

تبيعشلا تيط ارقميدلا تيرنازجا تيروهمجلا

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

يملعا ثحباو يلاعلا ميلعتلا قرارو

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

**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES  
DEPARTEMENT DE GENIE DE L'ENVIRONNEMENT**



*En vue de l'obtention du diplôme  
De MASTER en GENIE DES PROCÉDES*

*Option : Génie de l'environnement*

## Thème

**Etude comparative de coagulants utilisés pour la  
clarification de l'eau du barrage de Keddara par la  
station SEAAL de Boudouaou- Boumerdès.**

**Soutenu le :** 1<sup>er</sup> juillet 2017

**Par :** AGUENTIL Kamilia  
BOUDJENOUN Khadidja Serine

**Jury de soutenance :**

<b>Président</b>	<b>AR.YEDOU</b>	<b>Professeur</b>	<b>UMBB</b>
<b>Promotrice</b>	<b>A.ASELAH</b>	<b>MCB</b>	<b>UMBB</b>
<b>Examineur</b>	<b>H.BALLOUL</b>	<b>MCA</b>	<b>UMBB</b>
<b>Examinatrice</b>	<b>F.BOUMECHHOUR</b>	<b>MCB</b>	<b>UMBB</b>

*Année universitaire 2016/2017*

## Remerciements

En guise de gratitude, nous tenons à dire que nous avons réussi à réaliser ce modeste travail grâce à Dieu qui nous a procuré santé, volonté et courage pour achever notre stage et mémoire.

Nous ne remercierons jamais assez notre encadreur **Mlle Asselah Maitre de conférences B à l'UMBB** qui nous a honorées par son encadrement, son dévouement, sa patience à notre égard, ses précieux conseils et toutes les informations constructives qui nous ont permis d'avancer et de nous améliorer ; elle nous a été d'une aide exceptionnelle.

Nous remercions tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner et de juger notre travail. En l'occurrence :

**M<sup>r</sup> Yeddou Professeur à l'UMBB**

**M<sup>r</sup> Baloul.H, Maitre-assistant A à l'UMBB**

**Et M<sup>me</sup> Boumechehour.F Maitre de conférences B à l'UMBB**

Nos remerciements vont également à **nos chers professeurs** sans exception qui nous ont accompagnés pendant tout notre cursus universitaire et nous ont formées et transmis leurs savoirs, veuillez retrouver ici, notre sincère et profonde gratitude.

Nous remercions par la même occasion les techniciens des laboratoires de la **FSI**, et spécialement **Mr Tazerouti** pour son aide à toute épreuve et l'intérêt qu'il porte à tous les étudiants.

Nous adressons un grand merci à tout le personnel de la **station SEAAL** de Boudouaou qui nous ont si bien accueillies, répondu à nos questions et grâce à qui nous avons pu accomplir notre stage dans les meilleures conditions ; à **M<sup>me</sup> N.Benhables, M<sup>me</sup> T.Taous, M<sup>r</sup> R.Boumchedda, M<sup>r</sup> M.Senadjki, M<sup>r</sup> HadjArab, et M<sup>r</sup> Fazez.**

Merci à **M<sup>me</sup> L.Salmi** du laboratoire la **station Mazafran** pour nous avoir renseignées et procuré les informations dont nous avons besoin.

Enfin, dans l'impossibilité de citer tous les noms, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de notre projet de fin d'étude.

## Dédicace

J'aimerais dédier ce modeste travail à :

*Mes chers parents,*

Qui sont ma raison d'être et la source de mon bonheur, merci pour tous les sacrifices déployés pour m'élever dignement et assurer mon éducation,

*A mon frère Anis*

Mon frère qui est à la fois un ami complice et une épaule pour moi et qui partage mes délires, mes rires et mes peines,

*A ma grand-mère et mes tantes* que j'aime énormément, qui ont toujours pris soin de moi, encouragées et chérie, qui sont pour moi un symbole de la bonté par excellence, une source de tendresse, un exemple de dévouement et qui n'ont jamais cessé de me soutenir et de prier pour moi, votre prière et bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

*A mes oncles, cousins et cousines* que j'adore,

*A toute ma précieuse famille sans exception,*

*A mes amies d'enfance Amina, Hayet, Hasna, Sabrina, Yamina, Sihem et Jamila,* des filles en or, leur amitié n'a pas de prix,

*A mes amies de l'université Amira, Sara, Houria et Lilia* qui me rendent toujours le sourire par leurs personnalités si attachantes et si adorables,

*A mon binôme Kamilia* avec qui j'ai passé une période de stage très agréable et inoubliable,

*A tous les amis* qui m'ont soutenue moralement et qui m'ont prêté main forte pour la réalisation de mon travail,

Merci à tous d'avoir été là pour moi, vous avez été l'essence de ma force et de ma volonté.

**B.Khadidja Serine**

## Dédicace

Je tiens à dédier ce modeste travail à :

*A ma chère mère,*

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon éternel et ma considération pour les sacrifices que tu as consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je te remercie pour tout le soutien et l'amour que tu me portes depuis mon enfance et j'espère que ta chère bénédiction m'accompagnera toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de tes vœux tant formulés, le fruit de tes innombrables sacrifices. Puisse Dieu, le très haut, t'accorder santé, bonheur et longue vie.

*A la mémoire de mon père,*

Ce travail est dédié à mon père, décédé trop tôt, qui m'a toujours poussée et motivée dans mes études.

J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'une fille qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde !

*A ma sœur Amira,*

Merci énormément pour ton soutien plus que précieux, Merci pour ton grand cœur toutes tes qualités qui seraient trop longues à énumérer. Ma vie ne serait pas aussi magique sans ton présence et ton amour.

*A la mémoire de ma tante Nadia*

J'aurais tant aimé que tu sois présente parmi nous. Que Dieu ait ton âme dans sa sainte miséricorde.

*A mes frères Billel et yacine et leurs épouses pour leur soutien*

*A ma grande mère Qui m'a accompagnée par sa prière,*

*A mes tantes, mes oncles, mes cousins et cousines bien-aimés*

*Mes chères amies Asema, Ferial, Fatema zouhra , Samia, Sihem et yasmine.*

*Mon chère binôme Sérine et toute sa famille*

A tous et toutes un grand merci

**A. Kamilia**

لَبَّعْدُ الْعِلْمِ أَرْحَمُ الرَّحِيمِ



# SOMMAIRE

Introduction.....	1
Partie théorique	
<b>Chapitre 1 : Les eaux potables.....</b>	<b>2</b>
<b>1. Les ressources en eau .....</b>	<b>2</b>
1.2. Les eaux souterraines.....	2
1.3. Les eaux de surface.....	3
1.4. Les eaux de mer et eaux saumâtres.....	4
<b>2. Qualité et réglementation .....</b>	<b>4</b>
<b>3. Les impuretés à éliminer .....</b>	<b>5</b>
3.1. Les impuretés biologiques .....	5
3.2. Les impuretés minérales .....	5
3.3. Les impuretés organiques.....	6
<b>4. Les procédés de traitement usuels.....</b>	<b>8</b>
<b>5. Pollution induite par les traitements.....</b>	<b>9</b>
<b>Chapitre 2 : La coagulation-floculation.....</b>	
<b>1. Les solutions colloïdales.....</b>	
1.1. Classification des solutions.....	11
1.2. Structure des solutions colloïdales .....	12
1.3. Propriétés des solutions colloïdales.....	14
1.4. Déstabilisation des solutions colloïdales.....	16
<b>2. La coagulation .....</b>	<b>16</b>
2.1. Facteurs influençant la coagulation.....	17
2.1.1. Influence du pH .....	17
2.1.2. Influence de la température .....	17
2.1.3. Influence du coagulant.....	17
2.1.4. Influence du mélange.....	17
<b>2.2. Les coagulants.....</b>	<b>18</b>
2.2.1. Les sels d'aluminium .....	18

2.2.2.	Les polymères d'aluminium.....	19
2.2.3.	Les sels de fer.....	19
2.2.4.	Les avantages et les inconvénients des coagulants.....	21
2.2.5.	Les coagulants organiques de synthèse.....	22
<b>3.</b>	<b>La floculation</b> .....	<b>23</b>
3.1.1.	Les floculants organiques naturels .....	23
3.1.2.	Les floculants organiques de synthèse.....	24
<b>Chapitre 3 : L'aluminium</b>		
1.	Généralités .....	25
2.	Exposition .....	25
3.	L'aluminium dans l'eau potable .....	25
4.	Effets sur la santé .....	26
5.	Optimisation .....	30
Partie pratique		
<b>Chapitre 1 :</b>	<b>Présentation de la station SEAAL</b>	<b>31</b>
	<b>Objectif de l'étude</b> .....	<b>32</b>
<b>Chapitre 2 :</b>	<b>Résultats des analyses et discussions</b>	
<b>1.</b>	<b>Matériel et méthode</b> .....	<b>33</b>
1.1.	Prélèvement.....	33
1.2.	Dopage.....	33
1.3.	Produits utilisés.....	33
1.4.	Méthode .....	33
<b>2.</b>	<b>Evaluation de l'efficacité des coagulants</b> .....	<b>33</b>
2.1.	Analyses pour une turbidité de 7 NTU .....	34
2.1.1.	Le sulfate d'alumine .....	35
2.1.2.	Le chlorure ferrique.....	37
2.1.3.	Le Polychlorure d'aluminium .....	40
2.2.	Analyses pour une turbidité de 15 NTU .....	46

2.2.1. Le sulfate d'alumine .....	47
2.2.2. Le chlorure ferrique.....	50
2.2.3. Le polychlorure d'aluminium .....	53
<b>3. Comparaison entre les coagulants étudiés.....</b>	<b>56</b>
<b>4. Représentation graphiques des paramètres évalués.....</b>	<b>58</b>
4.1. Turbidité .....	58
6.2. pH .....	61
6.3. TAC .....	59
6.4. Matière organique .....	60
6.5. Aluminium résiduel .....	61
6.6. Fer résiduel .....	62
6.7. Chlorures .....	63
6.8. Couleur .....	63
<b>5. Etude économique .....</b>	<b>64</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>66</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau N°1 :</b>	Traitement usuels et leurs objectifs.....	7
<b>Tableau N°2 :</b>	Dimensions de différentes particules.....	11
<b>Tableau N°3 :</b>	Taux de traitement de sulfate d'alumine et chlorure ferrique pour différentes turbidités.....	20
<b>Tableau N°4 :</b>	Avantages et inconvénients des coagulants étudiés.....	20
<b>Tableau N°5 :</b>	Quelques propriétés des coagulants utilisés. ....	32
<b>Tableau N°6 :</b>	Caractéristiques physico-chimiques de l'eau brute.....	33
<b>Tableau N°7 :</b>	Les résultats de jar-test «coagulation par SA».....	34
<b>Tableau N°8 :</b>	Dose optimale du polyélectrolyte avec le S.A (7 NTU).....	35
<b>Tableau N°9 :</b>	Paramètres physico-chimiques après traitement avec le S.A (7NTU)..	36
<b>Tableau N°10 :</b>	Turbidité en fonction des doses du $FeCl_3$ .....	38
<b>Tableau N°11 :</b>	Résultats du jar-test ( $FeCl_3$ + polyélectrolyte) pour l'eau (7 NTU).....	38
<b>Tableau N°12 :</b>	Paramètres physico-chimiques après traitement au $FeCl_3$ (7 NTU).....	39
<b>Tableau N°13 :</b>	Turbidité en fonction des doses du PAC (7 NTU).....	40
<b>Tableau N°14 :</b>	Influence du pH sur l'aluminium total pour le PAC.....	41
<b>Tableau N°15 :</b>	Turbidité de l'eau pour pH=7 des doses du PAC.....	42
<b>Tableau N°16 :</b>	Turbidité en fonction des doses du polyélectrolyte pour le PAC (7NTU).....	43
<b>Tableau N°17 :</b>	Analyses physico-chimiques après traitement avec le PAC 100.....	45
<b>Tableau N°18 :</b>	Caractéristiques physico-chimiques de l'eau brute (15 NTU).....	46
<b>Tableau N°19 :</b>	La turbidité en fonction des doses du S.A pour l'eau de mélange (15 NTU)..	47
<b>Tableau N°20 :</b>	Dose optimale du polyélectrolyte avec le S.A pour l'eau de mélange (15 NTU).....	48
<b>Tableau N°21 :</b>	Paramètres physico-chimiques après traitement avec le S.A pour l'eau de mélange (15 NTU).....	49

<b>Tableau N°22 :</b>	Turbidité en fonction des doses du $\text{FeCl}_3$ .....	50
<b>Tableau N°23 :</b>	Turbidité en fonction du polyélectrolyte avec le $\text{FeCl}_3$ pour l'eau de mélange (15 NTU).....	51
<b>Tableau N°24 :</b>	Paramètres physico-chimiques après traitement avec le $\text{FeCl}_3$ pour l'eau de (15 NTU).....	52
<b>Tableau N°25 :</b>	Turbidité en fonction des doses du PAC pour l'eau de mélange (15NTU).....	53
<b>Tableau N°26 :</b>	Turbidité en fonction des doses du polyélectrolyte pour le PAC pour l'eau de mélange (15 NTU).....	54
<b>Tableau N°27 :</b>	Analyses physico-chimiques après traitement avec le PAC 100.....	55
<b>Tableau N°28 :</b>	Tableau comparatif des résultats d'analyse de l'eau de 15 NTU.....	56
<b>Tableau N°29 :</b>	Tableau comparatif des résultats d'analyse de l'eau traitée du mélange de 15 NTU.....	57
<b>Tableau N°30 :</b>	Tableau comparatif de consommation journalière en coagulants.....	64
<b>Tableau N°31 :</b>	Tableau comparatif de consommation journalière en polyélectrolyte pour chaque coagulant.....	65

## Liste des figures

<b>Figure N°1 :</b>	Micelle de savon.....	12
<b>Figure N°2 :</b>	Formation d'un gel.....	13
<b>Figure N° 3 :</b>	Double couche et potentiel Zêta.....	15
<b>Figure N°4 :</b>	Filière de traitement de la station SEAAL.....	30
<b>Figure N°5 :</b>	Obturbateurs.....	31
<b>Figure N°6 :</b>	Décanteurs.....	31
<b>Figure N°7 :</b>	Filtre à sable à l'arrêt.....	31
<b>Figure N°8 :</b>	Filtre à sable pendant la filtration.....	31
<b>Figure N°9 :</b>	Turbidité en fonction des concentrations de coagulant S.A.....	34
<b>Figure N°10 :</b>	Turbidité en fonction des concentrations de coagulant S.A.....	35
<b>Figure N°11 :</b>	Turbidité en fonction des doses du $\text{FeCl}_3$ pour l'eau brute (7 NTU).....	37
<b>Figure N°12 :</b>	Turbidité en fonction des doses du polyélectrolyte (7 NTU).....	38
<b>Figure N°13 :</b>	Turbidité en fonction des doses du PAC (7 NTU).....	41
<b>Figure N°14 :</b>	Influence du pH sur l'aluminium total pour le PAC.....	42
<b>Figure N°15 :</b>	La turbidité en fonction concentration du coagulant PAC à pH=7.....	43
<b>Figure N°16 :</b>	Turbidité en fonction de la concentration du polyélectrolyte.....	44
<b>Figure N°17 :</b>	Turbidité en fonction des doses du S.A pour l'eau de mélange (15 NTU).....	47
<b>Figure N°18 :</b>	Turbidité en fonction des doses du polyélectrolyte (15 NTU).....	48
<b>Figure N°19 :</b>	Turbidité en fonction des doses du $\text{FeCl}_3$ pour l'eau de mélange (15NTU)....	50
<b>Figure N°20 :</b>	Dose optimale du polyélectrolyte pour le chlorure ferrique (15NTU)...	51
<b>Figure N°21 :</b>	Turbidité en fonction des doses du PAC pour l'eau de mélange (15NTU).....	53
<b>Figure N°22 :</b>	Dose optimale du polyélectrolyte pour le chlorure ferrique (15NTU).....	54

<b>Figure N°23 :</b>	La différence entre les doses optimales des coagulants.....	58
<b>Figure N° 24 :</b>	Turbidité de l'eau décantée traitée par rapport à la valeur limite.....	58
<b>Figure N°25 :</b>	Taux d'élimination de la turbidité par les coagulants étudiés.....	59
<b>Figure N°26 :</b>	TAC avant et après traitement pour les coagulants étudiés.....	60
<b>Figure N°27 :</b>	Taux d'élimination de la Matière organique.....	60
<b>Figure N°28 :</b>	Taux d'Al total avant filtration .....	61
<b>Figure N°29 :</b>	Taux d'Al total après filtration .....	61
<b>Figure N°30 :</b>	Taux de Fer total avant filtration .....	62
<b>Figure N°31 :</b>	Taux de Fer total après la filtration .....	63
<b>Figure N°32 :</b>	Taux des chlorures.....	63
<b>Figure N°33 :</b>	Elimination de la couleur .....	63

Les besoins en eau potable augmentent régulièrement avec l'accroissement démographique et industriel. Le principal problème de l'accès à l'eau potable est dû à sa répartition dans le monde mais aussi à une pollution continue des ressources, en effet, les eaux de retenue des barrages, les rivières, les lacs et les nappes phréatiques sont menacés par la pollution de l'industrie, de l'agriculture et des rejets urbains. Les procédés de traitement des eaux peuvent également engendrer des sous-produits dangereux. Les eaux potables sont donc soumises à une réglementation sévère pour protéger la santé du consommateur.

Il existe différents procédés de traitement de potabilisation des eaux, le choix de ces derniers dépend de leur provenance et origines. Le chapitre 1 donne un aperçu sur les caractéristiques des ressources en eau, les types d'impuretés rencontrés, ainsi que les procédés usuels de l'élimination de ces dernières afin que l'eau soit conforme aux normes de qualité exigées.

L'un des procédés de traitement les plus importants est la coagulation-floculation car elle permet d'éliminer les matières colloïdales et toutes les impuretés qu'elles peuvent contenir. Le chapitre 2 aborde la classification de ces solutions colloïdales, les produits chimiques utilisés pour leur élimination, ainsi que les paramètres qui entrent en jeu lors de ce procédé de clarification.

Le sulfate d'alumine est le coagulant le plus utilisé pour la clarification de l'eau. Cependant, l'aluminium résiduel dans l'eau potable pourrait être dangereux pour la santé. En effet, Il a été suggéré que l'aluminium est impliqué dans l'étiologie de maladies neurodégénératives sévères : la sclérose latérale amyotrophique, la Parkinson et l'Alzheimer. Le chapitre 4 donne des généralités sur l'aluminium ainsi que ses facteurs de risques.

Notre projet de fin d'étude réalisé dans la station de la SEAAL de Boudouaou consiste à étudier la coagulation-floculation en utilisant deux coagulants disponibles sur le marché, à savoir, le chlorure ferrique (aussi répandu que le sulfate d'alumine) et le polychlorure d'aluminium (PAC), de tester leur efficacité pour la clarification de l'eau du barrage de Keddara dans le but d'obtenir des valeurs minimales, voire inexistantes en aluminium résiduel. En plus du chapitre relatif à la présentation de SEAAL, notre étude fait l'objet de la partie pratique comportant les analyses effectuées après traitement avec chaque coagulant, ainsi qu'une comparaison sur les paramètres étudiés.

### **1. Les ressources en eau**

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

### **1.1. Les eaux souterraines**

#### **a) Origines :**

Les nappes sont contenues dans des terrains réservoirs appelés aquifères. La porosité et la structure du terrain déterminent le type de nappe et le mode de circulation souterraine. Une nappe peut être libre (ou phréatique si elle est suffisamment proche de la surface pour être accessible par puits). Elle est alors alimentée directement par l'infiltration des eaux de pluie. Une nappe peut être captive si elle est emprisonnée entre deux couches de terrains imperméables, c'est le type de nappe les plus fréquents et généralement les plus profonds.

L'eau peut soit imprégner la totalité de la couche géologique considérée : c'est le cas des terrains poreux (sable, grès, alluvions) soit s'établir seulement dans des fissures ou fractures de roches compactes, c'est la structure karstique <sup>[1]</sup>.

#### **b) Caractéristiques générales :**

La nature géologique du terrain a une influence déterminante sur la composition chimique de l'eau retenue. A tout instant, l'eau est en contact avec le sol dans lequel elle stagne ou circule. Il s'établit un équilibre entre la composition du terrain et celle de l'eau. Les eaux circulant dans un sous-sol sablonneux ou granitique sont acides et peu minéralisées. Les eaux circulant dans des sols calcaires sont bicarbonatées calciques et présentent souvent une dureté élevée. Ces eaux sont caractérisées par une bonne pureté bactériologique, une faible turbidité, une température et une composition chimique constantes, l'absence presque générale d'oxygène provoquant la présence d'éléments réduits indésirables <sup>[1]</sup>.

#### **c) Potabilité des eaux souterraines**

Les eaux souterraines ont toujours été synonyme « d'eaux propres » répondant naturellement aux normes de potabilité. Ces eaux sont en effet moins sensibles aux pollutions accidentelles. Lorsqu'une eau souterraine a été polluée, il est très difficile de récupérer sa pureté originelle, les polluants ayant contaminé la nappe sont en effet non seulement présents dans l'eau, mais également adsorbés sur les roches et minéraux du sous-sol. Les eaux souterraines peuvent aussi contenir des éléments à des concentrations dépassant largement les normes de potabilité. Ceci est dû à la composition du terrain de stockage et, pour certains de ces éléments, au caractère réducteur de l'eau. On peut citer le fer, le manganèse l'azote, l'ammonium, et l'acide

sulfurique,...etc. Dans ce cas, ces eaux doivent être traitées à chaque fois que la concentration d'un ou plusieurs de ces éléments dépasse la valeur autorisée.

## **1.2. Les eaux de surfaces**

### **a) Origine**

Elles ont pour origine soit des nappes souterraines dont l'émergence constitue une source, soit les eaux de ruissellement. Ces eaux se rassemblent en cours d'eau, caractérisées par une surface de contact eau-atmosphère toujours en mouvement et une vitesse de circulation appréciable. Elles peuvent se trouver stockées en réserves naturelles (lacs) ou artificielles (retenues de barrages) caractérisées par une surface d'échange eau-atmosphère quasiment immobile, une profondeur qui peut être importante et un temps de séjour appréciable.

### **b) Caractéristiques générales**

La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains rencontrés durant leur parcours. Au cours de son cheminement, l'eau dissout les différents éléments constitutifs des terrains. Ces eaux sont caractérisées par :

- La présence de gaz dissous, en particulier l'oxygène.
- Une concentration importante en matière en suspension, très diverses, allant des particules colloïdales aux éléments figurés entraînés par les rivières en cas d'augmentation importantes de débit.
- La présence de matière organique d'origine naturelle provenant du métabolisme, puis de la décomposition *post mortem* des organismes végétaux ou animaux vivant à la surface du bassin versant ou dans la rivière.
- La présence du plancton : les eaux de surface sont parfois le siège d'un développement important de phytoplancton (algues...) et de zooplancton, surtout dans le cas d'eutrophisation. Certains de ces organismes peuvent sécréter des produits sapides et odorants ou des toxines.
- Des variations journalières (différence de température, précipitation, fonte des neiges), de végétation (chute de feuilles) ou aléatoires : pluies soudaines, orages, pollution accidentelles <sup>[1]</sup>.

### **c) Potabilité des eaux de surface**

Les eaux de surface sont rarement potables sans aucun traitement et sont souvent pollués par divers rejets d'origine urbaine, industrielle ou agricole ainsi qu'une pollution bactériologique d'origine humaine ou animale.

## **1.3. Eaux de mers et eaux saumâtres**

L'eau de mer est fortement minéralisée, contenant 3.5 % de sels divers dont le plus important est le chlorure de sodium. On n'a recours à une telle eau qu'en l'absence totale d'autres sources. La salinité observée dans les différents océans ou mers du globe résulte d'un équilibre entre évaporation, pluies et apports des fleuves (salinité faible) d'une part et d'échange d'eau avec les autres mers ou océans auxquels ils sont reliés d'autre part. La salinité est donc variable d'une mer à une autre, la Méditerranée a une salinité de 37 à 40 g/L tandis que la Mer Morte a une salinité de 270 g/L.

Les eaux de mer contiennent de la matière en suspension ; zooplancton et phytoplancton spécialement mais ils ne dépassent pas 1 mg/L même s'il a été constaté fréquemment des blooms algaux de plus de 10 000 cellules/ml. Au contraire près des rivages, l'action des vagues et/ou des marées peut remettre en suspension plusieurs dizaines de mg/L de sable, limon ou autres dépôts. En outre, à proximité des agglomérations, industries, ports la pollution peut devenir très importante [1].

## **2. Qualité et réglementation**

L'eau mise à disposition du consommateur dans le réseau de distribution doit avoir été traitée de façon à être « potable » c'est-à-dire répondre à la réglementation en vigueur pour les eaux destinées à la consommation humaine.

Les eaux naturelles sont parfois tout à fait salubres. C'est le cas, très souvent, des eaux souterraines ou des eaux de surface des régions vierges. Malheureusement, la grande majorité des cours d'eau véhiculent aujourd'hui des eaux insalubres à cause de la pollution de plus en plus envahissante. Les eaux souterraines elles-mêmes dans les régions peuplées, doivent être considérées comme suspectes. Les eaux de distribution doivent être traitées au préalable, de façon à être conformes aux normes de qualité appropriées.

L'Organisation mondiale de la santé OMS établit pour chaque paramètre, des recommandations qui peuvent être adaptés dans chaque pays, en fonction de l'état sanitaire et des conditions économiques pour aboutir aux normes réglementaires nationales.

La qualité des eaux potables est définie par une directive qui vise un certain nombre de valeurs paramétriques axées essentiellement sur la santé du consommateur. En établissant pour chacun une concentration maximale admissible CMA. Certains paramètres sont supprimés, d'autres sont modifiés dans le sens d'une sévérité accrue (ex. : Sb, As, Pb, Ni HPA..) d'autres pris en considération pour la première fois (acrylamide, benzène, bromates, THM, métabolites de pesticides). De plus, elle exprime clairement la notion de respect obligatoire des normes au

robinet du consommateur, prenant ainsi en compte la possible dégradation de la qualité de l'eau au cours de son transfert dans le réseau [2].

### **3. Les impuretés à éliminer**

Les impuretés éventuellement présentes dans l'eau doivent être éliminées, certaines sont néfastes pour la santé et subissent donc une réglementation sévère et d'autres le sont moins mais peuvent être à l'origine de différents inconvénients.

#### **3.1. Les impuretés biologiques**

##### **▪ Les bactéries et les virus**

Les coliformes totaux n'entraînent en général aucune maladie, mais leur présence indique qu'une source d'approvisionnement en eau peut être contaminée par des micro-organismes plus nuisibles. La présence d'*Escherichia coli* dans de l'eau indique une contamination récente par des matières fécales, et peut indiquer la présence possible de pathogènes responsables de maladies comme des bactéries, des virus et des parasites. Même si la plupart des souches d'*E.coli* sont inoffensives, certaines souches comme l'*E.coli* O157:H7, peut causer des maladies [1].

##### **▪ Les micro-organismes (phytoplancton et zooplancton)**

Les eaux de surfaces contiennent de nombreux organismes, végétaux et animaux, constituant respectivement le phytoplancton et le zooplancton. Ils forment une biomasse qui doit être éliminée. Certains d'entre eux (en particulier des actinomycètes et des cyanobactéries ou algues bleues) sécrètent des composés (comme la géosmine) donnant à l'eau un goût et/ou une odeur désagréable. De plus, pendant leur développement ou au moment de leur mort certaines algues bleues émettent des métabolites toxiques. Presque toutes les eaux superficielles véhiculent des protozoaires parasites, provoquant en particulier des épidémies de gastro-entérite (amibes, giardia, cryptosporidium, cyclospora)[1].

#### **3.2. Les impuretés minérales**

##### **3.2.1 Impuretés sans effet appréciables sur la santé :**

Ces impuretés minérales ne représentent pas de réel danger sur la santé mais elles sont susceptibles de poser des désagréments. On cite :

##### **▪ La turbidité**

La turbidité de l'eau est causée par des particules appelées matières colloïdales, (voir chapitre 3). Elle doit être éliminée pour permettre une bonne désinfection de l'eau et pour éliminer les polluants adsorbés sur les matières en suspension (comme les éléments traces métalliques).

### ▪ La couleur

La couleur peut être due à certaines impuretés minérales comme le fer...etc, mais le plus souvent à certaines matières organiques dissoutes (acides humiques, fulviques). Son élimination implique celles de certaines matières organiques indésirables, comme les précurseurs de composés haloformes ou trihalométhanes (THM).

### ▪ Certains métaux

Le fer et le manganèse peuvent provoquer une coloration et sont à l'origine de dépôt dans les réseaux. Des corrosions peuvent en résulter. Par ailleurs, ils affectent les qualités organoleptiques de l'eau comme d'autres métaux : le cuivre, l'aluminium, le zinc.

### ▪ Les gaz dissous

Parmi les gaz dissous dans l'eau, on cite le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et le gaz sulfurique ( $\text{H}_2\text{S}$ ), qui est révélateur de conditions anaérobies ; il provoque de mauvaises odeurs et peut être à l'origine de corrosion.

### 3.2.2 Impuretés affectant la santé

Soumis à de sévères réglementations, certaines impuretés minérales sont dangereuses pour la santé, elles peuvent être présentes naturellement dans l'eau (comme l'arsenic) ou sont issues de pollution (comme les éléments traces métalliques, le sélénium, les nitrites...etc.). Il y a aussi les impuretés issues des produits de traitement comme l'Aluminium et l'acrylamide <sup>[1]</sup>

## 3.3. Les impuretés organiques

On peut distinguer deux grandes catégories de matière organique :

### 3.3.1. Les matières organiques naturelles (M.O)

Elles sont inoffensives pour la santé humaine mais présentent l'inconvénient d'interférer sur tous les procédés de traitement d'eaux potables ; elles constituent en particulier un réservoir de précurseurs de sous-produits d'oxydation indésirables tels les trihalométhanes (THM), les acides haloacétiques (HAA) ou les haloacétonitriles (HAN) générés lors de la chloration. Les M.O sont par ailleurs responsables du fouling des membranes et de phénomènes de compétition lors de l'adsorption de micropolluants « artificiels » sur charbon actif en grains. De structure complexe et variable, ces matières organiques naturelles sont surtout étudiées par des techniques spectroscopiques (telles que l'absorption le domaine de l'infrarouge, de l'ultraviolet et  $^{13}\text{C}$ -RMN). Ainsi, l'utilisation de la technique de PY-CG-SM a permis de préciser que les fragments de décomposition thermique des matières organiques extraites d'eaux de diverses origines proviennent invariablement des biopolymères qui composent l'essentiel de la biomasse

animale et végétale à savoir les polysaccharides (cellulose, amidon...), les sucres aminés (présents dans les parois bactériennes et fongiques), les protéines et les substances polyphénoliques (provenant de la décomposition des tannins et lignines)<sup>[1]</sup>.

### **3.3.2. Les micropolluants organiques artificiels**

Les micropolluants organiques « artificiels » générés par l'activité humaine qui, bien que présents au niveau de quelques  $\mu\text{g/L}$  (d'où leur nom), peuvent présenter un danger pour la santé publique. On cite les : phénols et dérivés, les pesticides, les solvants chlorés, les hydrocarbures, les hydrocarbures polycycliques aromatiques HPA, les polychlorobiphényles PCB, les détergents et les adjuvants. Outre ces polluants classiques, des milliers de substances indésirables sont susceptibles de contaminer les milieux aquatiques, plusieurs problématiques sont apparues au milieu des années 1990 concernant la qualité des milieux aquatiques. On citera en particulier la présence à l'état de trace de certaines familles de « médicaments » et surtout la découverte de perturbateurs endocriniens. En fait, il ne s'agit pas seulement des résidus de médicaments mais aussi de nombreuses substances naturelles ou synthétiques (pesticides organochlorés, bisphénol A, nonylphénols, tributylétain...etc.) étaient capables d'interférer avec les systèmes endocriniens des organismes aquatiques ou des mammifères. Chez l'homme, des interrogations ont lieu sur la relation possible entre ces substances et la diminution de la fertilité masculine, et également du cancer de la prostate et du sein <sup>[1]</sup>.

## **4. Les procédés de traitement usuels**

Le concepteur d'une station de traitement de l'eau a à sa disposition une large gamme de procédés de traitement qu'il peut agencer selon ses objectifs. Les principaux procédés et leurs objectifs sont énoncés dans le tableau N°1 <sup>[2]</sup>.

**Tableau N° 1** : Traitement usuels et leurs objectifs.

<b>Procédé</b>	<b>Objectifs</b>
<b>Sédimentation simple</b>	Réduction des matières en suspension,
<b>Aération</b>	Enlèvement des gaz et des matières volatiles. oxygénation, oxydation,
<b>Coagulation-floculation</b>	Clarification, décoloration, désinfection partielle, précipitation chimique,
<b>Filtration rapide</b>	Clarification, désinfection partielle, usuellement précédée de coagulation-floculation,
<b>Chloration</b>	Désinfection, oxydation, suppression d'odeurs,
<b>Ozonation</b>	Mêmes objectifs que ceux de la chloration,
<b>Précipitation chimique</b>	Adoucissement, suppression d'ions toxiques ou indésirables,
<b>Echange ionique</b>	Adoucissement, déminéralisation, suppression d'ions toxiques, indésirables, radioactifs,
<b>Adsorption sur charbon actif</b>	Décoloration, suppression d'odeurs, de mauvais goût, de matières organiques toxiques ou indésirables,
<b>Osmose inverse</b>	Purification générale, dessalement, déminéralisation,
<b>Electro-dialyse</b>	Dessalement,
<b>Ultrafiltration</b>	Purification générale partielle,
<b>Microfiltration</b>	Traitement des eaux de surface (Séparation des petites particules en suspension, bactéries, virus, colloïdes),
<b>Nanofiltration</b>	Traitement des eaux de surface, adoucissement,

## 5. La pollution induite par les traitements :

L'introduction d'un réactif dans l'eau peut conduire à deux formes de pollution : les impuretés du réactif lui-même et celle de ses réactions avec les matières déjà présentes dans l'eau.

### 5.1. Les impuretés dues aux réactifs :

#### ▪ Les coagulants minéraux

Certains coagulants sont préparés à partir de minerais ou métaux pouvant contenir des impuretés en quantité non négligeable : attaque acide de bauxite pour préparer le sulfate d'aluminium et attaque de ferrailles pour préparer le chlorure ferrique. Cette attaque dissout également des impuretés (tungstène, manganèse, arsenic).

D'autres coagulants sont préparés à partir de sous-produits d'une autre industrie. Le chlorosulfate ferrique, préparé à partir de sulfate ferreux provenant de l'industrie du titane, peut contenir une quantité relativement importante de manganèse [1].

#### ▪ Les polyélectrolytes et adjuvants

Les polyélectrolytes de synthèse sont préparés à partir d'une polymérisation de monomères acrylamide (qui est un dérivé du pétrole) Pour les eaux potables, la législation de chaque pays peut fixer le type de monomère utilisables et la teneur maximale en monomère résiduel tolérable dans le polymère et/ou le taux de traitement maximal qu'il est possible de mettre en œuvre (en Algérie, la valeur limite est de 0.5 µg/L) [3].

#### ▪ Le chlore et ses dérivés :

Après traitement au chlore, on peut trouver dans l'eau les produits organo halogénés totaux (TOX) dont les acides chloroacétiques et les Trihalométhanes (THM), les bromates, les chlorites et les chlorates.

### 5.2. La pollution exogène :

Les matériaux constitutifs de certains composants utilisés pour le traitement de l'eau ou sa distribution (le caoutchouc des joints, les solvants utilisés pour la peinture et le revêtement des ouvrages, les monomères et additifs employés lors de la fabrication des tuyauteries en plastiques...etc.) peuvent être à l'origine de pollution. Certains de ces matériaux peuvent même être plus ou moins toxiques, d'autres peuvent tout simplement relarguer du carbone organique susceptible de servir de nourriture aux bactéries banales et de favoriser leur prolifération dans le réseau de distribution. De même, les matériaux des tuyauteries et/ou robinetterie peuvent être attaqués par l'eau (corrosion) relarguant des éléments dont le plus dangereux est le plomb (risque de saturnisme).

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

Il est important que les procédés de coagulation et floculation soient utilisés correctement. En effet, la production d'un floc trop petit ou trop léger entraîne une décantation insuffisante : lorsque les eaux arrivent sur les filtres, elles contiennent une grande quantité de floccs qui encrassent rapidement ces filtres, ce qui nécessite des lavages fréquents. Par ailleurs lorsque le floc est fragile, il se brise en petites particules qui peuvent traverser le filtre et altérer la qualité de l'eau produite [4].

## **1. Les solutions colloïdales**

### **1.1 Classification des solutions**

D'après l'ensemble de leurs propriétés, on est amenés à distinguer les solutions vraies, les dispersions, et les solutions colloïdales. En effet, dans les solutions vraies, le corps dissous se divise, se répartit dans tout le solvant formant avec lui une phase homogène. Ces solutions présentent certaines propriétés caractéristiques :

- Elles sont limpides, ne diffusent pas la lumière (elles peuvent cependant absorber certaines radiations particulières et donc présenter une coloration)
- Elles traversent les filtres les plus fins sans séparation
- Elles sont stables et ne tendent pas à se séparer de leurs constituants (sauf si elles sont saturées...).

A l'opposé des solutions vraies, les dispersions contiennent un ensemble de particules supramoléculaires gênant le passage de la lumière au sein de la phase liquide. Ces particules sont visibles du moins au microscope optique, elles sont retenues par les filtres et le plus souvent séparables par densité.

Les suspensions et les émulsions sont des exemples de dispersions : une émulsion correspond au mélange de deux liquides insolubles (c'est le cas du mélange eau-huile) ; on obtient une

suspension en agitant fortement un solide finement divisé avec un liquide dans lequel il est insoluble (c'est le cas des eaux usées). Dans tous les cas et même si à l'œil nu le mélange semble homogène, il est trouble et instable. En fait, c'est la taille des particules qui entraîne cette distinction (voir tableau N° 2).

**Tableau N°2** : Dimensions de différentes particules

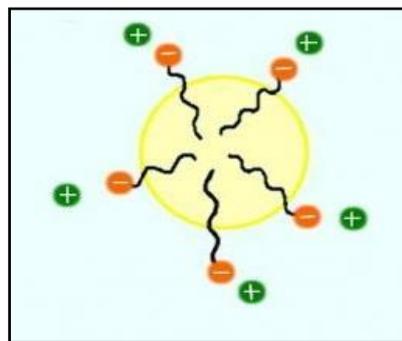
Solutions	Exemples	Dimension des particules (nm)
Solutions vraies	Molécules, ions	0.1 - 3
Solutions colloïdales	Hémoglobine Virus (grippe) Soufre colloïdal	30 120 50-500
Dispersions	Bactéries Globules rouges Grains de quartz (sable)	1500 7500 50 000

Du fait des dimensions de ces particules, les solutions colloïdales présentent des propriétés optiques, cinétiques et électriques particulières.

### 1.2 Structure des particules colloïdales :

Les particules colloïdales ont de telles dimensions car elles sont constituées :

- D'agrégats de molécules, encore appelés micelles (c'est le cas des solutions de savon ou de rouille  $[\text{Fe}(\text{OH})_3]_x$  (voir figure N°1)
- De macromolécules, formées par polycondensation ou polymérisation de petites molécules (c'est le cas des protéines, de la pectine, de la cellulose et de nombreux produits naturels ou artificiels) dont la forme est variable, elle peut être sphérique, allongée ou réticulée.



**Figure N°1** : Micelle de savon

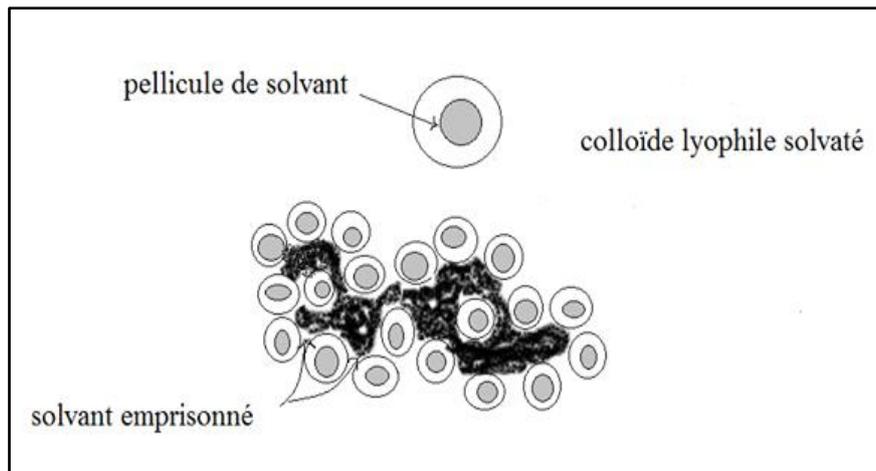
Par ailleurs, les particules colloïdales renferment généralement des charges électriques, si bien qu'elles présentent certaines propriétés analogues à celles des ions. Ces charges ont plusieurs origines :

- La particule peut contenir des groupements ionisables ( $-\text{NH}_2$ ,  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{SO}_3\text{H}$ ,...) régulièrement répartis dans la macromolécule ou encore, il peut y avoir un centre ionisable dans chacune des molécules constituant la micelle (c'est le cas des savons  $\text{RCOO}^-\text{Na}^+$ ). A vrai dire, ces groupements ionisables fournissent généralement peu de charges. Ils sont relativement peu nombreux et le signe de la charge peut varier selon le pH du milieu car les particules sont amphotères.
- L'origine la plus importante de la charge électrique des particules colloïdales est l'adsorption d'ions étrangers contenus dans la solution. Les particules présentent une grande surface- de l'ordre de  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$ , ce qui en fait d'excellents adsorbants et, selon qu'elles adsorbent plutôt des anions ou des cations, elles se chargent négativement ou positivement (il est évident que la solution contient les ions complémentaires des ions adsorbés). Le signe de la charge dépend à la fois de la nature de la particule et du milieu.

Enfin, toujours à cause de l'importance de leur surface, les particules colloïdales peuvent adsorber les molécules, surtout des molécules du solvant qui les entourent. Certaines particules peuvent ainsi adsorber 100 fois leur propre poids de solvant. Ce sont des colloïdes lyophiles (hydrophiles pour les solutions aqueuses). Encore une fois, ces attractions sont importantes quand la nature des particules est proche de celle du solvant : c'est le cas de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  et de l'eau. Par contre, les métaux colloïdaux comme l'or n'ont pas d'affinité pour le solvant ; ils sont hydrophobes <sup>[5]</sup>.

Les colloïdes lyophiles peuvent, en se réunissant, emprisonner le solvant : il y a formation d'un gel (voir figure N°2).

En général, quand la température augmente, la solvataion diminue et le gel tend à se liquéfier. Les moins solides se liquéfient par simple agitation.



**Figure N°2 :** Formation d'un gel

La charge et la solvation des particules colloïdales sont responsables de la stabilité des sols correspondants. En effet, ces particules sont soumises au mouvement brownien (déplacement aléatoire sous l'effet de l'agitation thermique). Par chocs, elles ont tendance à s'agglomérer de façon à présenter une surface minimale et, lorsque leur masse devient suffisante, elles peuvent flocculer. Deux facteurs s'opposent à cette flocculation : La charge des particules qui cause leur répulsion et la solvation, car la graine de solvant empêche les rencontres et les agrégations

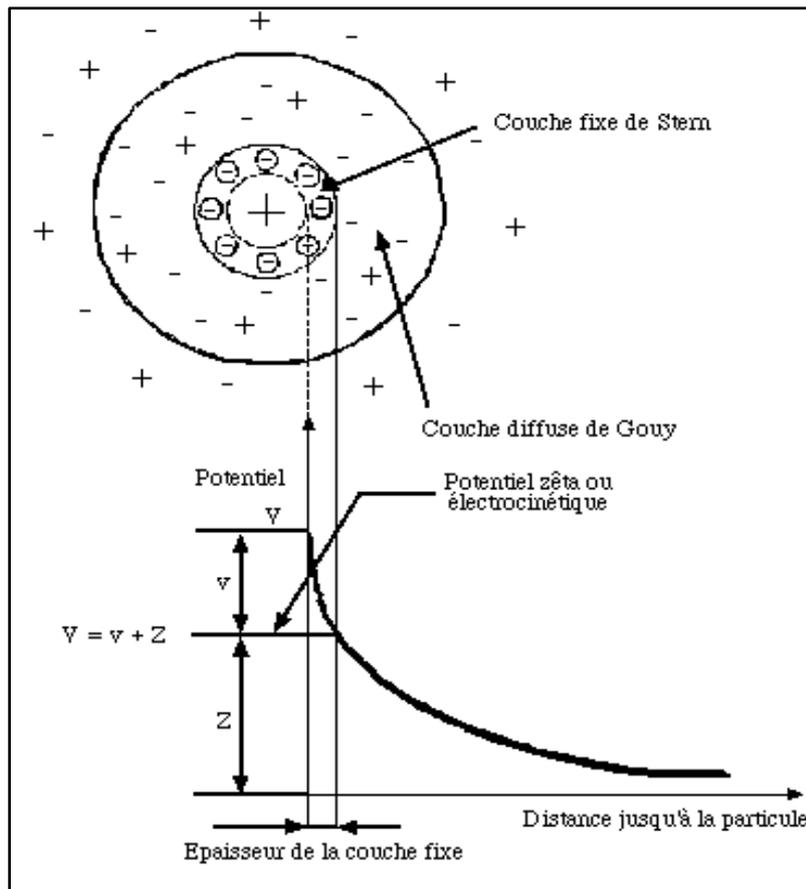
### **1.3. Propriétés des solutions colloïdales :**

#### **1.3.1. Propriétés cinétiques :**

Les particules colloïdales sont animées du mouvement brownien et ne sont pas sensibles à l'action de la pesanteur, elles ne sont pas sédimentables et cela même dans les centrifugeuses ordinaires. Il faut utiliser des ultracentrifugeuses qui tournent à environ 60 000 tours par minute avec une accélération 500 000 fois plus grande que celle de la pesanteur <sup>[5]</sup>.

#### **1.3.2. Propriétés électriques :**

On a vu que la charge des particules est due soit à des groupements ionisables, soit à des ions adsorbés. La charge effective d'une particule colloïdale diffère de sa charge réelle du fait des ions voisins, de signe opposé, qui adhèrent plus ou moins fermement à la particule. Les ions les plus proches de la particule y sont fortement retenus par attraction électrique : ils constituent la couche fixe (adhérente) ou couche de STERN, qui se déplace avec la particule, abaisse sa charge réelle et forme autour d'elle une graine, un écran protecteur. (Voir figure N°3) <sup>[5]</sup>.



**Figure N° 3 : Double couche et potentiel Zêta**

La concentration de ces ions diminue rapidement quand on s'éloigne c'est-à-dire que la distance « r » à la particule augmente. Il existe donc une deuxième couche diffuse ou couche de GOUY, qui n'adhère pas à la particule, mais qui forme un nuage autour d'elle, s'estompe et devient nulle à une certaine distance de la particule. Dans un champ électrique, ces ions, de signe contraire à celui de la particule, sont attirés par cette dernière mais sont attirés également par le pôle opposé. Ainsi, la charge effective tient compte d'une part de la couche fixe et d'autre part, de la couche diffuse.

Or, on sait que tout corps portant une charge électrique  $q$  exerce un potentiel  $V$ . dans le cas d'une particule colloïdale, il est très difficile de déterminer ce potentiel  $V$  dû à la charge réelle, mais on peut le décomposer en deux parties :

$$V = v + Z \quad (1)$$

Où :

$v$  : est un potentiel de contact qui varie brusquement de manière à peu près linéaire, à l'intérieur de la gaine que constitue la couche fixe.

**Z** : potentiel zêta ou potentiel électrocinétique est le seul vraiment important : il est dû, non pas à la charge réelle, mais à la charge effective de la particule-ou plutôt de l'ensemble (particule + double couche). Inversement, c'est cette charge effective et donc le potentiel zêta qui déterminent la mobilité de la particule ainsi que sa stabilité. Quand la charge diminue, le potentiel zêta diminue et la stabilité diminue même si la charge réelle ne varie pas [5].

#### **1.4. Déstabilisation des solutions colloïdales :**

.Les eaux brutes de surface ou les eaux souterraines contiennent des impuretés en solution colloïdale responsables de leur couleur et de leur turbidité (c'est le cas des molécules géantes des acides humiques et fulviques) ; ces eaux peuvent également renfermer des bactéries et des virus, qui, en raison de leurs dimensions sont aussi des particules colloïdales. La clarification d'une eau brute vise donc à éliminer ces substances sous forme de flocons séparables, par densité pour les plus gros, et par filtration pour les autres.

Pour flocculer une solution colloïdale, il faut donc tout d'abord neutraliser la charge des particules- c'est la coagulation et agglomérer les particules ainsi déstabilisées : c'est la floculation [5].

#### **2. La coagulation**

Les eaux naturelles contiennent le plus souvent des particules colloïdales chargées négativement dont le potentiel zêta atteint plusieurs dizaines de m-volts (ce potentiel est alors négatif). Pour neutraliser cette charge, il s'agit d'amener à proximité des particules des charges de signe opposé. Les agents coagulants que l'on ajoute contiennent donc des ions bivalents ou trivalents ; les plus utilisés sont des sels d' $Al^{3+}$  ou de fer ferrique  $Fe^{3+}$  comme le sulfate d'aluminium  $Al_2(SO_4)_3$  et le chlorure ferrique  $FeCl_3$ .

C'est pour cette raison et pour son coût raisonnable que le sulfate d'aluminium est l'agent coagulant le plus employé. Si le pH est convenablement ajusté, il y a polymérisation sous forme de chaînes qui entourent les particules colloïdales, les réunissent grâce à des ponts et permettent la formation de flocons susceptibles de précipiter. Pour que les particules colloïdales ne se repoussent plus, il faut que leur potentiel zêta soit faible ou nul. On détermine la quantité optimale d'agent coagulant à ajouter à une eau par des essais de floculation en laboratoire (Jar-test) [4].

## **2.1. Facteurs influençant la coagulation**

Afin d'optimiser la coagulation, il faut tenir compte de plusieurs variables : le pH, les sels dissous, la température de l'eau, le coagulant utilisé, les conditions de mélange, la turbidité et la couleur. Ces interrelations complexes empêchent de prédire quelles sont les concentrations optimales de coagulants.

### **2.1.1. Influence du pH**

Le pH est la variable la plus importante à prendre en considération au moment de la coagulation. Pour chaque eau, il existe une plage de pH pour laquelle la coagulation a lieu rapidement, plage qui est fonction du coagulant utilisé, de sa concentration et de la composition de l'eau à traiter. Lorsque la coagulation se produit hors de cette plage optimale, il faut soit augmenter la quantité de coagulant, soit se contenter d'une eau de moins bonne qualité. Pour les sels d'aluminium et de fer, la plage de pH optimale s'étend de 5.5 à 8.5. Pour certaines eaux il faut parfois corriger le pH à l'aide d'acides ou bases. Pour abaisser le pH, il est plus avantageux dans certains cas d'augmenter la quantité du coagulant. Lorsque le pH est optimal, les produits solubles d'aluminium ou de fer sont pratiquement inexistants. [4]

### **2.1.2. Influence de la température de l'eau**

On dispose de peu d'informations en ce qui concerne l'influence de la température de l'eau sur la coagulation. Toutefois, l'expérience révèle que durant l'hiver, lorsque la température de l'eau avoisine 0°C, le floc se décante plus difficilement et a tendance à pénétrer plus profondément dans les filtres. Une diminution de la température de l'eau entraîne une augmentation de sa viscosité ; c'est ce qui explique les difficultés de décantation du floc. On constate en outre que la plage du pH optimale se rétrécit.

### **2.1.3. Influence du coagulant**

Le choix du coagulant peut influencer les caractéristiques de la coagulation. On ne peut choisir un coagulant et en déterminer la concentration optimale pour une eau donnée qu'après avoir effectué des essais en laboratoire.

### **2.1.4. Influence du mélange**

Le mélange des produits chimiques se fait en deux étapes. A la première étape, le mélange est énergique et de courte durée : c'est le mélange rapide. Ce mélange a pour but principal de disperser les produits dans la totalité du volume d'eau à traiter. A la deuxième étape, le mélange est lent, il favorise les contacts entre les particules de floc, de turbidité et de couleur.

## 2.2. Les Coagulants

Les produits les plus utilisés pour la potabilisation des eaux sont les sels d'aluminium et de fer. On a longtemps pensé que ces sels libéraient des ions  $\text{Al}^{3+}$  et  $\text{Fe}^{3+}$  qui neutralisaient la force de répulsion entre les particules colloïdales et favorisaient ainsi la coagulation. On sait maintenant que les mécanismes qui entrent en jeu sont plus complexes et que les produits d'hydrolyse des sels d'aluminium et de fer sont des coagulants plus efficaces que les ions eux-mêmes.

### 2.2.1. Sels d'aluminium :

La réaction de base, lors de l'ajout de l'ion  $\text{Al}^{3+}$  dans l'eau, est la formation d'un précipité d'hydroxyde d'aluminium avec libération d'une certaine acidité (hydrolyse) :



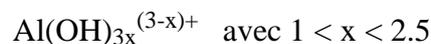
Cette acidité réagit sur certaines espèces en solution, notamment sur les bicarbonates (hydrogénocarbonates) :



La réaction globale est :

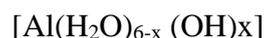


En fait, il ne s'agit ici que de réactions globales ; les mécanismes réels sont plus complexes et font intervenir des formes intermédiaires entre l'ion  $\text{Al}^{3+}$  et l'hydroxyde  $\text{Al}(\text{OH})_3$  de la forme :



Par exemple :  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$  et  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$

Ces ions sont aussi capables de s'hydrater, suivant la formule générale :

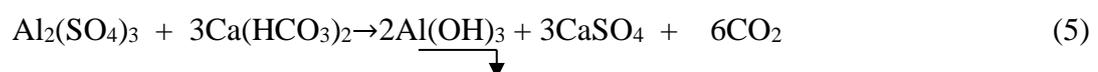


De tels ions complexes subissent ensuite une polymérisation qui correspond à un pontage entre les hydroxydes OH.

Les sels d'aluminium les plus employés sont :

- Le sulfate d'aluminium  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3, 18 \text{H}_2\text{O}$ ,
- Le chlorure d'aluminium  $\text{AlCl}_3$ ,
- L'aluminate  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Le pH chute plus ou moins rapidement suivant le pouvoir tampon de l'eau selon la réaction globale (ex. avec le sulfate d'alumine) :



On en déduit que 10 mg/L de sulfate d'alumine  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$  (0.81 mg/L en Al) diminue le TAC de 0.45 °F, forme 2.35 mg/L d'hydroxyde d'aluminium et libère 4 mg/L de  $CO_2$ .

L'aluminium est un amphotère qui est soluble sous forme d'aluminate aux pH acides et sous forme d'hydroxyde aux pH basiques. Le minimum de solubilité se manifeste proche de la neutralité. (5.8-7.2). Sa solubilité dans l'eau augmente avec le pH, la température et la minéralisation. Le pH optimal de coagulation floculation pouvant varier de 6 à 7,4 et le minimum de solubilité correspond à un pH de l'ordre de 6,5.

La manipulation du sulfate d'aluminium entraîne des problèmes respiratoires et irritation des muqueuses, de la peau et des yeux ainsi que le risque de la maladie de l'Alzheimer.

### 2.2.2. Polymères d'aluminium

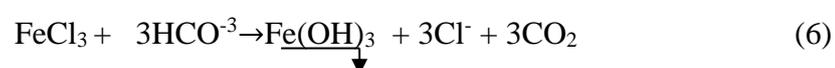
Les sels d'aluminium qu'on a vu précédemment, s'ils sont partiellement basifiés par ajout d' $OH^-$  avant leur mise en œuvre, vont « prépolymériser » des chaînes d'hydroxyde en laissant de nombreux sites  $Al^{3+}$  disponibles pour la coagulation. Le polychlorures d'aluminium  $Al_n(OH)_p(Cl)_{3n-p}$  ou polychlorosulfates d'aluminium  $(Al_n(OH)_p(Cl)_q(SO_4)_{3n-p})$  sont caractérisés par leur rapport molaire  $R = \frac{p}{n} = \frac{OH}{Al}$ . Plus ce rapport est élevé, plus les chaînes sont longues et meilleur est l'effet floculant du réactif, produisant rapidement un floc de bonne taille et dense (cohésif). En revanche, plus R croît, plus le produit devient instable. En pratique, R est généralement limité dans l'intervalle [0,4 – 0,6].

- Le polychlorures d'aluminium PAC
  - Il se présente sous forme d'un liquide dont la teneur en  $Al_2O_3$  est d'environ 10% et est stocké en citernes
  - La gamme de pH d'utilisation est de 6 à 7,5 (optimum 6,5). Ils ont toutefois moins d'impact sur le pH et l'alcalinité.
- Le polychlorure basique d'aluminium PCBA

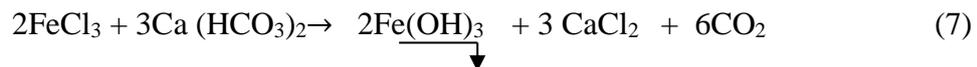
Si l'on veut pousser plus avant R, il faut préparer sur place le produit juste avant son utilisation et sans ce cas, R peut atteindre des valeurs supérieures à 2, ce qui permet une floculation rapide avec un taux de traitement minimum et une bonne élimination des matières organiques. Malheureusement, la préparation *in situ* n'est pas facile et ceci a jusqu'à présent, bloqué la diffusion de ce réactif.

### 2.3. Sels de fer :

La réaction globale est la même qu'avec les sels d'aluminium :



Par exemple avec le chlorure ferrique dans une eau bicarbonatée calcique :



Le chlorure ferrique existe sous forme solide et liquide, cette dernière étant la plus utilisée.

La forme solide, de formule théorique  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  a l'aspect d'une masse cristalline jaune brun; elle doit être maintenue à l'abri de la chaleur, car elle fond dans son eau de cristallisation à  $34^\circ\text{C}$ . La forme liquide commerciale est obtenue par dissolution du fer en milieu acide chlorhydrique avec formation de chlorure ferreux. Celui-ci est ensuite oxydé par le chlore en chlorure ferrique. La solution aqueuse ainsi obtenue de coloration rouge brune contient 41% de  $\text{FeCl}_3$  (600g/l) [1].

La réaction (6) permet de prévoir que 10 mg/L de solution chlorure ferrique de solution commerciale de chlorure ferrique à 41% par exemple, abaisse le TAC de  $0.38^\circ\text{F}$ , forment 2.7 mg/L de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  et libèrent 3,3 mg/L de  $\text{CO}_2$ .

Le chlorure ferrique est hautement corrosif. La forme anhydre est un agent déshydratant très puissant. Il doit être manipulé avec précautions. Il a un caractère d'acide fort et présente donc tous les risques dus aux produits corrosifs. Des projections dans les yeux peuvent causer des brûlures graves d'où le port obligatoire des lunettes lors de sa manipulation. Une éclaboussure sur la peau doit être lavée sans délai. Un contact prolongé cause des irritations et des brûlures.

#### ▪ Taux de traitement :

Des essais sont généralement nécessaires pour choisir le meilleur réactif et déterminer son taux de traitement. Le tableau N°3 donne des ordres de grandeur des taux d'emploi en  $\text{g/m}^3$  (ou mg/L) de sels de fer ou d'aluminium en traitement de clarification.

**Tableau N°3 :** Taux de traitement de sulfate d'alumine et chlorure ferrique pour différentes turbidités.

Type d'eau \ Dose ( $\text{g/m}^3$ )	Sulfate d'alumine	Chlorure ferrique pur $\text{FeCl}_3$	Chlorure ferrique solution 41%
Floculation sur filtre	3 à 10	1.5 à 4	3.5 à 10
Eaux peu chargées	15 à 30	6 à 12	15 à 30
Eau de turbidité moyenne	30 à 60	12 à 25	30 à 60
Eaux très turbides	60 à 150	25 à 60	60 à 150
Eaux très colorées	100 à 250	40 à 100	100 à 250

▪ **Les avantages et les inconvénients des coagulants** **Avantages**

Les avantages et inconvénients principaux des coagulants sont donnés dans le tableau N°4 :

**Tableau N°4** : Avantages et inconvénients du sulfate d'alumine, chlorure ferrique et PAC.

<b>Coagulant</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<p align="center"><b>Sulfate d'alumine <math>Al_2(SO_4)_3, 18</math> <math>H_2O</math></b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relativement peu coûteux,</li> <li>• Moins acide (il faut quand même porter un équipement de protection),</li> <li>• Très efficace pour enlever les matières en suspension, le phosphore total et les métaux.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elimination du COD réduite,</li> <li>• Les erreurs de dosage produisent une grande quantité de résidus d'aluminium, posant un risque potentiel pour la santé,</li> <li>• L'utilisation de l'alun, à cause de son interaction avec les substances alcalines provoque une réduction importante du pH.</li> </ul>
<p align="center"><b>Polychlorures d'aluminium P.A.C</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simplicité d'emploi : grâce à sa forme liquide, le PAC est peut être injecté à l'aide d'un matériel classique, et permet donc une économie énergétique,</li> <li>• Taux de résidus plus faible que le sulfate d'aluminium,</li> <li>• Moins d'impact sur le pH et l'alcalinité,</li> <li>• Le dosage est inférieur au sulfate d'alumine,</li> <li>• Formation des floccs de taille appréciable, de dimension uniforme et qui décantent bien,</li> <li>• L'avantage primordial de ces coagulants est qu'ils ne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son coût relativement élevé ,</li> <li>• Contient beaucoup d'impuretés,</li> <li>• Moins efficace pour l'élimination du carbone organique total (COD). (1996) [6].</li> </ul>

	<p>nécessitent pas ou peu d'adjuvants de floculation [7].</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Emploi dans des unités surchargées, la vitesse de réaction est très élevée</li> <li>• Efficacité en présence de turbidité élevée.</li> <li>• Efficace à basse température [8].</li> <li>• Meilleure cohésion des boues.</li> </ul>	
<p><b>Chlorure ferrique</b> <b>FeCl<sub>3</sub> à 41%</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le meilleur pour éliminer les matières organiques,</li> <li>• Bas prix,</li> <li>• Absence d'aluminium résiduel dans l'eau,</li> <li>• Les concentrations élevées de résidus de fer sont faciles à détecter.</li> <li>• Large gamme de pH (de 5.5 à 8.5) [1].</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un mauvais dosage produit une coloration rougeâtre et une concentration élevée de résidus de fer,</li> <li>• La forte concentration de résidus de fer risque de boucher les filtres et de tacher la lessive,</li> <li>• Très acide (le port d'un équipement de protection complet est de rigueur),</li> <li>• Grande quantité de boue.</li> </ul>

#### 2.4. Les coagulants organiques de synthèse :

Ce sont des molécules organiques de synthèse, à caractère cationique, de masse molaire moyenne. Ils sont disponibles uniquement sous forme liquide, en milieu aqueux.

Ces produits sont utilisables directement (pas de poste de préparation), en remplacement total ou partiel d'un coagulant minéral. Ils doivent être injectés après dilution en ligne.

Un coagulant organique ne modifie que très faiblement le pH et apporte très peu de salinité supplémentaire. Il conduit à une réduction importante du volume de boue produit. Les boues extraites sont plus denses, mais aussi plus collantes. Leur application n'est donc pas adaptable à n'importe quel type d'ouvrage de séparation.

### - Synergie avec un coagulant minéral

Dans certains cas, le coagulant organique seul ne permet pas d'atteindre la qualité d'eau obtenue avec un coagulant minéral. L'utilisation conjointe des deux types de coagulant permet une très nette diminution de la quantité de coagulant minéral nécessaire (40 à 80 %), tout en assurant un moindre volume de boue produit.

### 3. La floculation

Après diffusion rapide du coagulant, on ajoute en plus de l'agent coagulant, un aide-coagulant ou plutôt un floculant pour un grossissement des floccs par brassage homogène, d'autres particules colloïdales sont alors entraînées par balayage durant la sédimentation, ce qui augmente encore l'efficacité du procédé. Les eaux riches en colloïdes flocculeront donc plus aisément.

#### 3.1. Les floculants

Le floculant de synthèse peuvent être minéraux, naturels ou synthétiques ;

##### 3.1.1. Floculant organiques naturels

Ce sont des polymères naturels extraits de substances animales ou végétales.

##### ▪ Alginates

Les alginates de sodium sont obtenus à partir de l'acide alginique, lui-même extrait d'algues marines. Les constituants essentiels de cette structure polymérique sont l'acide man-uronique et l'acide gul-uronique. La masse molaire est de l'ordre de  $2 \cdot 10^3$  à  $10^4$ . Leur taux de traitement sont de 0,5 à 2 mg/L <sup>[1]</sup>

##### ▪ Amidons

Les amidons sont obtenus à partir de maïs, pommes de terre, tapioca ou extraits de graines végétales. Ce sont des polymères de glucopyranose ramifiés et non linéaires, parfois partiellement dégradés ( $\text{OH}^-$ ) ou dérivés (carboxy-éthyl-dextrone). Ils sont appliqués entre 1 et 10 mg /L, de préférence avec des sels d'aluminium.

Amidons et alginates sont des produits solides qui doivent être préparés en solution à une concentration de 5 à 10 g/L. Une fois dilués, leur biodégradation peut être rapide, surtout à plus de 20 °C.

##### ▪ Autres composés

Plusieurs polysaccharides naturels ont des propriétés floculantes (dérivés de la cellulose, gommes, tanins,)

### 3.1.2. Flocculant organiques de synthèse

On cite : les polyacrylamides. Ce sont des macromolécules à très longue chaîne obtenues par polymérisation de monomères d'acrylamides Ils sont caractérisés par une très grande masse molaire. Une dilution secondaire de ces produits est toujours nécessaire.

- Polymères anioniques : ce sont généralement des copolymères de l'acrylamide et de l'acide acrylique.
- Polymères neutres (ou non-ioniques) : ils sont composés essentiellement des polyacrylamides.
- Polymères cationiques : ce sont des copolymères d'acrylamide et d'un monomère cationique à N-quaternisé et chlorométhylé, généralement le MADAM (Méthacrylate de diméthylamino-éthyle) ou l'ADAM (Acrylate de diméthylamino- éthyle).

## 1. Généralités

L'aluminium est le métal le plus abondant sur terre, il constitue environ 8% de la croûte terrestre. On le trouve dans un certain nombre de minéraux et est également un composant normal du sol, des tissus des plantes et des tissus animaux. Le métal est utilisé pour la production d'un grand nombre d'articles, comprenant les matériaux de construction, les boîtes métalliques et les matériaux d'emballage, les pièces de véhicules et les carcasses d'avions [9].

Ce matériau léger, résistant et recyclable a connu un progrès fulgurant depuis la fin de la seconde guerre mondiale. Sa production annuelle a dépassé les 40 millions de tonnes à la fin de la dernière décennie et on prévoit un doublement d'ici 2030 [10].

Les sels d'aluminium sont utilisés par l'industrie pharmaceutique comme ingrédients importants des antiacides et des antidiarrhéiques. L'aluminium est également largement utilisé comme additif alimentaire et comme composant de matériaux d'emballage de produits alimentaires et également dans le traitement des eaux potables.

## 2. Exposition :

Puisque l'aluminium est omniprésent dans l'environnement et est utilisé dans divers produits et procédés, il est inévitable que la population y soit exposée quotidiennement. L'aluminium est présent dans certains aliments, spécialement dans les noix, les grains et les produits laitiers, particulièrement les fromages fondus. Il se peut aussi que l'aluminium libéré des ustensiles de cuisine, des contenants et des emballages en aluminium contribue à l'exposition par l'alimentation. On estime que l'apport total d'aluminium par toutes les sources alimentaires (excepté les médicaments en vente libre) pour un adulte est de 6 mg/j [11].

## 3. L'Aluminium dans l'eau potable :

La spéciation chimique de l'aluminium dans l'eau potable est d'un intérêt particulier car c'est la forme de l'aluminium qui détermine sa mobilité, sa biodisponibilité et sa toxicité. Le pH est l'un des facteurs qui déterminent la forme d'aluminium présente dans l'eau. La courbe d'évolution de l'aluminium dissous en fonction du pH ressemble à une parabole avec un minimum de solubilité très prononcé se situant approximativement au pH égal à 6,5 [12]. La solubilité de l'aluminium augmente à des pH moins élevés en raison de la formation de  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$  et de  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$  ; abrégé en  $\text{Al}^{3+}$  et parfois appelé aluminium libre. Le  $\text{Al}(\text{OH})_3$  solide est l'espèce prédominante à des pH se situant entre 5,2 et 8,8. Alors qu'à des pH supérieurs à 9, l'espèce prédominante est le  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  qui est soluble [13].

La plus grande partie de l'aluminium présent dans l'eau traitée est sous la forme d'aluminium dissous. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (methods standards*

*d'examen des eaux et des eaux usées*) définit l'aluminium dissous comme l'aluminium qui peut traverser un filtre de 0,45 µm. Cependant, comme seule l'utilisation d'un filtre de 0,22 µm garantit qu'aucune des plus petites particules ne reste en solution, il est recommandé de définir l'aluminium dissous comme l'aluminium qui peut traverser un filtre de 0,22 µm.

Avec des méthodes de traitement appropriées dans une usine traditionnelle, il est possible de réduire les niveaux d'aluminium dans l'eau traitée. La plus grande partie de l'alun utilisé comme coagulant est transformée en hydroxyde d'aluminium insoluble, qui se dépose ou est éliminé par filtration. Dans les meilleures conditions, un processus de traitement conventionnel peut atteindre dans l'eau traitée une concentration minimale d'aluminium d'environ 0,03 mg/L. On peut rencontrer des concentrations plus élevées dans l'eau potable si une dose insuffisante d'alun est utilisée [14].

La meilleure façon de contrôler la teneur en aluminium est l'optimisation des procédés de coagulation et de filtration. D'autres coagulants, tels le chlorure ferrique, le chlorure de polyaluminium et le sulfate de polyaluminium<sup>[15]</sup> peuvent être substitués au sulfate d'aluminium et engendreront des résiduels d'aluminium plus faibles. Les coagulants de substitution ne doivent être utilisés qu'après une évaluation approfondie de leur performance sur place.

#### **4. Effets sur la santé :**

##### **4.1. Absorption et biodisponibilité :**

Des chercheurs ont découvert que l'absorption d'aluminium chez les animaux ne se produit pas dans l'estomac où la plus grande partie de l'aluminium est convertie en une espèce monomérique soluble à un pH faible) ni dans l'intestin, à un pH presque neutre où la plus grande partie de l'aluminium prend une forme insoluble. La petite portion qui reste disponible pour le transport est la fraction qui a été complexée avec les molécules organiques, ce qui lui permet de rester soluble au pH plus élevé dans l'intestin grêle [16].

##### **4.1.1. L'absorption de l'aluminium contenu dans l'alimentation :**

En admettant que la contribution des aliments soit de 8 mg/j, que la contribution de l'air soit de 0,004 mg et que la contribution de l'eau soit de 0,26 mg, l'apport d'un adulte serait de 8,26 mg d'aluminium par jour. Autrement dit, environ 97 % de l'apport quotidien normal pour un adulte provient des aliments et le reste provient de l'eau potable. La contribution de l'air ambiant est négligeable. Cet apport quotidien moyen de 8,26 mg qui équivaut à environ 0,1 mg/kg p.c. par jour pour un adulte de 70 kg, peut être augmenté de façon importante chez les individus qui consomment de fortes doses d'antiacides à base d'aluminium ou d'aspirine tamponnée (jusqu'à environ 70-100 mg/kg par poids corporel par jour. Bien que les concentrations d'aluminium

dans le thé soient de 10 à 100 fois supérieures aux concentrations retrouvées dans l'eau potable. L'aluminium dans le thé se présente presque exclusivement (91-100 %) sous forme de complexes organiques à haut poids moléculaire qui ne sont pas facilement absorbés <sup>[17]</sup>.

#### **4.1.2. Facteurs d'absorption :**

- **L'acide citrique**

La composition des aliments consommés avec de l'eau potable contenant de l'aluminium a un effet important sur l'absorption de l'aluminium. Chez des rats ayant reçu de l'aluminium dans l'eau avec du jus de citron, du jus d'orange, du café ou du vin, l'absorption de l'aluminium augmentait respectivement de 1 800%, de 1 700 %, de 250 % et de 188 %. Dans le cas du jus de citron et du jus d'orange, cet effet était en grande partie dû à la formation de citrate d'aluminium non ionisé, qui devrait traverser facilement la barrière gastro-intestinale. En fait, dans l'alimentation humaine, l'acide citrique peut constituer le facteur le plus important pour la détermination de l'absorption de l'aluminium. Il est ressorti de plusieurs études que la présence de citrate dans les aliments ou dans les boissons augmentait de manière significative l'absorption de l'aluminium à partir des sources alimentaires <sup>[18]</sup>.

- **Le maltol**

Des études menées sur le lapin semblent indiquer que le maltol accroît également l'absorption de l'aluminium par voie gastro-intestinale. On a montré que les acides ascorbique et lactique favorisent l'absorption de l'aluminium chez les souris et chez les rats. Partridge *et al* <sup>[19]</sup> ont suggéré que plusieurs composés présents dans les aliments, notamment les acides ascorbique, citrique, lactique et malique, pourraient augmenter l'absorption d'aluminium dans l'intestin.

- **Le phosphate**

Le phosphate constitue également un facteur alimentaire important, en formant des complexes même à un pH faible et en rendant l'aluminium moins disponible pour l'absorption. On a avancé que la présence de phosphates dans l'alimentation était probablement le principal mécanisme « naturel » qui empêchait l'aluminium de passer dans le système de circulation sanguine. La silice peut agir comme le phosphate, puisque des études sur des humains volontaires suggèrent que la silice dissoute empêche l'absorption d'aluminium au niveau gastro-intestinal, possiblement en encourageant la formation d'espèces d'aluminosilicate insolubles dans le tractus gastro-intestinal <sup>[20]</sup>.

- **Certaines maladies**

Un examen critique décrit dans la littérature scientifique semble indiquer que certaines maladies accroissent l'absorption de l'aluminium par voie gastro-intestinale. Par exemple, l'insuffisance rénale chronique ou d'urémie que chez les individus normaux. L'absorption d'aluminium peut également être accrue par des modifications de la perméabilité de la paroi intestinale, ce qui affecte les personnes ayant des intestins plus perméables, les nourrissons et les personnes atteintes d'entéropathie [21].

- **L'âge**

L'âge peut également constituer un facteur important dans la détermination de l'absorption de l'aluminium. L'administration simultanée par voie orale d'hydroxyde d'aluminium et d'acide citrique a rapidement accru l'absorption de l'aluminium chez dix personnes en bonne santé, âgées de 77-88 ans par rapport à dix volontaires plus jeunes (69-76 ans). Ces résultats laissent entendre qu'il existe des différences d'ordre génétique dans la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique.

#### **4.2. Distribution et accumulation**

Dans les tissus des mammifères, on trouve les niveaux d'aluminium les plus élevés dans le squelette, les poumons, les reins, la rate et les glandes thyroïde et parathyroïde. L'expérience avec les dialysés a montré que l'aluminium pouvait s'accumuler dans le squelette et le cerveau. On signale que les niveaux normaux d'aluminium dans le sang humain se situent entre 1 et 16 µg/L. Après administration de l'hydroxyde d'aluminium dans l'eau potable à des rats mâles pendant 105 jours, les niveaux d'aluminium ont augmenté de 30 % dans les reins, de 60 % dans le foie et de 340 % dans le cerveau. On a établi une corrélation entre une réduction, même moyenne, de la fonction rénale chez les rats et une accumulation accrue d'aluminium dans les os. Une quantité sous-optimale de zinc dans l'alimentation augmente l'accumulation d'aluminium dans le cerveau [22].

#### **4.3. Excrétion**

Chez les humains, l'aluminium absorbé est excrété du corps par les reins. L'excrétion rénale est inefficace en raison de l'importante réabsorption de l'aluminium dans les tubes proximaux. Chez les patients atteints d'une dysfonction rénale, ou chez les personnes normales ayant une charge d'aluminium élevée, l'accumulation d'aluminium peut avoir des effets toxiques [22].

#### **4.4. Toxicité chez les humains :**

- **Sclérose latérale amyotrophique (SLA) et maladie de Parkinson (MP)**

Il a été suggéré que l'aluminium est impliqué dans l'étiologie de deux maladies neurodégénératives sévères : la sclérose latérale amyotrophique (SLA) et la maladie de Parkinson (MP). La SLA et la MP, que l'on observe avec une très grande fréquence chez les populations de Chamorros de Guam dans l'océan pacifique sont toutes les deux caractérisées par la perte de la fonction motoneurone et par la présence d'enchevêtrements neurofibrillaires dans le cerveau. On constate également une grande fréquence de la SLA dans deux autres régions, soit à l'ouest de la Nouvelle-Guinée et dans la péninsule Kili au Japon. Le sol et l'eau potable de Guam et des deux autres régions affectées sont très pauvres en calcium et en magnésium mais très riches en aluminium, en fer et en silicium. Après autopsie, on a signalé un dépôt intra neuronal de calcium et d'aluminium dans le cerveau de personnes atteintes de la SLA. Garruto et Yase ont avancé que des déficiences nutritionnelles chroniques en calcium et en magnésium pourraient entraîner une augmentation de l'absorption d'aluminium (et d'autres métaux), causant ainsi un dépôt d'aluminium dans les neurones. Ces dépôts pourraient interférer avec la structure des neurones et ils pourraient à la longue entraîner des enchevêtrements neurofibrillaires. La baisse spectaculaire de la fréquence de la SLA et de la MP après un changement des habitudes alimentaires et de l'approvisionnement local en eau potable est venu appuyer cette théorie [23].

- **Maladie d'Alzheimer (MA)**

On a également suggéré que l'aluminium constituait l'une des causes du déclenchement de la MA. Crapper-McLachlan et Farnell [24] ont constaté que les concentrations moyennes d'aluminium cérébral étaient moins élevées chez les témoins ( $1,9 \pm 0,7$  mg/kg poids sec) que chez les personnes atteintes de la MA (3,8 mg/kg poids sec). La présence d'aluminium dans les noyaux des plaques a conduit à la théorie que l'aluminium pourrait être impliqué dans le déclenchement d'événements menant à la formation de plaques et que le complexe d'aluminosilicate fournirait un point d'appui pour la précipitation de protéines observée dans les plaques. On pense que la dégénérescence des cellules par l'entremise du calcium et les enchevêtrements neurofibrillaires accélèrent la progression de la MA. L'aluminium n'a aucun effet bénéfique connu chez les humains. Aux fortes doses, on a observé des signes de neurotoxicité de l'aluminium chez les animaux. Des niveaux élevés d'aluminium dans le sang et dans les tissus de personnes qui souffraient de néphropathie chronique et qui suivaient une dialyse ont engendré une démence aiguë résultant d'une exposition iatrogénique à l'aluminium [25]

## 5. Optimisation

Afin de réduire au maximum le risque potentiel que représente l'aluminium résiduel dans l'eau traitée avec des coagulants à base d'aluminium, les procédés de traitement d'eau devraient être optimisés de façon à réduire le plus possible les niveaux d'aluminium résiduel. Une valeur cible opérationnelle donnée dépendra des caractéristiques de l'eau et du procédé de traitement utilisé. Une valeur opérationnelle de moins de 100 µg/L d'aluminium total est recommandée.

Pour les usines de traitement d'eau de surface conventionnelles qui utilisent des coagulants à base d'aluminium, l'optimisation du processus de clarification (optimisation de la dose de coagulant, contrôle du pH et mélange, floculation, sédimentation et filtration adéquats). Du point de vue du fonctionnement d'une usine, il est important de réduire l'aluminium total et dissous - dissous par l'optimisation du coagulant et total par l'élimination des particules par filtration.

L'optimisation du pH avant clarification est un moyen reconnu pour réduire les niveaux d'aluminium résiduel dans l'eau traitée. Cependant, toute mesure prise pour baisser le pH en vue de réduire l'aluminium résiduel doit être accompagnée d'une évaluation de l'effet de tels changements sur la corrosivité chimique de l'eau traitée.

L'utilisation d'autres coagulants ou d'autres procédés de traitement peut également être envisagée, mais la substitution d'un coagulant ou d'un procédé de traitement à un autre ne devrait être entreprise qu'après que la sécurité et l'efficacité du substitut aient été étudiées de façon approfondie.

Nous avons réalisé notre stage au sein de la station SEAAL sise à Boudouaou. Cette station de traitement d'eau potable a été mise en service en 1987. Elle dispose d'une superficie de 17 Hectares dont une capacité de stockage de 100 000m<sup>3</sup>.

Approvisionnée par le barrage de Keddara, elle alimente les wilayas d'Alger et de Boumerdès en eau en traitant une quantité de 540 000 m<sup>3</sup>/J.

#### Filière de traitement :

Les procédés de traitement de la station sont cités ci-dessous, et résumés dans la figure N°4.

- 1) **L'aération** : se fait par obturateurs (figure N°5).
- 2) **La préchloration** : avec le chlore gazeux, l'hypochlorite de calcium ou l'eau de javel.
- 3) **La démantanisation** : par ajout de permanganate de potassium.
- 4) **L'acidification** : par ajout d'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).
- 5) **L'adsorption** : sur charbon actif en poudre (C.A.P).
- 6) **La coagulation-floculation** : injection du sulfate d'alumine et du polyélectrolyte.
- 7) **La décantation** : sur décanteurs PULSATOR lamellaires à voile de boue (figure N°6).
- 8) **La filtration** : sur filtre à sable de type AQUAZUR V (figure N°7 et 8).
- 9) **La post-chloration** : avec le chlore gazeux, l'hypochlorite de calcium ou l'eau de javel.
- 10) **La neutralisation** : à la chaux éteinte.

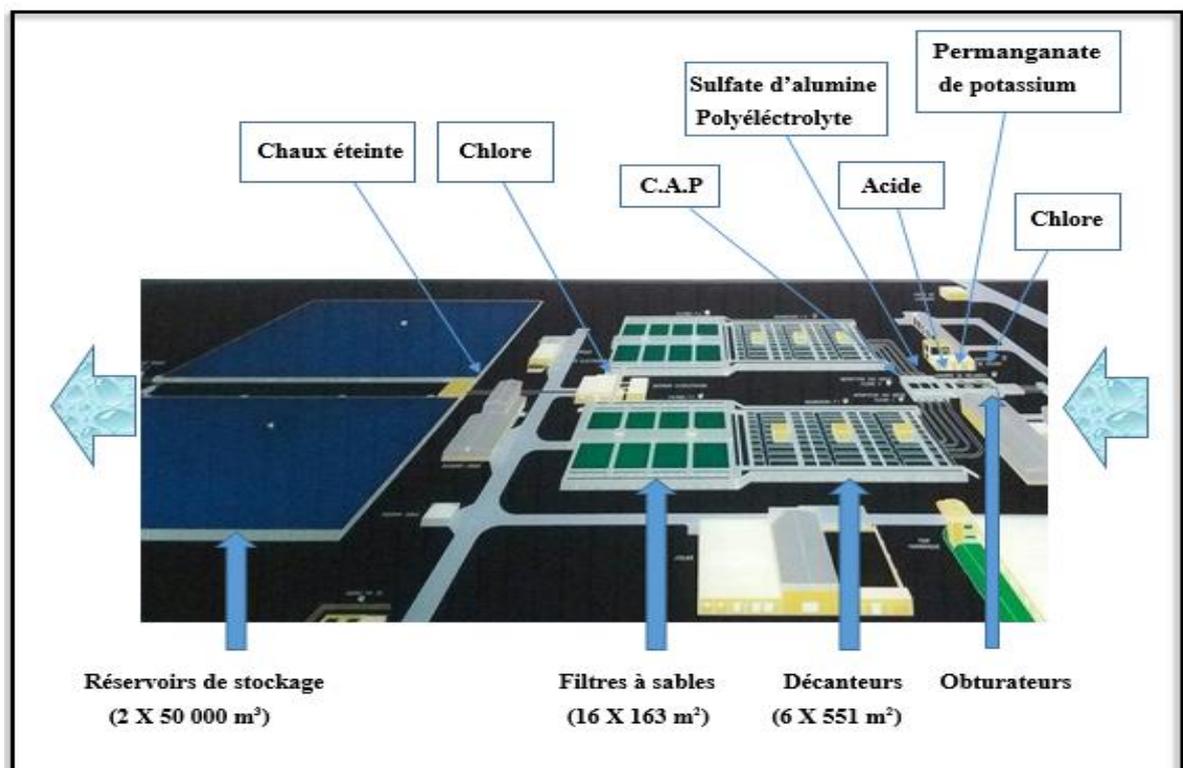


Figure N°4: Filière de traitement de la station SEAAL.



**Figure N°5 : Obturateurs**



**Figure N°6 : Décanteurs**



**Figure N°7 : Filtre à sable à l'arrêt.**



**Figure N°8 : Filtre à sable pendant la filtration**

### **1. Objectif de l'étude**

Le procédé de clarification choisi par la station SEAAL est la coagulation sur filtre et donc une injection d'un taux de traitement de 3 ppm de sulfate d'alumine.

Même sans dépasser les normes, les quantités d'aluminium résiduel total restent plus ou moins élevées.

La coagulation sur filtre implique aussi des lavages de filtres très fréquents et donc une consommation importante d'eau (850 m<sup>3</sup> d'eau par filtre).

Notre étude consiste à tester d'autres coagulants disponibles sur le marché qui représentent moins de risque pour la santé que le sulfate d'alumine. Et cela en faisant en sorte d'optimiser le procédé de coagulation-floculation sans pour autant altérer la qualité de l'eau potable.

## 1. Matériel et méthode

### 1.1.Prélèvement

L'échantillon d'eau du barrage de Keddara est prélevé au niveau du laboratoire par le robinet d'arrivée.

### 1.2.Dopage

L'eau du barrage de Keddara est une eau claire et peu turbide, elle est d'une turbidité annuelle moyenne de 6 NTU. Cependant en saison hivernale, la turbidité peut augmenter jusqu'à 15 NTU.

Pour étudier l'efficacité des coagulants sur les deux turbidités, nous avons en plus de l'eau prélevée, réalisé un dopage de notre échantillon par le biais d'un échantillon d'eau plus turbide ramené du point de rencontre entre les deux eaux : Béni-Amrane et Keddara. Nous avons mélangé les deux échantillons pour obtenir une turbidité de 15 NTU. L'échantillon est ensuite utilisé après homogénéisation.

### 1.3.Produits utilisés

Les coagulants que nous avons utilisés pour cette étude sont le sulfate d'alumine en cristaux, chlorure ferrique  $\text{FeCl}_3$  (41%) et le PAC 100 (10%).

**Tableau N° 5 :** Quelques propriétés des coagulants utilisés.

Coagulant Caractéristiques	Sulfate d'alumine $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3, 18 \text{H}_2\text{O}$	Chlorure ferrique $\text{FeCl}_3$ (41%)	PAC (10%)
<b>Forme</b>	Solide	liquide	liquide
<b>Couleur</b>	blanc	Rouge brun	Incolore à jaune
<b>Observation</b>	Produit acide, mais peu dangereux	Produit acide corrosif	Produit acide corrosif

### 1.4. Méthode

- 1) Jar-test (ou test de floculation) : Réalisé avec le flocculateur, pour chaque coagulant utilisé à savoir le sulfate d'alumine (S.A), le chlorure ferrique  $\text{FeCl}_3$  et le PAC 100. La procédure expérimentale est décrite dans l'annexe N°2.

- 2) L'eau décantée et siphonnée subit ensuite l'évaluation des paramètres suivants :
- Turbidité (voir annexe N°1),
  - pH (voir annexe N°1),
  - TAC (voir annexe N° 4),
  - Matière organique M.O (voir annexe N° 5),
  - Aluminium ou Fer résiduel (voir annexe N°6 et 7)
  - Chlorures (voir annex N°3).
  - Couleur ( méthode spectrophotométrique avec une longueur d'onde égale à 455nm),

Pour mesurer le taux d'aluminium total et de fer total résiduels dans l'eau avant et après filtration, nous avons filtré l'eau grâce à un papier filtre de 0.45 µm.

## 2. Evaluation de l'efficacité des coagulants

L'évaluation de l'efficacité de ces coagulants a été réalisée pour l'eau de barrage de Keddara et celle du mélange du barrage de Keddara et Beni Amrane sur une période allant du mois de février jusqu'au mois de mai.

### 2.1 Turbidité de 7 NTU

#### ➤ Prélèvement et caractérisation de l'eau brute

Le tableau N°6 représente les principales caractéristiques physico-chimiques de l'eau brute du barrage de Keddara.

**Tableau N°6 :** Caractéristiques physico-chimiques de l'eau brute

Prélèvement	Mars	Avril	Mai
<b>Turbidité (NTU)</b>	7	6	5
<b>pH</b>	7.97	7.89	8.01
<b>T (°C)</b>	18.8	19.4	19.7
<b>Conductivité (µs/cm)</b>	1088	1098	1160
<b>Matière organique (mg O<sub>2</sub>/L)</b>	2.1	2.1	2.2
<b>TAC (F°)</b>	16	16	16
<b>Al total (mg/L)</b>	0.005	0.004	0.006
<b>Fer total (mg/L)</b>	0.211	0.210	0.211
<b>Fer dissous (mg/L)</b>	0.002	0.004	0.001
<b>Chlorures (mg/L)</b>	99.67	102	106.35

➤ **Analyses :**

**2.2.1. Sulfate d'alumine (S.A)**

**- Jar-test**

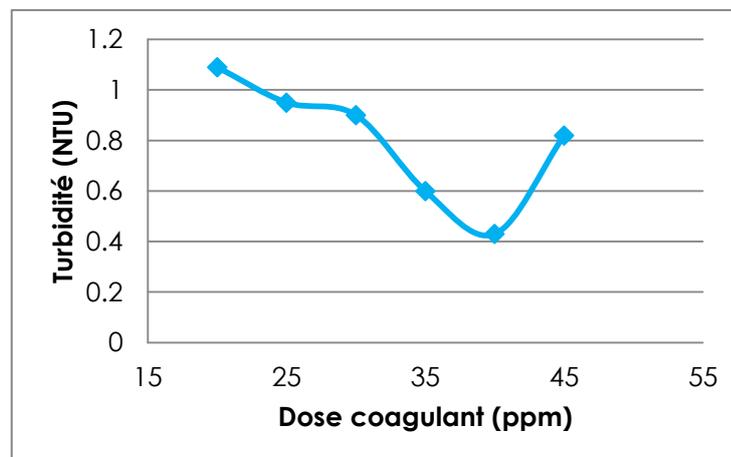
Afin de réaliser le procédé de coagulation dans les conditions optimales, nous avons fixé le pH à 7,3 qui est le pH optimal du sulfate d'alumine, cette valeur nous a été rapportée par l'unité SEEAL et est le résultat des études effectuées auparavant sur l'eau du Barrage Keddara. La correction du pH se fait par l'acide sulfurique  $H_2SO_4$ .

**a). Détermination de la dose optimale du coagulant**

Après avoir effectué deux essais de floculation, nous avons obtenu les résultats suivants (voir tableau N°7 et figure N°9).

**Tableau N°7 : Les résultats de jar-test «coagulation par SA»**

Dose du coagulant (ppm)	Turbidité (NTU)		Moyenne
	Essai n°1	Essai n°2	
20	1.07	1.11	1.09
25	0.84	1.07	0.95
30	0.80	0.99	0.90
35	0.67	0.58	0.60
<b>40</b>	<b>0.45</b>	<b>0.40</b>	<b>0.43</b>
45	0.80	0.81	0.82



**Figure N° 9:** Turbidité en fonction des concentrations de coagulant S.A.

Après coagulation, nous avons enregistré une turbidité moyenne de 0.43 NTU à une dose optimale de 40 ppm (comme le montre la courbe ci-dessus) avec un abattement de la turbidité qui est de 93,38 %.

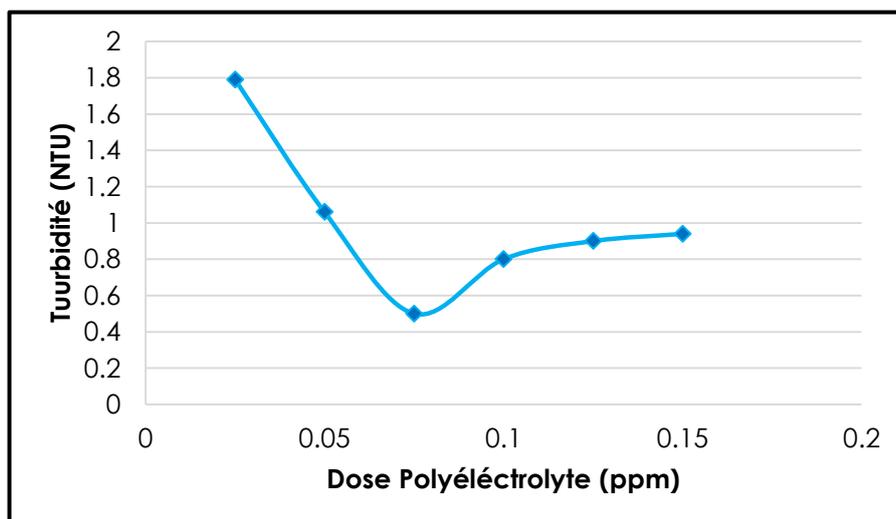
**b) Détermination de la dose optimale du flocculant (polyélectrolyte) :**

Après avoir déterminé la dose optimale du coagulant S.A qui est de 40ppm, des doses croissantes de flocculant (polyélectrolyte) ont été injectées selon le mode opératoire décrit dans l'annexe N°2.

Les résultats d'essai sont présentés dans le tableau N°8 et la figure N°10.

**Tableau N°8 :** Dose optimale du Polyélectrolyte avec le S.A (7 NTU)

Taux de traitement (ppm)	Turbidité (NTU)
0.025	1.79
0.05	1.06
<b>0.075</b>	<b>0.5</b>
0.1	0.8
0.125	0.9
0.15	0.15



**Figure N°10 :** Turbidité en fonction des doses du polyélectrolyte (7 NTU).

La dose optimale du polyélectrolyte pour le S.A pour une turbidité de 7 NTU est de **0.075 ppm**.

– Les analyses physico-chimiques d'eau traitée:

Les paramètres physico-chimiques avant et après traitement au sulfate d'alumine sont présentés dans les tableaux N°9 :

**Tableau N° 9** : Paramètres physico-chimiques après traitement avec le S.A (7 NTU).

Paramètres		Eau brute	Eau traite
Température (°C)		21	22.2
pH		7.3	7.14
Conductivité (µs/cm)		1160	1171
M.O (mg O <sub>2</sub> / L)		2.1	0.75
			0.92
			1.01
			<b>0.89 *</b>
TAC (°F)		17	13
			13
			14
			<b>13.66*</b>
Al résiduel avant filtration (mg/L)	Al total (mg/L)	0.05	0.404
			0.390
			0.439
			<b>0.411*</b>
	Al dissous (mg/L)	/	0.167
			0.139
			0.174
			<b>0.160*</b>
Al résiduel après filtration (mg/l)	Al total (mg/l)	/	0.249
			0.251
			0.262
			<b>0.245*</b>
	Al dissous (mg/L)	/	0.05
			0.46
			0.05
			<b>0.048*</b>

\* La moyenne de chaque paramètre.

D'après les résultats du tableau N°9, on note qu'avec une dose optimale de 40 ppm de S.A :

- La différence de pH avant et après traitement est de **0.2**,

- L'abattement de la matière organique est de **57.62 %**,
- Le TAC diminue de **3 °F**,
- Avant la filtration, la teneur en aluminium dissous est de 0.160 mg/L en moyenne mais après la filtration, elle baisse jusqu'à 0.04 mg/L. Quant à l'aluminium total, il est de 0.410 mg/L avant filtration et **0.245 mg/L** après filtration, une valeur qui dépasse la norme qui est de 0.200 mg/L en aluminium total [3].

### 2.1.2. Traitement avec le chlorure ferrique :

- **Jar-test :**

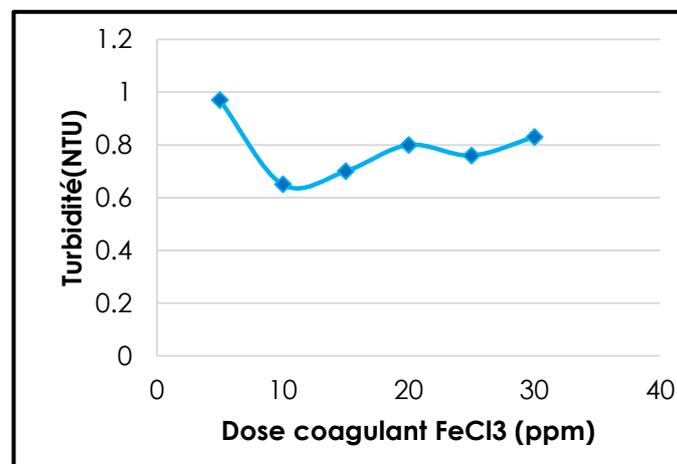
#### a) Détermination de la dose optimale du coagulant :

La correction du pH n'a pas été nécessaire car le pH de l'eau brute se situe dans la plage de pH optimale du chlorure ferrique (entre 5.5 et 8.5) [1].

Les résultats du jar-test réalisé pour le chlorure ferrique sont donnés dans le tableau N°10 et la figure N°11.

**Tableau N° 10 : Turbidité en fonction des doses du FeCl<sub>3</sub>.**

Dose du coagulant (ppm)	Turbidité (NTU)		Moyenne
	Essai n°1	Essai n°2	
5	0.93	1.01	0.97
<b>10</b>	<b>0.46</b>	<b>0.49</b>	<b>0.47</b>
15	0.58	0.59	0.58
20	0.6	0.62	0.62
25	0.71	0.72	0.71
30	0.76	0.76	0.83



**Figure N°11: Turbidité en fonction des doses du FeCl<sub>3</sub> pour l'eau brute (7 NTU)**

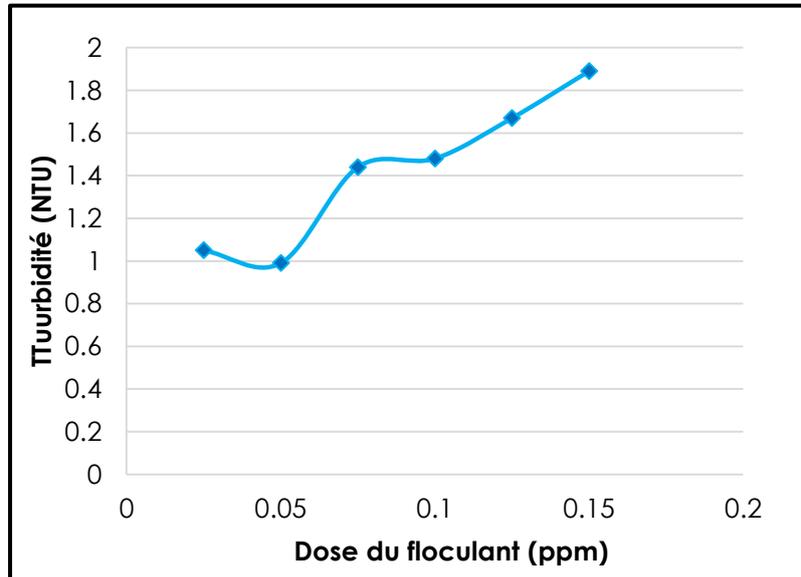
D'après la courbe de la figure N°11, la dose optimale du chlorure ferrique pour 7 NTU est de **10 ppm**.

**b) Détermination de la dose optimale du floculant (polyélectrolyte):**

Les résultats du jar-test réalisé pour le floculant avec le chlorure ferrique sont donnés dans le tableau N 11° et la figure N°12

**Tableau N°11 : Résultats du jar-test (FeCl<sub>3</sub> + polyélectrolyte) pour l'eau (7 NTU).**

Dose du floculant (ppm)	Turbidité (NTU)
0.025	1.05
<b>0.05</b>	<b>0.99</b>
0.075	1.44
0.1	1.48
0.125	1.67
0.15	1.89



**Figure N°12 : Turbidité en fonction des doses du polyélectrolyte (7 NTU)**

La dose optimale du polyélectrolyte nécessaire au chlorure ferrique pour l'eau de 7 NTU est de 0.05 ppm.

➤ **Les analyses physico-chimiques d'eau traitée**

Les résultats d'analyses après avant traitement au chlorure ferrique sont présentés dans le tableau N°12.

**Tableau N°12 : Paramètres physico-chimiques après traitement au FeCl<sub>3</sub> (7 NTU)**

Paramètres		Eau brute	Eau traitée
Température (°C)		21.1	23
pH		8.08	7.66
Conductivité (µs/cm)		1029	1050
M.O (mg O <sub>2</sub> / L)		1.68	0.42
			0.44
			0.45
			<b>0.42*</b>
TAC (°F)		17	14.80
			15.4
			15
			<b>15.06*</b>
Fer résiduel avant filtration (mg/L)	Fer total (mg/L)	0.211	0.644
			0.642
			0.666
			<b>0.649*</b>
	Fer dissous (mg/L)	0.03	0.062
			0.063
			0.062
			<b>0.062*</b>
Fe résiduel après filtration (mg/L)	Fer total (mg/L)	-	0.05
			0.04
			0.039
			<b>0.04*</b>
	Fer dissous (mg/L)	-	0.012
			0.015
			0.017
			<b>0.014*</b>
Chlorures [Cl <sup>-</sup> ] (mg/L)		106.35	125
			124.40
			125
			<b>124.80*</b>

\* : la moyenne de chaque paramètre

D'après les résultats du tableau N° 12, le taux de traitement de 10ppm de  $\text{FeCl}_3$  :

- Un abattement de la matière organique de **75%**.
- Diminution de TAC de **2 °F**
- Après injection du chlorure ferrique, le fer résiduel total environs **0.600 mg/L**. Cette valeur dépasse la norme qui est de 0.3 mg/L en fer total <sup>[3]</sup> mais après avoir filtré notre échantillon, cette valeur diminue jusqu'à atteindre une valeur de **0.04 mg/L** de fer total et **0.01 mg/L** de fer dissous.
- Pour les chlorures, après apport de 19 mg/L à l'eau brute, le total est de 125 mg/L et reste inférieure à la norme qui est de 500 mg/L <sup>[3]</sup>.

### 2.1.3. Polychlorure d'aluminium (PAC 100) :

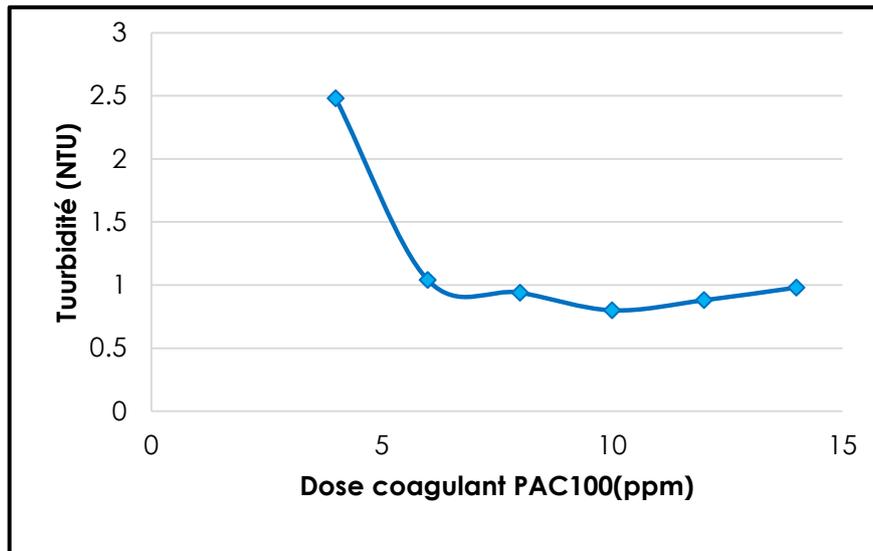
#### ➤ Jar-test :

##### a) Dose optimale du coagulant :

Les résultats du jar-test réalisé pour le PAC sont donnés dans les tableaux N°13 et la figure N°13.

**Tableau N°13** : Turbidité en fonction des doses du PAC (7 NTU).

Dose du coagulant (ppm)	Turbidité (NTU)			Moyenne
	Essai 2	Essai 3	Essai 4	
4	1.11	1.06	3.9	2.48
6	1.04	1.09	1.01	1.04
8	0.62	0.92	0.95	0,94
<b>10</b>	<b>0.56</b>	<b>0.72</b>	<b>0.83</b>	<b>0.73</b>
12	0.68	0.82	0.95	0.88
14	0.7	0.97	0.99	0.98



**Figure N°13:** Turbidité en fonction des doses du PAC (7 NTU)

La courbe de la turbidité (figure N°13) nous indique que la valeur optimale du coagulant PAC100 est de 10 ppm.

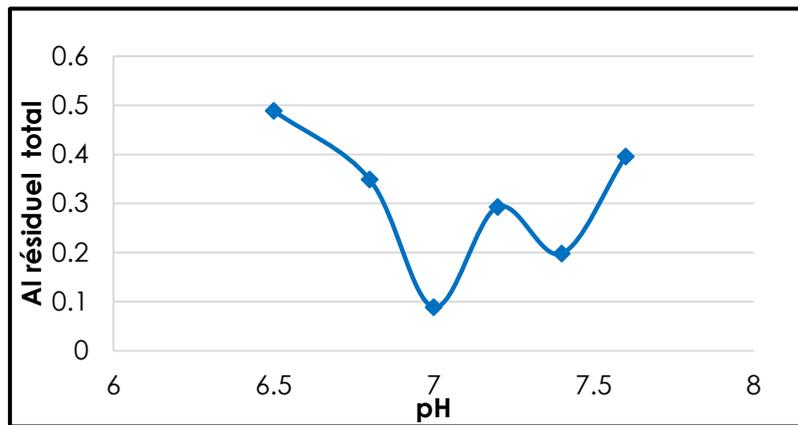
**b) Influence du pH sur l'aluminium résiduel :**

Après avoir fixé la dose optimale de la turbidité du PAC pour l'eau brute de Keddara, nous avons réalisé un autre jar-test en fixant cette fois la dose trouvée (10 ppm) dans le but de déterminer le pH optimal du taux d'aluminium minimal et avons fait varier le pH pour des valeurs de (6.5 – 6.8- 7 – 7.2 – 7.4- 7.6). Après décantation et siphonage de l'eau, nous avons mesuré l'aluminium total résiduel dans l'eau.

Les résultats de l'influence du pH sur l'aluminium sont donnés dans le tableau N°15 et figure N° 14.

**Tableau N°14 :** Influence du pH sur l'aluminium total pour le PAC

pH avant traitement	pH après traitement	Al total (mg/l)
6.5	6.4	0.489
6.8	6.76	0.349
<b>7</b>	<b>6.87</b>	<b>0.089</b>
7.2	7.1	0.198
7.4	7.28	0.145
7.6	7.34	0.396
7.8	7.41	0.487



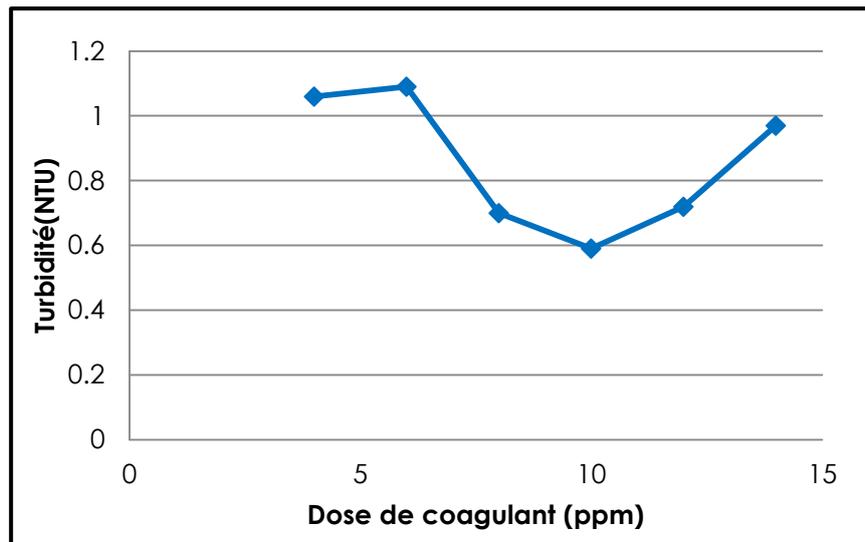
**La figure N°14 :** Influence du pH sur l'aluminium total pour le PAC

Les résultats ont montré que la valeur minimale d'aluminium résiduel a été obtenue pour un pH égal à 7, nous avons ensuite fixé cette valeur de pH et réalisé des essais en faisant varier les doses de coagulant PAC afin de confirmer que la dose optimale du PAC à cette valeur de pH n'a pas changé. Les résultats des essais sont présentés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau N°16 :** Turbidité de l'eau pour pH=7 des doses du PAC

<b>Dose du coagulant PAC (ppm)</b>	<b>Turbidité (NTU)</b>
4	1.06
6	1.09
8	0.70
<b>10</b>	<b>0.59</b>
12	0.72
14	0.97

La figure N°15 représente la turbidité en fonction des doses du PAC.



**Figure N°15:** La turbidité en fonction concentration du coagulant PAC à pH=7.

En effet, d'après les résultats obtenus, nous avons obtenu une dose optimale de 10 ppm assurant un meilleur rendement d'élimination de la turbidité (91.57%) à un pH égale à 7.

D'après les résultats du tableau N°15 on remarque qu'après traitement avec le PAC :

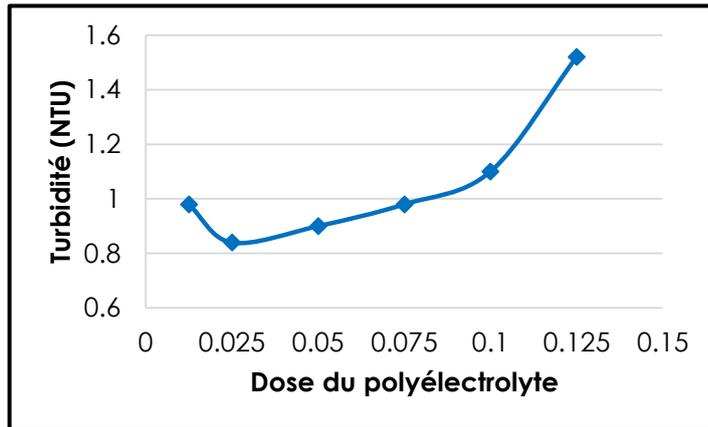
- Il n'y a pas une grande variation de pH (une différence de 0.1 à 0.2 avant et après traitement).
- La valeur minimale d'aluminium résiduel a été obtenue pour un pH égal à 7. C'est donc le pH optimal de l'aluminium résiduel.

#### c) Dose optimale du polyélectrolyte :

Les résultats du jar-test réalisé pour le flocculant avec le PAC sont donnés dans le tableau N°17 et la figure N°16.

**Tableau N°17:** Turbidité en fonction des doses du polyélectrolyte pour le PAC (7NTU)

Dose du polyélectrolyte (ppm)	Turbidité (NTU)
0.0125	0.98
<b>0.025</b>	<b>0.84</b>
0.05	0.90
0.075	0.98
0.1	1.1
0.125	1.52



**Figure N°16** :La turbidité en fonction de la concentration du polyélectrolyte.

La dose optimale du polyélectrolyte nécessaire au PAC pour l'eau de 7 NTU est de 0.025 ppm

➤ **Analyses physico-chimiques après traitement avec le PAC 100**

Les résultats d'analyses après traitement avec le PAC sont rassemblés dans le tableau N°16

**Tableau N°17 : Analyses physico-chimiques après traitement avec le PAC 100**

Paramètres		Eau brute	Eau traite
Température (°C)		21	22.6
Conductivité (µs/cm)		1141	1146
pH		7	6.8
M.O (mg O <sub>2</sub> / L)		1.87	0.63
			0.63
			0.75
			<b>0.67*</b>
TAC (°F)		17	16
			14.5
			16
			<b>15.5*</b>
Al résiduel avant filtration (mg/L)	Al total	0.05	0.254
			0.230
			0.270
			<b>0.251*</b>
	Al dissous	/	0.050
			0.053
			0.052
			<b>0.052*</b>
Al résiduel après filtration (mg/L)	Al total	0.02	0.120
			0.145
			0.154
			<b>0.139*</b>
	Al dissous	/	0.050
			0.042
			0.054
			<b>0.048*</b>
[Cl <sup>-</sup> ] (mg/l)		106.35	141.82
			148.90
			148.90
			<b>146.54*</b>

\* : La moyenne de chaque paramètre

Selon les résultats ci-dessus on remarque qu'un taux de traitement de **10ppm** de PAC permet :

- Un abattement de la matière organique de **64.17%**
- Une légère diminution du pH de 0.1 à 0.2,
- La valeur de chlorures atteint 146.5 mg/L mais reste inférieure à la norme de potabilité,

- La teneur en aluminium dissous est de **0.052 mg/L** avant filtration et de **0.04 mg/L** après filtration. Quant à l'aluminium total, elle est de **0.251 mg/L** avant filtration et **0.139mg/L** après filtration, cette valeur respecte la norme qui est de **0.200 mg/L** en aluminium total.

## 2.2. Analyse pour l'eau de 15 NTU :

Avant d'effectuer les analyses nous avons caractérisé l'eau de mélange de 15 NTU. (Voir tableau N°18)

**Tableau N°18:** Caractéristiques physico-chimiques de l'eau brute (15 NTU)

Prélèvement	Mars	Avril	Mai
<b>pH</b>	7.8	7.9	8.1
<b>T (°C)</b>	19.4	19.7	21
<b>Conductivité (µs/cm)</b>	1098	1160	1172
<b>Matière organique (mg O<sub>2</sub>/L)</b>	2.1	2.3	2.44
<b>TAC (°F)</b>	16	16	16
<b>Al total (mg/L)</b>	0.004	0.006	0.006
<b>Fer total (mg/L)</b>	0.211	0.210	0.211
<b>Fer dissous (mg/L)</b>	0.004	0.001	0.004
<b>Chlorure (mg/L)</b>	102	106.35	106.35

### 2.2.1. Sulfate d'alumine (S.A)

#### ➤ Jar-test :

##### a) Détermination de la dose optimale du coagulant :

Les turbidités obtenues après le jar-test pour une turbidité de 15 NTU sont présentées dans le tableau N°19 et figure N°17.

Tableau N° 19 : La turbidité en fonction des doses du S.A (15 NTU)

Doses du S.A (ppm)	Turbidité (NTU) 1 <sup>er</sup> essai	Turbidité (NTU) 2 <sup>ème</sup> essai	Moyenne (NTU)
40	1.07	1.07	1.07
45	1.04	1.01	1.025
<b>50</b>	<b>0.97</b>	<b>0.91</b>	<b>0.94</b>
55	1.02	0.99	1.00
60	1.19	1.23	1.21
65	1.25	1.27	2.52

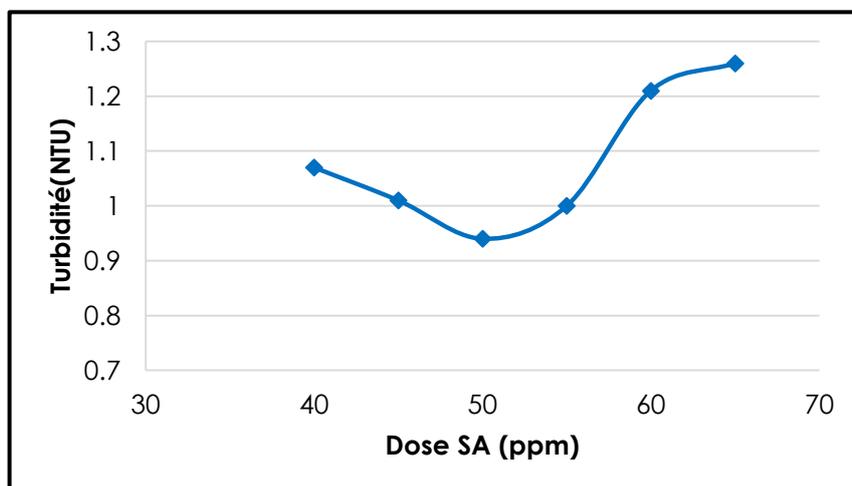


Figure N°17: Turbidité en fonction des doses du S.A pour l'eau de mélange (15 NTU)

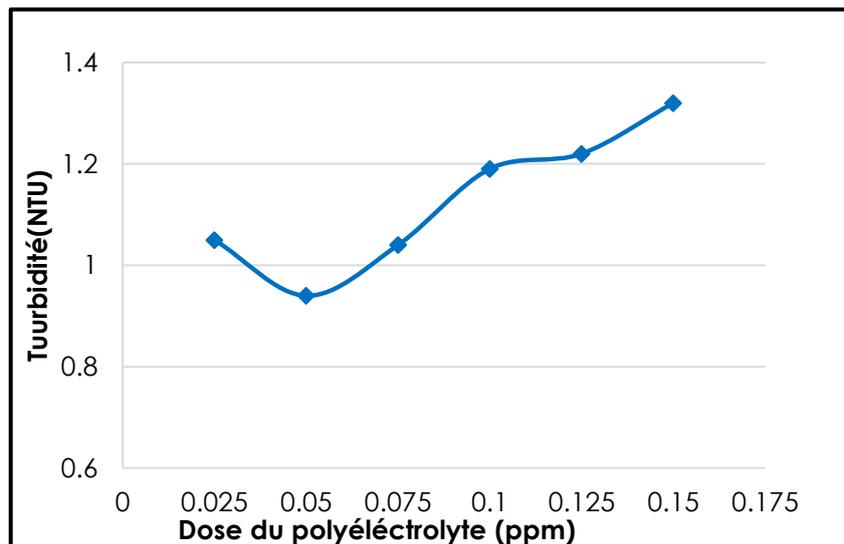
On note que la dose optimale du S.A pour une turbidité de 15 NTU est de **45 ppm**.

**b) Détermination de la dose optimale du flocculant (polyélectrolyte) :**

La dose optimale du flocculant polyélectrolyte avec le S.A pour l'eau de mélange (15 NTU) est déterminée à partir des turbidités obtenues dans le tableau N°20 et la figure N°18.

**Tableau N°20** : Dose optimale du polyélectrolyte avec le S.A pour l'eau de mélange (15 NTU)

Taux de traitement (ppm)	Turbidité (NTU)
0.025	1.05
<b>0.05</b>	<b>0.94</b>
0.075	1.04
0.1	1.19
0.125	1.22
0.15	1.32

**Figure N°18**: Turbidité en fonction des doses du polyélectrolyte pour l'eau de mélange (15 NTU) .

La dose optimale du polyélectrolyte pour le S.A pour une turbidité de 15 NTU est de **0.05 ppm**.

➤ Les analyses physico-chimiques de l'eau traitée

**Tableau N°21** : Paramètres physico-chimiques après traitement avec le S.A pour l'eau de mélange (15 NTU).

Paramètres		Eau brute	Eau traitée
Température (°C)		21	22.2
pH		7.3	7.14
Conductivité (µs/cm)		1317	1326
M.O (mg O <sub>2</sub> / L)		2.1	1.26
			1.09
			1.17
			<b>1.2*</b>
TAC (°F)		16	14
			14
			13.8
			<b>13.9*</b>
Al résiduel avant filtration (mg/l)	Al total (mg/l)	0.05	0.290
			0.315
			0.341
			<b>0.341*</b>
	Al dissous (mg/l)	/	0.06
			0.056
			0.07
			<b>0.06*</b>
Al résiduel après filtration (mg/l)	Al total (mg/l)	/	0.244
			0.240
			0.251
			<b>0.245*</b>
	Al dissous (mg/l)	/	0.05
			0.46
			0.05
			<b>0.049*</b>

\* : la moyenne de chaque paramètre

D'après les résultats du tableau N°18, on conclue qu'avec un taux de traitement de 45 ppm de SA

- La différence de pH avant et après traitement est de 0.2
- L'abattement de la matière organique est de **43 %**,
- Le TAC diminue de **2.1 °F**,

- Avant la filtration, la teneur en aluminium dissous est de 0.060 en moyenne mais après la filtration, elle baisse jusqu'à 0.04 mg/L. Quant à l'aluminium total, il est de 0.341 mg/L avant filtration et **0.245 mg/L** après filtration, une valeur qui dépasse la norme qui est de 0.200 mg/L en aluminium total.

### 2.2.2. Le chlorure ferrique FeCl<sub>3</sub>

#### ➤ Jar-test :

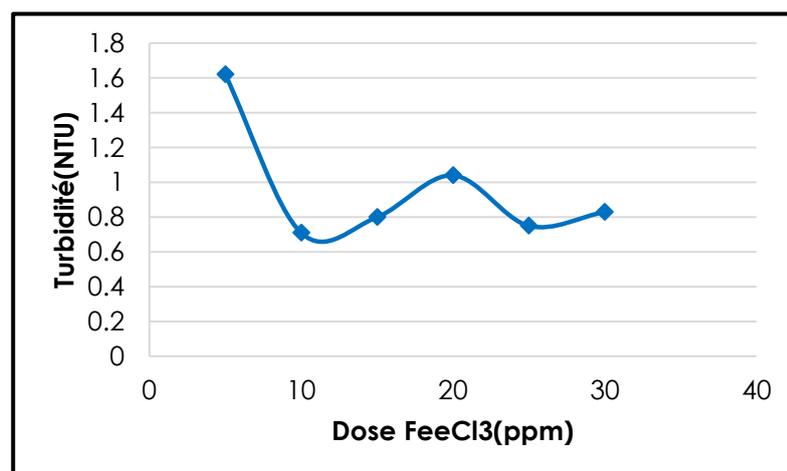
##### a) Détermination de la dose optimale du coagulant

La correction du pH n'a pas été nécessaire car selon la littérature, le pH de l'eau brute se situe dans la plage de pH optimale du chlorure ferrique (entre 5.5 et 8.5)

Les résultats du jar-test réalisé pour le chlorure ferrique sont donnés dans le tableau N23° et la figure N°19

**Tableau N°22 :** Turbidité en fonction des doses du FeCl<sub>3</sub>

Dose du coagulant (ppm)	Turbidité (NTU)		Moyenne
	Essai n°2	Essai n°2	
5	2.02	1.21	1.62
<b>10</b>	<b>0.68</b>	<b>0.75</b>	<b>0.71</b>
15	0.79	0.82	0.8
20	1.19	0.90	1.04
25	0.73	0.78	0.75
30	0.77	0.81	0.83



**Figure N°19:** Turbidité en fonction des doses du FeCl<sub>3</sub> (15 NTU)

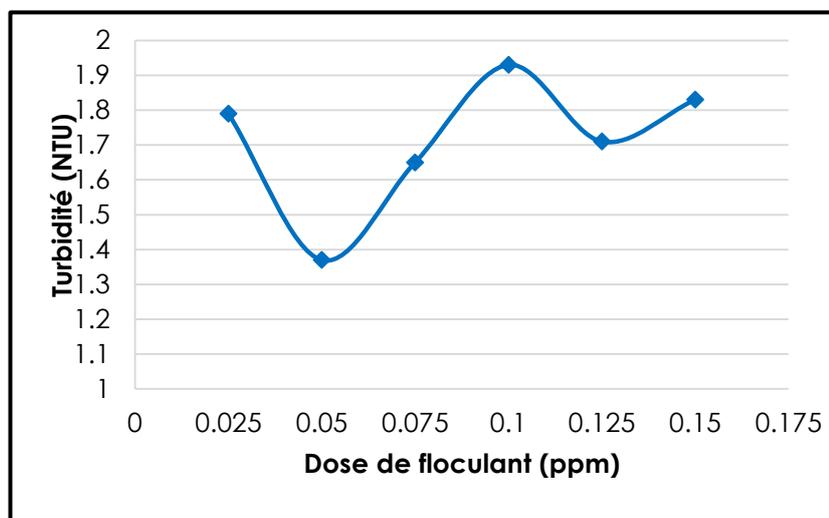
La dose optimale du chlorure ferrique pour 15 NTU est de **10 (ppm)**.

**b) Dose optimale du flocculant :**

Les résultats du jar-test réalisé pour le flocculant avec le chlorure ferrique sont donnés dans le tableau N°23 et la figure N°20.

**Tableau N°23:** Turbidité en fonction du polyélectrolyte avec le  $\text{FeCl}_3$  (15 NTU).

Dose du flocculant (ppm)	Turbidité (NTU)
0.025	1.79
<b>0.05</b>	<b>1.37</b>
0.075	1.65
0.1	1.93
0.125	1.71
0.15	1.83



**Figure N°20 :** Dose optimale du polyélectrolyte pour le chlorure ferrique (15 NTU)

La dose optimale du polyélectrolyte nécessaire au chlorure ferrique pour l'eau de 15 NTU est de 0.05 ppm.

➤ **Les analyses physico-chimiques d'eau traitée**

Les résultats d'analyses après avant traitement au chlorure ferrique sont présentés ci-dessous.

**Tableau N°24 :** Paramètres physico-chimiques après traitement avec le FeCl<sub>3</sub> pour l'eau de 15 NTU

Paramètres		Eau brute	Eau traitée
Température (c°)		21.1	23
pH		8.08	7.66
Conductivité (µs/cm)		1203	1364
M.O (mg O <sub>2</sub> / L)		2.44	0.96
			1.17
			1.17
			<b>1.24*</b>
TAC		16	14.80
			15
			14.80
			<b>14.85*</b>
Fer résiduel avant filtration (mg/l)	Fer total (mg/l)	0.211	0.607
			0.575
			0.752
			<b>0.644*</b>
	Fer dissous (mg/l)	0.03	0.062
			0.063
			0.062
			<b>0.062*</b>
Fe résiduel après filtration (mg/l)	Fer total (mg/l)	-	0.05
			0.04
			0.06
			<b>0.05*</b>
	Fer dissous (mg/l)	-	0.012
			0.015
			0.017
			<b>0.014*</b>
Chlorures [Cl <sup>-</sup> ]		106.35	125
			124.40
			125
			<b>124.80*</b>

\* : La moyenne de chaque paramètre

D'après les résultats on conclue que pour 10ppm de FeCl<sub>3</sub> on trouve :

- Un abattement de la matière organique de **56 %**.
- Diminution de TAC de **1.15 °F**.

- Après injection du chlorure ferrique, le fer résiduel total dépasse la norme (environs **0.644 mg/L**) mais après la filtration, cette valeur diminue jusqu'à atteindre une valeur de **0.05 mg/L** de fer total et **0.014 mg/L** de fer dissous.
- Pour les chlorures, après apport de 19 mg/l à l'eau brute, le total est de 125 mg/L et reste inférieure à la norme qui est de 500mg/l

### 2.2.3. Polychlorure d'aluminium (PAC 100) :

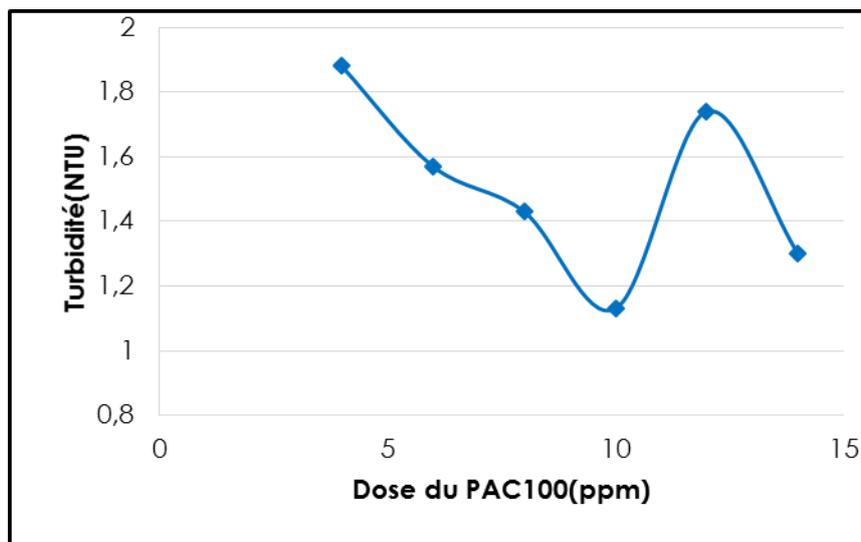
**Jar-test :**

#### a). Détermination de la dose optimale du coagulant

Les résultats du jar-test réalisé pour le PAC sont donnés dans le tableau N°25 et la figure N°21.

**Tableau N°25 :** Turbidité en fonction des doses du PAC pour l'eau de mélange (15 NTU)

Dose du coagulant (ppm)	Turbidité (NTU)		Moyenne
	Essai 1	Essai 2	
4	2	1.76	1.88
6	1.89	1.25	1.57
8	1.75	1.17	1.43
<b>10</b>	<b>1.11</b>	<b>1.05</b>	<b>1.13</b>
12	1.52	1.45	1.74
14	2.07	1.7	1.3



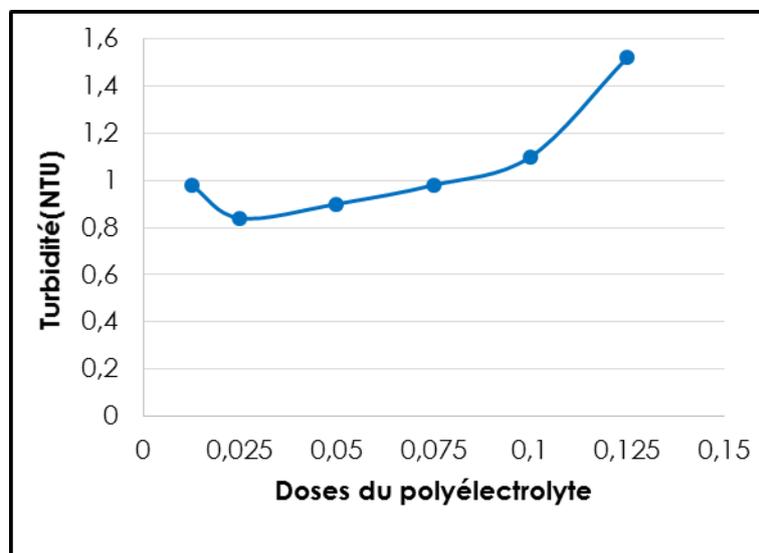
**Figure N°21:** Turbidité en fonction des doses du PAC pour l'eau de mélange (15 NTU)

**b). Dose optimale du polyélectrolyte :**

Les résultats du jar-test réalisé pour le flocculant avec le PAC sont donnés dans le tableau N°26 et la figure N°22.

**Tableau N°26 :** Turbidité en fonction des doses du polyélectrolyte pour le PAC (15 NTU)

Dose du polyélectrolyte (ppm)	Turbidité (NTU)
0.0125	0.98
<b>0.025</b>	<b>0.84</b>
0.05	0.90
0.075	0.98
0.1	1.1
0.125	1.52



**Figure N°22 :** Dose optimale du polyélectrolyte pour le chlorure ferrique (15 NTU)

**1.2.3.1. Analyses physico-chimiques d'eau après traitement avec le PAC 100**

Les résultats d'analyses après traitement avec le PAC sont rassemblés dans le tableau N°27 :

**Tableau N°27:** Analyses physico-chimiques après traitement avec le PAC 100

Paramètres		Eau brute	Eau traitée
Température (°C)		21	22.6
Conductivité (µs/cm)		1141	1146
pH		7	6.9
M.O (mg O <sub>2</sub> / L)		2.1	0.56
			1.09
			0.63
			<b>0.76*</b>
TAC (°F)		16	14
			14.8
			14.4
			<b>14.3*</b>
Al résiduel avant filtration (mg/l)	Al total (mg/l)	0.05	0.254
			0.230
			0.270
			<b>0.251*</b>
	Al dissous (mg/l)	/	0.050
			0.053
			0.052
			<b>0.052*</b>
Al résiduel après filtration (mg/l)	Al total (mg/l)	0.02	0.125
			0.150
			0.145
			<b>0.140*</b>
	Al dissous (mg/l)	/	0.050
			0.042
			0.054
			<b>0.048*</b>
[Cl <sup>-</sup> ] (mg/l)		106.35	141.82
			148.90
			148.90
			<b>146.54*</b>

\* : La moyenne de chaque paramètre.

D'après les résultats du tableau N°23 on remarque qu'avec une dose de **10ppm** de PAC, il ya :

- Un abattement de la matière organique de **60.09%**
- Une légère diminution du pH de 0.1 à 0.2
- La valeur de chlorures atteint 146.5 mg/L mais reste inférieure à la norme de potabilité.

- Après traitement avec le PAC, la teneur en aluminium dissous avant filtration est de **0.052 mg/L** et jusqu'à **0.048 mg/L** après filtration. Quant à l'aluminium total, il est de **0.251 mg/L** avant filtration et **0.140 mg/L** après filtration, cette valeur respecte la norme qui est de **0.200 mg/L** en aluminium total.

### 3. Comparaison entre les coagulants étudiés: (voir tableaux suivants)

Tableau N° 28 : Comparaison des analyses pour 7 NTU

Paramètres		E.B	SA	FeCl <sub>3</sub>	PAC
Dose optimale (ppm)		/	<b>40</b>	<b>10</b>	<b>10</b>
pH optimal		/	<b>7.3</b>	<b>8.1</b>	<b>7</b>
pH après traitement		/	<b>7.14</b>	<b>7.66</b>	<b>6.8</b>
Conductivité (µs/cm)		/	<b>1171</b>	<b>1050</b>	<b>1146</b>
Abattement de la turbidité (%)		/	<b>94</b>	<b>93.21</b>	<b>92</b>
Abattement M.O (%)		/	<b>57.61</b>	<b>73.8</b>	<b>64.17</b>
TAC (°F)		17	<b>13.66</b>	<b>15.06</b>	<b>15.5</b>
Al total (mg/l)	avant filtration	0.05	<b>0.411</b>	/	<b>0.251</b>
	après filtration	/	<b>0.254</b>	/	<b>0.154</b>
Al dissous (mg/l)	avant filtration	/	<b>0.160</b>	/	<b>0.056</b>
	après filtration	/	<b>0.048</b>	/	<b>0.050</b>
Fer total (mg/l)	avant filtration	0.211	/	0.649	/
	après filtration	/	/	<b>0.004</b>	/
Fer dissous (mg/l)	avant filtration	0.02	/	0.062	/
	après filtration	/	/	<b>0.014</b>	/
Chlorures (Cl <sup>-</sup> ) (mg/l)		106.35	/	<b>124.80</b>	<b>126.27</b>
ASF		/	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>6</b>
VS		/	<b>M</b>	<b>R</b>	<b>L</b>
Couleur (mg/L Platine)		17	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>4</b>

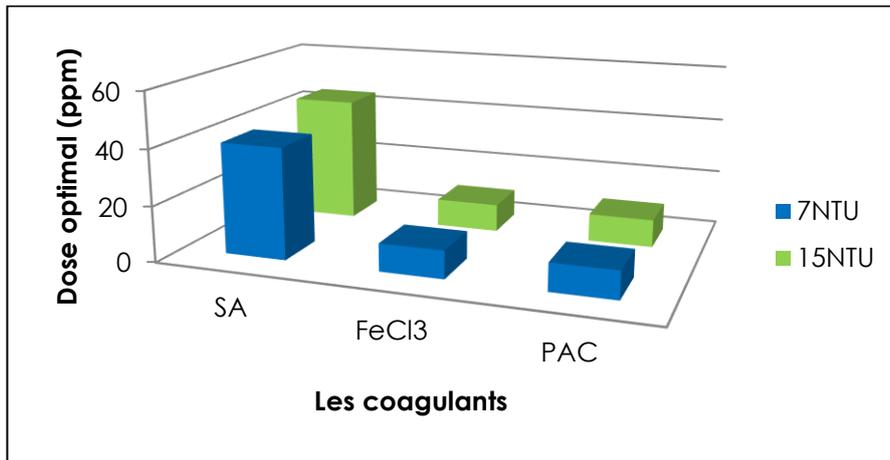
**Tableau N°29** : comparaison des analyses pour 15 NTU.

Paramètres		E.B	SA	FeCl <sub>3</sub>	PAC
Dose optimale (ppm)		/	45	10	10
pH optimal		/	7.3	8.1	7
pH après traitement		/	7.1	7.66	6.9
Conductivité (µs/cm)		/	1326	1364	1146
Abattement turbidité (%)		/	94	93.21	92
Abattement M.O (%)		/	43	44	60
TAC (°F)		16	13.9	14.85	14.3
Al total (mg/l)	avant filtration	0.05	0.341	/	0.251
	après filtration	/	0.245	/	0.140
Al dissous (mg/l)	avant filtration	/	0.06	/	0.052
	après filtration	/	0.049	/	0.048
Fer total (mg/l)	avant filtration	0.211	/	0.644	/
	après filtration	/	/	0.005	/
Fer dissous (mg/l)	avant filtration	0.02	/	0.062	/
	après filtration	/	/	0.014	/
Chlorure (mg/l)		106.35	/	124.80	146.54
ASF		/	8	8	6
VS		/	M	R	L
Couleur (mg/L Platine)		25	4	7	4

ASF : aspect des floes,  
1 : pas de floes,  
2 : légère opalescence,  
4 : petits points,

- 6 : flocs de dimension moyenne,
- 8 : bon flocs,
- 10 : excellents flocs.
- VS : vitesse de sédimentation
- L : lente,
- M : moyenne,
- R : rapide.

La figure N°22 représente les taux de traitement des coagulants pour les deux turbidités 7 et 15 NTU.



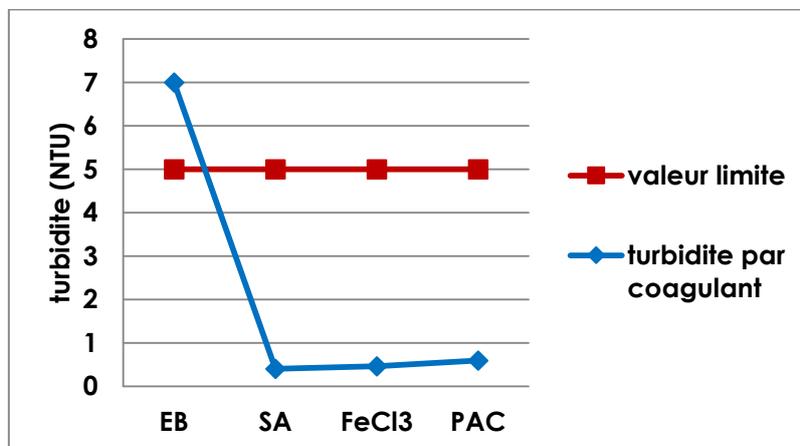
**Figure N°23 :** Les doses optimales des coagulants pour 7 et 15 NTU.

D’après les résultats que nous avons obtenus, le taux de traitement optimal du sulfate d’alumine S.A est entre 40 et 45 ppm et est 4 fois supérieure à ceux du PAC et du chlorure ferrique et cela, pour les deux turbidités 7 et 15 NTU.

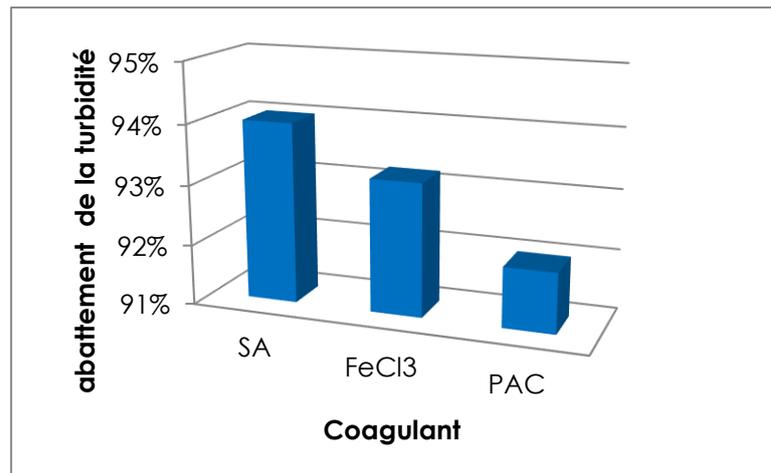
4. **Représentation graphique des paramètres évalués :**

4.2. **La Turbidité :**

La figure N°23 représente l’élimination de la turbidité en fonction des coagulants et la figure N°24 représente le taux d’abattement de turbidité en fonction des coagulants.



**Figure N°24 :** Turbidité de l’eau traitée par les coagulants par rapport à la valeur limite.

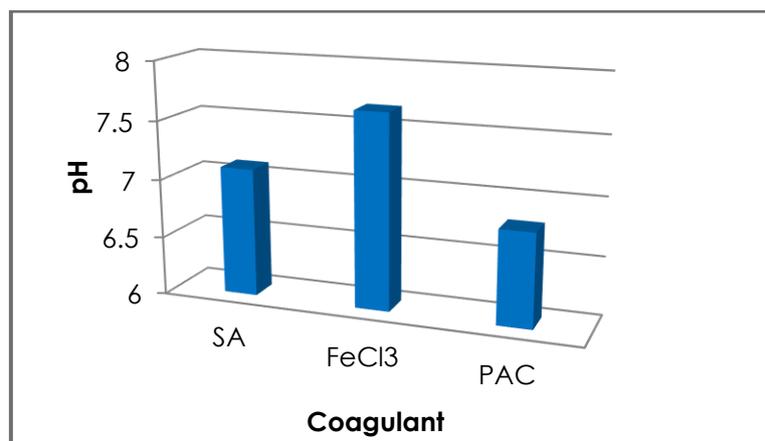


**Figure N°25 :** Taux d'élimination de la turbidité pour chaque coagulant.

D'après la figure ci-dessus, le chlorure ferrique et le PAC sont aussi efficaces que le sulfate d'alumine pour l'élimination de la turbidité, avec des taux qui varient entre 92 et 96 %.

### 4.3. Le pH

La figure N°25 représente pH de l'eau traitée pour les trois coagulant étudié pour l'eau traitée du barrage de Keddara.

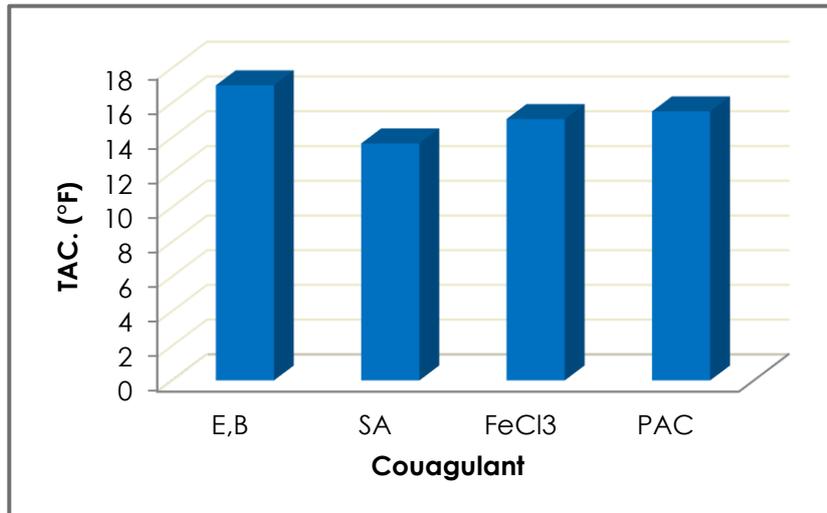


**Figure N°26 :** Le pH après traitement pour les coagulants étudiés.

Le pH de l'eau traitée avec les coagulant SA, FeCl<sub>3</sub> et PAC respecte la norme de potabilité qui se situe entre 6.5 et 9 [3].

### 4.4. Le TAC :

La figure N°26 représente TAC de l'eau du barrage de Keddara avant et après traitement par les coagulants étudié.

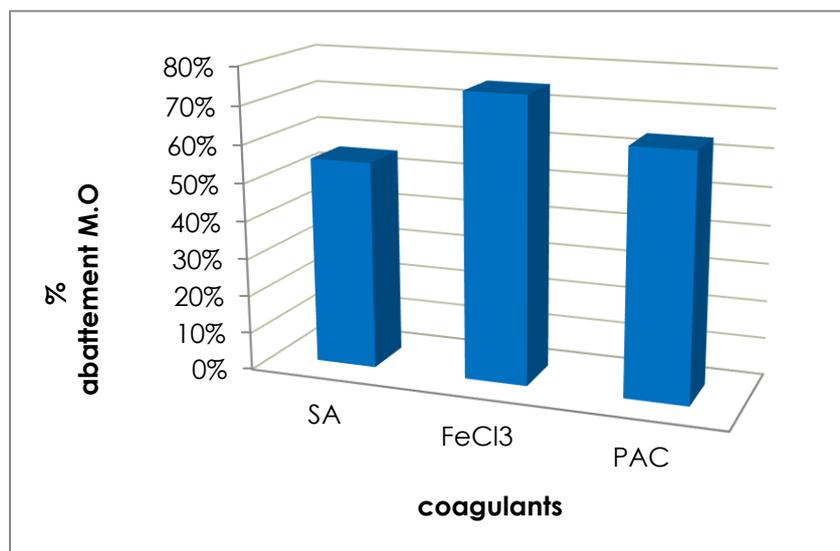


**Figure N°27** : TAC avant et après traitement pour les coagulants étudiés.

D'après ces résultats on voit que les trois coagulants n'affectent pas beaucoup de TAC mais c'est le PAC qui l'affecte le moins (une diminution de 1 à 2 °F).

#### 4.5. La Matière organique M.O

La figure N°27 représente les taux d'élimination de la matière organique pour l'eau du barrage de Keddara après traitement avec les coagulants étudiés.



**Figure N°28** : Taux d'élimination de la M.O pour l'eau du barrage de Keddara en fonction des trois coagulants.

#### 4.6. L'Aluminium résiduel

- Aluminium total avant filtration

La figure N°28 représente la teneur d'aluminium total avant filtration traitée par les trois coagulants pour l'eau du barrage de Keddara.

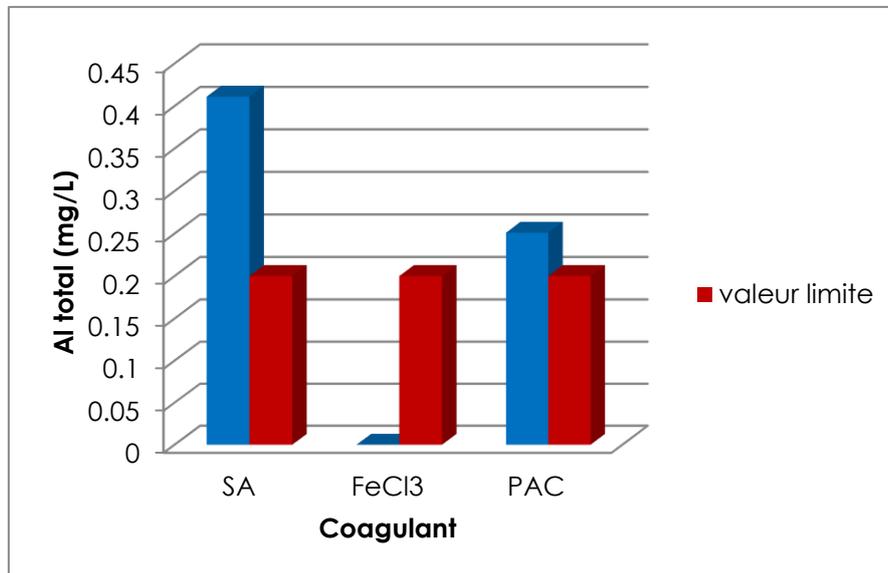


Figure N°29 : taux d'Al total avant filtration pour les trois coagulants.

- Aluminium total après filtration

La figure N°29 représente la teneur d'aluminium total après filtration des eaux traitée (7 NTU) par les trois coagulants.

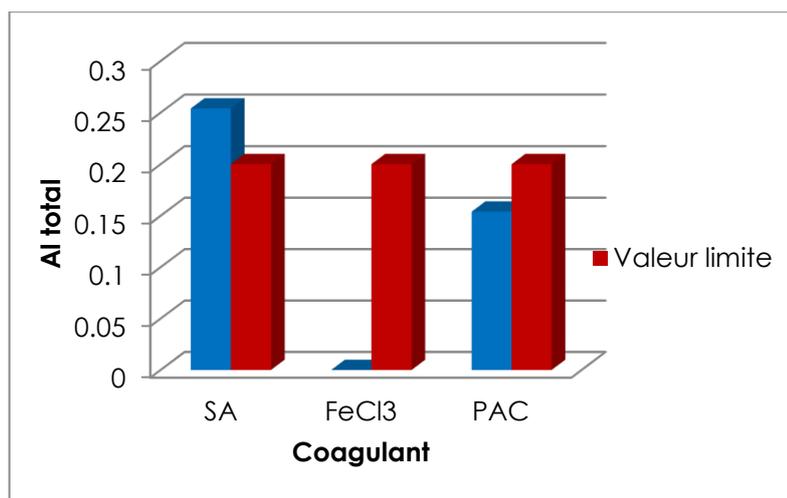
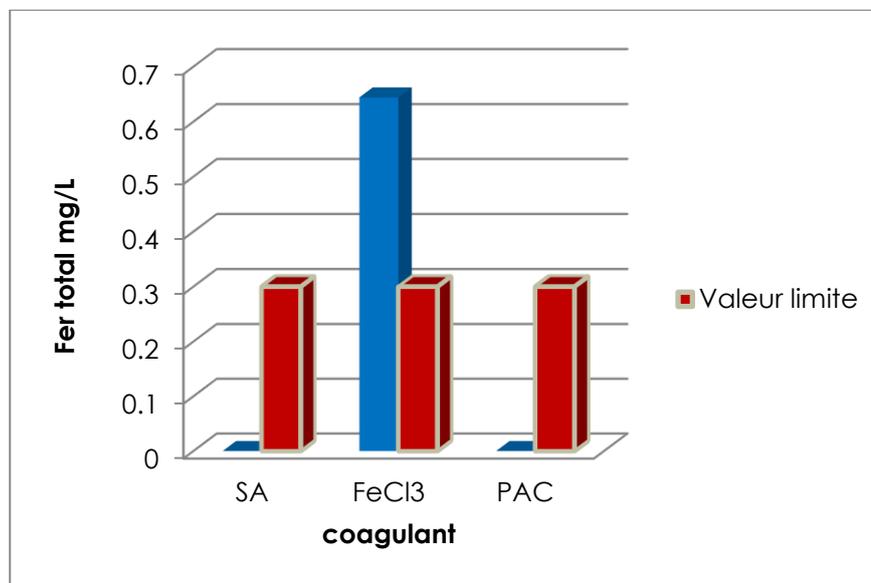


Figure N°30 : Taux d'Aluminium total après filtration pour les trois coagulants.

- Selon les résultats que nous avons obtenus, après filtration, le traitement avec le PAC engendre un taux d'aluminium résiduel total plus faible qu'avec celui du sulfate d'alumine (S.A)
- Avec le chlorure ferrique il n'y a pas d'apport d'aluminium.

#### 4.7. Le fer total résiduel

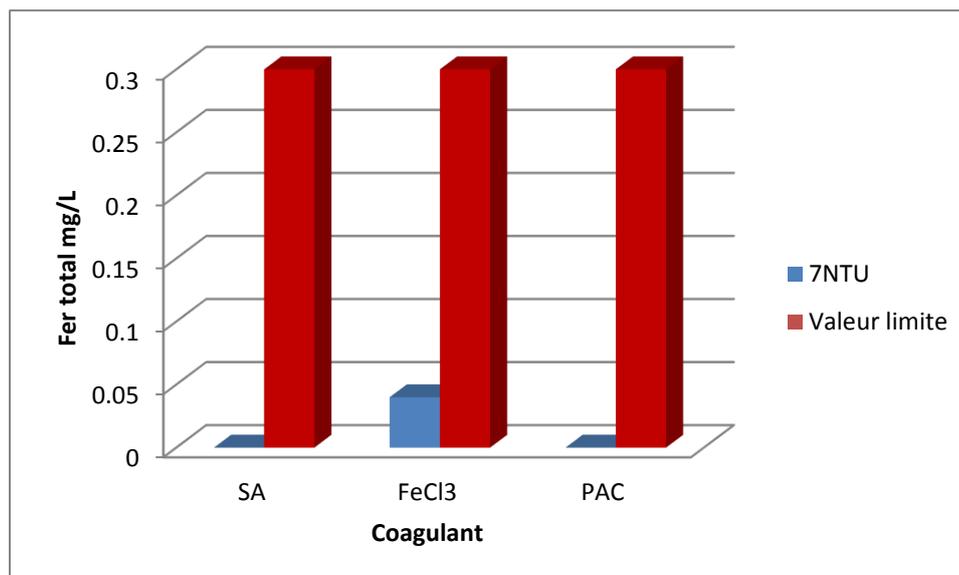
- Fer total avant filtration



**Figure N°31 :** Taux de Fer total avant filtration pour eau traitée.

Il n'y a pas d'augmentation de fer résiduel dans l'eau traitée avec le PAC et le SA contrairement à celle traitée par le FeCl<sub>3</sub> où elle dépasse la valeur maximale admissible.

- Fer total après filtration



**Figure N°32:** taux de Fer total après filtration pour les trois coagulants.

Le fer résiduel après traitement au chlorure ferrique avant filtration est d'une valeur de 0.650 mg/L de fer total et de 0.06 mg/L de fer dissous mais après avoir filtré, nous avons obtenu une valeur moyenne de 0.015 mg/L de fer dissous, et de 0.04 mg/L fer total qui est largement inférieure à la norme.

4.8. Les chlorures :

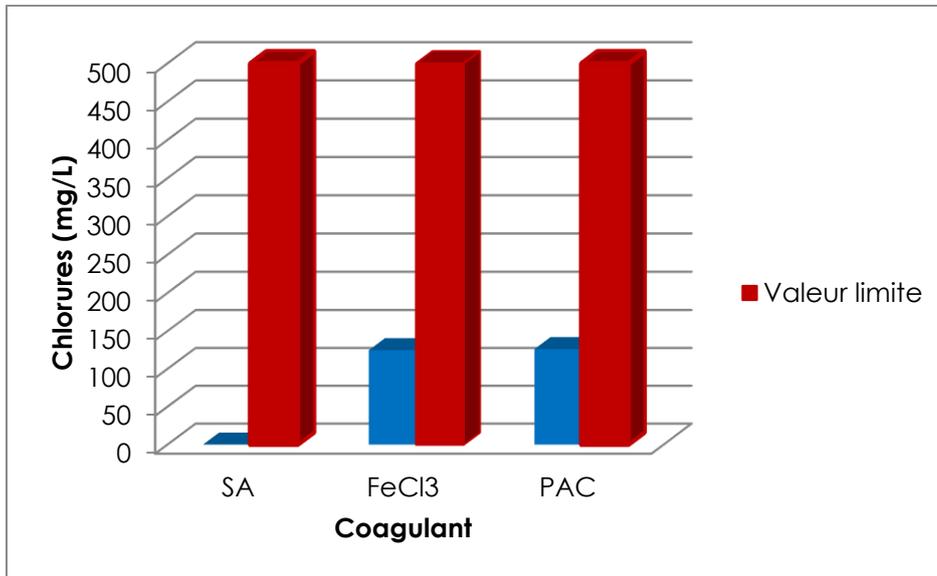


Figure N°33 : Apport des ions chlorures dans l'eau après traitement.

Les taux de chlorures apporté par le chlorure ferrique et par le PAC ne dépassent pas la valeur limite.

6.8. La couleur :

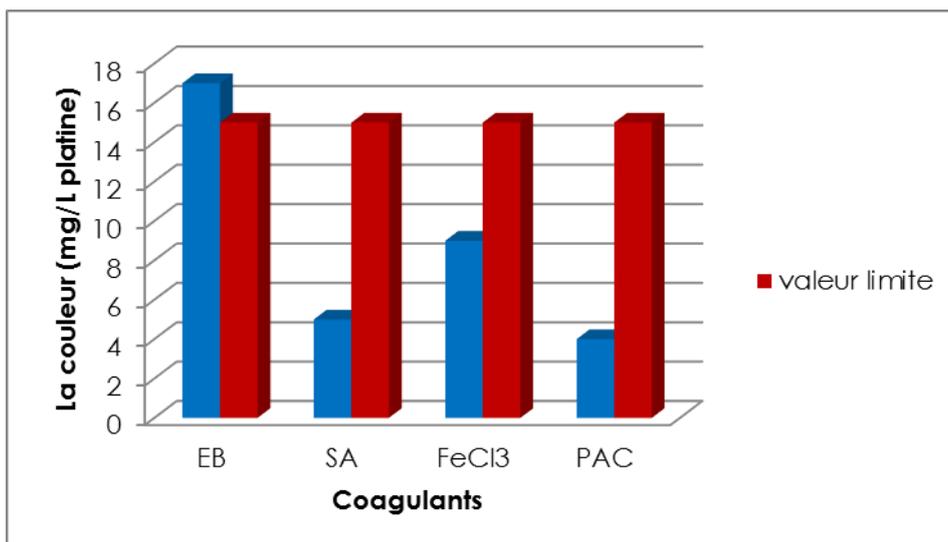


Figure N°34 : L'élimination de la couleur de l'eau après traitement avec les coagulants étudiés.

On voit que l'élimination de la couleur est bien réalisée avec les trois coagulants.

## 5. Etude économique :

### 5.2. Le prix des coagulants :

Le choix du coagulant doit tenir compte en plus de son efficacité, de son coût ainsi que de la facilité de manipulation

A partir du taux de traitement déterminé à l'échelle laboratoire, nous avons calculé la consommation journalière de coagulant à l'échelle semi-industrielle sachant que durant notre période de stage le débit de la station était de 518 400 m<sup>3</sup>/J puis nous avons déterminé le coût total comme suit :

$$\text{Consommation (Kg/m}^3\text{)} \times \text{Prix unitaire (DA/Kg)} \times \text{Débit (m}^3\text{/J)} = \text{Coût total (DA/J)}$$

Le coût total de chaque coagulant est représenté dans le tableau suivant :

**Tableau N° 30:** Tableau comparatif de consommation journalière en coagulants.

Coagulant	Taux de traitement (ppm)	Prix unitaire (DA/Kg)	Coût final DA/J
Sulfate d'alumine	40	39	808 080
Chlorure ferrique (41%)	10	32	165 000
PAC 100 (10%)	10	62	321 160

D'après les résultats du tableau N°26, on peut remarquer que :

- Le sulfate d'alumine est le coagulant le plus coûteux pour la station malgré son faible prix unitaire.
- Le chlorure ferrique est le moins onéreux pour la station.
- Bien que le prix du PAC est plus élevé que celui du sulfate d'alumine, sa consommation journalière est deux fois moins coûteuse car son taux de traitement est quatre fois plus faible que celui du sulfate d'alumine.

### 5.3. Le prix du floculant :

Nous avons procédé de la même manière pour calculer le coût de consommation en floculant, sachant que le prix du polyélectrolyte anionique est de 289 DA/Kg. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau N° 31** : Tableau comparatif de consommation journalière en polyélectrolyte pour chaque coagulant.

<b>Coagulant</b>	<b>Taux de traitement (ppm) en floculant</b>	<b>Coût final du polyélectrolyte DA/J</b>
<b>Sulfate d'alumine</b>	0.05	7491
<b>Chlorure ferrique (41%)</b>	0.05	7491
<b>PAC 100 (10%)</b>	0.025	3745

Les résultats du tableau N°31 montrent que le PAC est plus avantageux que les autres coagulants par rapport à la consommation du polyélectrolyte.

## Conclusion

D'après les résultats d'analyses, nous avons constaté que dans les conditions optimales pour chaque coagulant :

- Le taux de traitement du sulfate d'alumine nécessaire à la clarification de l'eau du barrage Keddara se situe aux environs de 40 ppm alors qu'il ne nous a fallu que 10 ppm de chlorure ferrique et 10 ppm de polychlorures d'aluminium pour obtenir une turbidité résiduelle inférieure à 0.8 NTU.
- Les essais de floculation, en utilisant un polyélectrolyte anionique, nous ont permis d'obtenir une dose optimale de 0.05 ppm pour le sulfate d'alumine et le chlorure ferrique. Quant au PAC, la dose est de seulement 0.025 ppm.
- Les coagulants étudiés sont tous efficaces pour l'élimination de la matière organique mais le chlorure ferrique est le meilleur avec un abattement de 73%.
- Après filtration de l'eau traitée avec 40 ppm de sulfate d'aluminium, on obtient 0.254 mg/L d'aluminium total résiduel (valeur supérieure à la norme) et 0.107 d'aluminium dissous. L'aluminium résiduel moyen de nos essais après traitement avec le PAC est de 0.154 d'aluminium total (valeur inférieure à la norme) et de 0.05 en aluminium dissous.
- Le fer résiduel après traitement au chlorure ferrique avant filtration est d'une valeur de 0.650 mg/L de fer total et de 0.06 mg/L de fer dissous mais après avoir filtré, nous avons obtenu une valeur moyenne de 0.015 mg/L de fer dissous, et de 0.04 mg/L fer total qui est largement inférieure à la norme.
- La filtration est un procédé de traitement très important car il complète le procédé de coagulation-floculation et permet une élimination considérable des résidus métalliques (hydroxyde de fer et d'aluminium)
- Après injection du chlorure ferrique dans l'eau brute, l'eau se colore en jaune (flocs jaunes), mais après décantation, la couleur jaune disparaît pour laisser place à une eau transparente et limpide conforme à la norme de potabilité. Cependant, l'un des inconvénients majeurs du chlorure ferrique est l'apparition immédiate de couleur jaune dans l'eau en cas de surdosage.
- Nous avons remarqué visuellement que lors du jar-test, le PAC permet d'obtenir une très bonne floculation ; les flocs obtenus sont légèrement plus fins mais plus nombreux, de taille moyenne et identique et génèrent une faible quantité de boue comparés aux flocs du chlorure ferrique qui sont de taille plus grande par rapport à ceux des autres coagulants et génèrent

un volume de boue important. Cependant, cette quantité de boue peut être moindre avec un taux de traitement de 10 ppm et donc le problème de boue cité dans la littérature lié au chlorure ferrique peut être évité grâce à une optimisation du traitement de coagulation-floculation.

- Le chlorure ferrique et le PAC sont très acides et corrosifs, ils exigent une très grande prudence de manipulation et nécessitent des changements d'équipement et/ou des systèmes de protections d'installations (pompes, bacs de préparation... etc.)
- Le chlorure ferrique et le sulfate d'alumine sont tous les deux fabriqués en Algérie mais le chlorure ferrique est beaucoup moins coûteux que le sulfate d'alumine, et le PAC est un produit d'importation mais reste toutefois moins coûteux que le sulfate d'alumine et plus cher que le chlorure ferrique.

Enfin, à l'issue de ce travail, nous nous permettons de faire les recommandations suivantes :

- Une étude plus approfondie sur l'influence du pH sur la solubilité de l'aluminium résiduel dans l'eau en cas d'utilisation du PAC afin de confirmer les valeurs obtenues.
- Réaliser des essais comparatifs avec les trois produits à l'échelle industrielle pour confirmer les résultats obtenus.

## **Perspectives**

Dans le but de tester un 3<sup>ème</sup> coagulant en plus du PAC et du chlorure ferrique, nous avons essayé de synthétiser le coagulant polychlorure d'aluminium basique (PCBA) au niveau du laboratoire SEAAL, mais son rapport  $r=OH/Al$  étant très élevé ( $r = 2.4$ ) le rend très instable (sa préparation *in-situ* est délicate) ce qui rend son emploi difficile, les essais jar-test ont donc été freinés par ce phénomène vu qu'on n'a pas obtenu de floes lors de la coagulation. Nous aimerions avoir la chance de retenter une seconde fois l'opération afin d'obtenir une bonne floculation en essayant cette fois-ci d'autres rapports molaires (inférieurs ou égaux à 2).



# Annexes

## Annexe N°1 : Détermination des paramètres physique

### 1. Température

Il est important de connaître la température de l'échantillon d'eau à traiter avec une bonne précision. En effet celle-ci joue un rôle dans la solubilité des gaz, dans la dissolution des sels et dans la détermination du pH. Elle se fait à l'aide d'une sonde de température qui est connectée au pH-mètre.

### 2. Potentiel d'hydrogène

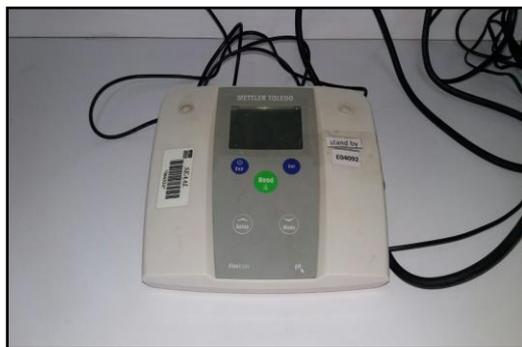
La mesure de pH permet de déterminer l'acidité ou alcalinité d'une solution, souvent qu'il se trouve dans la bande 0 à 7 ou 7 à 14 constitue la neutralité du milieu. Le pH d'un échantillon dépend également de la température en raison de l'équilibre de dissociation.

#### Mode opératoire

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

#### Appareillage

Sension+pH3 HACH est un instrument pour mesurer le pH, les mV et la température. Il est doté d'un agitateur.



pH-mètre

#### Expression des Résultats

La valeur du pH est exprimée à deux décimales près.

### 3. Conductivité

La détermination de la valeur de la conductivité est basée sur la mesure du courant électrique conduit par les ions présents dans l'eau, et dépend :

- De la concentration et de la nature des ions ;
- De la température et de la viscosité de l'échantillon.

## Appareillage

Conductimètre : Mettler Toledo SevenEasy équipé d'une électrode de mesure, d'une sonde de température et d'un convertisseur fourni par le fabricant.



Conductimètre

## 4. Turbidité

La mesure de la turbidité permet de préciser les informations visuelles sur l'eau, elle traduit la présence des particules en suspension dans l'eau (organismes microscopique, argile).

Cette mesure se fait avant et après chaque traitement (Jar test, filtration, désinfection) par un turbidimètre. Son principe repose sur la Comparaison de la lumière diffusée et la lumière transmise par échantillon d'eau et par une gamme étalon constituée de solution formazine.

### Mode opératoire

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



Turbidimètre

## **Annexe N° 2: Essais de coagulation-floculation par jar-test.**

### **Préparation de la solution Sulfates d'alumine à 10 g/L**

- Peser 1 g de sulfate d'alumine en cristaux.
- Les verser dans un bécher qui contient un peu d'eau distillée.
- Agiter avec un agitateur magnétique jusqu'à dissolution totale des cristaux (500 tr/min)
- Transvaser dans une fiole jaugée de 100 mL et remplir avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.

### **Préparation du Polyélectrolyte à 5 g/L (solution mère)**

- Peser 0.5 g du poly en poudre.
- Remplir un bécher de 100 mL d'eau distillée et poser sur l'agitateur
- Verser le poly soigneusement sur les parois du bécher pour éviter une formation de boule dure et agiter 15 à 20min.
- Réaliser une dilution de 1/100 : 1 mL de la solution mère dans une fiole de 100 mL et remplir d'eau distillée jusqu'au trait de jauge.

### **Mode opératoire**

#### **Dose optimale du coagulant**

- Remplir les 6 béchers du flocculateur avec 1 L d'eau brute chacun.
- Régler la vitesse à 180 tr/min et le temps à 2 min et mettre en marche.
- Injecter simultanément les doses croissantes du coagulant.
- Après les deux minutes, faire baisser la vitesse à 40 tr/min pendant 18min.
- Laisser l'eau décanter pendant 45 min.
- Siphonner l'eau et mesurer la turbidité de chaque bécher.
- Tracer la courbe turbidité en fonction de la concentration du coagulant.
- Noter la turbidité minimale et déduire la dose optimale du coagulant.

#### **Dose optimale du flocculant**

- Remplir les 6 béchers du flocculateur avec 1 L d'eau brute chacun.
- Régler la vitesse à 180 tr/min et le temps à 2 min.
- Injecter dans chaque bécher la dose optimale du coagulant précédent.
- Après 1min30 injecter les doses croissantes du Polyélectrolyte et baisser la vitesse à 40 tr/min pendant 18min.
- Laisser l'eau décanter 30 min puis siphonner et mesurer la turbidité de chaque bécher.
- Tracer la courbe et déduire la dose optimale du Polyélectrolyte.

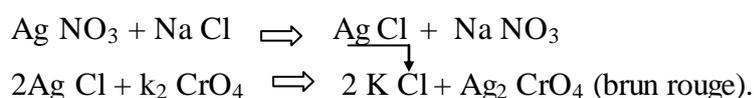
**Annexe N°3:** Dosage des chlorures par la méthode de Mohr (Titration au nitrate d'argent avec de chromate comme indicateur)

**Principe**

Le dosage des chlorures est réalisé par titration au nitrate d'argent  $\text{AgNO}_3$  Avec  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  comme indicateur. Réaction des ions chlorure avec des ions argent pour former du chlorure d'argent  $\text{AgCl}$  insoluble. Ce précipité réagit avec  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  pour former du chromate d'argent brun  $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$ . La coloration brun-rouge marque la fin du titration (point de virage).

**Note**

Durant le titration, le PH est maintenu entre 5 à 9.5 afin de permettre la précipitation :



**Réaction**

Toutes les compositions et les solutions d'argent sont sensibles à la lumière. La solution de nitrate d'argent, conservée à l'obscurité dans une bouteille en verre brune munie d'un bouchon en verre, reste stable pendant plusieurs mois.

– **Solution Nitrate d'argent 0.02 mol/L :**

Dissoudre dans l'eau distillé 3.397g d' $\text{AgNO}_3$ , sèche ou préalable à l'étuve  $105^\circ\text{C}$  pendant 2h, complète avec eau distillé à 1000mL.

– **Chromate de potassium 10% (indicateur)**

Dissoudre dans de l'eau distillée 10g de chromate du potassium  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  et complète à 100 mL.

– **Solution référence de chlorure de sodium 0.02 mol/L :**

On réalise cette solution comme suit :

Dissoudre dans de l'eau distillée 1.1688g de chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ), séchés au préalable à l'étuve à  $105^\circ\text{C}$  pendant 2h, et compléter à 1000ml dans une fiole jaugée.

– **Solution d'acide nitrique a 0.1 mol/L:**

Solution du commerce. Utilisée pour réajuster un pH supérieur à 9,5.

– **Solution d'hydroxyde de sodium 0,1 mol/L :**

Solution prête à l'emploi. Utilisée lorsque le pH est inférieur à 5 pour le réajuster.

– **Carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) ou mono hydrogencarbonate de sodium ( $\text{NaHCO}_3$ ) en poudre.**

Ces réactifs sont utilisés lorsque le pH est inférieur à 5 pour le réajuster (solution tampon).

## Appareillage

- Burette automatique.
- Matériel courant de laboratoire.

## Préparation et conservation des échantillons

L'échantillon à analyse doit être prélevé dans des bouteilles en verre ou en polyéthylène et ne pas dépasser les 15 jours pour le dosage.

## Application

- Dosage de l'échantillon :

Introduire, au moyen d'une fiole, 100 mL de l'échantillon (volume  $V_a$ ), dans un bécher conique, placé sur un fond blanc.

Note : si la teneur en chlorures est élevée (plus de 200 mg/L), l'opérateur réalisera au préalable une dilution.

- Si le pH de l'échantillon n'est pas compris entre 5 et 9.5, il faut ajuster le pH avec un acide ou une base.
- S'il y'a des ions ammonium dans l'échantillon, à des concentrations supérieures à 10 mg/L, il faut ajuster le pH entre 6.5 et 7 et noter le volume de réactif requis.
- Ajouter 1ml d'indicateur de chromate de potassium et titre la solution par addition goutte à goutte de solution de nitrate d'argent jusqu'à ce que la solution prenne une couleur brun rougeâtre.
- Essai à blanc.
- Titrer une solution à blanc en utilisant 100 mL d'eau distillé à la place de l'échantillon, noter le volume de nitrate d'argent versé  $V_b$ .

Ce volume  $V_b$  ne doit pas dépasser 0.2 mL, dans le cas contraire vérifier la pureté de l'eau.

## Exploitation et interprétation des résultats :

La concentration en chlorure  $Cl^-$  exprimée en milligramme par litre, est donnée par la formule suivante :

$$[\text{Chlorures}] = \frac{(V_s - V_b) * C * f}{V_a}$$

- ✓  $V_s$  : est le volume en millilitres de la solution de nitrate d'argent utilisée pour le titrage de l'échantillon.
- ✓  $V_a$  : est le volume en millilitre, de l'échantillon pour essai.
- ✓  $C$  : est la concentration réelle exprimée en mole par litre, de la solution de nitrate d'argent, éventuellement corrigée du coefficient correcteur.
- ✓  $f$  : 35453 (masse molaire du  $Cl^-$  \*1000).

## Annexe N°4 : Mesure du Titre alcalimétrique (TA) et Titre alcalimétrique complet (TAC)

### Principe

Le titre alcalimétrique complet TAC est la concentration de l'ensemble des anions alcalins faibles, à savoir les hydroxydes  $\text{OH}^-$ , carbonates  $\text{CO}_3^{2-}$  et hydrogencarbonates  $\text{HCO}_3^-$  par mesure de la quantité de  $\text{HCl}$  ou  $\text{H}_2\text{SO}_4$  nécessaire pour amener le pH de l'eau à analyser à  $\text{pH} = 8.3$  pour le TA et  $\text{pH} = 4.4$  pour le TAC. Le changement du pH est détecté par l'emploi d'un indicateur colorée méthyl orange.

### Réactifs

- Méthylorange virant du jaune à orange à  $\text{pH} = 4.4$
- $\text{HCl}$  0.1 N ou  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (0.02 N)

### Mode opératoire

- Prendre 50ml de l'échantillon à analyser
- Si le  $\text{pH} < 8.3 \implies \text{TA} = 0$
- Ajouter 3 gouttes de méthylorange
- Remplir la burette avec  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (0.02N)
- Mettre sur l'agitateur magnétique
- Ouvrir la burette goutte à goutte jusqu'au changement de couleur du jaune vers le jaune orangé
- Noter  $V_{\text{eq}}$ .

### Expression des résultats

$$\text{TAC} = \frac{(V_2 * N_2 * 1000)}{V \text{ échantillon}} \text{ (mEq g/L)}$$

$$1 \text{ mEq g/L} = 5 \text{ °F}$$

## Annexe N°5 : Matière organique (Indice permanganate)

### Définition

C'est la concentration en masse d'oxygène en relation avec les ions permanganates consommées par l'échantillon d'eau dans des conditions définies. Exprimée en mg/L d'oxygène.

### Principe

Mesure en milieu acide la quantité d'oxygène utilisée pour la réduction du  $\text{KMnO}_4$  par les matières oxydables organiques contenues dans l'eau (l'échantillon).

### Réactifs

- Solution mère d'oxalate de sodium à 0.1 N (0.05 mol/L) : m= 6.7 g d'oxalate dans 1L d'eau distillée.
- Solution fille d'oxalate de sodium à 0.01 N (0.005 mol/L) : Dilution de 10% (stable une semaine).
- Solution de permanganate de potassium  $\text{KMnO}_4$  0.1 N (20mmol/L) : Dissoudre 3.2g de  $\text{KMnO}_4$  dans 1L d'eau distillée.
- Solution fille de  $\text{KMnO}_4$  à 0.01 N (2 mmol/L) : Diluer la solution mère 10%. Conserver à l'obscurité, renouveler fréquemment.
- Solution de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  à 18 mol/L  $d=1.84$
- Solution de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  à 2 mol/L : Dans une fiole de 1000 mL, verser 500 mL d'eau distillée puis 110ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , laisser refroidir puis compléter jusqu'au trait de jauge.

### Matériels

- Plaque chauffante
- Matériel de laboratoire (bêchers, fioles, burette, pipettes.)

### Préparation et conservation des échantillons

Analyser les échantillons dès que possible et au plus tard 2 jours après prélèvement. En cas de conservation de plus de 6h, ajouter 5 ml d'acide  $\text{H}_2\text{SO}_4$  par litre d'échantillon et garder dans un flacon brun à 4 °C.

### Application :

- Transférer à l'aide d'une pipette 100 mL d'échantillon dans un bécher de 250 mL.
- Ajouter 20 mL d'acide sulfurique 2 mol/L et mélanger en agitant doucement.
- Placer le bécher sur une plaque chauffante et porter à ébullition.
- Ajouter 20 mL de la solution fille de  $\text{KMnO}_4$  2 mmol/L.
- Démarrer le chronomètre et maintenir à ébullition pendant 10 minutes.

- Après 10 minutes ajouter 20 mL de la solution fille de l'oxalate 5mmol/L (0.01 N) et attendre que la solution se décolore.
- Retirer alors le bécher de la plaque et le poser sur l'agitateur
- Titrer pendant que la solution est encore chaude avec la solution  $\text{KMnO}_4$  0.01 N jusqu'à couleur rose pâle. Noter  $V_{1\text{eq}}$
- Effectuer parallèlement un essai à blanc avec le même mode opératoire mais en remplaçant la prise d'essai par 100 mL d'eau distillée. Noter  $V_{0\text{eq}}$
- Conserver le blanc titré pour la vérification de  $\text{KMnO}_4$  :
  - Au blanc titré ajouter 20 mL d'oxalate à 0.01 N
  - Réchauffer la solution 1 à 2 minutes
  - Retitrer avec le  $\text{KMnO}_4$  0.01 N jusqu'à coloration rose pâle.
  - Noter  $V_{2\text{eq}}$  au  $\text{KMnO}_4$  ; doit être entre 19 et 20 mL si ce n'est pas le cas, refaire la solution mère de  $\text{KMnO}_4$ .

Expression des résultats en milligramme par litre d'oxygène :

$$\mathbf{IP} = \frac{16 \cdot (V_1 - V_0)}{V_2} \text{ (mg O}_2\text{/L)}$$

## Annexe N°6 : Dosage de l'aluminium Résiduel $\text{Al}^{3+}$

### Réactifs :

- Acide ascorbique,
- Indicateur coloré Eriochrome cyanine R :
- Solution  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_2$ ,
- Solution de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  à 0.04 N,
- Solution tampon pH=6.2,
- Solution étalon 0.1 mg/L à partir de la solution mère d' $\text{Al}^{3+}$  à 1 g/L.

### Préparation des solutions :

- Solution Eriochromecyanine ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{NaO}_9$ )

On pèse 2.5g d'Eriochrome, dissoudre dans 250 mL d'eau distillée + 1 mL  $\text{CH}_3\text{COOH}$  concentré 1 N.

- Solution tampon pH=6.2 :

On pèse 37.2 g d'acétate d'ammonium + 12 mL de  $\text{CH}_3\text{COOH}$  dans 1L E.D puis on contrôle le pH à 6.2 (18.6 g ==> 500 ml E.D)

### Mode opératoire :

Dans trois fioles de 50ml on introduit dans chacune d'elle :

- 1ère : 25 mL d'eau à analyser (eau traitée)
- 2ème : 25 mL de l'étalon à 0.1 mg/L
- 3ème : 25 mL eau distillée.

On rajoute dans chaque fiole :

- 1 goutte  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  pour faire échapper le chlore si présent.
- 1 mL  $\text{H}_2\text{SO}_4$  à 0.04 N.
- 10 mL de la solution tampon pH = 6.2
- 5 mL d'Eriochrome cyanine R.
- Compléter chaque fiole avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.
- On fait la lecture au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 535 nm de l'eau à analyser.

## Annexe N°7 : Dosage du fer –méthode spectrométrique à la phénanthroline.

### Définition

- Fer total : la somme du fer dissous et non dissous.
- Fer dissous : la somme de  $Fe^{2+}$  et  $Fe^{3+}$ .

### Réactifs

- **Acide chlorhydrique, HCl de concentration 10% (solution commerciale)**

Verse 10 mL d'acide chlorhydrique concentré 10% dans une fiole de 100 mL et compléter à 100 ml d'eau distillée.

Ce réactif se conserve dans un flacon en verre brun, 4°C, pendant un mois.

- **Peroxodisulfate de potassium de concentration 40 g/L.**

Dans un bécher dissoudre 4g de peroxodisulfate de potassium ( $K_2S_2O_8$ ) commercial dans l'eau distillée, transvaser dans une fiole de 100 mL et compléter avec l'eau distillée. Cette solution est stable pendant plusieurs semaines si elle est conservée dans un flacon brun à température ambiante.

- **solution mère de concertation 1 g/L**

Cette solution peut être préparée à partir d'ammonium-fer (II) sulfate hexa hydraté  $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ . appelé sel de mohr : dissoudre 0.7022g dans 100 mL d'eau distillée.

- **solution fille de concentration 10 mg/L**

- **Chlorhydrate d'hydroxylamine de concentration 100 g/L**

Dans un bécher dissoudre 10g de chlorhydrate d'hydroxylamine ( $NH_2OH \cdot HCl$ ) « commerciale. » dans l'eau distillée, transvaser dans une fiole de 100mL et compléter avec l'eau distillée, transvaser dans une fiole de 100 mL et compléter avec de l'eau distillée. Conservée à 4°C, cette solution est stable pendant une semaine au moins.

- **Solution de phénanthroline-1.10 de concentration 100g/L**

Dans un bécher dissoudre 0.5 g de chlorure de phénanthroline-1.10 monohydrate ( $C_{12}H_9ClN_2 \cdot H_2O$ ), transvaser dans une fiole de 100ml et compléter avec l'eau distillée. Cette solution est stable pendant une semaine si elle est conservée à l'obscurité à 4°C.

- **Solution tampon acétate :**

Dans un bécher dissoudre 40 g d'acétate d'ammonium ( $CH_3COONH_4$ ) dans l'eau distillée, ajouter 50ml d'acide acétique cristallisable ( $CH_3COOH$ ) de Masse volumique 1.06g/mL transvaser dans une fiole de 100 mL et compléter avec l'eau distillée.

## **1.2. Appareillage :**

- Spectrophotomètre,
- Agitateur magnétique,
- Balance de précision,
- Plaque chauffante.
- Matériel courant du laboratoire (bêchers, fioles, pipettes...)

## **1.3. Préparation et conservation des échantillons**

Prélever les échantillons dans des flacons en polyéthylène ou en verre. Les conserver si besoin entre 2 et 5 °C jusqu'à 24 heures.

### **1. Application**

#### **Dosage du fer total**

Mesure de l'échantillon

- Verser 50 mL de l'échantillon à analyser dans un Erlen Meyer de 100 mL.
- Ajouter 1 mL d'acide chlorhydrique à 10%
- Ajouter 5 mL de peroxydisulfate de potassium.
- placer l'échantillon sur la plaque chauffante à douce ébullition durant 40min, en s'assurant que le volume ne descende pas en dessous de 20mL.
- Laisser refroidir et ajouter 1mL de la solution chlorhydrate hydroxylamine et mélanger soigneusement
- Ajouter 2mL de la solution chlorhydrate hydroxylamine et mélanger soigneusement.
- Ajouter 2mL de la solution tampon acétate pour obtenir un pH entre 3.5 et 5.5 de préférence 4.5.
- Ajouter 2 mL de la solution phénanthroline et conserver pendant 15min à l'obscurité.
- Effectuer la lecture spectrométrique à la longueur d'onde de 510 nm.

#### **Dosage du fer total**

- Verser 50 mL de l'échantillon à analyser dans un Erlen Meyer de 100 mL.
- Transvaser la solution dans une fiole de 100 mL, ajouter 1 mL de la solution chlorhydrate hydroxylamine et mélanger soigneusement.
- Ajouter 2 mL de la solution tampon acétate pour obtenir un pH entre 3.5 et 5.5 de préférence 4.5.
- Ajouter 2 mL de la solution phénanthroline et conserver pendant 15 min à l'obscurité.
- Effectuer la lecture spectrométrique à la longueur d'onde de 510 nm.

# Chapitre 1: Les eaux potables

# Chapitre 2 : La coagulation-floculation

# Chapitre 3: L'aluminium

## dans l'eau potable

# Partie théorique

# Partie expérimentale

# Présentation de la station SEAAL

# Résultats d'analyses et discussions

# Conclusion