits points	Flocons de dimension moyenne	Flocons de dimension moyenne	Flocons de dimension moyenne
Première estimation de la vitesse de sédimentation	Lente	Lente	Lente	Moyenne	Moyenne	Moyenne

➤ Observation après décantation (temps de décantation : 30 min).

	1	2	3	4	5	6
pH	7.72	7.61	7.43	7.34	7.20	7.18
Turbidité en N.T.U	13.6	3.33	1.35	0.94	0.92	0.80
Chlore résiduel en mg/l	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15

➤ Observation après filtration :

	1	2	3	4	5	6
Turbidité en N.T.U	2.26	0.93	0.63	0.60	0.59	0.47
T.A.C en mé/l	1.5	1.9	1.5	1.4	1.5	1.4
Al	0.12	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16

- Agitation rapide : 2 min Rotation 120 tr/min
- Agitation lente : 20 min Rotation 45/min

Annexe 3

Chlorure ferrique / polymère

	1	2	3	4	5	6
Coagulant (mg/l)	5	7.5	10	12.5	15	17.5
Floculant (mg/l)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Délai d'apparition du floc pendant l'agitation lente	0 second	0 second	0 second	0 second	0 second	0 second
Aspect du floc en fin d'agitation lente	Petits points	Petits points	Flocons de dimension moyenne	Bon floc	Bon floc	Bon floc
Première estimation de la vitesse de sédimentation	Lente	Lente	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne

➤ Observation après décantation (temps de décantation : 30 min).

	1	2	3	4	5	6
pH	7.46	7.39	7.23	7.09	6.98	6.87
Turbidité en N.T.U	19.15	15.93	8.49	3.91	5.86	4.25
Chlore résiduel en mg/l	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15

➤ Observation après filtration :

	1	2	3	4	5	6
Turbidité en N.T.U	1.30	1.35	1.24	0.46	0.85	1.13
T.A.C en mé/l						
Fe	0	0	0	0	0	0

- Agitation rapide : 2 min Rotation 120 tr/min
- Agitation lente : 20 min Rotation 45/min

Annexe 4

Chlorure ferrique / Alginate

	1	2	3	4	5	6
Coagulant (mg/l)	5	7.5	10	12.5	15	17.5
Floculant (mg/l)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Délai d'apparition du floc pendant l'agitation lente	0 second	0 second	0 second	0 second	0 second	0 second
Aspect du floc en fin d'agitation lente	Flocons de dimension moyenne	Flocons de dimension moyenne	Bon floc	Bon floc	Bon floc	Bon floc
Première estimation de la vitesse de sédimentation	Lente	Lente	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne

➤ Observation après décantation (temps de décantation : 30 min).

	1	2	3	4	5	6
pH	7.67	7.50	7.38	7.42	7.37	7.20
Turbidité en N.T.U	7.41	3.86	3.89	4.40	2.70	2.60
Chlore résiduel en mg/l	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15

➤ Observation après filtration :

	1	2	3	4	5	6
Turbidité en N.T.U	0.43	0.31	0.43	1.20	0.76	0.78
T.A.C en mé/l				1.5		
Fe	0	0	0	0	0	0

- Agitation rapide : 2 min Rotation 120 tr/min
- Agitation lente : 20 min Rotation 45/min

Annexe 5

Tableau 1 : Optimisation de la dose du flocculant (polymère)

Essai	Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg/L)	Flocculant (mg/L)	Eau de javel (ml/L)	Turbidité (NTU)
1	45	0,05	4.35	28,2
2	45	0,1	4.35	10,2
3	45	0,15	4.35	4,84
4	45	0,20	4.35	7,4
5	45	0,25	4.35	5,15
6	45	0,30	4.35	6,89

Tableau 2 : Optimisation de la dose du flocculant (Alginate)

Essai	Fe(Cl) ₃ (mg/L)	Flocculant (mg/L)	Eau de javel (ml/L)	Turbidité (NTU)
1	30	0,05	4,35	4,25
2	30	0,1	4,35	3,96
3	30	0,15	4,35	2,48
4	30	0,2	4,35	2,55
5	30	0,25	4,35	2,67
6	30	0,30	4,35	2,87

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Desjardins, R. « Le traitement des eaux ». 2^{eme} Édition, l'École Polytechnique de Montréal. Montréal, 1997.
- [2] DEGREMONT. Mémento technique de l'eau, Technique et documentation, tome 1, 1989,
- [3] CARDOT Claude. Génie de l'environnement: le traitement de l'eau. Paris, 1999, P : 9.
- [4] Desjardins, « Le traitement des eaux ». 2^{eme} édition, Montréal, école polytechnique de Montréal, P 304, 1988.
- [5] MECHATL.F. Etude des paramètres physico-chimique avant et après traitements.
- [6] KETTAB A. Traitement des eaux " les eaux potable " , O.P.U, Alger, 1992.
- [7] PHILIPPO P, POMMERY J , T HOMAS P. Evolution d' une eau de surface au cours des traitements de potabilisation ; coportement des espèces métalliques au contact des matières humiques, J .fr .Hydrobiol , 1981.
- [8] Héctor Ricardo Hernandez, 2006,"Supervision diagnostic des procédés de production d'eau potable", Thèse Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse(France).
- [9] Marie Rovel.Jean « Memento Technique de l'eau » dixième édition, Tome 1 2005.
- [10] Amirthajah et O'melia, 1990; Montgomery, J.M. « Water treatment principles and design » New York, J.Wiley, 1977, P 696.
- [11] Bechac, J.P, P. Boutin, B. Mercier « Traitements des eaux usées ». 1^{ère} édition, Paris, Eyrolles, P 281, 1984.
- [12] Benefield, Judkins et Weand. « Process chemistry for water and wastewater treatment » Printice-Hall, Englewood Cliffs, P 510, 1982.