

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Ecole Doctorale Ingénierie et environnement
Laboratoire des Biotechnologies Environnementales et Génie des Procédés

Mémoire de Magister

Présenté par

SAYAH Amna

Spécialité : Ingénierie et environnement
Option : Biotechnologie et environnement

Thème

***CONTRIBUTION A LA TRAITABILITE DES EAUX
DE BARRAGE PAR LE CHITOSANE COMME AIDE COAGULANT NATUREL***

Soutenu le 18 décembre 2011 devant le Jury composé de :

Président :	Mr. N. MAMERI	Professeur	ENP
Directeur :	Mr. M. DROUCHE	Maître de Conférences A	ENP
Examineurs :	Mr. D. ABDESSEMED	Professeur	USTHB
	Mme. N. ABDI	Professeur	ENP
	Mr. H. LOUNICI	Professeur	U-Bouira
Invitée :	Mme. H. ZEMMOURI	Chargée de recherches	CDER

Année universitaire 2010/2011

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie « ALLAH » de m'avoir donné la force, le pouvoir et le courage de réaliser ce travail.

Je tiens à remercier Monsieur DROUCHE Madani, Maître de Conférences A à l'Ecole Nationale Polytechnique, et Madame ZEMMOURI Hassiba, chargée de recherche au Centre de Développement des Energies Renouvelables. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma très sincère reconnaissance pour leurs précieuses directives, leur très grande disponibilité, leurs fructueux conseils, leur suivi constant, leur courtoisie si raffinée et leurs qualités humaines.

Que Monsieur MAMERI Nabil, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, trouve ici le témoignage de notre sincère gratitude pour l'honneur qu'il ma fait en acceptant la présidence du jury.

J'adresse mes chaleureux remerciements à Monsieur ABDESSEMED Djamel, Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène, Madame ABDI Nadia, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, et Monsieur LOUNICI Hakim, Professeur à l'Université de Bouira et Directeur du Laboratoire des Biotechnologies Environnementales et Génie des Procédés, qui ont bien voulu juger mon travail et m'honorer de leur participation dans le jury.

Je tiens également à adresser mes sincères remerciements au chef du laboratoire de contrôle de la station de traitement des eaux de Boudouaou, Monsieur BOUMCHEDDA Rachid de nous avoir bien accueilli au sein de son département pour la réalisation de cette étude.

Sans oublier toute l'équipe du laboratoire de contrôle physico-chimique de la station, en particulier Taous, Nassima et Sofiane, pour leur aide précieux.

Je suis très reconnaissante envers toute ma famille pour leurs encouragements soutenus et surtout pour leur soutien moral.

Je ne saurais terminer sans remercier toutes mes amies pour la bonne influence et leurs encouragements interminables en particulier Latifa, Ahlem, Asma, Farida et Samira.

DEDICACES

*J*e dédie aussi mon travail à tous ceux qui sont décrits si dessous,
que le bon Dieu les garde pour moi.

Ceux qui me sont les plus chers au monde, père et mère.

Mes très chers grands parents, paternels et maternels.

Mes adorables frères et sœurs, cousins et cousines.

Mes chers oncles et tentes, paternel et maternels.

Tous mes amis qui m'apprécient, de loin ou de près.

Toute ma promotion, biotechnologie et environnement.

*U*ne spéciale dédicace à ma très chère grand-mère SAHRA,
que Dieu apaise sa souffrance, la guérisse et la garde.

LISTE DES ABREVIATIONS

Symbole	Désignation
Abs	Absorbance
Alum	Sulfate d'aluminium
Al ₂ (SO ₄) ₃	Sulfate d'aluminium
Ben	Bentonite
Chito	Chitosane
COA	Carbone Organique Assimilable (mg/l)
CODB	Carbone Organique Dissous Biodégradable (mg/l)
COT	Carbone Organique Totale (mg/l)
CT	Concentration × Temps de contact
Da	Dalton
DA	Degré d'acétylation (%)
DBO ₅	Demande biologique en oxygène pendant cinq jours (mgO ₂ /l)
DBPs	Disinfection by-products (sous-produits de désinfection)
DCO	Demande chimique en oxygène (mgO ₂ /l)
DD	Degré de désacétylation (%)
DPD	Sulfate de N, N – diéthylphénylène – 1.4 diamine
EDTA	Ethylènediaminetétraacétique
HCl	Acide chloridrique
HOAC	Acide acétique
kDa	Kilo Dalton
M	Masse molaire (g/mol)
MES	Matières en suspension (mg/l)
min	Minute
MON	Matière organique naturelle
NaAC	Acétate de Sodium
NaOCl	Eau de javel
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
PAC	Polychlorure d'aluminium
PEI	Polyéthylène imine
PM	Poids moléculaire
Poly	Polyélectrolyte synthétique
ppm	Partie par million (mg/l)
Rpm	Rotation (tour) par minute
t	Temps de contact (min)
Turb	Turbidité (NTU)
TAC	Titre Alcalimétrique Complet (mg/l CaCO ₃)
TH	Dureté totale (mg /l CaCO ₃ ou °F)
UFAC	Ultrafiltration assistée par du chitosane
US.EPA	United State Environnemental Protection Agency.
UV	Ultraviolet

LISTE DES FIGURES

Figure I- 1 :	Distribution ionique autour d'une particule colloïdale électronégative.....	04
Figure I- 2 :	Comparatif général des principaux agents de désinfection pour différents objectifs de traitement.....	07
Figure I- 3 :	Sous-produits halogénés de la désinfection.....	08
Figure II- 1 :	Structure chimique de la chitine parfaite, du chitosane parfait et du chitosane commercial (un copolymère caractérisé par son degré d'acétylation DA).....	16
Figure II-2 :	Différentes formes de conditionnement du chitosane. (a) fibre creuse ; (b) Membrane plane.....	20
Figure III-1 :	Procédé UFAC.....	26
Figure IV- 1 :	Essai « Jar test ».....	33
Figure V-1 :	Aspect de l'eau de Keddara à droite, de l'eau de Beni Amrane à gauche.....	37
Figure V-2 :	Evolution des paramètres physico-chimiques de l'eau brute de Keddara, année 2010 ; (a) température ; (b) pH ; (c) turbidité ; (d) UV ; (e) dureté ; (f) alcalinité.....	39
Figure V-3 :	Répartition des paramètres biologiques de l'eau brute de Keddara, année 2010.....	40
Figure V-4 :	Comparaison de l'abattement de la turbidité de l'eau de Keddara en utilisant deux solutions de chitosane préparé par deux acides différents (acide acétique et HCl) comme aide coagulant et l'Alum comme coagulant.....	42
Figure V-5 :	Evolution de la turbidité de l'eau de Keddara en fonction de la dose du chitosane utilisé comme coagulant primaire.....	47
Figure V-6 :	Evolution de la turbidité de l'eau de Beni Amrane en fonction de la dose du chitosane utilisé comme coagulant primaire.....	47
Figure V-7 :	Evolution de la turbidité de l'eau de Keddara en fonction de la dose de l'Alum et du chitosane utilisé comme aide coagulant.....	47
Figure V-8 :	Evolution de la turbidité de l'eau de Beni Amrane en fonction de la dose de l'Alum et du chitosane utilisé comme aide coagulant.....	47
Figure V-9 :	Evolution de la turbidité de l'eau de Keddara en fonction de la dose de l'Alum utilisé seul.....	48

Figure V-10 :	Evolution de la turbidité de l'eau de Beni Amrane en fonction de la dose du chitosane utilisé seul.....	48
Figure V-11 :	Evolution de la turbidité de l'eau de Keddara en fonction de la dose du polyélectrolyte.....	48
Figure V-12 :	Evolution de la turbidité de l'eau de Beni Amrane en fonction de la dose du polyélectrolyte.....	48
Figure V-13 :	Evolution de la turbidité de l'eau de Keddara en fonction de la dose du chitosane après utilisation de la bentonite à différentes concentrations.....	49
Figure V-14 :	Abattement de l'absorbance UV à 254nm de l'eau de Beni Amrane en fonction de la dose du chitosane utilisé comme coagulant primaire.....	51
Figure V-15 :	Abattement de l'absorbance UV à 254nm de l'eau de Keddara en fonction de la dose du chitosane après utilisation de la bentonite à différents concentrations.....	51
Figure V-16 :	Abattement de l'absorbance UV à 254nm de l'eau de Keddara en fonction de la dose de l'Alum et du chitosane utilisé comme aide coagulant.....	51
Figure V-17 :	Abattement de l'absorbance UV à 254nm de l'eau de Beni Amrane en fonction de la dose de l'Alum et du chitosane utilisé comme aide coagulant.....	51
Figure V-18 :	Variation du pH de l'eau de Beni Amrane en fonction de la dose du chitosane utilisé comme coagulant primaire.....	53
Figure V-19 :	Variation du pH de l'eau de Keddara en fonction de la dose du chitosane après utilisation de la bentonite à différents concentrations.....	53
Figure V-20 :	Variation du pH de l'eau de Keddara en fonction de la dose de l'Alum et du chitosane utilisé comme aide coagulant.....	53
Figure V-21 :	Variation du pH de l'eau de Beni Amrane en fonction de la dose de l'Alum et du chitosane utilisé comme aide coagulant.....	53
Figure V-22 :	Suivi de la concentration de l'Aluminium résiduel dans l'eau de Keddara en fonction de l'Alum et de la dose du chitosane utilisé comme aide coagulant.....	55
Figure V-23 :	Suivi de la concentration de l'Aluminium résiduel dans l'eau de Beni Amrane en fonction de l'Alum et de la dose du chitosane utilisé comme aide coagulant.....	55
Figure V-24 :	Suivi de la concentration de l'Aluminium résiduel dans l'eau de Keddara en fonction de l'Alum utilisé seul.....	55
Figure V-25 :	Suivi de la concentration de l'Aluminium résiduel dans l'eau de Keddara en fonction de la dose du polyélectrolyte.	55

Figure V-26 :	Effet du pH initial de l'eau de Beni Amrane sur l'abattement de la turbidité par le chitosane utilisé comme coagulant primaire.....	58
Figure V-27 :	Effet du pH initial de l'eau de Keddara sur l'abattement de la turbidité par le chitosane utilisé avec la bentonite.....	58
Figure V-28 :	Effet du pH initial de l'eau de Keddara sur l'abattement de la turbidité par le chitosane utilisé comme aide coagulant.....	58
Figure V-29 :	Effet du pH initial de l'eau de Beni Amrane sur l'abattement de la turbidité par le chitosane utilisé comme aide coagulant.....	58
Figure V-30 :	Effet de la turbidité initiale sur l'abattement de la turbidité de l'eau de Keddara par le chitosane utilisé comme aide coagulant.....	60
Figure V-31 :	Effet de la concentration de la bentonite sur l'abattement de la turbidité de l'eau de Keddara par le chitosane.....	60
Figure V-32 :	Variation de l'alcalinité de l'eau de Keddara en fonction de la concentration du chitosane utilisé comme aide coagulant à l'Alum.....	61
Figure V-33 :	Variation de l'alcalinité de l'eau de Beni Amrane en fonction de la concentration du chitosane utilisé comme aide coagulant à l'Alum.....	61
Figure V-34 :	Variation de la dureté de l'eau de Keddara en fonction de la concentration du chitosane utilisé comme aide coagulant à l'Alum.....	62
Figure V-35 :	Variation de la dureté de l'eau de Beni Amrane en fonction de la concentration du chitosane utilisé comme aide coagulant à l'Alum.....	62
Figure V-36 :	Demande en chlore de l'eau de Keddara, brute et traitée par le chitosane comme aide coagulant.....	65
Figure V-37 :	Demande en chlore de l'eau de Beni Amrane, brute et traitée par le chitosane comme aide coagulant.....	65
Figure V-38 :	Rémanence en chlore de l'eau de Keddara, brute et traitée par le chitosane comme aide coagulant.....	65
Figure V-39 :	Rémanence en chlore de l'eau de Beni Amrane, brute et traitée par le chitosane comme aide coagulant.....	65
Figure V-40 :	Variation du l'Aluminium résiduel détecté dans l'eau de Keddara après les différents essais de traitabilité.....	67
Figure V-41 :	Taux d'Aluminium résiduel dissous dans l'eau de barrage traitée différemment...	67

Figure V-42 :	Aspect des floes formés pendant la coagulation de l'eau de Keddara et de Beni Amrane par différentes méthodes. (a) Traitement à l'Alum et polyélectrolyte pour l'eau de Keddara; (b) Traitement à l'Alum et chitosane pour l'eau de Keddara ; (c) Traitement à l'Alum et bentonite pour l'eau de Keddara ; (d) Traitement au chitosane seul pour l'eau de Beni Amrane ; (e) Traitement à l'Alum et chitosane pour l'eau de Beni Amrane.....	69
Figure V-43 :	Aspect des floes décantés après différents traitements de l'eau de Keddara et de Beni Amrane. (b') Traitement à l'Alum et chitosane pour l'eau de Keddara ; (c') Traitement à l'Alum et bentonite pour l'eau de Keddara ; (d') Traitement au chitosane seul pour l'eau de Beni Amrane ; (e') Traitement à l'Alum et chitosane pour l'eau de Beni Amrane.....	69
Figure V-44 :	Abattement de la turbidité de l'eau de Keddara et de Beni Amrane traitée différemment.....	71
Figure V-45 :	Abattement de l'absorbance UV à 254nm de l'eau de Keddara et de Beni Amrane traitée différemment	71
Figure VI- 1 :	Photo du barrage de Keddara.....	ii
Figure VI- 2 :	Photo du barrage de Beni Amrane.	ii
Figure VI- 3 :	Les différentes filières de traitement de la station.....	iii
Figure VI- 4 :	Schéma synoptique de la filière de traitement.....	iv
Figure VI- 5 :	Photo des obturateurs.....	v
Figure VI- 6 :	Photo du couloir de mélange.....	v
Figure VI- 7 :	Photo du décanteur Pulsator.....	v
Figure VI- 8 :	Schéma du décanteur lamellaire à lit de boue <i>Pulsator</i>	vi
Figure VI- 9 :	Photo du filtre en filtration.....	vii
Figure VI- 10 :	Photo du filtre en lavage.....	vii

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	01
Chapitre I: METHODES GENERALES DE TRAITEMENT DE POTABILISATION DE L'EAU	
I.1. Traitement de clarification.	03
I.1.1. Séparation mécanique préalable	03
I.1.2. Coagulation	04
I.1.3. Floculation.....	04
I.1.4. Décantation.....	04
I.1.5. Filtration.....	05
I.2. Traitement de désinfection.	06
I.2.1. Principaux types de désinfection.....	06
I.2.2. Importance d'une clarification préliminaire.....	07
I.2.2.1. <i>Élimination des colloïdes</i>	07
I.2.2.2. <i>Élimination des matières organiques</i>	08
I.2.3. Concept de CT.....	09
I.2.4. Le chlore	09
I.2.4.1. <i>Réactions avec l'eau : dissolution-hydrolyse</i>	09
I.2.4.2. <i>Réaction avec l'ammonium</i>	10
I.2.4.3. <i>Réaction avec les matières organiques</i>	10
I.2.5. L'ozone.....	10
I.2.6. Les ultraviolets (UV)	10
I.2.7. Les membranes.....	11
I.3. Traitement spécifique.	11
I.3.1. Mise à l'équilibre calco-carbonique.....	11
I.3.2. Prétraitements naturels	12
I.3.2.1. <i>Stockage</i>	12
I.3.2.2. <i>Percolation au travers du sol</i>	12
I.3.3. Sous-produits de traitement.....	12
Chapitre II : LE CHITOSANE	
II.1. Origine du chitosane.	15
II.2. Préparation du chitosane.	16
Qualité de chitosane produit	17
II.3. Principales propriétés.	17
II.3.1. Degré de N-acétylation et poids moléculaire	18
II.3.2. Propriétés en solution	18
II.3.3. Arrangement naturel en microfibrilles	18
II.3.4. Solubilité du chitosane.....	19
II.4. Aptitude au conditionnement.....	19
II.5. Principales applications du chitosane.	21
II.5.1. Traitement des eaux usées	21
II.5.2. Agriculture.....	22
II.5.3. Décontamination.....	22
II.6. Les aspects économiques.....	23

Chapitre III : TRAITEMENT DES EAUX PAR LE CHITOSANE

III.1. Procédé d'adsorption.....	25
Mécanismes d'adsorption par chitosane.....	25
III.2. Ultrafiltration assistée par le chitosane	26
Mécanismes d'interaction	26
III.3. Technique de coagulation-floculation par le chitosane	27
III.3.1. Intérêts de l'utilisation du chitosane.....	27
III.3.2. Facteurs influents.....	28
III.3.3. Mécanisme mis en jeu.....	29

Chapitre IV : MATERIEL ET METHODES

IV.1. Matériel	31
IV.1.1. Appareils.	31
IV.1.2. Petit matériel	31
IV.1.3. Réactifs utilisés	31
IV.2. Méthodes	32
IV.2.1. Préparation des solutions utilisées	32
IV.2.1.1. Préparation des échantillons d'eaux	32
IV.2.1.2. Préparation de la solution du chitosane.	32
IV.2.1.3. Préparation de la suspension turbide à base de bentonite.	32
IV.2.1.4. Préparation de la solution de sulfate d'aluminium	32
IV.2.1.5. Préparation de la solution de polyélectrolyte	32
IV.2.2. Tests de coagulation-floculation par jar test	32
IV.2.2.1. Chitosane comme coagulant primaire	33
IV.2.2.2. Chitosane comme aide coagulant	33
IV.2.2.3. Chitosane associé à la bentonite	33
IV.2.2.4. Traitement conventionnel	34
IV.2.3. Techniques d'analyses utilisées	34
IV.2.3.1. Mesure de la turbidité.	34
IV.2.3.2. Mesure du pH.	34
IV.2.3.3. Mesure de l'absorbance UV à 254nm.	35
IV.2.3.4. Mesure de l'Aluminium résiduel.	35
IV.2.3.5. Mesure de l'Alcalinité de l'eau	35
IV.2.3.6. Mesure de la dureté de l'eau	35
IV.2.3.7. Mesure de la demande et la rémanence en chlore de l'eau.	35

Chapitre V : RESULTATS ET DISCUSSION

V.1. Caractérisation physico-chimique et bactériologique de l'eau brute de barrage.....	37
V.1.1. Evolution de quelques paramètres physico-chimiques de l'eau brute de Keddara pour l'année 2010.....	38
V.1.2. Répartition de quelques paramètres biologiques existants dans l'eau brute de Keddara pendant l'année 2010.....	40
V.2. Essais de traitabilité (jar test) sur les eaux de Keddara et de Beni Amrane.	41
V.2.1. Choix du solvant acide pour la dissolution du chitosane.	41
V.2.2. Abattement de la turbidité par les différents traitements utilisant le chitosane.	43
V.2.2.1. <i>Utilisation du chitosane comme coagulant primaire.</i>	43
V.2.2.2. <i>Utilisation du chitosane comme aide coagulant au sulfate d'aluminium.</i>	44
V.2.2.3. <i>Utilisation du chitosane avec la bentonite.</i>	45
V.2.2.4. <i>Utilisation du sulfate d'aluminium et du polyélectrolyte.</i>	46
V.2.3. Elimination de la matière organique naturelle par les différents traitements.	49
V.2.3.1. <i>Utilisation du chitosane comme coagulant primaire.</i>	49
V.2.3.2. <i>Utilisation du chitosane comme aide coagulant au sulfate d'aluminium.</i>	50
V.2.3.3. <i>Utilisation du chitosane avec la bentonite.</i>	50
V.2.4. Impact des différents traitements sur le pH de l'eau de barrage.	52
V.2.4.1. <i>Utilisation du chitosane comme coagulant primaire.</i>	52
V.2.4.2. <i>Utilisation du chitosane comme aide coagulant au sulfate d'aluminium.</i>	52
V.2.4.3. <i>Utilisation du chitosane avec la bentonite.</i>	52
V.2.5. L'Aluminium résiduel dans les échantillons d'eau traités.	54
V.2.5.1. <i>Utilisation du chitosane comme aide coagulant au sulfate d'aluminium.</i>	54
V.2.5.2. <i>Utilisation du sulfate d'aluminium et du polyélectrolyte.</i>	54
V.2.6. Influence du pH sur l'optimisation de la coagulation floculation.	56
V.2.6.1. <i>Utilisation du chitosane comme coagulant primaire.</i>	56
V.2.6.2. <i>Utilisation du chitosane comme aide coagulant au sulfate d'aluminium.</i>	56
V.2.6.3. <i>Utilisation du chitosane avec la bentonite.</i>	57
V.2.7. Relation entre la turbidité initiale et l'abattement de la turbidité.	59
V.2.7.1. <i>Utilisation du chitosane comme aide coagulant au sulfate d'aluminium.</i>	59
V.2.7.2. <i>Utilisation du chitosane avec la bentonite.</i>	59
V.2.8. Effet du chitosane sur l'alcalinité et la dureté de l'eau de barrage.	61
V.2.8.1. <i>Etude de l'alcalinité.</i>	61
V.2.8.2. <i>Etude de la dureté.</i>	62
V.2.9. Comparaison de la demande et de la rémanence en chlore entre l'eau brute et traitée.....	63
V.3. Analyse des taux d'aluminium résiduel dans les eaux traitées différemment.	66
V.4. Impact du chitosane sur la qualité et la quantité de boues formées.	68
V.5. Comparaison de l'efficacité des différents traitements utilisés.	70
CONCLUSION GENERALE	73
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	76
ANNEXES	
RESUME	

INTRODUCTION GENERALE

Il existe, actuellement, une recherche très active dans le domaine de la « chimie verte » sans pétrole qui utilise des matières premières plus respectueuses de l'environnement et de notre santé comme le bois, les coproduits végétaux, les fibres naturelles et les ressources marines.

Il est important de noter que cette chimie n'est pas nouvelle car l'agriculture, la forêt et la mer ont fourni produits et énergie aux civilisations préindustrielles.

Parmi les objectifs de cette chimie verte, on peut citer l'utilisation de ressources renouvelables à la place des ressources fossiles, la recherche d'alternatives aux matériaux synthétiques d'origine pétrochimique, la conception de produits biodégradables ou encore l'amélioration des procédés industriels existants.

Le marché mondial des produits de la mer, et en particulier celui des crustacés (crevettes, crabes, homards...), a atteint une production de plusieurs millions de tonnes par an, dont la moitié représente des déchets.

Les carapaces contiennent essentiellement du carbonate de calcium et un polymère nommé «chitine», lequel peut être dégradé pour former le chitosane. La chitine est l'un des polymères naturels, avec la cellulose, les plus abondants au monde. Chitines et chitosanes suscitent un intérêt de plus en plus grand car ces polysaccharides (ou biopolymères) ont démontré d'excellentes propriétés physico-chimiques et biologiques intrinsèques. Ils sont exploités dans de nombreux secteurs industriels et de recherche, aussi variés que la pharmacie, le biomédical, la cosmétologie, l'agriculture, l'agroalimentaire, l'environnement, le textile et les industries du papier.

En recherche, l'intérêt général soulevé par ces biopolymères s'est traduit par un nombre impressionnant et croissant de publications scientifiques.

Le traitement de l'eau potable implique plusieurs processus unitaires selon la qualité de la source d'eau et l'accessibilité. Le coût nécessaire pour avoir le niveau désiré de traitement dépend, entre autres, du coût et de la disponibilité des produits utilisés.

L'utilisation de la technique de coagulation-floculation pour traiter les eaux de surface n'a cessé d'être appliquée dans plusieurs pays. Les coagulants les plus utilisés sont des sels métalliques. Malgré leur efficacité, ces produits chimiques génèrent des sous-produits pouvant être nocifs et associés aux problèmes de santé humaine et d'environnement. Il a été constaté que la sur-utilisation des sulfates d'aluminium engendre une augmentation de la concentration d'aluminium dans l'eau traitée dévaluant ainsi le processus de traitement. En outre, une overdose d'aluminium peut causer la maladie d'Alzheimer.

Vu sa biodégradabilité, sa biocompatibilité, sa propriété d'absorption, son aptitude à la floculation, sa nature polyélectrolytique et ses possibilités de régénération, le chitosane est apte à remédier aux insuffisances des coagulants traditionnels. Il est recommandé en tant que floculant adéquat dans de nombreuses applications.

Cependant peu d'études ont été faites sur son potentiel d'utilisation dans la production d'eau potable et encore moins lorsque les eaux à traiter sont faiblement turbides comme le cas des eaux du barrage de Keddara.

Notre investigation consiste à une contribution à la traitabilité des eaux de surface de barrage par le chitosane comme aide coagulant naturel.

Pour cela, nous avons préparé deux solutions de chitosane du même chitosane provenant du commerce avec deux acides différents ; l'un organique (Acide acétique) et l'autre minéral (Acide chlorydrique).

L'étude a été réalisée en deux parties ; une sur l'eau de Keddara et l'autre sur l'eau de Beni Amrane. Pour l'eau de Keddara, nous avons d'abord essayé l'utilisation du chitosane seul comme coagulant primaire, ensuite nous avons utilisé le chitosane en conjonction avec le sulfate d'aluminium comme aide coagulant. Nous avons aussi testé l'efficacité de la bentonite sur l'activité du chitosane seul et enfin nous avons comparé l'efficacité de l'utilisation du chitosane en générale avec les réactifs classiques dans le traitement de l'eau destinée à la consommation.

Pour l'eau de Beni Amrane, nous avons utilisé le chitosane seul, puis en conjonction avec le coagulant minéral et nous avons fait une comparaison du procédé au biocoagulant avec celui aux réactifs conventionnels (sulfate d'aluminium et polyacrylamide).

Pour les deux études plusieurs paramètres ont été mesurés avant et après chaque traitement pour le suivi et l'optimisation de l'efficacité : turbidité en NTU, absorbance UV à 254nm, pH, aluminium résiduel, alcalinité, dureté, demande en chlore et rémanence en chlore.

Ce mémoire est composé de cinq chapitres distincts. Dans le premier chapitre, nous présentons l'ensemble des procédés rencontrés lors du traitement de potabilisation des eaux de surface.

Le deuxième chapitre est consacré au chitosane, son origine, sa préparation, ses propriétés et ses différentes applications.

L'utilisation du chitosane dans le traitement des eaux est décrite largement dans le troisième chapitre. Les applications (coagulation floculation, adsorption ultrafiltration assistée) et le mécanisme d'interaction entre le chitosane et les particules polluantes s'y trouvent aussi.

Les techniques expérimentales adoptées, le matériel utilisé relatif à l'utilisation du chitosane dans le traitement de l'eau de barrage sont décrits dans le chapitre quatre.

Les résultats expérimentaux ainsi que les interprétations sont exposés dans le chapitre cinq.

Une conclusion générale viendra enfin conclure notre travail.

Chapitre I

METHODES GENERALES DE TRAITEMENT DE POTABILISATION DE L'EAU

I.1. Traitement de clarification

- I.1.1. Séparation mécanique préalable
- I.1.2. Coagulation
- I.1.3. Flocculation
- I.1.4. Décantation
- I.1.5. Filtration

I.2. Traitement de désinfection

- I.2.1. Principaux types de désinfection
- I.2.2. Importance d'une clarification préliminaire
- I.2.3. Concept du produit concentration et temps de contact
- I.2.4. Le chlore
- I.2.5. L'ozone
- I.2.6. Les ultraviolets (UV)
- I.2.7. Les membranes

I.3. Traitement spécifique

- I.3.1. Mise à l'équilibre calco-carbonique
- I.3.2. Prétraitements naturels
- I.3.3. Sous-produits de traitement

La production d'eau potable correspond à l'action permettant de produire de l'eau potable à partir des eaux naturelles. Le traitement nécessaire dépend fortement de la qualité de la ressource. Il varie aussi avec le niveau d'exigence et les normes appliquées dans chaque pays. (Annexes)

Ce chapitre permettra de nous renseigner sur les différents procédés de traitement employés dans une usine de production d'eau potable.

Les eaux brutes disponibles dans la nature comprennent, en quantités et proportions variables suivant les lieux, tout le spectre des composants naturels de la croûte terrestre, des produits de la vie végétale et animale ainsi que des constituants des rejets de l'activité humaine. Toutes ces substances, comme les produits de leurs dégradations ou transformations ultérieures dans le milieu, se trouvent soit en suspension, soit sous forme colloïdale, soit encore en solution. Les teneurs de ces paramètres dans le milieu naturel sont souvent incompatibles avec la réglementation sanitaire et la perception des consommateurs.

Le traitement des eaux pour la distribution a pour objet :

- de réduire ces teneurs pour les rendre inférieures à des valeurs (ou pour les amener à l'intérieur d'une fourchette de valeurs) fixées par des normes qui sont en fait des critères de qualité ;
- d'assurer une sécurité parfaite par désinfection.

I.1. Traitement de clarification

Avant d'appliquer tout autre traitement, y compris ceux de désinfection qui sont communs à toutes les distributions publiques d'eau de consommation humaine, il faut rendre l'eau apte à recevoir efficacement ces traitements. Cela suppose, en particulier, une eau débarrassée de ses impuretés macroscopiques ou microscopiques : c'est le domaine de la clarification.

Les techniques et processus auxquels le traitement fait appel sont d'ordre mécanique, physique et physico-chimique.

I.1.1. Séparation mécanique préalable

Une étude détaillée le long du cours d'eau permet de choisir le point de prise et le mode de prise entraînant le moins de débris solide et de pollution.

Dans le cas de prise dans un réservoir naturel ou artificiel, l'endroit et la profondeur de prise devront pouvoir être choisis en cours d'année pour tenir compte des phénomènes limnologiques.

Le dégrillage et le tamisage arrêtent mécaniquement les corps flottants grossiers d'une dimension supérieure à celle des mailles ou à l'espacement des barreaux.

Le micro-tamis est utile dans le cas d'eaux chargées de micro-organismes du type plancton qui sédimentent difficilement et qui engorgent très rapidement les filtres à sable (Godart, 2000).

I.1.2. Coagulation

La coagulation a pour but la déstabilisation des colloïdes et leur agglomération ainsi que celle des particules fines en suspension. Elle agit également par adsorption sur les substances dissoutes et les grosses molécules organiques hydrophiles en suspension stable. Elle est utilisée pour la clarification, la décoloration, l'agglomération des précipités résultant d'un adoucissement calcosodique, l'amélioration de goûts et d'odeurs (Godart, 2000).

Les colloïdes sont des particules qui ne décantent pas naturellement, en raison de leur grande surface spécifique et de leur très faible densité (Valentin, 2000). Ils sont généralement chargés négativement et soumis à des forces d'attraction (de Van der Waals) et à des forces de répulsion électrostatique. Afin de neutraliser cette charge négative, des ions positifs présents dans l'eau brute (ou ajoutés par le biais du coagulant) viennent se coller aux colloïdes pour former un nuage autour des colloïdes. On parle alors, de double couche (figure I-1) :

— la première adhère au colloïde, le potentiel (traduisant une énergie exprimée en volts) y décroît rapidement et linéairement ;

— la seconde est diffuse et le potentiel décroît lentement.

Il y a coagulation lorsque les forces ont été équilibrées de façon à annuler le potentiel zêta. Ainsi les coagulants sont le plus souvent des sels de métal trivalent (fer, aluminium) qui apportent beaucoup d'ions positifs (cations). C'est la coagulation par adsorption.

On peut la distinguer de la simple coagulation électrostatique, par diminution des forces de répulsion, et de la coagulation par entraînement (captation de particules d'une suspension diluée).

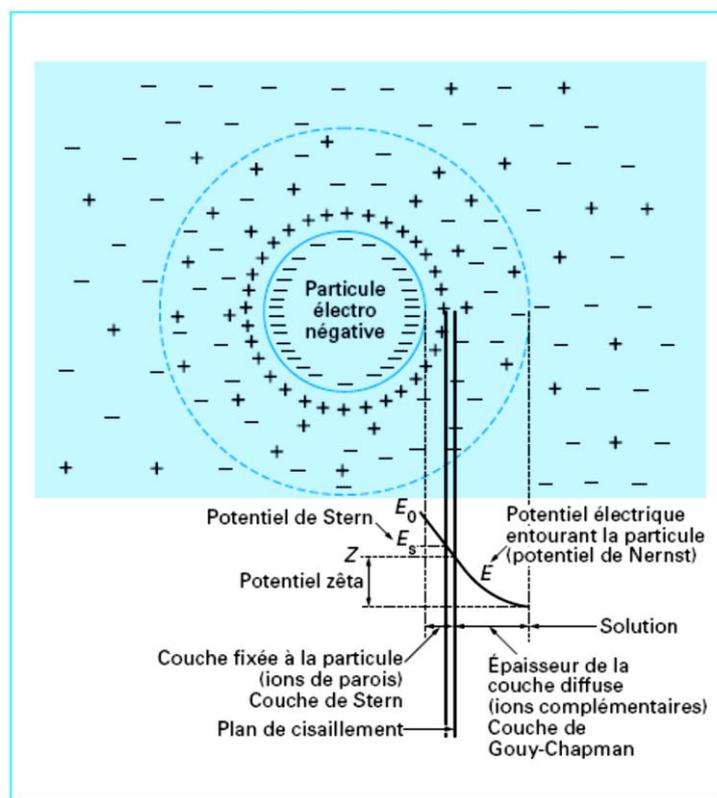


Figure I-1 : Distribution ionique autour d'une particule colloïdale électro-négative.

I.1.3. Floculation

Pour favoriser la dispersion des réactifs dans l'eau à traiter et la formation consécutive de gros agglomérats, on introduit les coagulants et adjuvants en des endroits où règne une forte turbulence (chute, remous, agitation mécanique rapide, etc.) ; on parle de flash mixing ou de flash mélange. La durée de séjour ne doit pas y excéder 2 minutes. La notion d'énergie de dispersion est très importante.

On introduit ensuite l'eau dans un ouvrage où règne une turbulence faible mais non négligeable. Les micro-flocons formés au stade de l'agitation rapide voient leur dimension croître considérablement par effet de pontage notamment. En fait, la floculation est un cas particulier de coagulation par adsorption ; on distingue usuellement la floculation péri-cinétique (mouvement brownien des particules) et la floculation ortho-cinétique (liée au déplacement du fluide). L'ouvrage où se produit l'opération s'appelle un flocculateur. Il existe des flocculateurs statiques du type à chicanes (section fixe ou croissante) et des flocculateurs dynamiques, les plus fréquents actuellement, à pales ou à équipages tournants, à un ou deux compartiments verticaux ou horizontaux. (Godart, 2000).

I.1.4. Décantation

C'est la phase au cours de laquelle les gros agglomérats sont séparés de l'eau traitée. On peut distinguer trois types d'appareils :

- ceux où la séparation est acquise par chute des agglomérats jusqu'au contact d'une surface fixe ;
- ceux où la séparation s'obtient par contact avec un lit fluidisé de boues préformées ;
- et, dans les appareillages les plus récents, ceux où la décantation est accélérée par un lest de micro-sable.

I.1.5. Flottation

La flottation est en quelque sorte une décantation à l'envers. Le procédé consiste à alléger, à l'aide de très fines bulles d'air, un floc naturellement léger et fragile. Le floc, dont la masse volumique est alors plus faible que celle de l'eau, est entraîné vers la surface de l'ouvrage où il s'accumule. L'eau clarifiée est collectée en partie basse du flottateur. Les boues de surface sont raclées vers une goulotte d'évacuation.

I.1.6. Filtration

Dans la recherche d'une clarification, la filtration est le processus de finition par excellence. Parallèlement à ses propriétés de fixation des particules en suspension, la filtration peut agir par adsorption et être le siège de processus biologiques. Un filtre est composé d'un lit de matières granuleuses qui est traversé par l'eau à traiter à des vitesses variables. La hauteur du lit granuleux, la granulométrie et la nature du matériau sont adaptées aux conditions d'emploi.

I.2. Traitement de désinfection

La désinfection est l'opération qui a pour objectif de produire une eau « potable » destinée à la consommation humaine qui soit exempte de germes pathogènes.

On a longtemps associé cette opération à la simple injection d'un désinfectant (réactif chimique) dans une eau préalablement clarifiée.

En fait, on constate que toutes les opérations de traitement, et principalement celles qui ont pour objet d'éliminer des eaux brutes des colloïdes ou les matières en suspension, participent physiquement à cette désinfection ; en outre, elles sont bénéfiques car une clarification préalable améliore l'efficacité du réactif.

Il faut également faire la différence entre la désinfection « active » (effet bactéricide) qui assure l'élimination des germes dans un temps relativement court, avant d'alimenter le réseau, et la désinfection « passive » ou de sécurité, qui consiste à maintenir une concentration minimale de désinfectant (résiduel) dans le réseau de distribution et jusqu'aux points de prélèvements (effet rémanent).

Pour maintenir ce résiduel pendant des temps longs, la présence de matières organiques dissoutes n'est pas souhaitable, car un grand nombre de ces molécules contribue à la dégradation accélérée du désinfectant ; en outre, certaines d'entre elles peuvent induire la formation de sous-produits indésirables car toxiques ou générateurs de mauvais goûts. (Moles, 2000).

I.2.1. Principaux types de désinfection

La désinfection peut être réalisée par voie physique, physico-chimique ou biologique (Moles, 2000; Gardner et Peel, 1998).

— Les **traitements physiques** concernent surtout l'emploi des rayons ultraviolets, dont l'action s'exercerait au niveau des molécules organiques des composés essentiels à la vie de la cellule, notamment les nucléoprotéines. Les différentes étapes de la clarification (décantation/filtration) constituent également autant de barrières vis-à-vis des colloïdes et des matières en suspension, et de ce fait participent à la désinfection ; c'est à ce titre que les membranes (ultrafiltration principalement) constituent une barrière absolue vis-à-vis de tout élément pathogène.

— En ce qui concerne les **traitements biologiques** : on peut considérer qu'ils s'exercent au niveau de la membrane biologique des filtres lents, en même temps qu'une pure rétention mécanique des germes (comme cela se passe également dans les techniques de « filtration sur berge » des rivières, dans le milieu naturel, pratiquées surtout en Allemagne sous le nom de « Uferfiltration »).

— Mais ce sont surtout les traitements **physico-chimiques** qui sont mis en œuvre pour détruire les germes indésirables : on utilise alors des oxydants (chlore et chloramines, dioxyde de chlore, ozone).

La figure I-2 illustre les avantages et les limites des principaux agents de désinfection actuellement utilisés. On constatera qu'il n'y a pas de désinfectant idéal et que le travail du traiteur d'eau sera d'utiliser conjointement l'un et l'autre des moyens qui sont à sa disposition pour optimiser les filières de traitement.

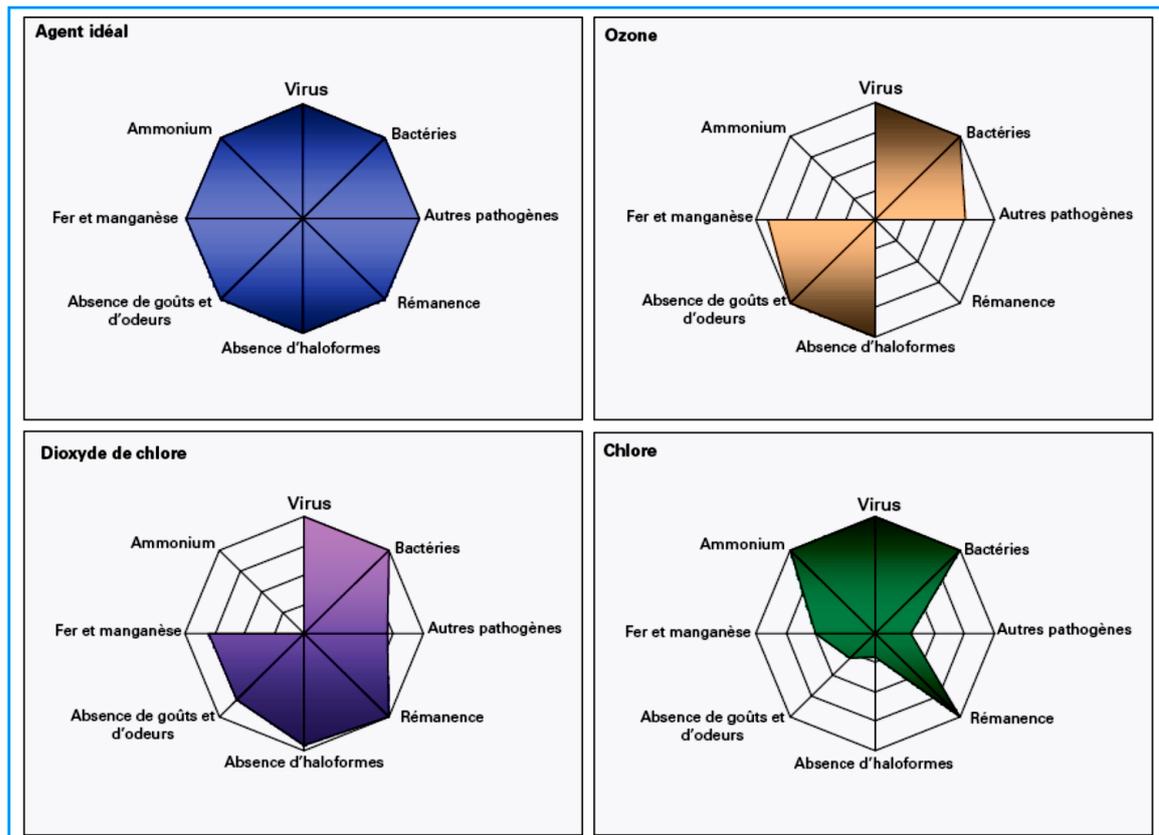


Figure I- 2 : Comparatif général des principaux agents de désinfection pour différents objectifs de traitement.

I.2.2. Importance d'une clarification préliminaire

Le traitement de désinfection par simple addition d'un désinfectant ne peut s'appliquer qu'à une eau naturelle conforme en toutes circonstances aux normes physico-chimiques de potabilité, puisque l'on ne corrige dans ce cas que la qualité bactériologique (Moles, 2000).

I.2.2.1. Élimination des colloïdes

Il existe 2 raisons majeures qui conduisent le traiteur d'eau à éliminer les particules en suspension et les colloïdes préalablement à toute désinfection.

— Aux doses usuelles les particules colloïdales protègent les bactéries qui leur sont agglomérées contre l'action des désinfectants. Une bactérie fixée est beaucoup plus résistante qu'une bactérie libre. L'efficacité de la désinfection est donc intimement liée au niveau de limpidité de l'eau, dans laquelle turbidité et teneur en MES devraient être en permanence inférieure à 1 NTU et 1 mg/L, respectivement (l'OMS propose 5 NTU).

— Parmi les colloïdes figurent, des spores d'algues ou de bactéries, des œufs et des kystes de micro-invertébrés, etc.... Ces formes de résistance de reproduction et/ou de dissémination, peuvent ensuite coloniser le réseau et contaminer le consommateur, car la désinfection n'en détruit pas la totalité ; c'est pourquoi, certains spécialistes américains s'élèvent contre la possibilité de distribuer une eau de surface, même limpide, sans filtration et rejoignent ainsi la conception européenne qui tend à développer le concept de multi-barrière.

I.2.2.2. Élimination des matières organiques

Il faut également que les teneurs en matières organiques (COT, carbone organique total) soient les plus faibles possibles pour de multiples raisons :

— les matières organiques consomment du désinfectant ; il faut donc en rajouter plus pour obtenir un résiduel donné si l'eau est mal traitée ;

— l'interaction désinfectant-COT est souvent nuisible : elle contribue à la formation de sous-produits indésirables comme l'indique la figure I-3 ;

— enfin, la fraction biodégradable du COT est une source de nutriment pour les germes qui persistent dans le réseau, d'où des phénomènes de reviviscence qu'il faut éviter au maximum. Il faut donc abaisser les teneurs en COA (Carbone Organique Assimilable) ou CODB (Carbone Organique Dissous Biodégradable), sous peine de constater dans le réseau une disparition rapide du désinfectant résiduel et la reviviscence des bactéries.

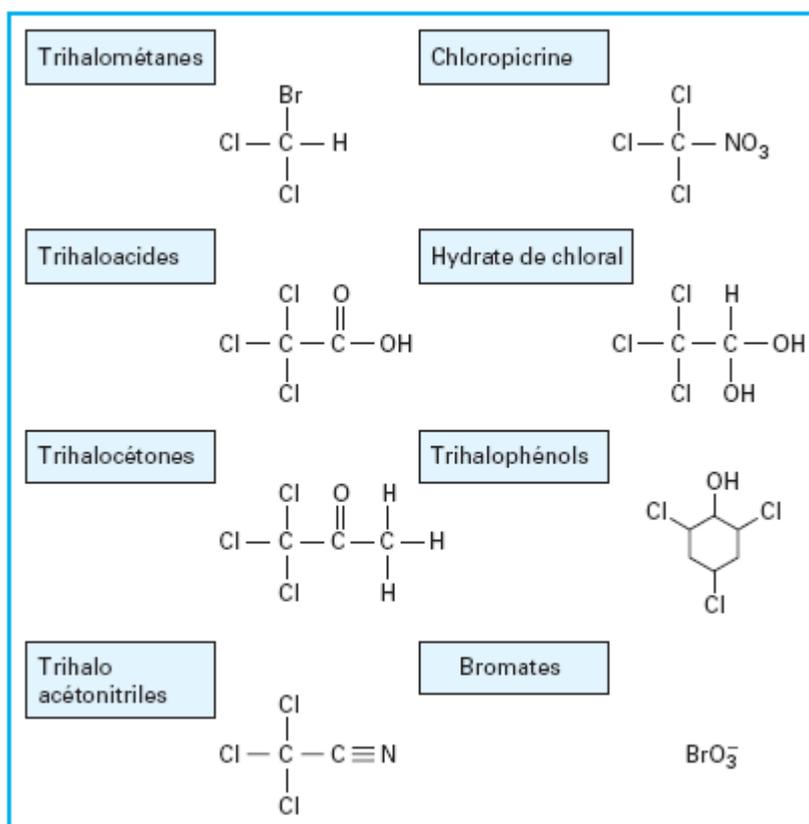


Figure I- 3 : Sous-produits halogénés de la désinfection.

I.2.3. Concept du produit CT: concentration et temps de contact

Afin d'uniformiser l'approche de la désinfection, le concept de CT a été développé (issu des lois de Chick et Watson).

C : est la concentration en désinfectant exprimée en mg/l,

T : est le temps de contact, exprimé en min.

Les études basées sur ce principe permettent :

- soit de classer divers désinfectants par ordre d'efficacité vis-à-vis d'un micro-organisme déterminé.
- soit de comparer la sensibilité de divers micro-organismes à un même désinfectant.

I.2.4. Le chlore

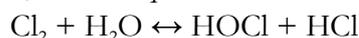
Le chlore est le désinfectant le plus utilisé à travers le monde depuis ses premières applications en traitement des eaux vers 1897 en Europe. Cet oxydant a permis de franchir une grande étape technologique en permettant, à moindre frais et avec une efficacité redoutable, d'atteindre un niveau d'hygiène et de qualité faisant reculer les grandes épidémies hydriques (Moles, 2000 ; Block et al., 1998).

Il peut être utilisé sous forme :

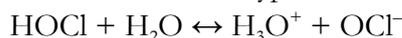
- de chlore gazeux Cl_2 (liquéfié en bouteilles ou en tanks, utilisé par prélèvement direct en phase gazeuse, ou liquide par l'intermédiaire d'un évaporateur, et introduit dans l'eau après dosage et mise en solution dans un appareil appelé chloromètre) ;
- d'hypochlorite de sodium : NaOCl (liquide : eau de Javel) ;
- d'hypochlorite de calcium : Ca(OCl)_2 (en poudre).

I.2.4.1. Réactions avec l'eau : dissolution-hydrolyse

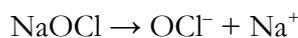
Quand le chlore est introduit dans l'eau, il y a une hydrolyse rapide qui conduit à la dismutation du chlore en acide hypochloreux et acide chlorhydrique, selon l'équilibre :



Cette réaction s'accompagne d'une dissociation de l'acide hypochloreux également réversible



Il se produit une réaction analogue lorsque le réactif de départ est l'hypochlorite de sodium (eau de Javel) ou de calcium, par exemple :



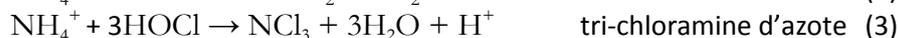
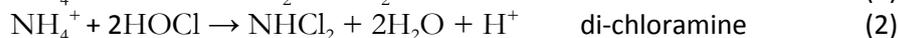
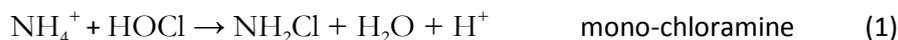
La proportion de HOCl/OCl^- dans l'eau est étroitement liée au pH.

L'effet germicide de l'acide hypochloreux est très supérieur à celui de l'ion hypochlorite. La désinfection par le chlore sera donc beaucoup moins efficace, en milieu alcalin et à haute température, qu'à froid et à pH faible.

L'acide hypochloreux et l'ion hypochlorite sont appelés l'un et l'autre chlore libre, en opposition au chlore combiné (en particulier les chloramines). Mais, de ce qui précède l'acide hypochloreux est, quant à lui, dénommé chlore libre actif.

I.2.4.2. Réaction avec l'ammonium

En présence d'ammonium ou de composés organiques aminés (ex. R-NH₂), le chlore forme, par substitution, des chloramines. Suivant la quantité de chlore et le pH, on aura des mono-, di- ou tri-chloramines.



Lorsque la réaction (1) est terminée, un excès de chlore détruit les chloramines :



Lorsque la réaction (4) est terminée, le chlore rajouté en excès se retrouve sous forme de chlore libre (HOCl + OCl⁻).

Il est important de connaître la valeur du chlore introduit, car l'acide hypochloreux est environ 100 fois plus actif que la mono-chloramine et 20 à 30 fois plus que la di-chloramine.

I.2.4.3. Réaction avec les matières organiques

Le chlore réagit également avec de nombreuses molécules organiques dissoutes comme l'indique l'équation ci-après :



La formation de ces composés halogénés est régie par 3 paramètres principaux :

- 1-présence de précurseurs (matières organiques) ;
- 2-présence de chlore (taux de traitement au-dessus du point critique) ;
- 3-temps de contact important.

C'est cette observation qui a conduit, dans certains pays, à supprimer la préoxydation au chlore et à la remplacer par une préozonation.

I.2.5. L'ozone

L'ozone étant l'oxydant le plus puissant mis au service du traiteur d'eau. Il a longtemps été considéré comme le meilleur désinfectant. Grâce à son potentiel d'oxydation élevé, on a rapidement découvert les multiples facettes de ce réactif.

I.2.6. Les ultraviolets (UV)

Depuis plusieurs dizaines d'années, un procédé physique de désinfection est utilisé en production d'eau potable : le rayonnement ultraviolet.

Le terme UV est utilisé pour les radiations du spectre électromagnétique de longueurs d'onde comprises entre le visible et les rayons- X, soit de 100 à 400 nm.

Les UV-C (200 à 280 nm) sont les seuls germicides (destruction des bactéries, virus, champignons, algues et levures). L'effet maximal étant obtenu à 253,7 nm. (Moles, 2000).

I.2.7. Les membranes

La filtration classique ne permet pas d'éliminer les particules ou les micro-organismes de taille inférieure à 1 μm . Pour des particules plus fines, des techniques de séparation par membranes sont employées. La dimension des pores de chaque membrane définit le pouvoir de séparation, appelé aussi seuil de coupure. Ce seuil de coupure permet de caractériser ainsi la microfiltration et l'ultrafiltration. La microfiltration correspond à des pores d'un dixième de micromètre. Par contre, l'ultrafiltration correspond à des pores de un centième de micromètre. Ces deux techniques membranaires fonctionnent à basse pression. Au-delà, la nanofiltration, avec un seuil de coupure très bas (1 nanomètre), fonctionne sous des pressions plus élevées. Elle est intermédiaire entre l'ultrafiltration et l'osmose inverse. (Moles, 2000 ; Cote, 1997).

I.3. Traitement spécifique

Ces traitements font appel à des techniques et processus, qui sont de plus en plus généralisés. Il en va ainsi de:

- la mise à l'équilibre calco-carbonique, parfois considérée comme un luxe, mais sérieusement remise en avant depuis que l'on se préoccupe plus du confort du consommateur (machines entartrées, etc.), de la longévité des canalisations (corrosion, incrustation...), et de nouveaux problèmes sanitaires comme celui du plomb ;
- les prétraitements naturels extensifs qui permettent de limiter les autres traitements ;
- le traitement enfin des sous-produits de traitement.

I.3.1. Mise à l'équilibre calco-carbonique

Il y a typiquement deux problèmes distincts : corriger une eau agressive (très chargée en CO_2 dissous), et corriger une eau incrustante (charge en calcium Ca^{2+} et en ions bicarbonates HCO_3^-).

La correction d'une eau agressive peut s'effectuer de plusieurs façons :

Premièrement, on peut éliminer le CO_2 par aération. Du fait de l'élimination du CO_2 , le pH augmente et se rapproche du pH d'équilibre.

Deuxièmement, on peut ajouter une base à l'eau. L'ajout de base permet d'augmenter le pH et d'atteindre le pH d'équilibre. La correction d'une eau incrustante peut se faire soit par traitement direct soit en réduisant le potentiel d'entartrage par décarbonatation. Le traitement direct correspond à un ajout d'acide (Degremont, 2005).

Il existe aussi la percolation au travers des lits de calcaires minéraux ou marins. Si une eau percole sur un matériau divisé contenant du calcaire, l'eau se mettra d'elle-même en équilibre si l'opération est suffisamment prolongée. En effet, si l'eau est entartrante, elle tendra à déposer le calcaire avec un dégagement de CO_2 jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. Par contre, si elle est agressive, le CO_2 en excès attaquera le calcaire et donnera du bicarbonate de calcium : le CO_2 dissous décroîtra et l'alcalinité augmentera. (Godart, 2000 ; Legrand et al., 1981).

I.3.2. Prétraitements naturels

Lorsque les circonstances s'y prêtent, on a toujours intérêt à utiliser les processus naturels d'épuration. Ils comprennent le stockage d'une certaine durée et la percolation à travers le sol. (Godart, 2000).

I.3.2.1. Stockage

Le stockage peut avoir deux objectifs :

Constitution d'une réserve assurant au distributeur un degré de liberté supplémentaire dans la gestion hydraulique de la ressource (possibilité de diluer ou même de passer outre à une vague de pollution accidentelle).

Modification de la qualité de l'eau brute (abaissement de la turbidité de l'eau).

Dans le cas le plus général, les deux aspects doivent être pris en considération.

I.3.2.2. Percolation au travers du sol

Selon la qualité initiale, la nature des terrains, les vitesses et les durées de percolation, on constate une nette amélioration vis-à-vis de la turbidité et du pouvoir colmatant de la teneur en matières organiques et de l'ammoniaque, dans les limites de la teneur initiale en oxygène dissous. Vis-à-vis du fer et du manganèse, les résultats obtenus sont variables.

Ces techniques sont à envisager quand les conditions économiques sont favorables : terrains peu onéreux ou domaine foncier inaliénable, service d'eau constitué depuis très longtemps, et bien sûr dans les cas où la nature du terrain s'y prête : dunes, alluvions.

I.3.3. Sous-produits de traitement

Les rejets des unités de potabilisation n'ont pas encore de réglementation propre. Les boues d'eau potable ne présentent pas de qualités intrinsèques intéressantes. Elles sont, dans la majorité des cas, constituées de matières inertes d'hydroxydes d'aluminium ou de fer.

— Évacuation de résidus sous forme d'épandage agricole : En principe, les boues d'eau potable peuvent être épandues en agriculture sans contraintes particulières, sous l'appellation « terre de décantation ».

— Rejets en milieu naturel : les unités ayant un rejet en milieu naturel (eaux douces ou de mer) sont soumises à autorisation ou à déclaration administrative. Les teneurs en métaux de ces rejets (aluminium et fer entre autres) ne sont pas prises en compte, car ils sont considérés comme déjà présents à de fortes concentrations dans le milieu naturel.

— Rejets dans le réseau d'eaux usées : C'est la solution la plus simple à mettre en œuvre. Ce système d'évacuation des boues d'eau potable peut, toutefois, entraîner quelques inconvénients sur le bon fonctionnement de la station d'eau résiduaire urbaine.

Les techniques de traitement de ces sous-produits sont les suivantes (Godart, 2000) :

— techniques de déshydratation : épaissement, déshydratation mécanique ou naturelle ;

— traitement des éluats : la destination des éluats de régénération de résines est en général une usine de dépollution urbaine.

Les eaux issues de la partie rinçage de la régénération, donc à faible teneur en chlorures, peuvent être rejetées directement dans le milieu naturel ;

— traitement des concentrats de membranes : d'après une étude effectuée aux États-Unis, dans 50 % des cas, les concentrats sont rejetés dans les eaux de surface. Seulement 25 % des effluents sont évacués vers des usines de dépollution. L'élimination du dernier quart se fait par épandage ou réinjection dans le sol. Par ailleurs, il n'existe pas de traitement particulier d'élimination des phosphonates ou des polycarboxylates avant rejet au milieu naturel ;

— traitement commun des boues d'eau potable et des boues d'eau résiduaire urbaine : ce type de traitement est exclusivement réservé aux boues de décarbonatation qui, en raison de leurs qualités, sont susceptibles d'améliorer les performances de la déshydratation des boues d'eau résiduaire urbaine.

Parmi les diverses destinations des sous-produits après traitement, on peut citer :

— la mise en remblais routiers ;

— l'incinération ;

— les briques ou tuiles enrobées, les bétons colloïdaux ;

— les réactifs de stabilisation de déchets ;

— la couverture de décharge.

La disponibilité en eau de bonne qualité est vitale. Cependant, peu d'eaux répondent aux caractéristiques exigées pour l'eau potable. La transformation d'une eau de surface en une eau propre à la consommation nécessite de faire appel à un ensemble de procédés de traitement extrêmement divers décrits brièvement dans ce chapitre.

Cependant, ces procédés doivent être assemblés dans un ordre déterminé, afin de fournir un produit fini conforme aux normes de potabilité. L'efficacité du traitement adopté dépendra, de plus, de la façon dont sera conduite l'exploitation de l'usine. Pour atteindre l'objectif souhaité, l'exploitant devra respecter certains principes élémentaires pour assurer le contrôle du processus de traitement et le contrôle de l'eau traitée.

Un exemple d'une usine de production d'eau potable est décrit dans les annexes

Chapitre II

LE CHITOSANE

- II.1. Origine du chitosane**
- II.2. Préparation du chitosane**
 - II.2.1. Qualité du chitosane produit
- II.3. Principales propriétés**
 - II.3.1. Degré de N-acétylation et poids moléculaire
 - II.3.2. Propriétés en solution
 - II.3.3. Arrangement naturel en microfibrilles
 - II.3.4. Solubilité du chitosane
- II.4. Aptitude au conditionnement**
- II.5. Principales applications du chitosane**
 - II.5.1. Traitement des eaux usées
 - II.5.2. Agriculture
 - II.5.3. Décontamination
- II.6. Les aspects économiques**

L'idée d'utiliser des polymères naturels pour le traitement des eaux n'est pas neuve puisqu'ils sont utilisés en Inde, en Afrique et en Chine pour clarifier l'eau depuis plus de 2000 ans.

Les polymères organiques naturels présentent un intérêt particulier par rapport aux polymères synthétiques dans la mesure où ils ne comportent aucun danger pour la santé humaine contrairement aux produits synthétiques.

Le chitosane présente un sérieux potentiel dans ce domaine vue ses innombrables propriétés qu'on décrira largement dans ce chapitre.

II.1. Origine du chitosane

Le chitosane est un aminopolysaccharide d'origine biologique, c'est un copolymère linéaire composé d'unités monomériques de D-glucosamine et de N-acétyl-D-glucosamine (voir figure II-1). Ce biopolymère est caractérisé par son degré d'acétylation (DA) ou, selon les auteurs, par son degré de dés-acétylation (DD) (Kurita, 2006 ; Roberts, 1992).

Le chitosane est une substance peu répandue dans la nature. Il est présent dans la paroi cellulaire de certains micro-organismes fongiques (champignons zygomycètes) et dans le mycélium de *Mucor rouxii*, *Rhizopus oryzae* et *Absidia coerulea*. Il n'est signalé que dans les exosquelettes de certains insectes (par exemple la paroi abdominale des reines de termites). Il n'y a donc pas de source primaire de chitosane exploitable. La production étant assurée par transformation des déchets issus de la pêche.

La source majeure du chitosane vendu commercialement provient de la dés-acétylation de la chitine qui est un biopolymère insoluble constitué d'unités de N-acétyl-D-glucosamine. La chitine est une substance naturellement synthétisée : c'est le constituant structural de l'exosquelette des arthropodes (crustacés, insectes) et des parois cellulaires de certains champignons, algues et levures (Roberts, 1992).

Ce polysaccharide est produit, par exemple, par les insectes tels que les blattes, les coléoptères, les fourmis, les scorpions, les araignées, les langoustines ou encore les calamars. La présence de chitine a aussi été retrouvée dans les chrysalides de ver à soie (Roberts, 1992).

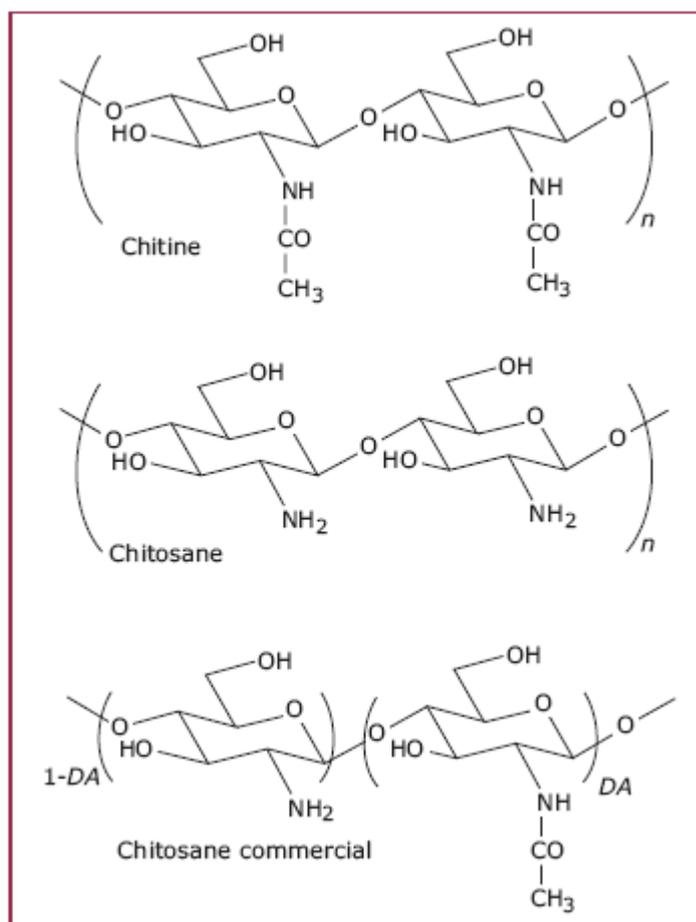


Figure II-1 : Structure chimique de la chitine parfaite, du chitosane parfait et du chitosane commercial. (Crini et al., 2009)

II.2. Préparation du chitosane

La production commerciale de chitosane utilise la chitine provenant des crevettes et des crabes. Ce sont les deux sources naturelles les plus abondantes (Shahidi et Abouzeydoun, 2005 ; Skjak-Braek et al., 1980 ; Roberts, 1992). Les procédés de fabrication, les plus courants, font appel à une série de traitements chimiques incluant les trois grandes étapes suivantes (Skjak-Braek et al., 1980 ; Roberts, 1992):

- 1-étape de **déprotéinisation** : les carapaces de crustacés sont d'abord broyées, puis les protéines ainsi qu'une partie des colorants naturels sont extraits par une solution de soude ou de potasse ;
- 2-étape de **déminéralisation** en milieu acide chlorhydrique qui permet de se débarrasser des sels minéraux (principalement carbonates et phosphates) ;
- 3-étape de **désacétylation** par une solution de soude concentrée ; le chitosane obtenu peut être ensuite redissous dans une solution d'acide organique afin de le purifier.

À la fin des deux traitements (déprotéinisation et déminéralisation), il peut subsister une coloration due à des pigments incomplètement éliminés. On effectue alors une étape de **décoloration** par un agent oxydant, avec un risque de dépolymérisation et/ou d'oxydation des produits.

Il existe une multitude de méthodes de préparation du chitosane. La principale est une réaction de désacétylation en milieu basique. Le traitement alcalin de la chitine entraîne l'hydrolyse d'un nombre variable de groupements acétyles, produisant ainsi du chitosane possédant divers degrés d'acétylation (DA).

En général, le chitosane obtenu possède un DA voisin de 20 à 30 %. Il se présente sous la forme d'un solide amorphe ayant une couleur orange brûlé. Le procédé chimique de dépolymérisation de la chitine génère également un continuum de macromolécules de chitosane de masses moléculaires (MM) variées (on parle de « chitosane polydispersé »).

Qualité du chitosane produit

La qualité du chitosane varie selon l'origine de la matière première utilisée (crevettes, crabes, calamars...) et de la procédure expérimentale d'extraction (Kurita, 2006 ; Shahidi et Abouzeydoun, 2005). En effet, il est à noter que les étapes d'extraction de la chitine et de désacétylation influencent la qualité du produit fini, qui est le chitosane.

Des conditions trop drastiques conduisent à une dégradation physique du biopolymère (avec une chute importante de la masse moléculaire et/ou une oxydation des extrémités réductrices des chaînes macromoléculaires), alors que des conditions trop douces ne permettent pas une désacétylation suffisante.

Ceci permet d'expliquer parfois la difficulté d'obtenir de manière reproductible des produits de composition prédéterminée. La production mondiale de chitine est estimée entre 2 000 et 3 000 tonnes par an, dont 60% à 70 % sert à produire le chitosane (Kurita, 2006). Le prix de vente du chitosane varie entre 20 000 et 10 000 euros le kilogramme, en fonction de ses applications et donc de ses caractéristiques.

II.3. Principales propriétés

Les chaînes macromoléculaires du chitosane sont caractérisées par leur **masse moléculaire** et leur **degré d'acétylation**. La troisième caractéristique importante porte sur la **crystallinité** du polymère (le chitosane est une substance semi-cristalline).

D'un point de vue chimique, sa structure est similaire à celle de la cellulose (biopolymère linéaire de β - (1→4)-D-glucopyranose). Par contre, la présence d'une fonction amine primaire de pK proche de 6,3 (le pK est fonction du DA) en position 2 du noyau glucopyranose confère au chitosane des propriétés chimiques et physico-chimiques qui en font un polymère possédant un ensemble de propriétés remarquables.

Le chitosane est à la fois une macromolécule polyaminée et polyhydroxylée qui devient un polyélectrolyte lorsque le groupement aminé est protoné (il se solubilise en milieu acide). Il possède alors un fort potentiel en raison de son caractère polycationique qui le distingue des autres polymères naturels qui sont en général anioniques (Desbrieres, 2002 ; Kurita, 2006 ; Shahidi et Abouzeydoun, 2005).

Ce biopolymère présente également des propriétés biologiques variées. Les propriétés intrinsèques du chitosane influent sur sa solubilité en milieu aqueux, son hydratation, sa structure tridimensionnelle, sa viscosité, son aptitude à participer dans des interactions ioniques, sa capacité à lier des molécules organiques et des sels de métaux lourds et autres, et sa facilité à subir des modifications chimiques qui permettent de créer une multitude de dérivés aux propriétés physico-chimiques et biologiques variées.

II.3.1. Degré de N-acétylation et poids moléculaire

Un des paramètres les plus importants à observer au niveau de la chitine est son degré de N acétylation, ou plutôt le ratio 2-acetamido-2-deoxy-D-glucopyranose/2-amino-2-deoxy-Dglucopyranose. Ce ratio est tributaire de la solubilité et des propriétés en solution de la chitine.

Lorsque le degré d'acétylation atteint environ 90 %, on peut donner le nom de chitine au polysaccharide alors que lorsque ce dernier chute en bas de 35 %, on parle plutôt de chitosane.

La N-déacétylation augmente ainsi la solubilité du biopolymère dans une solution aqueuse d'acide acétique ou d'acide formique. (Ravi Kumar, 2000)

La viscosimétrie est une technique rapide pour la détermination du poids moléculaire du chitosane ou de la chitine (Ravi Kumar, 2000).

La conversion de la chitine en chitosane modifie le degré d'acétylation et donc la distribution des charges, ce qui peut causer l'agglomération des molécules (Ravi Kumar, 2000).

Généralement, on observe un poids moléculaire moyen de $1,03 \times 10^6$ à $2,5 \times 10^6$ mais la réaction de désacétylation réduit ce dernier entre 1×10^5 et 5×10^5 (Lee, 1997).

II.3.2. Propriétés en solution

La chitine et le chitosane ont la propriété de se dégrader avant d'atteindre leur point de fusion, ce qui est caractéristique des polysaccharides formant des ponts hydrogènes.

Pour rendre la chitine et le chitosane utilisables sur le plan technique, il est nécessaire de les mettre en solution dans un solvant approprié (ex : acide acétique). Pour tous les systèmes de solvants, il est nécessaire de connaître les effets de la concentration du polymère, du pH, de la température et de la concentration en contre ions sur la viscosité de la solution.

Cependant, les comparaisons entre les différents systèmes de solvant ne sont pas disponibles dans la littérature. (Ravi Kumar, 2000)

Les propriétés d'adsorption du chitosane peuvent être décrites selon l'équation de Langmuir. L'adsorption maximale est obtenue lorsqu'il est complètement désacétylé (Huang et al ., 2000).

II.3.3. Arrangement naturel en microfibrilles

Dans les organismes vivants, la chitine forme des microfibrilles qui sont enchâssées dans une matrice protéique (contenant du carbonate de calcium) avec un diamètre variant généralement de 2.5 à 2.8 nm.

Chez les crustacés, on observe toutefois des microfibrilles atteignant les 25 nm de diamètre (Ravi Kumar, 2000).

II.3.4. Solubilité du chitosane

La solubilité du chitosane est l'un de ses avantages majeurs par rapport à la chitine (soluble que dans des solvants très toxiques). Bien qu'il soit insoluble dans l'eau et les solvants organiques, cette polyamine est soluble dans les acides aqueux dilués.

Il est soluble dans l'acide chlorhydrique et les acides organiques aqueux tels que l'acide formique, l'acide acétique, l'acide oxalique et l'acide lactique.

L'efficacité de la solubilité dépend de l'acide employé et de sa concentration. La solubilité diminue avec l'augmentation de la concentration de l'acide, et les solutions aqueuses de quelques acides, tels que l'acide phosphorique, et l'acide sulfurique, semblent être de piètres solvants pour le chitosane (Kurita, 2001 ; Peter, 1995).

Il existe plusieurs facteurs agissant sur la solubilité du chitosane, tels que : la température et le temps de réaction de la désacétylation, la concentration alcaline, les traitements antérieurs appliqués à l'isolation de la chitine, le rapport chitine/base et la taille des particules.

A pH 7, la stabilité de la solubilité du chitosane est médiocre. A pH élevé, le chitosane tend à précipiter ou à former un gel. Des complexes polyioniques entre le chitosane et les hydrocolloïdes anioniques résultent de la formation du gel (Felt, 1999).

Le chitosane solubilisé peut être régénéré grâce à un coagulant. Le choix du coagulant dépend du solvant utilisé pour la solubilisation du chitosane (Felt, 1999).

II.4. Aptitude au conditionnement

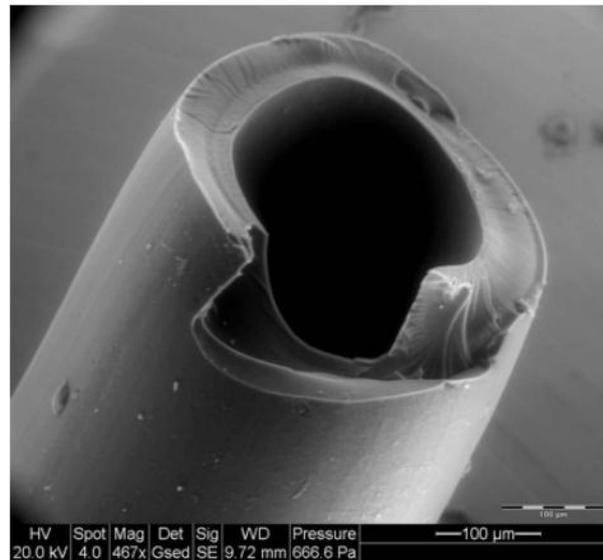
Le chitosane se distingue de la cellulose par le fait que c'est un matériau beaucoup plus versatile et pouvant être modifié facilement par voie physique ou chimique.

Du fait de sa solubilité en milieu acide, le chitosane offre, en effet, la possibilité de produire différentes formes physiques (possibilité d'avoir plusieurs conditionnements) comme des solutions ou des lyophilisats, des billes, des hydrogels, des nanoparticules, des fibres, des films ou encore des membranes (Guibal, 2004 ; Skjak-Braek et al., 1980).

Par exemple, le chitosane peut être utilisé:

- sous forme **liquide** dans des formulations de principes actifs thérapeutiques ou pour traiter des piscines,
- sous forme de **particules** pour préparer des médicaments ou pour décolorer des solutions alimentaires,
- sous forme **semi-solides** (hydrogels) pour préparer des crèmes, sous forme de **fibres** (voir figure II-2 a) pour préparer des tissus biologiques ou des fils de sutures, sous forme de **films** dans les emballages (voir figure II-2 b) ou de revêtements dans l'industrie papetière,
- sous forme **d'objets** façonnés pour préparer des lentilles de contact ou des prothèses orthopédiques.

Les modifications physiques et chimiques, que peut subir le chitosane, ont pour objectifs, non seulement, de préparer de nouveaux conditionnements, mais également d'apporter d'autres propriétés comme une plus grande stabilisation du matériau en limitant sa solubilisation ou sa dégradation, une amélioration de la sélectivité de fixation en greffant des groupes spécifiques qui conduisent à changer. Par exemple, le mécanisme d'interaction, ou encore d'étendre le champ d'application du matériau en modifiant en particulier la plage de pH optimale ou son comportement vis-à-vis de la température (Guibal, 2004).



(a)



(b)

Figure II-2 : Différentes formes de conditionnement du chitosane.

(a) fibre creuse ; (b) Membrane plane.

II.5. Principales applications du chitosane

Les propriétés physico-chimiques et biologiques du chitosane en font un matériau de choix pour son utilisation dans de nombreux domaines industriels comme les secteurs biomédical, pharmaceutique, cosmétique, agroalimentaire et agricole.

De nombreux travaux scientifiques transdisciplinaires ont été conduits sur la chitine, et surtout sur le chitosane, depuis une vingtaine d'années (Desbrieres, 2002 ; Ravi Kumar, 2000 ; Skjak-Braek et al., 1980). Le nombre important de brevets déposés dans des secteurs économiquement porteurs, comme les industries cosmétiques ou biomédicales, démontre une recherche très innovante.

II.5.1. Traitement des eaux usées

Plusieurs études démontrent que le chitosane est un agent coagulant et floculant efficace dans le traitement des eaux usées industrielles (production de volailles, d'œufs, de fromage, de viande, de gâteaux aux fruits, de fruits de mer, etc.) (Keong Jun et al., 1994).

Des réductions de 70 à 98 % de la teneur en MES et de 55 à 80 % de la demande chimique en oxygène (DCO) ont été observées pour ces eaux usées (Keong Jun et al., 1994). Le chitosane peut être utilisé seul ou en combinaison avec d'autres coagulants, tels les sels métalliques d'aluminium ou de fer.

Mis à part sa grande disponibilité, le grand intérêt à utiliser ce composé d'origine biologique comme agent floculant, provient du fait qu'il est biodégradable et pratiquement non-toxique (Knorr, 1983).

Actuellement, dans la majorité des cas, les particules colloïdales, comme les protéines ou les huiles, sont retirées à l'aide d'un procédé chimique de coagulation-précipitation à l'aide de sulfate d'aluminium ou de chlorure de polyaluminium, deux agents coagulants efficaces et peu dispendieux (Ruhsing Pan et al., 1999).

Cependant, l'utilisation de ces sels d'aluminium peut causer une augmentation de la teneur en aluminium dans l'eau potable et ainsi avoir un impact considérable, à long terme, sur la santé humaine. McLachlan (1995) a démontré la relation entre les concentrations d'aluminium présentes dans l'eau et le risque de contraction de la maladie d'Alzheimer. L'aluminium peut aussi avoir des répercussions négatives sur les milieux naturels s'il s'y retrouve en trop grandes concentrations (Wang et al. 2004).

Le chitosane apparaît, dans ce contexte, comme une alternative durable pour l'enlèvement des MES à cause de sa non répercussion sur la santé humaine et celle des écosystèmes à long terme. Cette non toxicité a aussi permis d'étendre ces usages à l'industrie chimique, biomédicale, pharmaceutique et agroalimentaire (Wibowo et al., 2005). Le procédé de coagulation-floculation, par ajout de chitosane, est actuellement utilisé dans la moitié des cas de traitement d'eaux usées au Japon. Et selon une proportion variable dans certains autres pays asiatiques (Jourdin, 2001). Cependant, en Amérique du Nord, son utilisation est quasi inexistante.

II.5.2. Agriculture

Outre son grand potentiel pour le traitement des eaux usées, le chitosane est un biopolymère d'intérêt dans le domaine agroalimentaire. En tant que biostimulateur, il favorise la germination et la croissance des plantes, en plus d'augmenter leur rendement.

Une étude réalisée sur des plans de tomates de serre montre une augmentation de 12 % dans la production lorsque ceux-ci sont traités au chitosane (Marinard Biotech, 2005).

Il possède aussi des propriétés antifongiques qui le rendent fort attrayant pour lutter contre les phytopathogènes. L'application de chitosane induit, chez la plante, des mécanismes de défense (synthèse de phytoalexines, chitinases, pectinases, etc.), ce qui fait de ce biopolymère un outil attrayant pour réaliser la lutte antiparasitaire (Marinard Biotech, 2005).

Des travaux de recherche montrent plusieurs autres domaines d'application en agroalimentaire, notamment dans l'enrobage des semences, comme agent fertilisant, comme pellicule protectrice pour les fruits et légumes, comme pellicule antigél et enfin comme stimulateur de la floraison et de la fructification (Marinard Biotech, 2005).

D'un point de vue environnemental, l'utilisation de ce biopolymère est fort acceptable puisqu'il contribuerait à réduire l'utilisation de pesticides et de fertilisants chimiques. Ces deux types de substances sont responsables d'importantes répercussions sur les milieux naturels et sur la santé humaine.

II.5.3. Décontamination

Le chitosane possède également des propriétés lui permettant de se lier à certains métaux : Pd > Au > Pt > Cu > Ni > Zn > Mn > Pb > Co > Cr > Cd > Ag, avec une affinité plus ou moins grande et variable selon le pH, la force ionique et la présence d'autres métaux qui entrent en jeu.

Plusieurs technologies exploitent, ainsi, ces propriétés afin de décontaminer les eaux usées, notamment les membranes en gel, l'ultrafiltration avec complexe métal-chitosane, l'osmose inverse, la nano-filtration et la pervaporation (Krajewska, 2005).

II.6. Les aspects économiques

La disponibilité de la chitine et du chitosane repose essentiellement sur l'industrie de la mise en conserve du crabe et des crevettes qui récolte d'énormes quantités d'exosquelettes.

Les pays les plus actifs dans le recyclage de cette ressource sont les États-Unis (plus particulièrement les états de l'Oregon, de Washington et la Virginie) et le Japon, de même que plusieurs flottes de pêche en antarctique. Cependant, la Norvège, le Mexique et le Chili possèdent de grandes quantités de chitine non exploitées.

D'un point de vue commercial, la production du chitosane est économiquement viable, surtout si elle permet la récupération des caroténoïdes ; un pigment qui peut ensuite servir d'additifs alimentaires en salmoniculture. (Ravi Kumar, 2000).

Avantages

- Biodégradable et pratiquement non-toxique pour l'humain et les écosystèmes,
- Réduction importante des MES et de la DCO (cette réduction peut varier selon le type d'effluent à traiter),
- Il permet de réduire de manière importante les quantités de sels d'aluminium (réduction de 2/3) lorsqu'il est utilisé comme floculant dans le traitement des eaux usées municipales,
- En aquaculture, il permet une réduction substantielle du phosphore lorsqu'il est utilisé avec le chlorure ferrique. Près de 80 % de réduction du phosphore dissous lorsque le chitosane est utilisé à raison de 0.1 ppm avec diverses concentrations de chlorure ferrique (Marinard Biotech, 2001).

Inconvénients

- L'utilisation du chitosane est plus coûteuse comparativement aux sels métalliques,
- Au même titre que les autres coagulants et floculants utilisés, l'efficacité dépend de plusieurs facteurs tels que sa concentration en solution, sa charge globale et la densité de charge (niveau de déacétylation), son poids moléculaire, les caractéristiques de l'effluent et les paramètres physiques (énergie de brassage, pH, température, etc.).

Le chitosane est, en effet, une substance naturelle, écologiquement intéressante et relativement bon marché. C'est également un polyélectrolyte linéaire à structure chimique flexible et très réactive à fort potentiel de fixation qui est dû à sa polycationicité et à sa forte densité de charges.

Ce biopolymère a fait l'objet de nombreux dépôts de brevets et continue à donner lieu à de nombreuses recherches académiques (Guibal, 2004 ; Crini et Badot, 2007).

Dans notre investigation nous essayerons de tester son efficacité dans le traitement des eaux de barrage.

Chapitre III

TRAITEMENT DES EAUX PAR LE CHITOSANE

III.1. Procédé d'adsorption

III.2. Ultrafiltration assistée par le chitosane

**III.3. Technique de coagulation-floculation
par le chitosane**

III.3.1. Intérêts de l'utilisation du chitosane

III.3.2. Facteurs influents

III.3.3. Mécanisme

Les propriétés polyélectrolytes et chélatantes du chitosane en font de lui un bon produit pour les applications environnementales dans le domaine du traitement des eaux potables et des eaux usées. Cette application est basée sur le caractère polycationique du biopolymère et sur sa solubilité en milieu acide. Ce comportement de polyélectrolyte ouvre la porte, en traitement des eaux, à de nombreuses applications dans le domaine de la coagulation-floculation, de l'adsorption ou de l'ultrafiltration assistée par complexation.

Le chapitre présent expose les différentes utilisations du chitosane dans le traitement des eaux selon ses propriétés

III.1. Procédé d'adsorption

L'adsorption liquide/solide est un processus de séparation au cours duquel des substances (ions, molécules, polymères, micro-organismes) présentes dans un liquide (appelées « adsorbats ») viennent se fixer sur la surface d'un matériau solide, appelé « adsorbant » (Boeglin, 1999 ; 2002).

Les matériaux adsorbants les plus utilisés industriellement sont les charbons actifs (CA) qui sont très efficaces d'un point de vue décontamination (Crini et Badot, 2007). Cependant, même si leur pouvoir adsorbant est élevé, ils posent, non seulement, des problèmes d'élimination après usage, mais aussi et surtout, de saturation rapide.

—Fixation et récupération d'ions métalliques

De nombreuses études (Ravi Kumar, 2000 ; No et Meyers, 2000 ; Guibal, 2004 ; Crini et Badot, 2007) ont montré la forte capacité du chitosane à complexer et à capter par adsorption (par exemple, le zinc, le cadmium, le palladium, le molybdène ou encore l'argent) de façon hautement efficace et sélective.

—Décoloration des eaux

Le chitosane et ses dérivés sont également efficaces pour la décoloration des solutions aqueuses. Une de leurs applications importantes est, en effet, basée sur leur capacité à se lier fortement par adsorption à une large gamme de molécules de colorant de type anionique (les plus étudiés), non ionique et cationique.

—Complexation d'autres polluants

Le chitosane est connu pour ses propriétés d'adsorption non seulement vis-à-vis des métaux lourds et des colorants anioniques, mais aussi des polymères et dérivés (protéines, carboxyméthylcellulose, sulfonates de lignine, tannins naturels), des saccharides, des médicaments, des huiles, des graisses, des suspensions bactériennes, des phosphates et des polluants organiques (dérivés phénoliques) ; (No et Meyers, 2000 ; Crini, 2005 ; Guibal, 2004).

Mécanismes d'adsorption par chitosane

Lors de l'adsorption, la fixation des ions métalliques par le chitosane peut faire intervenir les trois mécanismes suivants (Crini et al., 2009), à savoir :

- 1- la complexation des cations métalliques par les fonctions amines due à la présence de doublets d'électrons libres sur les atomes d'azote (souvent en milieu neutre),
- 2- la fixation par échange d'ions due à l'attraction électrostatique d'anions sur le chitosane protoné en milieu acide,
- 3- la formation de complexes ternaires.

III.2. Ultrafiltration assistée par le chitosane

Le chitosane suscite, actuellement, un fort intérêt comme agent chélatant pour complexer et concentrer des métaux lourds. Il semble être un élément intéressant pour une utilisation en UFAC.

Les deux principaux avantages, souvent mis en avant, sont d'une part, l'excellente capacité de chélation des chaînes de polymère vis-à-vis de nombreux métaux, notamment ceux utilisés dans l'industrie des traitements de surface, et d'autre part, la bonne sélectivité des séparations obtenues.

Cette propriété de chélation, ajoutée à sa non-toxicité, sa recyclabilité et son prix, font du chitosane le meilleur substitut aux polyélectrolytes synthétiques conventionnels comme la PEI utilisées jusqu'à présent (Crini et al., 2009).

Mécanismes d'interaction

Le procédé UFAC avec du chitosane associe deux mécanismes pour la récupération des métaux : la complexation en solution et la séparation par la membrane.

Le principe repose sur l'augmentation de la taille du soluté cible par complexation avec les chaînes macromoléculaires du polymère. Cette étape est une fixation (immobilisation) du métal sur la macromolécule dans les conditions de la réaction. Cette immobilisation est favorisée par le fait que le métal possède une grande affinité pour le polymère. L'espèce complexée possède alors une taille suffisante pour être « arrêtée » par une membrane d'ultrafiltration de porosité contrôlée. Les métaux qui ne sont pas fixés sur le polymère traversent la membrane et sont collectés dans le perméat et les métaux complexés sont retenus dans le rétentat (Crini et al., 2009).



Figure III-1 : Procédé UFAC.

III.3. Technique de coagulation-floculation par le chitosane

C'est une technique de séparation solide/liquide qui permet l'élimination des particules colloïdales et des matières en suspension (MES) qui ne peuvent décanter par elles-mêmes, par l'ajout d'une substance chimique appelée « coagulant » (Boeglin, 1999 ; 2002).

Les principaux coagulants employés sont des sels d'aluminium (sulfate d'aluminium ou Alum, $Al_2(SO_4)_3$) ou le PAC (polychlorure d'aluminium), des sels de fer (sulfate ferrique ou chlorure ferrique) et des polymères organiques cationiques (polyacrylamides).

Les performances de l'Alum et du PAC ont été maintes fois prouvées, de même que d'autres avantages comme leur faible coût, leur facilité à être manipulés et leur disponibilité (Crini et Badot, 2007). Cependant, leur utilisation est une source de préoccupation et de débats quant à leur toxicité. Ils produisent des quantités considérables de boues chimiques dont la gestion (déshydratation...) est difficile.

La floculation a pour objectif de favoriser les contacts entre les molécules déstabilisées à l'aide d'un floculant, qui est en général, des polyélectrolytes d'origine synthétique (polyacrylamides, polyéthylèneimines, polyvinylsulfonates) ou naturelle (dérivés amyliques).

Cependant, l'acrylamide est extrêmement toxique. Il produit plusieurs effets neurotoxiques (Bratby J., 2007). Bolto et Gregory ont rapporté que les polyélectrolytes cationiques sont très toxiques spécialement pour les organismes aquatiques.

La majorité des polymères commerciaux sont aussi issus de matières premières à base de pétrole en utilisant la chimie de transformation qui n'est pas toujours favorable à l'environnement.

III.3.1. Intérêts de l'utilisation du chitosane

Actuellement, de nombreuses études sont menées sur les biofloculants obtenus à partir de chitosane, car ces procédés de traitement sont très intéressants d'un point de vue de la toxicité (produit non toxique et biodégradable qui ne produit pas de métaux résiduels pouvant causer des problèmes de contamination), de l'efficacité (matériau bien connu pour ses propriétés coagulantes et floculantes vis-à-vis des matières organiques, des minéraux et des micro-organismes) et des coûts d'opérations (produit efficace à de plus faibles concentrations que les sels de métaux). En plus des caractéristiques énumérées jusqu'ici, ce polymère organique possède d'autres propriétés intéressantes (Crini et Badot, 2007), à savoir que :

- c'est un produit relativement bon marché, dérivé de la chitine ; une ressource abondante et renouvelable, extraite de la carapace de crustacés ;
- c'est un produit efficace même en eau froide et l'efficacité dépend moins du pH en comparaison avec celle des sels de métaux ;
- le floc produit à partir de chitosane est de taille plus importante (plus dense et volumineux) ;
- le produit ne colmate pas les filtres à sables, mais participe plutôt à l'amélioration de la filtration (il agit comme une couche filtrante supplémentaire) ;
- des faibles concentrations de polymères réduisent le volume de boues produites ; l'utilisation de chitosane augmente considérablement la densité des boues et améliore le procédé de déshydratation des boues en comparaison avec les sels ferreux ou l'Alum ;

- les boues produites sont beaucoup plus biodégradables que les boues métalliques. Elles sont plus facilement digérées par les micro-organismes et peuvent être utilisées pour stimuler la croissance des plantes ;
- le chitosane apporte peu de salinité supplémentaire à l'eau traitée ;
- le chitosane peut aussi être appliqué à l'étape de conditionnement et de déshydratation de boues afin de diminuer leur teneur d'eau ;
- c'est un matériau qui peut être régénéré par désorption.

Les traitements utilisant du chitosane permettent d'abattre, significativement, la demande chimique en oxygène (DCO), la demande biochimique en oxygène sur 5 jours (DBO_5) et la teneur en carbone organique total (COT), ou encore éliminer la turbidité de l'eau.

La dispersion instantanée du chitosane déstabilise les particules colloïdales et conduit à la formation de microflocs. Le pontage de ces microflocs en fait des flocons plus denses et volumineux, et surtout plus facilement séparables. Une simple décantation ou une étape de séparation/flottation permet ensuite l'élimination des flocs formés.

Le chitosane agit également sur les eaux usées industrielles (filiales papetière et textile par exemple). Outre son effet sur la turbidité, l'ajout de coagulant naturel permet aussi de réduire la concentration en polluants dissous (métaux, phosphore, matière organique) par précipitation et/ou la couleur. Le chitosane s'avère supérieur à l'Alum, spécialement où l'eau est contaminée par des MES et des bactéries. (Stand et al., 2003).

L'emploi du chitosane comme agent coagulant et/ou floculant a conduit à la remise en cause des formulations à dominante métallique et organique. Ceci a permis de diminuer les teneurs en métaux, en phosphore et azote, et de réduire également la toxicité des rejets. Cependant, il y a également plusieurs inconvénients à signaler. Il faut, en effet, avoir une bonne maîtrise du procédé, car celui-ci dépend de nombreux facteurs.

III.3.2. Facteurs influents

Les principaux facteurs qui influencent la coagulation-floculation avec le chitosane sont (Crini et al., 2009) :

- les caractéristiques de la solution à épurer (pH, alcalinité, concentration des particules colloïdales, couleur, présence de sels dissous ou d'éléments traces) et leurs propriétés physico-chimiques (types de particules, polarité, hydrophobicité),
- le type et la concentration du coagulant/floculant ajoutés,
- les conditions des mélanges (régime, temps, vitesse de rotation),
- l'ordre d'ajout des produits chimiques,
- le potentiel zêta et la température.

L'effet de la concentration des particules colloïdales dans l'eau est important car celles-ci servent de noyaux à la coagulation. Si la concentration des colloïdes est faible, il y aura trop peu de particules pour assurer une bonne floculation, même si elles sont neutralisées. C'est pour cette raison qu'il est avantageux de faire augmenter la turbidité par ajout d'une argile. Les eaux les plus difficiles à traiter par coagulation sont celles dont la concentration de colloïdes est faible et qui sont peu alcalines.

Les problèmes suivants peuvent être également évoqués :

- une surdose en chitosane aura un effet négatif sur les performances de la coagulation ;
- lorsqu'un sel de métal est utilisé comme coagulant primaire, son efficacité est toujours croissante jusqu'à l'obtention d'un plateau (Remarque : la concentration optimale est la concentration la plus faible qui permettra d'atteindre le but désiré). Alors qu'avec l'utilisation d'un polymère cationique, il existe une petite gamme où celui-ci sera efficace ;
- enfin l'emploi de chitosane conduit à la production de boues hydrophiles, qui doivent être déshydratées avant leurs mises en décharge.

III.3.3. Mécanisme mis en jeu

Le processus de coagulation-floculation qui implique du chitosane est complexe puisqu'il s'accompagne de phénomènes comme :

- la précipitation chimique ;
- la complexation ;
- l'adsorption à la surface des floes ;
- le piégeage ainsi que le balayage.

En résumant, on peut dire que le chitosane utilisé, en tant que coagulant, a comme rôle d'exercer simultanément une coagulation et un pontage.

Son mode d'action consiste à neutraliser les charges électriques des particules dans l'eau. Puis, il assure, grâce à sa structure chimique macromoléculaire, un pontage entre les particules ou les floes. Le polycationique chitosane peut adsorber des colloïdes ou des floes chargés négativement. L'addition du biopolymère permet d'abaisser le potentiel zêta à zéro. Les forces d'attractions de masse deviennent effectives et le polyélectrolyte agit alors par pontage mécanique. Plus la chaîne organique est longue, meilleure est le pontage. Les avantages des polyélectrolytes naturels sont de permettre d'atteindre le point iso-électrique sans modification du pH et d'être 10 à 15 fois plus efficaces que le sulfate d'aluminium.

Il est à noter que l'une des plus grandes différences entre les sels de métaux et les polymères cationiques se trouve au niveau de leur réaction hydrolytique. Les sels de métaux (Alum, chlorure ferrique) s'hydrolysent immédiatement une fois ajoutés dans l'eau, d'où des réactions d'adsorption très rapides. Par contre, dans le cas du chitosane, les réactions hydrolytiques ne se déroulent pas et le temps d'adsorption colloïdale est beaucoup plus lent. (Crini et al., 2009).

Grace à ces propriétés polyélectrolytes et chélatantes, le chitosane bouscule positivement le domaine de traitement des eaux.

La caractérisation de chaque lot de chitosane est très importante car ses propriétés et son comportement sont intimement liés aux valeurs de DD et de masse moléculaire.

En effet, ces paramètres jouent un rôle important sur la solubilité et la conformation des chaînes macromoléculaires, et par conséquent sur la viscosité des solutions, ainsi que sur la flexibilité des chaînes de polymère.

Chapitre IV

MATERIEL ET METHODES

IV.1. Matériel

IV.1.1. Appareils

IV.1.2. Petit matériel

IV.1.3. Réactifs utilisés

IV.2. Méthodes

IV.2.1. Préparation des solutions utilisées

IV.2.2. Test de coagulation floculation

IV.2.3. Techniques d'analyses utilisées

Dans ce chapitre, sont exposées les différentes techniques expérimentales adoptées ainsi que le matériel et les solutions préparées.

Ces essais vont nous permettre de bien exploiter les propriétés remarquables du chitosane dans la coagulation-floculation, l'optimisation de son efficacité et de le comparer aux procédures conventionnelles de traitement des eaux destinées à la consommation humaine.

IV.1. Matériel

IV.1.1. Appareils

- Agitateurs Magnétiques de type STUART SB162.
- Turbidimètre : HACH 2100N.
- pH - mètre avec électrode de verre : CYBERXEN 8100.
- Balance analytique de marque DENVER INSTRUMENT.
- Floculateur (Jar test) : PROLABO FLOCULAB ; appareil à 6 agitateurs mécaniques à vitesse variable.
- Spectrophotomètre HACH DR 5000.
- Photomètre portable (pour mesurer le chlore libre) : HANNA HI 93713.

IV.1.2. Petit matériel

- Bêcher, pipettes, burettes, thermomètre, chronomètre.
- Flacon en verre brun de 10 litres pour éviter la lumière.
- Siphon recourbé vers le haut (pour le prélèvement du surnageant).
- Filtre de porosité 0,45 micron.

IV.1.3. Réactifs utilisés

- Acide acétique (CH_3COOH)
- Acide chlorhydrique (HCl), hydroxyde de sodium (NaOH)
- Acide sulfurique (H_2SO_4) , acide ascorbique ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$)
- Hydroxyde d'ammonium (NH_4OH)
- Sulfate d'aluminium ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)
- Polyélectrolyte (polyacrilamide anionique)
- Eau distillée, solution tampon pH 6,2
- Chitosane de Sigma ® (Chitosan from crab shells) référence : C3646 ; (DD : 85%, PM : 183.14kDa)
- Bentonite provenant du gisement de Roussel (Maghnia, Algérie)
- Solution d'E.D.T.A N/50 ($\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- Noir érichrome, Murexide (Indicateurs colorés)
- Solution d'erichrome cyanine
- NaOCl eau de javel
- Thiosulfate de sodium ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)
- DPD : sulfate de N, N – diéthylphénylène-1.4 diamine.
- Solutions de tampon de pH 4, 7 et 9

IV.2. Méthodes

IV.2.1. Préparation des solutions utilisées

IV.2.1.1. Préparation des échantillons d'eaux

Pour l'eau de Keddara, les échantillons ont été prélevés directement du laboratoire de contrôle de la station de traitement qui possède un système d'apport d'eaux provenant des différentes étapes de traitement.

Pour l'eau de Beni Amrane, les échantillons ont été prélevés directement de la retenue de Beni Amrane et rapportés au laboratoire.

IV.2.1.2. Préparation de la solution de chitosane

Le chitosane commercial a été dissous dans de l'acide acétique ou de l'acide chlorhydrique sous agitation lente à la température ambiante de 25°C.

Les proportions adoptées sont les suivantes : 100 mg de chitosane/1 ml d'acide acétique (80 % masse/masse) et 99 ml d'eau déminéralisée.

Chaque 1 ml de la solution correspond à 1 mg de chitosane.

IV.2.1.3. Préparation de la suspension turbide à base de bentonite

Un gramme de bentonite a été dissous dans 1 litre d'eau distillée, puis laissé pour 24 heures d'hydratation.

Chaque 1 ml de la solution correspond à 1 mg de bentonite.

IV.2.1.4. Préparation de la solution de sulfate d'aluminium

25 gramme de sulfate d'aluminium ont été dissous dans 100ml d'eau distillée sous agitation, après dissolution, 4ml de la solution obtenu a été ajouté à 96ml d'eau distillée.

Chaque 1 ml de la solution obtenue correspond à 10mg de sulfate d'aluminium.

IV.2.1.5. Préparation de la solution de polyélectrolyte

Une dose de 0,5g de polyélectrolyte a été dissoute dans 100ml d'eau distillée sous agitation. Après dissolution, 1ml de la solution obtenue a été ajouté à 99ml d'eau distillée.

Chaque 1 ml de la solution obtenue correspond à 0,05mg de polyélectrolyte (polyacrylamide, un polymère synthétique anionique).

IV.2.2. Tests de coagulation-floculation (jar test)

Deux paramètres nécessitent une attention particulière lors du dimensionnement d'un traitement de coagulation-floculation, à savoir ; les quantités de réactifs à ajouter et les vitesses d'agitation du milieu réactionnel. Ces valeurs ne peuvent être déterminées que de façon empirique par des essais sur échantillons en laboratoire. La détermination de ces grandeurs au laboratoire est réalisée par le biais d'un Jar test.

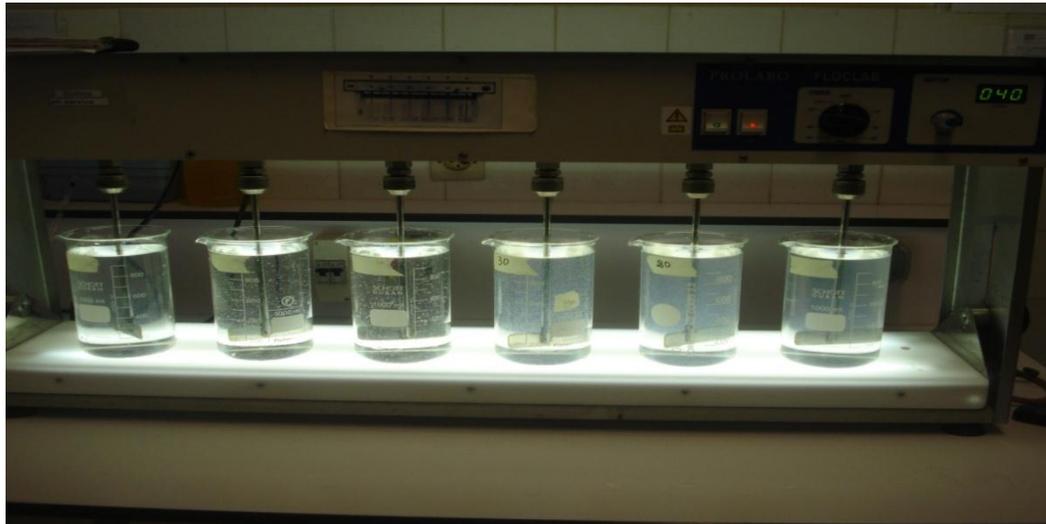


Figure IV- 1 : Essai « Jar test ».

IV.2.2.1. Chitosane comme coagulant primaire

Pour l'utilisation du chitosane comme coagulant primaire, nous avons suivi les étapes suivantes :

- Chaque bécher est rempli de 1000ml d'eau de Keddara ou d'eau de Beni-Amrane.
- La solution de chitosane est ajoutée dans chaque bécher à différentes doses (Pour Keddara : 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 ; 2,5 et 3mg/l et pour Beni-Amrane : 0,1 ; 0,2 ; 0,3...9mg/l). Puis agité à 100 rpm pendant 1min.
- L'agitation rapide est ensuite réduite à 30 rpm pendant 30 min.
- Après 30min de sédimentation, 10ml du centre de chaque bécher sont prélevés et la turbidité résiduelle, le pH, l'absorbance à 254nm sont déterminés.

IV.2.2.2. Chitosane comme aide coagulant

Nous avons suivi la procédure empruntée par Mehdinejad et al (2009), qui est la suivante:

- Chaque bécher est rempli de 1000ml d'eau de Keddara ou d'eau de Beni Amrane.
- La solution de sulfate d'aluminium est ajoutée dans chaque bécher à différentes doses (10, 20, 30, 40, 50, et 60 mg/l) et agité à 100 rpm pendant 1min.
- L'agitation rapide est ensuite réduite à 40 rpm pendant 7,5min puis à 20 rpm pendant 7,5min.
- A cette étape les doses du chitosane désirées (0,05 ; 0,1 ; 0,15...1mg/l) sont ajoutées comme aide coagulant.
- Après 20min de sédimentation, 10ml du centre de chaque bécher sont prélevés et la turbidité résiduelle, le pH, l'absorbance UV à 254nm et l'aluminium résiduel sont déterminés.

IV.2.2.3. Chitosane associé à la bentonite

Les étapes de l'expérience sont décrites si dessous :

- Chacun des béchers a été rempli avec 1000ml d'eau de Keddara.
- La solution de bentonite est ajoutée dans chaque bécher à différentes doses (10, 15, 20, 30, 40, et 50 mg/l) et agitée à 200 rpm pendant 2min.
- L'agitation rapide est ensuite réduite à 30 rpm pendant 30min.
- A cette étape les doses du chitosane désirées (0,15 ; 0,2 ; 0,3...1mg/l) sont ajoutées.

- Après 30min de sédimentation, 10ml du centre de chaque béccher sont prélevés et la turbidité résiduelle, le pH, l'absorbance UV à 254nm sont déterminés.

IV.2.2.4. Traitement conventionnel

C'est le traitement utilisé par la station de traitement à base de sulfate d'aluminium comme coagulant et un polyélectrolyte comme adjuvant. Les étapes sont les suivantes (Protocole Dégremont) :

- Les bécchers sont remplis avec 1000ml chacun d'eau de Keddara ou d'eau de Beni Amrane.
- La solution de sulfate d'aluminium est ajoutée dans chaque béccher à différentes doses (10, 20, 30, 40, 50, et 60 mg/l) et agitée à 180 rpm pendant 1minute et 30 secondes.
- Agitation lente à 40 rpm pendant 18 minutes
- Après 45minutes de sédimentation, 10ml du centre de chaque béccher sont prélevés et la turbidité résiduelle est déterminée.
- La dose optimale du sulfate d'aluminium est injectée dans chaque béccher et agité à 180 rpm pendant 1min 30s.
- Les doses du polyélectrolyte désirées (0,15 ; 0,2 ; 0,3...1mg/l) sont ajoutées sous agitation rapide pendant 30s.
- A cette étape la vitesse d'agitation est diminuée à 40 rpm pendant 18min.
- Après 30min de sédimentation, 10ml du centre de chaque béccher sont prélevés et la turbidité résiduelle, le pH, l'absorbance UV à 254nm sont déterminés.

IV.2.3. Techniques d'analyses utilisées

IV.2.3.1. Mesure de la turbidité

Pour étudier les paramètres intervenant dans la coagulation des particules colloïdales, plusieurs méthodes peuvent être utilisées, telles que l'analyse de la DCO, la détermination du potentiel Zêta, la titration colloïdale, la mobilité électrophorétique, l'analyse spectrophotométrique, et la mesure de la turbidité.

Dans notre étude nous avons adopté la mesure de la turbidité, car elle est considérée comme étant la plus simple et la plus efficace (Meysami et Kasaeian, 2004).

Les analyses effectuées se font sur des échantillons prélevés à des temps voulus de décantation. L'appareil utilisé est un turbidimètre HACH 2100N. Ce dernier a été développé pour être conforme au standard international (ISO 7027).

La mesure a été faite selon les étapes suivantes :

- Remplissage de la cuvette de mesure propre avec 10 ml de l'eau turbide (solution à tester).
- Vérification qu'aucune bulle d'air ne soit présente dans cette cuvette.
- Fermeture de la cuvette à l'aide du bouchon et nettoyage de celle-ci, pour éviter toute trace de doigt ou de toute autre trace pouvant affecter le passage de rayon émis par la diode électroluminescente.
- Mise de la cuvette dans son logement.
- Lecture directe des valeurs de la turbidité en NTU.

IV.2.3.2. Mesure électrométrique du pH avec l'électrode de verre

Le pH de l'eau est mesuré avant et après chaque traitement par un pH-mètre préalablement étalonné avec des solutions tampon de pH donné. La détermination électrométrique du pH s'effectue par mesure de la différence de potentiel entre électrode de mesure (électrode de verre) et une électrode de référence à potentiel connu (électrode au calomel KCl saturé) plongeant dans la solution dont on veut déterminer le pH.

IV.2.3.3. Mesure de l'absorbance à 254nm

La mesure de l'absorbance UV à 254nm nous renseigne sur la présence de la matière organique dissoute dans l'eau avant et après le traitement. Elle est réalisée par un spectrophotomètre UV visible.

IV.2.3.4. Mesure de l'Aluminium résiduel

Le dosage de l'aluminium dans l'eau se fait par spectrophotométrie en utilisant l'érichrome cyanine, l'aluminium réagit avec l'érichrome cyanine en présence d'acétate d'ammonium à un pH de 5,9 et donne une coloration rouge orangé. Le pH désiré est obtenu par l'ajout de l'acide sulfurique, l'acide ascorbique et de la solution tampon.

L'aluminium résiduel est mesuré après chaque traitement par le sulfate d'aluminium.

IV.2.3.5. Mesure de l'alcalinité de l'eau

Elle est mesurée avant et après les traitements par un dosage des carbonates, des bicarbonates et des hydroxydes présents dans l'eau. Avec un pH inférieur à 8,3, seuls les bicarbonates (HCO_3^-) sont présents dans l'eau et sont déterminés par un simple titrage à l'acide chlorhydrique jusqu'au pH= 4,5 (annexes).

IV.2.3.6. Mesure de la dureté de l'eau : Ca^{2+} et Mg^{2+}

La dureté calcique et la dureté totale sont mesurées par deux méthodes colorimétriques. Le titrage molaire des ions calcium et magnésium se fait avec une solution de sel disodique de l'acide éthylènediaminotétracétique (EDTA) à pH=10 obtenu par l'hydroxyde d'ammonium. Le noir érichrome T, qui donne une couleur bleue en présence des ions calcium et magnésium, est utilisé comme indicateur.

Le Ca^{2+} est dosé par l'EDTA en présence d'NaOH et du murexide comme indicateur coloré (annexes).

IV.2.3.7. Mesure de la demande et de la rémanence en chlore de l'eau

Réalisée grâce à une méthode colorimétrique et un photomètre mesurant l'intensité de la couleur.

La demande en chlore permet de mesurer la quantité de chlore nécessaire au traitement de l'eau. Des doses croissantes de chlores sont introduites dans différentes fractions d'eau. Après deux heures de contact, le chlore libre est mesuré par les pastilles de DPD. La courbe tracée permet de définir la valeur du break point.

La rémanence en chlore consiste à suivre la cinétique de consommation du chlore. Pour un volume d'eau à traiter, on ajoute au temps $t=0$ une dose de chlore définie. La concentration en chlore libre résiduel est ensuite déterminée en fonction du temps. Le taux de chlore à injecter dépend de la qualité de l'eau. Elle est égale à la valeur du break point additionné de 0,3mg/l. Le temps de contact indicatif est de 48 heures.

Le NaOCl utilisé pour l'apport du chlore est préalablement titré avec le thiosulfate de sodium pour définir sa concentration exacte (annexes).

Pour l'évaluation du pouvoir du chitosane comme coagulant-floculant dans le traitement des eaux, nous avons utilisé le matériel et les techniques expérimentales de mesure exposés dans ce chapitre.

Les résultats ainsi que les interprétations seront décrits dans le chapitre suivant.

Chapitre V

RESULTATS ET DISCUSSION

- V.1. Caractérisation physico-chimique et bactériologique de l'eau brute de barrage**
- V.2. Essais de traitabilité (jar test) sur les eaux de Keddara et de Beni Amrane**
 - V.2.1. Choix du solvant acide pour la dissolution du chitosane
 - V.2.2. Abattement de la turbidité par les différents traitements utilisant le chitosane
 - V.2.3. Elimination de la matière organique naturelle par les différents traitements
 - V.2.4. Impact des différents traitements sur le pH
 - V.2.5. L'Aluminium résiduel dans les échantillons d'eaux traitées
 - V.2.6. Influence du pH sur l'optimisation de la coagulation floculation
 - V.2.7. Relation entre la turbidité initiale et l'abattement de la turbidité
 - V.2.8. Effet du chitosane sur l'alcalinité et la dureté de l'eau
 - V.2.9. Comparaison de la demande et de la cinétique de chlore entre l'eau brute et traitée
- V.3. Analyse des taux d'aluminium résiduel dans les eaux traitées**
- V.4. Impact du chitosane sur la qualité et la quantité des boues formées**
- V.5. Comparaison de l'efficacité des différents traitements utilisés**

Les essais expérimentaux ont été menés afin d'évaluer la faisabilité du traitement d'une eau de surface par le chitosane. Pour cela, nous avons utilisé l'eau brute des deux barrages de Keddara et de Beni-Amrane. Ces deux barrages alimentent la station de traitement des eaux de Boudouaou. Plusieurs jar test ont été effectués et différents paramètres ont été mesurés.

Le chitosane a été utilisé seul comme coagulant primaire avec l'Alum comme aide coagulant et aussi avec la bentonite.

V.1. Caractérisation physico-chimique et bactériologique de l'eau brute

L'eau brute arrive vers la station de traitement de Boudouaou par gravitation à partir du barrage de Keddara qui est alimenté par la station de pompage de Béni-Amrane qui est alimenté à son tour en grande partie par l'Oued Isser. L'eau de keddara est une eau très claire ayant une faible turbidité qui peut arriver jusqu'à 1 NTU. Par contre, celle de Beni Amrane est une eau jaunâtre (figure V-1), turbide et relativement dure.

Le tableau (V-1) contient certains paramètres qui caractérisent l'eau de Keddara et de Beni-Amrane.

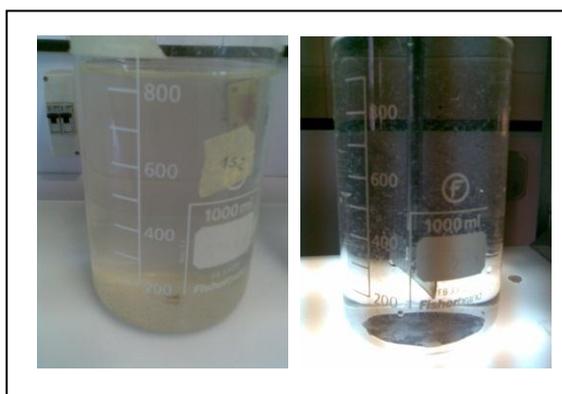


Figure V-1 : Aspect de l'eau de Keddara à droite, de l'eau de Beni Amrane à gauche

Tableau V-1 : Caractéristiques de l'eau de barrage de Keddara et de Beni Amrane déterminées pendant la période de réalisation des expériences (Avril, mai, juin, juillet et août 2010)

Paramètre	Eau de Keddara		Eau de Beni Amrane	
Température (°C)	12	- 17	15	- 16
Conductivité (µs/cm)	945,5	- 981,7	1024,2	- 1118,1
pH	7,00	- 8,00	7,90	- 8,50
Turbidité (NTU)	1	- 6	25	- 50
Absorbance à 254 nm	0,046	- 0,064	0,080	- 0,141
Alcalinité (mg/l CaCO ₃)	195	- 200	213	- 214
Dureté totale (mg/l CaCO ₃)	120	- 124	160	- 163
Dureté calcique (mg/l CaCO ₃)	80	- 82	75	- 76
Dureté magnésique (mg/l CaCO ₃)	39	- 43	85	- 87
Demande en chlore (mg/l)	1,0	- 1,5	2,0	- 2,5

V.1.1. Evolution de quelques paramètres physico-chimiques de l'eau brute de Keddara pour l'année 2010

Les mesures analytiques relevées par le laboratoire de contrôle physico-chimique de la station, pendant les mois de l'année 2010, ont permis d'avoir une idée préalable sur les paramètres qui caractérisent l'eau de barrage sujet de notre étude.

Grace à la moyenne de ces données nous avons pu réaliser les histogrammes représentés dans la figure (V-2).

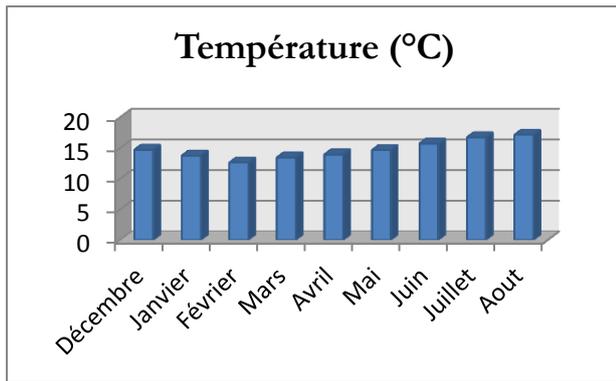
Comme l'indique la figure (V-2) (a), la température de l'eau de Keddara varie entre 12 et 17°C. Elle augmente pendant l'été en raison de l'augmentation de la température ambiante.

La figure (V-2) (b) montre que le pH de l'eau de Keddara est neutre (entre 7 et 8). Une diminution du pH pendant la période estivale est remarquée aussi.

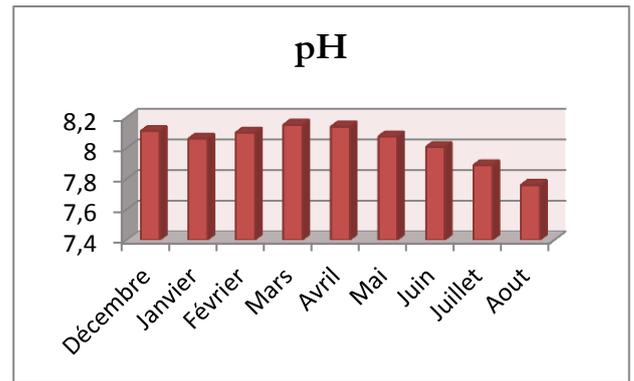
L'évolution de la turbidité de l'eau représentée dans la figure (V-2) (c) montre une augmentation remarquable durant la saison des pluies.

L'absorbance UV à 254 nm ne varie pas trop pendant l'année comme l'indique le graphe de la figure (V-2) (d).

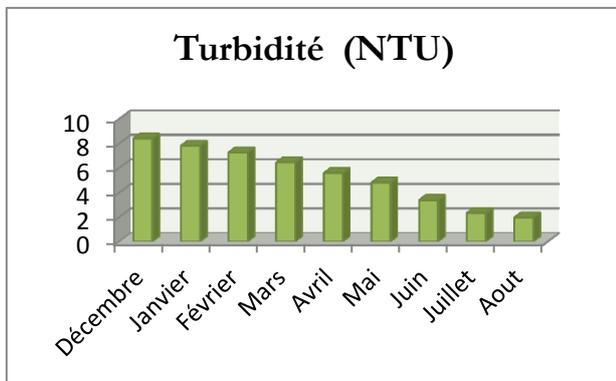
Concernant la minéralisation, nous remarquons une certaine stabilité des valeurs pendant l'année. Une alcalinité de 36°F environ et une dureté inférieure à 20°F (figure V-2 (e) et (f)).



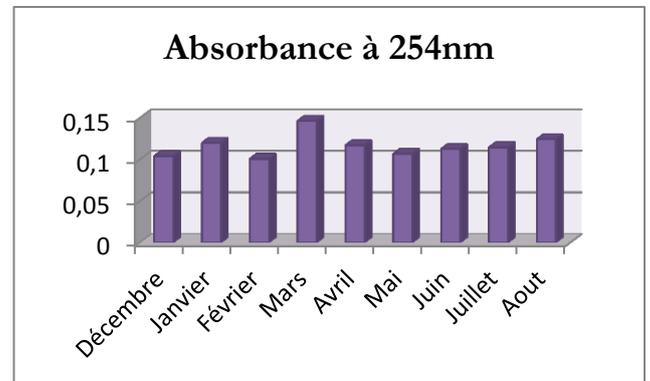
(a)



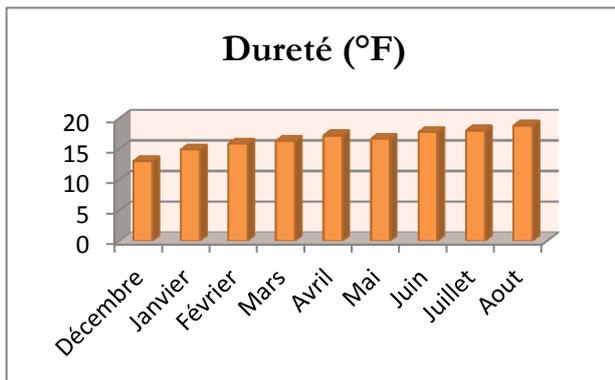
(b)



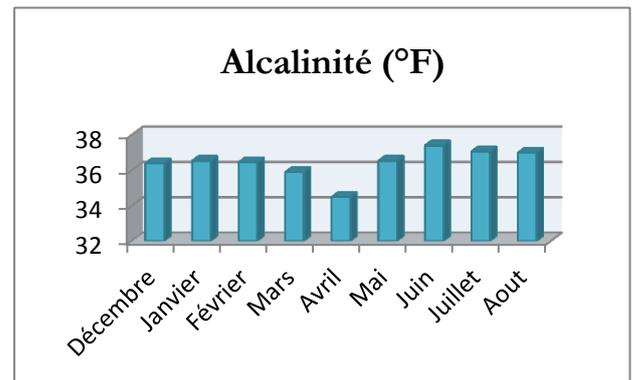
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure V-2 : Evolution des paramètres physico-chimiques de l'eau brute de Keddara, année 2010 ; (a) température ; (b) pH ; (c) turbidité ; (d) absorbance à 254nm ; (e) dureté ; (f) alcalinité.

V.1.2. Répartition de quelques paramètres biologiques existants dans l'eau brute de Keddara pendant l'année 2010

La qualité bactériologique de l'eau brute destinée à une potabilisation est un critère très important.

La présence des organismes vivants (bactéries, virus, algues, planctons ...) dans l'eau est une évidence. Une eau destinée à la consommation humaine doit répondre à des normes bien définies, microorganismes pathogènes doivent être neutralisés. Cependant, plus une source est pure, plus elle est facile à désinfecter. C'est le cas de l'eau brute de Keddara.

La figure (V-3) représente la répartition des paramètres biologiques de l'eau brute de Keddara analysés par la station de traitement pendant l'année 2010.

Nous remarquons que les plus grandes portions correspondent aux germes totaux et aux coliformes totaux. Les espèces pathogènes telles que les staphylocoques ne sont pas très présents, ils sont rarement détectés lors des dénombrements quotidiens effectués au laboratoire de contrôle.

Les étapes de clarification et de désinfection permettent une réduction voire une élimination totale de ces microorganismes afin d'obtenir une eau potable conforme sans danger pour le consommateur.

L'une des propriétés étudiées du chitosane est sa capacité à réduire après traitement la présence de bactéries (*Escherichia coli*) et d'algues dans l'eau. Dans notre expérience, nous n'avons pas eu la possibilité d'étudier cette propriété, en effet le flocculateur (jar test) est un dispositif qui n'est pas conçu pour travailler dans des conditions aseptiques. Il n'est pas disposé à fournir une isolation de l'environnement extérieur. De plus, la majorité des bactéries retrouvées dans l'eau brute sont des germes totaux, qui se retrouvent un peu partout, dans l'air et les surfaces, ce qui fait que la contamination est inévitable.

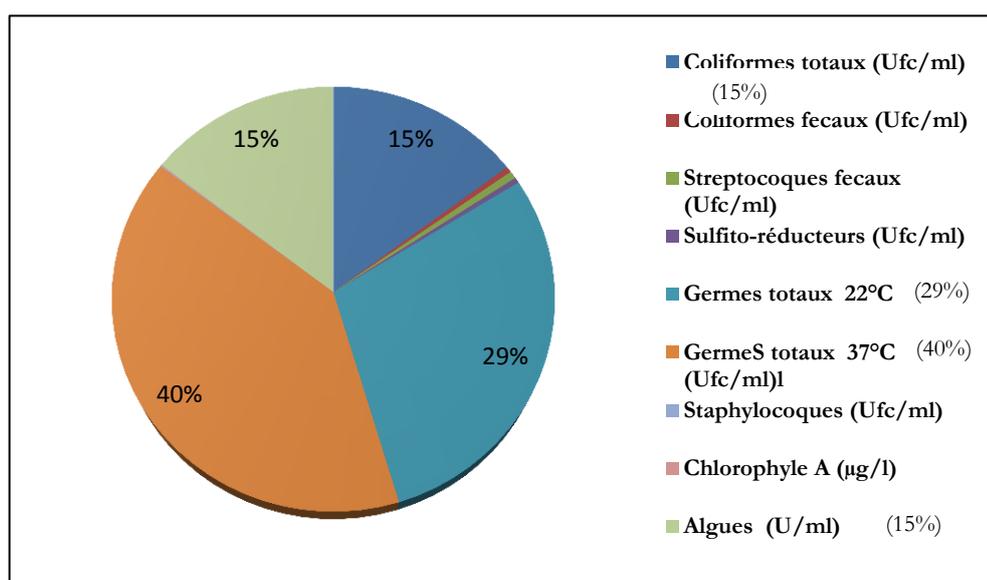


Figure V-3 : Répartition des paramètres biologiques de l'eau brute de Keddara, année 2010

V.2. Essais de traitabilité (jar test) sur les eaux de barrage (Keddara et de Beni Amrane)

L'essai du Jar test vise à reproduire en bécher l'ensemble des processus complexes de la coagulation et de la coalescence des flocons similaires à celles retrouvés en usine. Ces tests sont très courants et réalisés aussi bien dans les usines de production d'eau potable que dans les laboratoires de recherche.

Dans le but d'évaluer l'efficacité du chitosane pour le traitement de potabilisation des eaux, nous avons effectué une série d'essais pour l'eau de keddara et de Beni Amrane. Nous avons utilisé pour cela, le chitosane comme coagulant primaire puis comme aide coagulant en conjonction avec l'Alum et associé avec la bentonite. Les mesures analytiques et les observations ont été aussi faites avant, pendant et à la fin de la coagulation-floculation.

V.2.1. Choix du solvant acide pour la dissolution du chitosane

La solubilité du chitosane est l'un des avantages majeurs du chitosane. Bien qu'il soit insoluble dans l'eau et les solvants organiques, il est soluble dans les acides ; entre autre les plus connu l'acide acétique et l'acide chlorhydrique.

L'impact du choix de l'acide de dissolution du chitosane sur l'efficacité de ce dernier comme coagulant naturel a été étudié.

Pour cela, nous avons utilisé l'acide acétique et l'acide chlorhydrique comme solvant. Deux solutions de chitosane ont été ainsi obtenues à la valeur du pH égale à 4.

Les solutions du chitosane obtenues sont très limpides indiquant que celui-ci a été complètement solubilisé.

En effet, la solubilisation du chitosane dépend du degré de désacétylation. Il est estimé qu'une désacétylation à 85 % permet d'avoir une complète dissolution (No et al., 2000). Le milieu acide permet de solubiliser le système, car il y a ionisation des groupements amine en C₂ du motif D-glucosamine.

On a l'équilibre chimique suivant :



En effet, à la valeur du pH égale à 4, tous les groupements NH₂ sont ionisés sous la forme de NH₃⁺.

Le polymère peut donc être considéré comme un polycation. (Zemmouri H, 2008).

Les jars test ont été utilisés avec l'eau de Keddara ayant une température de 16°C, un pH de 7,97, une turbidité de 3,8NTU et une absorbance UV à 254nm égale à 0,066. Nous avons pour cela utilisé 30mg/l d'Alum et différentes concentrations de chitosane (0,05...0,5mg/l) comme aide coagulant. Les mesures de la turbidité ont été faites après décantation et les résultats sont représentés sur la (figure V-4).

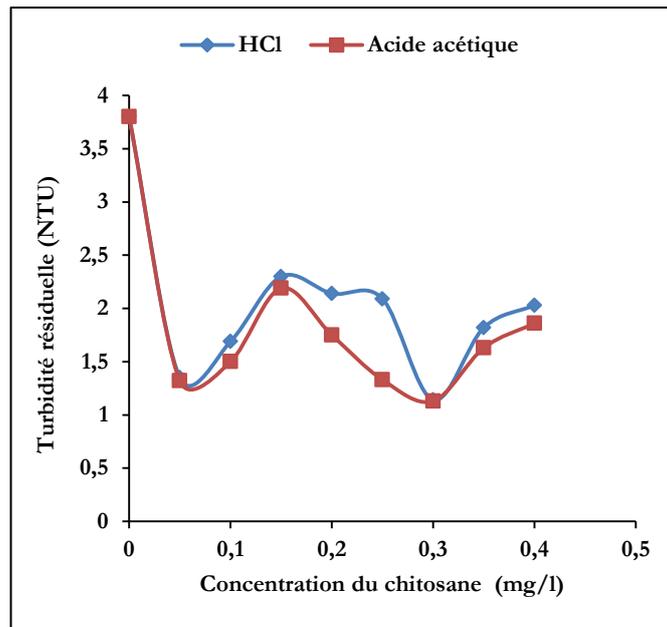


Figure V-4 : Comparaison de l'abattement de la turbidité de l'eau de Keddara en utilisant deux solutions de chitosane préparées par deux acides différents (CH_3COOH et HCl) comme aides coagulants et l'Alum comme coagulant.

Nous constatons d'après cette figure que la turbidité résiduelle diminue progressivement avec l'augmentation de la dose de chitosane utilisée jusqu'à une certaine concentration correspondante à la dose économique, un deuxième abaissement plus important de la turbidité est observé pour la dose optimale du chitosane (0,3mg/l) et cela pour les deux solutions de chitosane utilisées. Au-delà de cette valeur, une réaugmentation de la turbidité résiduelle est observée. Cela nous amène à dire que le type d'acide de dissolution utilisé pour la préparation du chitosane n'affecte pas sa capacité à réduire la turbidité de l'eau.

Cependant, nous avons remarqué une certaine instabilité de la solution préparée avec l'HCl dans le temps. La solution avait tendance à perdre son homogénéité. En effet, la solution devient, de plus en plus, trouble avec le temps. C'est probablement une reconstitution du chitosane qui est due à l'utilisation d'une base pour l'ajustement du pH.

Par contre, la solution à base d'acide acétique n'a montré aucun changement d'aspect. L'acide acétique est l'acide le plus utilisé dans la préparation du chitosane. Cependant sa nature organique crée des suspicions sur son éventuelle augmentation des composés organiques de l'eau (Huang et al., 2000).

En tenant compte du faible dosage du chitosane dans nos expériences, le taux résiduel du carbone organique introduit serait assez faible.

Nous avons ainsi choisi de prendre l'acide acétique comme solvant pour la préparation des solutions de chitosane utilisées dans toutes nos expériences.

V.2.2. Abatement de la turbidité par les différents traitements utilisant le chitosane

La coagulation-floculation est typiquement utilisée dans le traitement des eaux potables pour l'enlèvement de la turbidité et de la matière organique naturelle (MON). La turbidité résiduelle permet de comparer l'efficacité des différents traitements utilisés dans cet investissement à l'aide du coagulant conventionnel.

Dans notre cas, le chitosane a été utilisé seul ou comme aide coagulant. Les essais ont été effectués sur l'eau de Keddara et de Beni Amrane. La concentration du chitosane a été variée en ordre croissant pour déterminer les doses optimales afin d'obtenir le meilleur abatement de la turbidité.

V.2.2.1. Utilisation du chitosane comme coagulant primaire.

Une série d'essais a été réalisé sur l'eau brute de Keddara d'une turbidité moyenne de 5 NTU. Dans des conditions de pH neutre (pH=7). Plusieurs doses de chitosane ont été utilisées, de 0.05 à 40 mg/l. Seules les valeurs comprises entre 0 et 3 mg/l ont été retenues pour nos essais. Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure (V-5). Cette dernière nous montre qu'il n'y a pas eu de diminution considérable de la turbidité (de 5,5 à 4,6 NTU soit 16% d'abatement). Nous avons remarqué aussi, pendant les essais, qu'il n'y a pas eu de formation de floccs dans les béchers.

Ce résultat peut être attribué à la faible turbidité et à la faible présence des colloïdes dans l'eau de Keddara. En effet, la concentration des particules colloïdales dans l'eau est importante car elles servent de noyaux à la coagulation (Gidas, 1998). Si les concentrations des colloïdes dans l'eau est faible, il n'y aura pas assez de particules pour assurer une bonne floculation, même s'ils sont neutralisés.

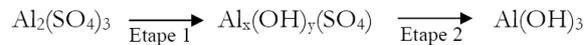
Pour l'eau de Beni-Amrane, un échantillon d'eau d'une turbidité de 34,5 NTU et un pH de 8,28 a servi pour une série de jars test. L'effet du chitosane sur l'abatement de la turbidité est montré dans la figure (V-6). Contrairement à l'eau de Keddara, une réduction remarquable a été observée. Avec une dose optimale de 2,5 mg/l de chitosane, nous avons obtenu un abatement de 66,66% (de 34,5 à 13 NTU). Nous avons observé, pendant les Jars test au laboratoire, une formation de multitudes de floccs de tailles moyennes peu de temps après l'ajout du coagulant.

Les résultats montrent aussi qu'au-delà de la dose optimale, l'eau a tendance à se restabiliser. Ceci est dû aux phénomènes d'excès du polymère adsorbé sur la surface du colloïde et qui produit la restabilisation du colloïde. En effet, il y'a plusieurs sites valables sur la surface de la particule pour la formation des liens inter-particulaires. Les particules colloïdales restabilisées peuvent devenir positivement chargées et causent une répulsion électrostatique entre les particules en suspension (Mohd Ariffin, 2007).

Nous constatons que plus la turbidité initiale est élevée plus l'abatement de la turbidité est meilleure. En effet, l'eau de Beni Amrane est naturellement plus chargée que celle de Keddara.

V.2.2.2. Utilisation du chitosane comme aide coagulant au sulfate d'aluminium :

Le produit le plus utilisé dans le traitement des eaux est l'Alum. Ce coagulant, une fois introduit dans l'eau, forme des produits hydrolysés qui déterminent l'efficacité de la coagulation (Lengo, 1994). L'hydrolyse de l'Alum se déroule en deux étapes, comme le montre la réaction suivante :



L'étape 1 est une phase d'hydrolyse. Elle neutralise la charge primaire négative des colloïdes.

L'étape 2 permet la formation du précipité $\text{Al}(\text{OH})_3$. Ce dernier assure le pontage et la coalescence entre les colloïdes déstabilisés (Lind, 1994).

A cause de son non efficacité dans l'eau de Keddara, nous avons jugé utile d'utiliser le chitosane comme aide coagulant à l'Alum. Des essais ont été effectués avec différentes doses d'Alum (10, 20, 30, 40, 50 et 60mg/l) et à plusieurs doses de chitosane (0,05 ; 0,1 ; 0,15 ; 0,2 ; 0,25 ; ...0,5mg/l).

Le chitosane a été ajouté 1 minute après l'addition de l'Alum. Peu de performance est obtenue quand l'aide coagulant et l'Alum sont ajoutés simultanément (Bina, 1995).

Pour l'eau brute de Keddara, avec une turbidité initiale de 4,55 NTU et un pH égale à 8,15, les courbes obtenues sont représentés dans la figure (V-7). Afin d'optimiser la dose du coagulant et de l'aide coagulant, nous avons choisi la courbe qui correspond à la plus faible concentration d'Alum et qui donne la plus faible turbidité résiduelle. Les doses optimales ainsi obtenues sont : 30 mg/l d'Alum et 0,3mg/l de chitosane, avec un abattement de 76,92% (1,05 NTU). En plus, une très bonne formation de floes a été remarquée durant l'expérience.

Pour l'eau de Beni Amrane (25 NTU et pH =8,25), la coagulation-floculation a donné de très bons résultats. La figure (V-8) illustre l'abattement rapide de la turbidité en fonction de la dose du chitosane. Les doses optimales d'Alum et du chitosane qui sont égales à 20mg/l et 0,15mg/l respectivement correspondent à la courbe qui représente la plus faible concentration d'Alum et qui donne la plus faible turbidité résiduelle. L'abattement correspondant est de 96.04% (0.99NTU). La formation de floes a été rapide et un enlèvement de la couleur a été observé.

Ces résultats sont en accord avec ceux retrouvés chez Bough et al., (1975) ; Kawamura, (1991) ; Divakaran et Pillai, (2002).

L'utilisation du chitosane comme aide coagulant dans le procédé de floculation diminue la dose de l'Alum nécessaire, dans un traitement conventionnel, et la turbidité résiduelle chute jusqu'à 1 NTU sans filtration. Ce résultat est soutenu par les travaux de Bina et al., (2009).

Les doses du coagulant et de l'aide coagulant diminuent avec l'augmentation de la turbidité. Ceci est en accord avec les études précédentes. (Vaidya, 1984 ; Mehdinejad et al., 2009).

V.2.2.3. Utilisation du chitosane avec la bentonite

La bentonite est un type d'argile composé essentiellement de minéraux smectites. L'importante propriété de la bentonite inclue sa capacité à échanger les cations, son gonflement et sa capacité d'hydratation (Smart, 1999). Sa capacité d'adsorption et d'échange vient de sa grande surface d'adsorption (Sandhya et Tonni, 2003 ; Ahmed et al., 2005).

Vu la faible turbidité de l'eau de Keddara, et afin d'améliorer l'efficacité du chitosane, nous avons pensé à augmenter la charge de l'eau brute en ajoutant des concentrations croissantes de la bentonite.

Le jar test a été lancé à partir d'une eau de turbidité faible (2.40 NTU) et un pH égal à 7.91. Plusieurs concentrations de bentonite ont été utilisées (10, 20, 30, 40, et 50mg/l). La dose du coagulant (chitosane) a été variée de 0,15 à 1 mg/l par pas de 0,05. Les courbes de la figure (V-13) représentent les résultats obtenus.

Nous remarquons une diminution rapide de la turbidité résiduelle jusqu'à l'obtention d'un palier. Et ce pour toutes les concentrations de bentonite utilisées. Cette diminution est d'autant plus accentuée que la concentration de bentonite est élevée. Pour une concentration de 50mg/l de bentonite, la dose optimale de chitosane, qui correspond à la plus faible turbidité résiduelle, obtenue est égale à 0,15 mg/l seulement. La suspension blanchâtre par l'addition de la bentonite est parfaitement déstabilisée par le chitosane. L'apparition des floccs est rapide, et l'augmentation du volume des floccs se fait progressivement jusqu'à la fin de l'agitation lente.

Dans cette expérience nous avons remarqué une très bonne coagulation-floculation de l'eau de Keddara. Cependant, la turbidité résiduelle la plus faible, obtenue après le test de coagulation-floculation, était toujours élevée (6,99 NTU) et même plus élevée que la turbidité initiale de l'eau brute (2,40 NTU) avant l'ajout de la bentonite. Ce résultat peut être expliqué soit par une répulsion électrique entre la bentonite et la faible matière colloïdale présente dans l'eau de Keddara, soit par une saturation des sites actifs du chitosane avec la bentonite par compétition.

V.2.2.4. Utilisation du sulfate d'aluminium et du polyélectrolyte

Le polyélectrolyte est une grande molécule avec un grand poids moléculaire qui a un fort pouvoir d'ionisation. Il possède des propriétés de polymère et d'électrolyte. Son grand intérêt d'utilisation, est la formation de floccs massifs qui accélère la vitesse de décantation des floccs et diminue le volume de boue formée. Par contre, son utilisation peut présenter quelques problèmes pour la santé et l'environnement. (Nabi et al., 2007).

Afin de comparer l'efficacité de la traitabilité de l'eau de barrage au coagulant naturel avec le traitement conventionnel à base d'Alum et d'adjuvant (polyélectrolyte) adapté par la station de traitement des eaux de Boudouaou, nous avons réalisé des essais jar test sur l'eau de Keddara ainsi que celle de Beni-Amrane en suivant le protocole adopté par le laboratoire de contrôle.

Avec une turbidité de 3,8 NTU de l'eau de Keddara, après l'essai de jar test nous avons pu tracer la courbe de la turbidité résiduelle en fonction de la concentration de l'Alum (10, 20, 30, 40, 50, et 60 mg/l). L'allure de la courbe obtenue est présentée dans la figure (V-9). Elle ressemble à celle obtenu avec le chitosane. La dose optimale égale à 60 mg/l. Après utilisation du polyélectrolyte avec la dose optimale de l'Alum, la dose optimale a été égale à (0,1 mg/l). La figure (V-11) représente ce résultat.

Après optimisation des doses du coagulant et de l'adjuvant, nous avons obtenu un abattement de 86.8% (de 3,8 à 0.5 NTU).

Pour l'eau de Beni-Amrane, d'une turbidité de 38 NTU et un pH de 8.20, nous avons obtenu aussi le même profil de courbe de turbidité résiduelle en fonction de l'Alum. La dose optimale du coagulant obtenue correspond à la plus faible turbidité résiduelle obtenue. Elle est égale à 40 mg/l. Ce résultat est illustré dans la figure (V-10).

L'abattement de la turbidité a été trouvé très élevé (97,68%). Après utilisation du polyélectrolyte, le taux augmente jusqu'à 98,33% avec une turbidité résiduelle de 0,65 NTU. Ce résultat est représenté dans la figure (V-12).

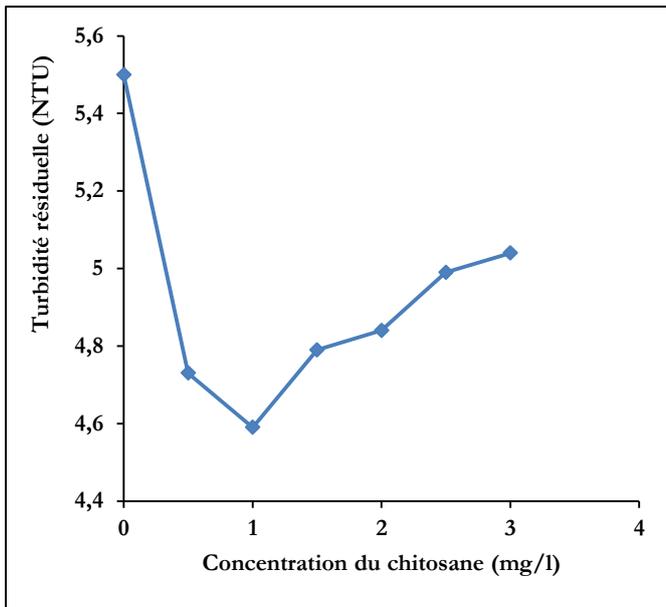


Figure V-5 : Evolution de la turbidité de l'eau de Keddara en fonction de la dose du chitosane utilisé comme coagulant primaire.

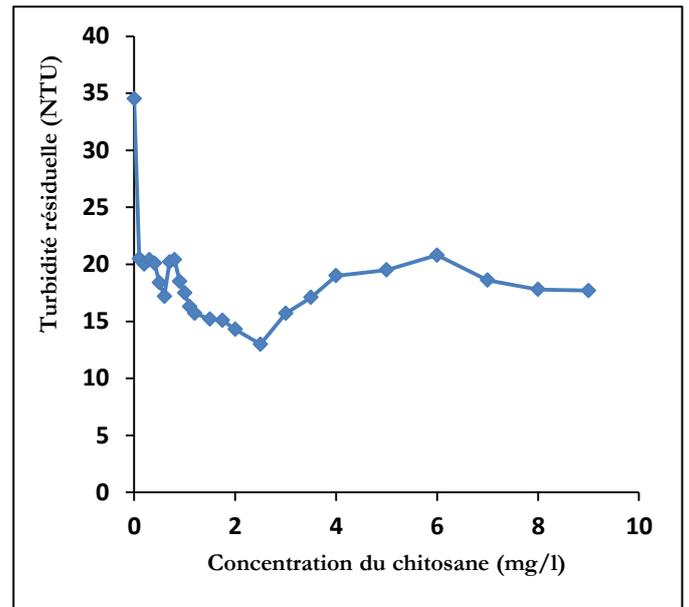


Figure V-6 : Evolution de la turbidité de l'eau de Beni Amrane en fonction de la dose du chitosane utilisé comme coagulant primaire.

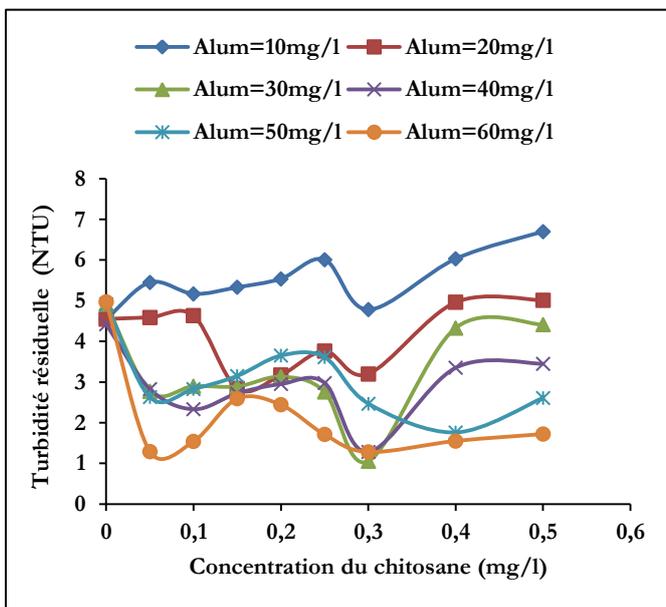


Figure V-7 : Evolution de la turbidité de l'eau de Keddara en fonction de la dose de l'Alum et du chitosane utilisé comme aide coagulant.

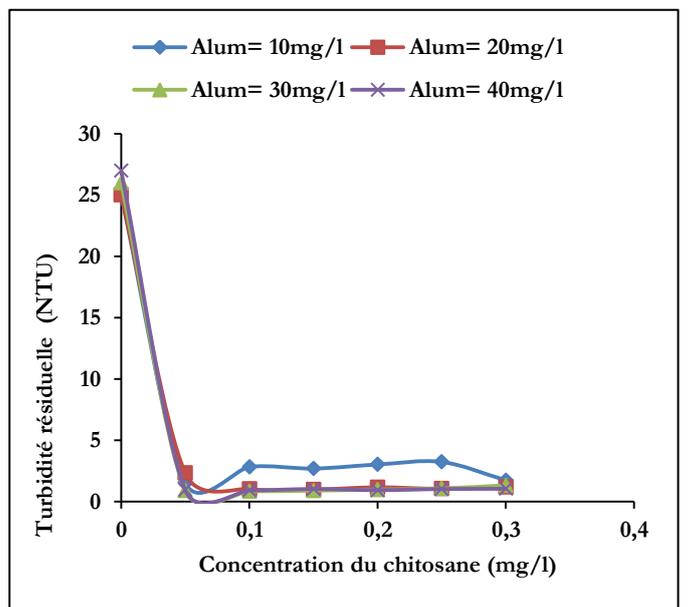


Figure V-8 : Evolution de la turbidité de l'eau de Beni Amrane en fonction de la dose de l'Alum et du chitosane utilisé comme aide coagulant.

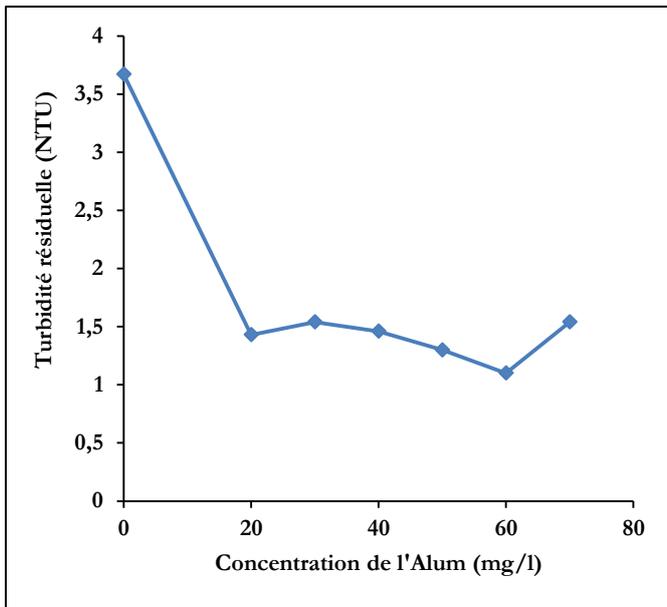


Figure V-9 : Evolution de la turbidité de l'eau de Keddara en fonction de la dose de l'Alum utilisé seul.

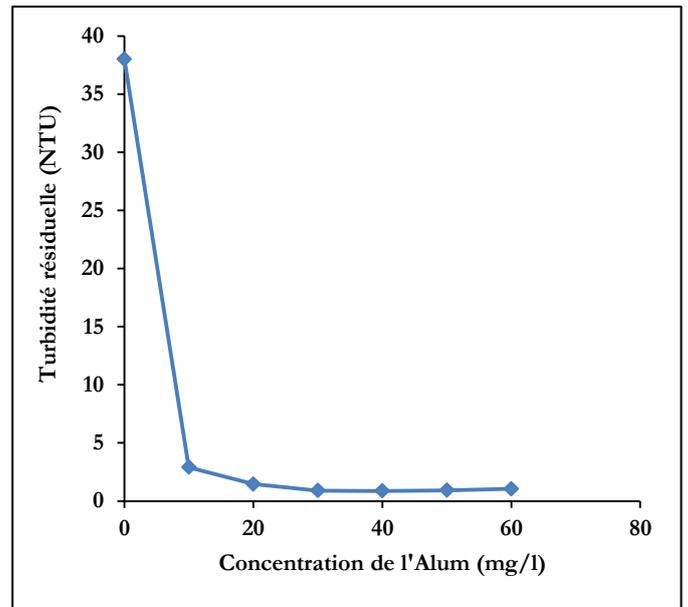


Figure V-10 : Evolution de la turbidité de l'eau de Beni Amrane en fonction de la dose du chitosane utilisé seul.

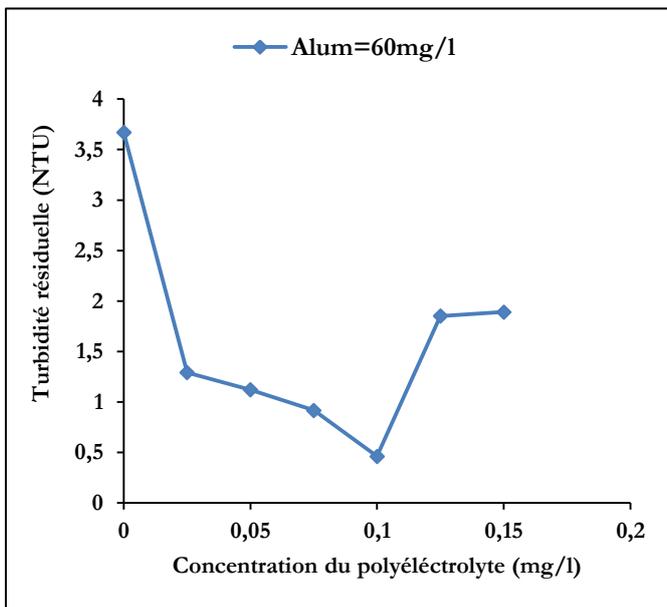


Figure V-11 : Evolution de la turbidité de l'eau de Keddara en fonction de la dose du polyélectrolyte.

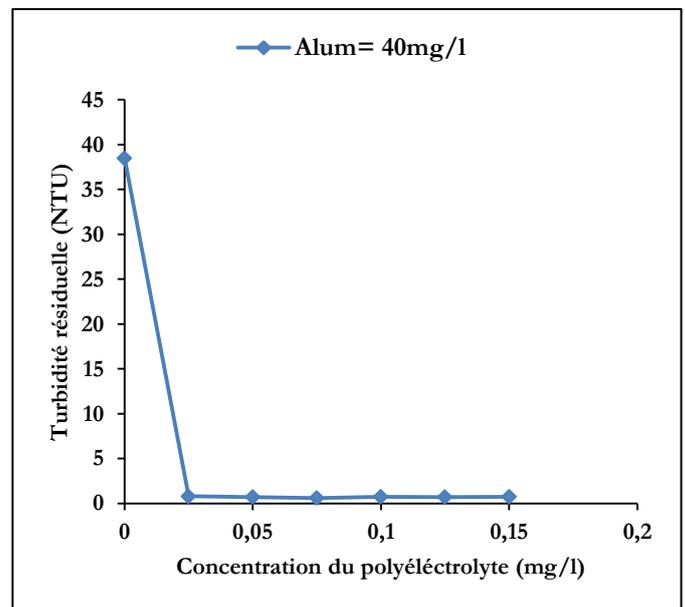


Figure V-12 : Evolution de la turbidité de l'eau de Beni Amrane en fonction de la dose du polyélectrolyte.

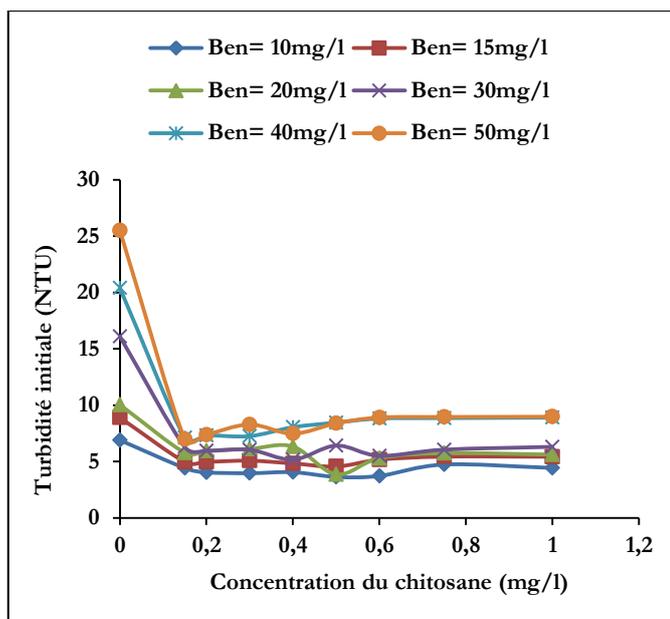


Figure V-13 : Evolution de la turbidité de l'eau de Keddara en fonction de la dose du chitosane après utilisation de la bentonite à différentes concentrations.

V.2.3. Elimination de la matière organique naturelle par les différents traitements

La capacité du chitosane à réduire la matière organique naturelle (MON) est caractérisée en termes de mesure de l'absorbance UV à une longueur d'onde de 254 nm et du carbone organique total (COT).

L'absorbance UV à 254nm est typiquement utilisé pour caractériser le contenant aromatique de la MON, parce que cette fraction est considérée comme le précurseur le plus important dans la formation des sous-produits de chloration. (Rook, 1974 ; Peters et al., 1980 ; Reckow et al., 1990).

Une série de jars test a été effectué sur l'eau de Keddara et de Beni Amrane pour évaluer l'impact du chitosane sur cette absorbance UV à 254nm.

V.2.3.1. Utilisation du chitosane comme coagulant primaire

En tenant compte de la charge importante de l'eau brute de Beni-Amrane, nous avons utilisé des concentrations de chitosane allant de 0.05 à 10mg/l. La figure (V-14) montre la réduction de L'absorbance UV à 254nm en fonction de l'augmentation de la dose du chitosane. Avec une absorbance UV₂₅₄ initiale de 0.11, nous avons obtenu la plus basse valeur résiduelle 0.08nm avec une dose de 2.5 mg/l de chitosane. Cette valeur est en accord avec le résultat obtenu dans l'enlèvement de la turbidité. Le taux d'abattement obtenu est de 27,27%. Nous constatons que c'est une réduction pas assez importante, mais elle est en accord avec l'étude de Rizzo et al (2008) qui ont obtenu un maximum de réduction d'absorbance UV à 254nm de 30%.

V.2.3.2. Utilisation du chitosane comme aide coagulant au sulfate d'aluminium

Pour l'eau brute de Keddara, une série d'essais a été réalisé après avoir mesuré l'absorbance UV_{254} initiale (0.060). La figure (V-16) représente les courbes obtenues en variant les doses de l'Alum et du chitosane. Les valeurs d'Alum de 10 et 20 mg/l, augmentent l'absorbance avec les doses croissantes de chitosane utilisé. En effet, pour ces deux valeurs il n'y a pas eu de coagulation et le chitosane ne faisait qu'augmenter l' UV_{254} dans l'eau vu sa nature organique.

Nous avons obtenu, après essai de traitabilité, une valeur minimale de 0.042nm. Soit un abattement de 30%. Ce résultat correspond à une dose optimale de 30mg d'Alum et 0.3mg/l de chitosane. Il est en accord avec les doses optimales pour l'abattement de la turbidité.

Pour une eau difficile à traiter comme celle de Keddara en raison de sa faible charge, une réduction de l'absorbance UV à 254nm de 30% est un résultat appréciable.

Pour l'eau brute de Beni-Amrane d'une absorbance UV à 254nm initiale de 0.085, nous avons obtenu une valeur d'absorbance UV à 254nm minimale de 0,041. Soit 51,76% de réduction pour une dose optimale de 20 mg d'Alum et 0.15mg de chitosane. Ce résultat est nettement meilleur que celui obtenu avec le chitosane seul, il est illustré dans la figure (V-17).

En effet, selon Roussy et al. (2005), la composition ionique en sulfate a un effet important sur l'adsorption du chitosane. Aussi, il a été rapporté, que le chitosane semblerait avoir un plus grand poids moléculaire en présence de sulfates. Van Duin et Hermens (1959) ont justifié leur hypothèse avec le fait que le chitosane forme de larges agrégats qui peuvent précipiter en présence de sulfate.

V.2.3.3. Utilisation du chitosane avec la bentonite

Après ajout de la bentonite à l'eau brute de Keddara, l'absorbance UV_{254} de l'eau augmente de 0.060 à 0.115nm. En effet, la bentonite dissoute dans l'eau forme une suspension colloïdale et cause un peu de turbidité et des particules suspendus. (Ahmed et al., 2005).

Le chitosane permet de réduire l'absorbance UV 254nm jusqu'à une valeur de 0.066nm. Ceci est obtenu en utilisant 50mg de bentonite et 0,15mg de chitosane. Bien qu'il ait eu une réduction de l'absorbance, l'objectif de réduire l'absorbance au-delà de 0,060 n'a pas été atteint dans cette expérience.

Le résultat est présenté dans la figure (V-15).

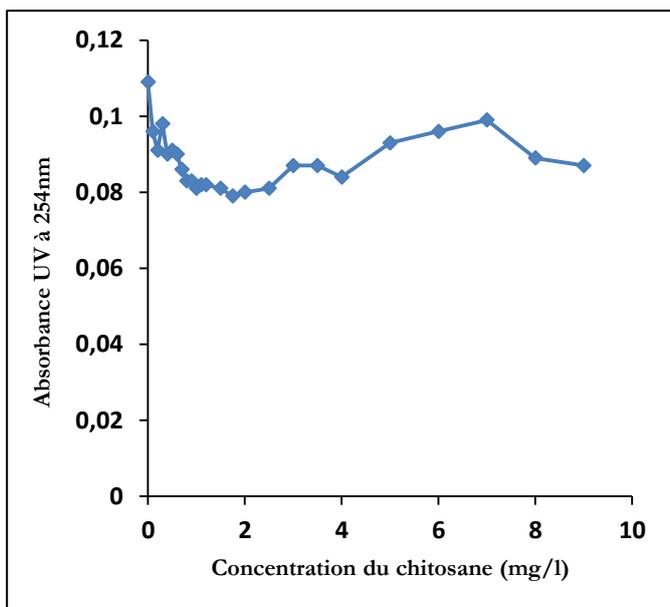


Figure V-14 : Abattement de l'absorbance UV à 254nm de l'eau de Beni Amrane en fonction de la dose du chitosane utilisé comme coagulant

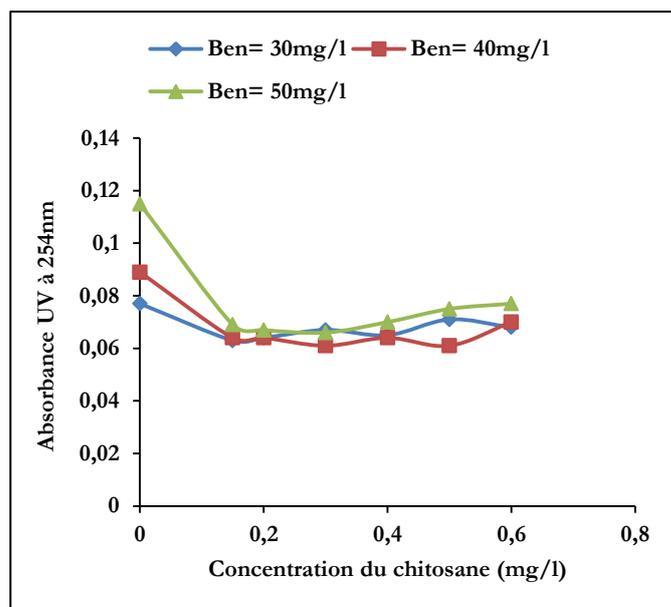


Figure V-15 : Abattement de l'absorbance UV à 254nm de l'eau de Keddara en fonction de la dose du chitosane après utilisation de la bentonite à différents concentrations.

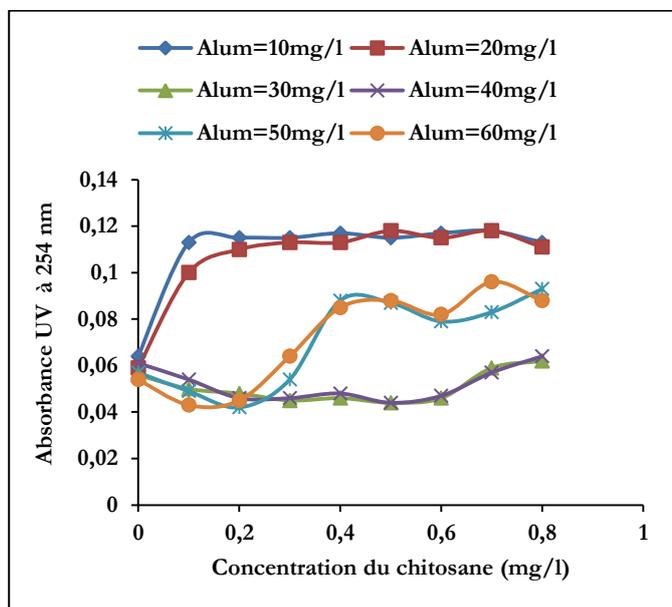


Figure V-16 : Abattement de l'absorbance UV à 254nm de l'eau de Keddara en fonction de la dose de l'Alum et du chitosane utilisé comme aide

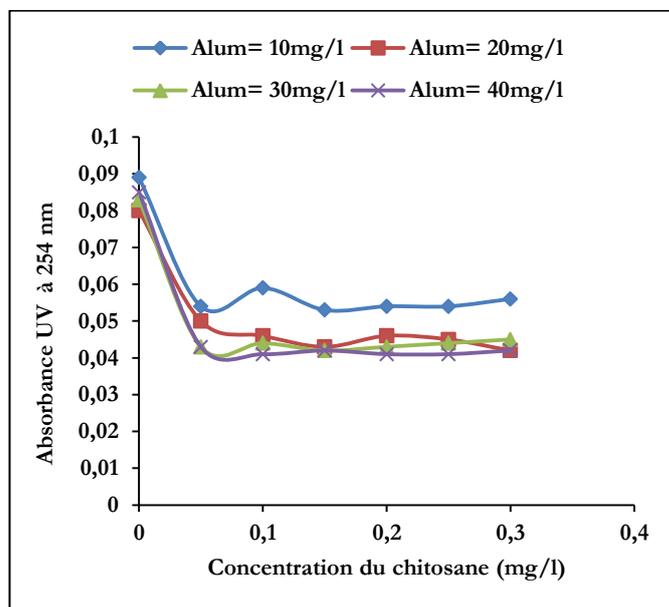


Figure V-17 : Abattement de l'absorbance UV à 254nm de l'eau de Beni Amrane en fonction de la dose de l'Alum et du chitosane utilisé comme aide coagulant.

V.2.4. Impact des différents traitements sur le pH de l'eau de Keddara et de Beni-Amrane

Afin d'étudier l'impact des tests de traitabilité sur le pH de l'eau à analyser, des mesures du pH ont été faites avant et après chaque traitement utilisé. Nous avons remarqué selon les résultats obtenus, qu'il n'y avait pas un grand changement du pH final de la solution traitée par le chitosane. Ce dernier n'a pas un impact important sur le pH. Ceci est en accord avec les résultats trouvés par Divakaran et Pillai (2002) et Meysami (2005). En plus, Roussy et al (2005) souligne que l'acidité introduite par le chitosane (solution) est négligeable (0,01 meq/l) comparée à l'alcalinité de l'eau.

V.2.4.1. Utilisation du chitosane comme coagulant primaire

Pour l'eau brute de Beni-Amrane, on a fait varier les doses de chitosane utilisées pour la traitabilité jusqu'à 10 mg/l. La courbe obtenue est représentée dans la figure (V- 18). Nous remarquons que, plus la concentration du chitosane augmente plus le pH diminue. La valeur du pH a diminué de 0,6 unité (de 8,3 à 7,7), pour la valeur optimale (enlèvement de turbidité) de chitosane (2.5mg/l).

V.2.4.2. Utilisation du chitosane comme aide coagulant au sulfate d'aluminium

En plus du chitosane, l'utilisation du sulfate d'aluminium fait baisser le pH de l'eau. Ceci est reflété par l'allure des courbes représentées dans les figures (V- 20) et (V-21). En effet, plus la concentration de l'Alum utilisée augmente plus le pH de l'eau traité diminue. Plus les doses de chitosane utilisées augmentent, plus le pH diminue. On a remarqué que pour les valeurs optimales de traitement, nous avons obtenu une réduction de pH d'environ 0,45 et 0,5 unité pH pour l'eau de Beni-Amrane et de Keddara, respectivement.

V.2.4.3. Utilisation du chitosane avec la bentonite

L'ajout de la bentonite à l'eau brute de Keddara a pour conséquence une augmentation du pH de l'eau du fait que la bentonite utilisée est une bentonite à caractère basique. La valeur du pH peut augmenter au maximum une unité pH. L'utilisation du chitosane, en doses croissantes, fait diminuer légèrement la valeur initiale du pH. Ce résultat est représenté dans la figure (V- 19).

La dispersion des fines particules de la bentonite libère des particules colloïdales très fines. Ce qui explique l'augmentation de la turbidité. (Kanfhold et Dohrmann, 2007).

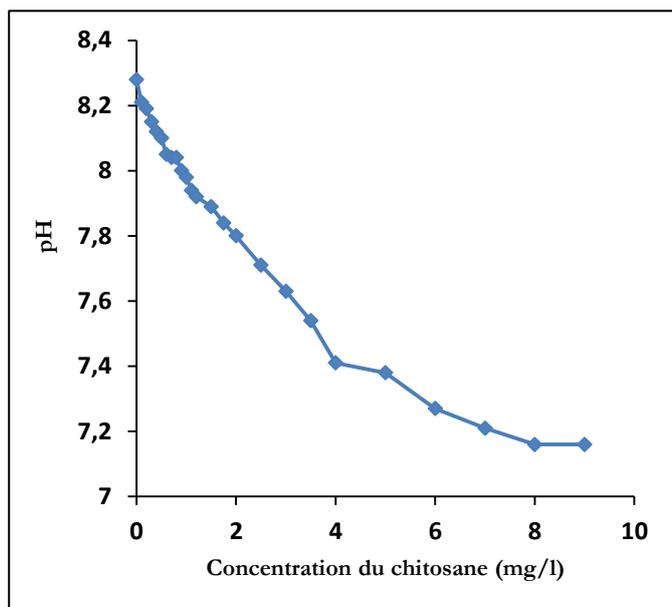


Figure V-18 : Variation du pH de l'eau de Beni Amrane en fonction de la dose du chitosane utilisé comme coagulant primaire.

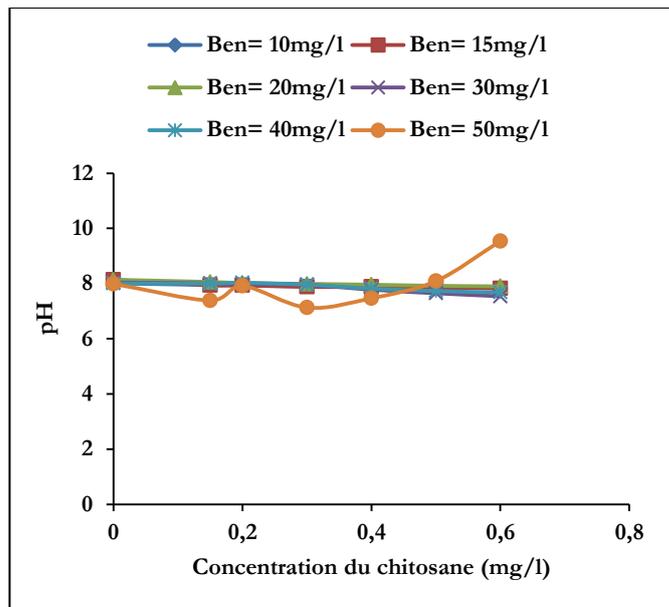


Figure V-19 : Variation du pH de l'eau de Keddara en fonction de la dose du chitosane après utilisation de la bentonite à différents concentrations.

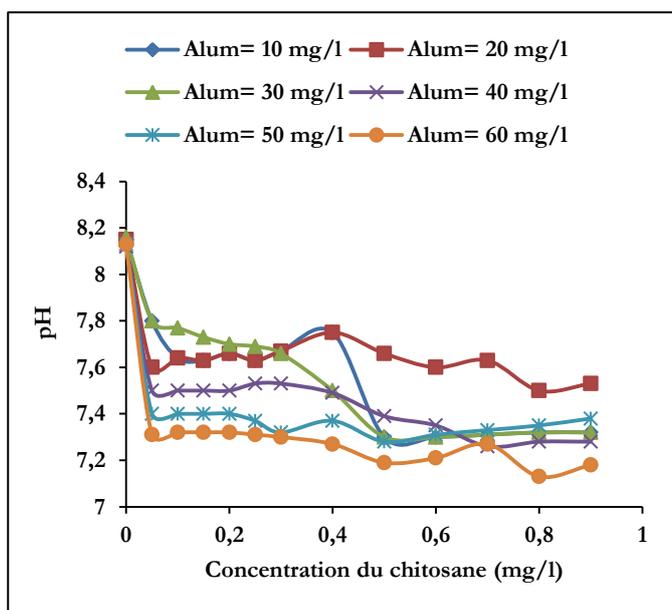


Figure V-20 : Variation du pH de l'eau de Keddara en fonction de la dose de l'Alum et du chitosane utilisé comme aide coagulant.

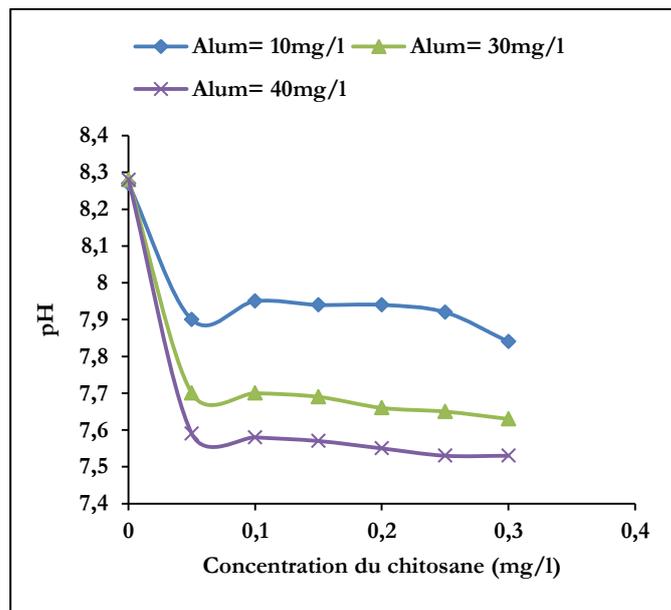


Figure V-21 : Variation du pH de l'eau de Beni Amrane en fonction de la dose de l'Alum et du chitosane utilisé comme aide coagulant.

V.2.5. L'Aluminium résiduel dans les échantillons d'eau traitée

L'utilisation du sulfate d'aluminium dans le traitement des eaux, engendre des résidus d'aluminium dans l'eau traité ainsi que dans les boues produites. L'utilisation de l'Alum en conjonction avec le chitosane serait une solution pour réduire les ions Al^{3+} dans les eaux traitées (Bina et al., 2009).

V.2.5.1. Utilisation du chitosane comme aide coagulant au sulfate d'aluminium

A partir de l'eau brute de Keddara et de Beni-Amrane, nous avons réalisé des séries de Jar test en utilisant des doses croissantes d'Alum et de chitosane. Après coagulation-floculation et sédimentation, on a procédé au dosage de l'aluminium résiduel dans le surnageant. Les résultats obtenus sont montrés dans les figures (V-22) et (V-23). Il en ressort de ces courbes que, les taux d'Aluminium résiduels obtenus après traitabilité varient entre 0,2 et 0,35 mg/l.

Pour l'eau de Keddara et de Beni-Amrane, l'utilisation de l'Alum fait augmenter la concentration de l'Al résiduel dans l'eau d'autant plus que la dose d'Alum augmente. Et ce, quelque soit la concentration du chitosane. La quantité d'aluminium résiduelle varie entre 0,2 et 0,35 mg/l. Ces concentrations sont obtenues après coagulation-floculation et sédimentation sans filtration.

Les taux d'Aluminium obtenus dépassent le niveau maximal de contamination définie par l'agence américaine de la protection environnementale (US.EPA).il est égal à 0.2 mg/l d' Al^{3+} résiduel. L'OMS estime, pour sa part, qu'entre 0,1 et 0,2 mg/l la présence de l'aluminium n'est pas dangereuse dans l'eau potable.

Nous attribuons ceci au fait que, le chitosane aboutit à la formation de micro-flocs composés de particules colloïdales combinées à des ions Al^{3+} . Ces composés ne sont pas totalement éliminés lors de l'étape de sédimentation pendant le jar test. Le dosage de Al^{3+} par la méthode de l'Eriochrome Cyanine, libère l'aluminium combiné ce qui explique les valeurs élevées de Al^{3+} obtenues.

V.2.5.2. Utilisation du sulfate d'aluminium et du polyélectrolyte

Nous avons utilisé le traitement conventionnel sur l'eau brute de Keddara. Nous avons mesuré l'aluminium résiduel dans l'eau. Les résultats obtenus sont mentionnés dans la figure (V-24) et (V-25). Pour le traitement conventionnel, en remarque aussi que plus la dose d'Alum utilisée augmente plus l'aluminium résiduel augmente (Figure V-24).. La dose optimale d'Alum (60mg/l) correspond à 0,27 mg/l d' Al^{3+} résiduel. L'utilisation du polyélectrolyte comme adjuvant avec l'Alum donne avec une dose optimale de polyélectrolyte de 0,1mg/l et un taux d' Al^{3+} de 0,25 mg/l.

Après filtration de l'eau traitée (par un filtre de labo de 0,45 μm de porosité), l'aluminium résiduel dissous (Les ions Al^{3+}) mesuré diminue considérablement jusqu'à 0,09 et 0,06 mg/l respectivement pour les doses optimales d'Alum et du polyélectrolyte (60 et 0,1 mg/l respectivement). Ces résultats sont largement inférieurs à la valeur limite définie par l'organisme US.EPA.

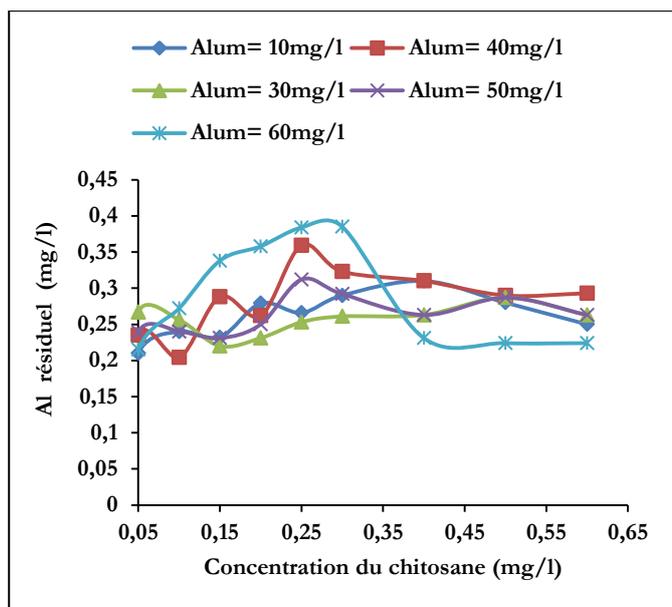


Figure V-22 : Suivi de la concentration de l'Aluminium résiduel dans l'eau de Keddara en fonction de l'Alum et de la dose du chitosane utilisé comme aide coagulant.

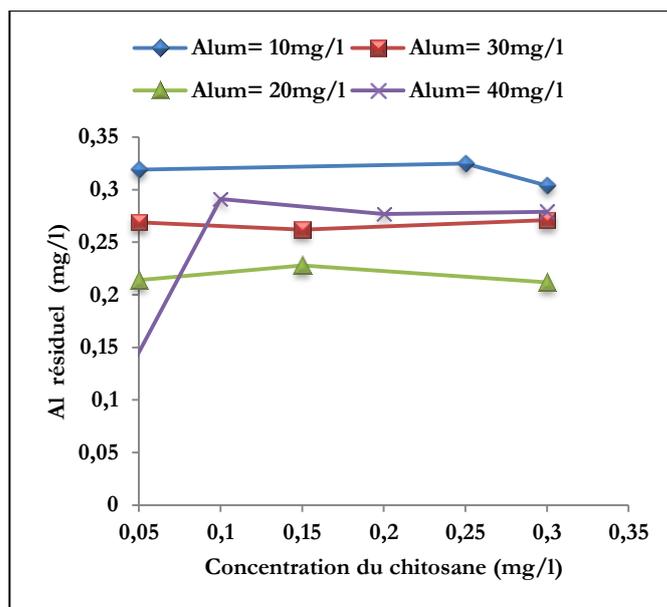


Figure V-23 : Suivi de la concentration de l'Aluminium résiduel dans l'eau de Beni Amrane en fonction de l'Alum et de la dose du chitosane utilisé comme aide coagulant.

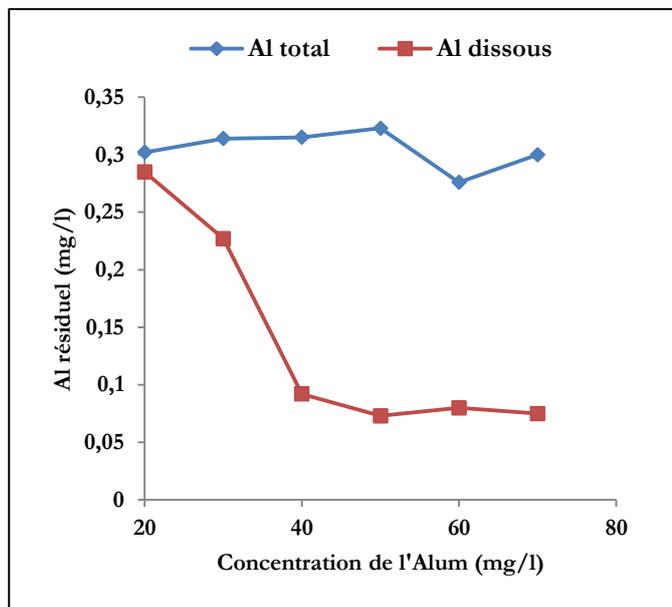


Figure V-25 : Suivi de la concentration de l'Aluminium résiduel dans l'eau de Keddara en fonction de la dose du polyélectrolyte.

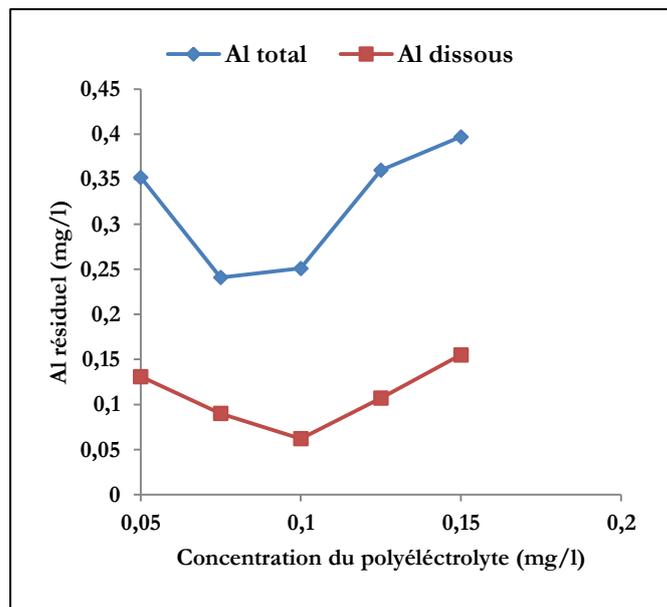


Figure V-24 : Suivi de la concentration de l'Aluminium résiduel dans l'eau de Keddara en fonction de l'Alum utilisé seul.

V.2.6. Influence du pH sur l'optimisation de la coagulation floculation

Le coagulant est très sensible au pH initial de l'eau, que ça soit l'Alum ou le chitosane. L'efficacité du traitement en dépend énormément.

La turbidité résiduelle de l'eau a été examinée en faisant varier le pH de la solution. Le pH a été ajusté par l'addition de 0,1 M de HCl ou 0,1 M de NaOH avant l'utilisation du chitosane. Ces essais ont été effectués à température ambiante de 28 °C.

V.2.6.1. Utilisation du chitosane comme coagulant primaire

L'effet du pH a été analysé à une dose optimale du chitosane soit 2,5mg/l. A partir d'une eau de Beni-Amrane (50 NTU), nous avons lancé un Jar test après avoir régler le pH de chaque bécher avec des pH variant de 5 à 9. Le résultat obtenu est présenté dans la figure (V-26). Après traitabilité au chitosane, on remarque que la turbidité résiduelle a diminuée en abaissant le pH initial jusqu'à une valeur de 6,5 NTU qui correspond à un pH de 6. Au delà du pH 6, la turbidité résiduelle a ré-augmentée. Avec un pH optimal de 6 et une dose optimale de chitosane de 2,5 mg/l, on a obtenu un abattement de turbidité de 87%.

V.2.6.2. Utilisation du chitosane comme aide coagulant au sulfate d'aluminium

L'efficacité de l'Alun, généralement utilisé comme coagulant, est sévèrement affectée par le pH. Dans les conditions optimales, les floes sont larges et rigides et sédimentent très bien en moins de 10 min (Lin et al., 1971 ; Ebeling et al., 2003 ; Bina et al., 2009).

Nous avons étudié l'effet du pH optimal lors de l'utilisation du traitement composé (Alum et chitosane). Les caractéristiques représentatives de l'évolution de la turbidité résiduelle, en fonction du pH initial de l'eau de Keddara ou de Beni-Amrane, sont illustrées sur les figures (V- 28) et (V- 29) respectivement.

A partir d'une turbidité de l'eau brute de Keddara de 3.6, nous avons effectué un Jar test. En utilisant les doses optimales d'Alum et de chitosane précédemment déterminées de 30 et 0,3 mg/l, respectivement. Et en faisant varier le pH initial de l'eau brute de 5 à 9, l'allure de la courbe obtenue est en forme de V. Le minimum correspond à la plus faible turbidité résiduelle obtenu (1,09 NTU) avec un pH optimale de 7. Soit un abattement de 69,72%.

Des résultats similaires ont été publiés dans la littérature. En effet, des valeurs optimales entre 7 et 7,5 ont été enregistrés par les travaux de Divakaran et Pillai, 2002 et 2004 ; Mehdiadj et al., 2009 et Bina et al.,2000.

Pour l'eau de Beni-Amrane (45 NTU), en variant le pH initial de l'eau brute de 5 à 9, nous avons fait le test de traitabilité avec la dose optimale d'Alum et de chitosane pour 20 et 0,15 mg/l, respectivement. Le pH optimal déterminé est égal à 6,5 et correspond à la plus faible turbidité résiduelle enregistrée (1,58 NTU). Soit un abattement de 96,24%. Au-delà de ces deux valeurs optimales de pH déterminées pour l'eau de Keddara et de Beni-Amrane, la turbidité résiduelle enregistrée ré-augmente progressivement.

V.2.6.3. Utilisation du chitosane avec la bentonite

Afin d'étudier l'effet du pH initial sur le processus de coagulation-floculation en utilisant le chitosane et la bentonite sur l'eau brute de Keddara (ayant une turbidité naturelle très faible atteignant 1.16 NTU en été), nous avons utilisé une dose de 60 mg/l de bentonite en conjonction avec 0.15 mg/l de chitosane. Dans les conditions optimales du pH et de température de l'eau, nous avons obtenu les résultats qui sont illustrés sur la courbe (V-27). Le profil obtenu indique une diminution de la turbidité résiduelle avec l'augmentation du pH jusqu'à une valeur optimale de 6,5 qui correspond à la plus basse turbidité enregistrée (3,56 NTU ; absorbance UV à 254nm =0,052nm). Au-delà du pH de 6,5 la turbidité ré-augmente. Ces résultats concordent avec les résultats obtenus par Zemmouri (2008).

Même en ajustant le pH initial, l'ajout de la bentonite n'améliore pas l'efficacité du chitosane dans l'abattement de la turbidité initiale de l'eau de Keddara qui a une faible turbidité. Il semblerait que le chitosane a une affinité pour la bentonite bien meilleure que pour les colloïdes faiblement présents dans l'eau de Keddara.

Takahashi et al ont prouvé que la solubilité du chitosane diminue lorsque le pH varie vers de conditions basiques (Takahashi et al., 2005 ; Mohd Ariffin et al, 2001). En effet, à partir d'un pH de 8, la turbidité résiduelle tend à augmenter. Divakaran et Pillai (2002) ont expliqué ceci par le point « zéro charge » égal à 8 qui est déterminé par Huang et Chen.

Par contre, à de très faibles valeurs de pH, le chitosane est soluble, donc il est incapable de produire des floccs, selon Divakaran.

Selon Guibal et Roussy (2007), le pH initial ne serait pas le paramètre prépondérant pour une efficace utilisation du chitosane, mais ça serait le pH de la solution finale. La diminution du pH initial impliquerait une diminution des doses du chitosane nécessaire pour une coagulation-floculation efficace.

La détermination du pH optimal permet d'augmenter considérablement le taux d'abattement des traitements.

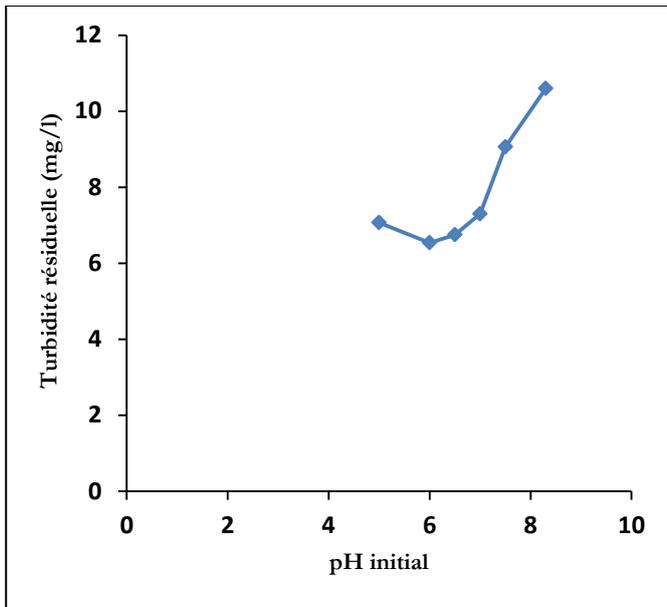


Figure V-26 : Effet du pH initial de l'eau de Beni-Amrane sur l'abattement de la turbidité par le chitosane utilisé comme coagulant primaire

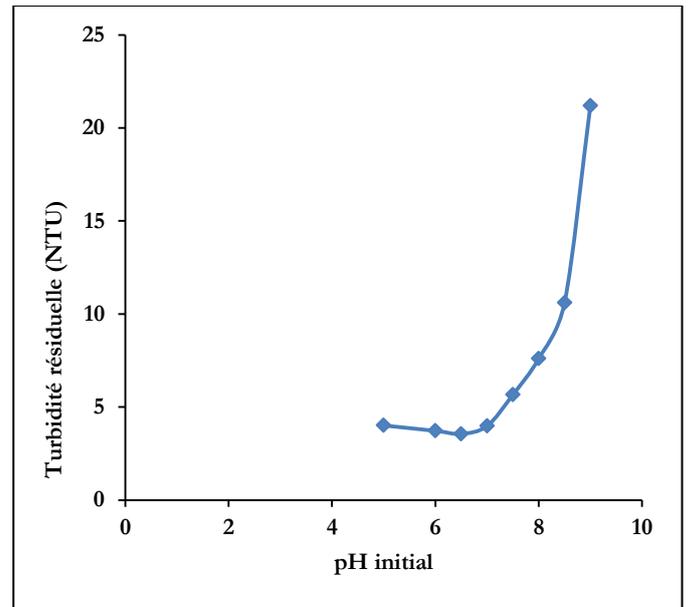


Figure V-27 : Effet du pH initial de l'eau de Keddara sur l'abattement de la turbidité par le chitosane utilisé avec la bentonite

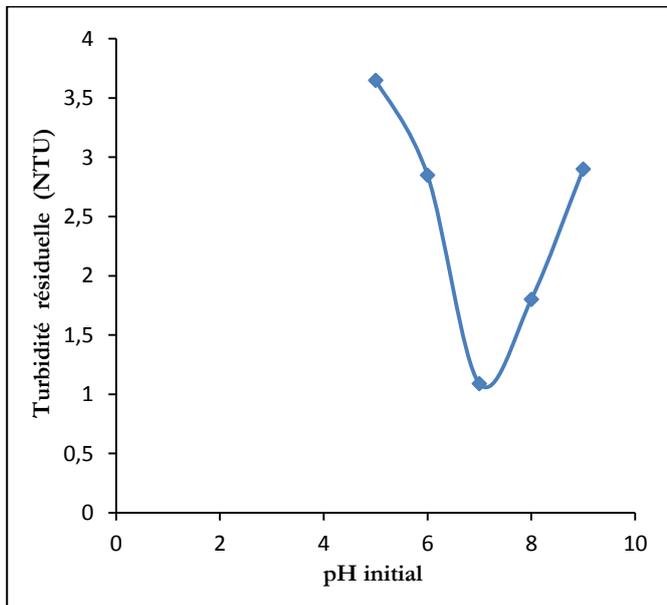


Figure V-28 : Effet du pH initial de l'eau de Keddara sur l'abattement de la turbidité par le chitosane utilisé comme aide coagulant

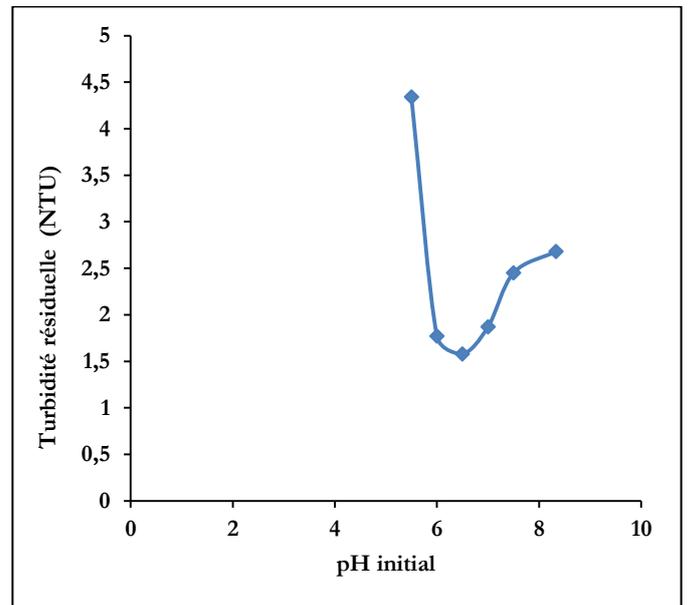


Figure V-29 : Effet du pH initial de l'eau de Beni-Amrane sur l'abattement de la turbidité par le chitosane utilisé comme aide coagulant

V.2.7. Relation entre la turbidité initiale et l'abattement de la turbidité

Afin de vérifier si la turbidité initiale de l'eau brute influe sur l'efficacité du chitosane, nous avons examiné de près les résultats obtenus sur l'eau de Keddara.

Ces résultats sont obtenus après traitement aux mêmes doses optimales de coagulant ou aide coagulant.

V.2.7.1. Utilisation du chitosane comme aide coagulant au sulfate d'aluminium

Tous les échantillons d'eau brute de Keddara ont été traités avec les doses optimales d'Alum et de chitosane correspondantes à 30 et 0.3 mg/l respectivement.

La courbe régressive obtenue est mentionné dans la figure (V- 30).

La turbidité résiduelle obtenue diminue progressivement avec l'augmentation de la turbidité initiale de l'eau à traiter. Ce résultat est en accord avec les travaux de Rizzo et al., (2008).

Le chitosane est plus efficace quand les charges sont plus importantes. En effet, si on compare l'efficacité du chitosane sur l'eau de Keddara ou sur l'eau de Beni Amrane, utilisé seul (abattement de turbidité de 17 et 87% respectivement) ou en conjonction avec l'Alum (abattement de turbidité de 70 et 96% respectivement), on constate que les meilleurs résultats sont obtenus pour l'eau de Beni-Amrane en raison de sa charge considérable comparé à l'eau de Keddara.

Les résultats obtenus indiquent que l'efficacité du chitosane dans l'enlèvement de la turbidité de l'eau de barrage dépend de la turbidité initiale. L'effet de la concentration des particules colloïdales dans l'eau, est important car celles-ci servent de noyaux à la coagulation. Si la concentration des colloïdes est faible, il y a trop peu de particules pour assurer une bonne floculation, même si elles sont neutralisées.

De plus, selon Chen et al (2003), le chitosane n'aurait qu'un faible effet sur l'enlèvement de la matière organique dissoute. Cette dernière est présente en petite quantité dans notre eau de barrage. La matière en suspension, elle aussi joue un rôle dans la formation des floes. L'eau de Beni-Amrane, étant plus turbide que celle de Keddara, expliquerait la différence d'efficacité.

V.2.7.2. Utilisation du chitosane avec la bentonite

Lors de l'utilisation de la bentonite dans le traitement de l'eau de Keddara avec le chitosane, nous avons rassemblés les taux d'abattement obtenus en fonction de la dose de bentonite utilisée. Les résultats obtenus sont représentés dans la figure (V-31). La courbe montre que plus la concentration de bentonite utilisée augmente, plus la turbidité de l'eau augmente et par conséquent le pourcentage d'enlèvement de la turbidité augmente. Les fortes turbidités initiales aident à une formation plus rapide des floes, qui sont plus larges et sédimentent mieux. Ces observations ont fait l'objet de plusieurs travaux (Divakaran et Pillai, 2001).

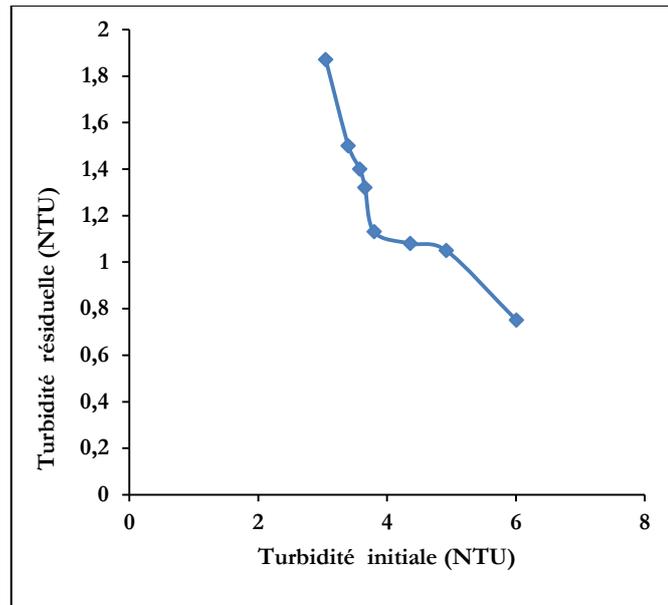


Figure V-30 : Effet de la turbidité initiale sur l'abattement de la turbidité de l'eau de Keddara par le chitosane utilisé comme aide coagulant.

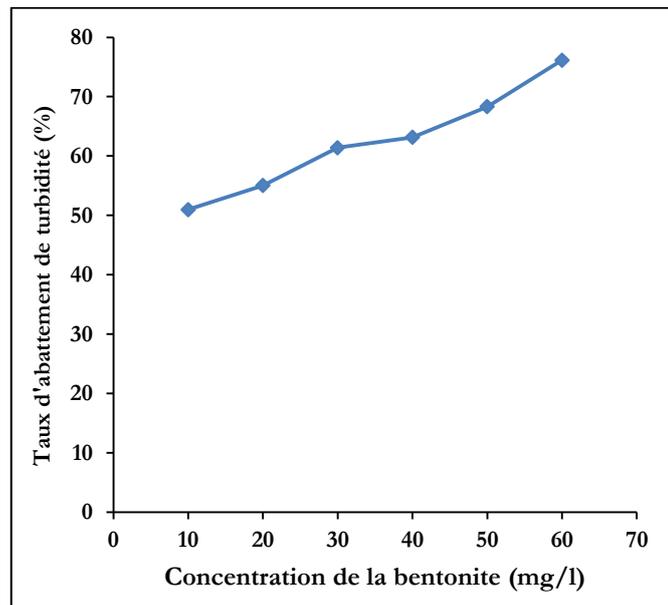


Figure V-31 : Effet de la concentration de la bentonite sur l'abattement de la turbidité de l'eau de Keddara par le chitosane.

V.2.8. Effet du traitement sur l'alcalinité et la dureté de l'eau de Keddara et de Beni-Amrane

Après avoir déterminé les doses optimales du coagulant minéral et naturel (chitosane utilisé seul, en conjonction avec l'Alum ou bien avec la bentonite) ainsi que le pH optimal de chaque traitement, nous avons constaté que l'abattement de la turbidité, de l'absorbance UV à 254nm ainsi que le taux d' Al^{3+} résiduel avec l'utilisation du chitosane comme aide coagulant à l'Alum est le meilleur procédé de traitement pour l'eau de Keddara et de Beni-Amrane en tenant compte, bien sûr, de l'impact environnemental des traitements (taux d'aluminium, volume de boues,...). Nous avons aussi jugé utile d'étudier en complément, l'effet de ce traitement par conjonction sur l'alcalinité, la dureté, la demande et la rémanence en chlore.

V.2.8.1. Etude de l'alcalinité

A partir de l'eau brute de Keddara ayant une alcalinité égale à 200mg/l de $CaCO_3$ et un pH initial optimisé à 7, nous avons réalisé un Jar test avec la dose optimale d'Alum (30 mg/l) et des doses croissantes de chitosane. La variation de l'alcalinité exprimée en TAC, en fonction de la dose du chitosane est représentée sur la figure (V-32). Nous constatons une faible diminution de l'alcalinité de l'eau après traitement, avec un meilleur abaissement pour la dose de chitosane optimale d'abattement de turbidité et (0.3 mg/l) et qui correspond à une meilleure coagulation-floculation. En effet, vue ses charges positives, le chitosane interagirait sans doute avec les bicarbonates chargés négativement présente dans l'eau.

Concernant l'eau de Beni-Amrane, l'alcalinité mesurée est de 214 mg/l de $CaCO_3$. Nous avons réalisé un test de coagulation-floculation au laboratoire avec 20mg/l d'Alum (dose optimale) et des doses croissantes de chitosane. Le pH de l'eau à traiter a été, préalablement, ajusté à la valeur optimale. Le résultat obtenu est présenté dans la figure (V-33). Un abaissement d'alcalinité plus important que celui observé pour l'eau de Keddara. La concentration optimale de chitosane (0.15 mg/l) donne 67% d'abattement (de 213 à 70 mg/l). La variation de l'alcalinité est attribuée au pH initialement optimisé, à l'utilisation de l'Alum et à l'utilisation du chitosane.

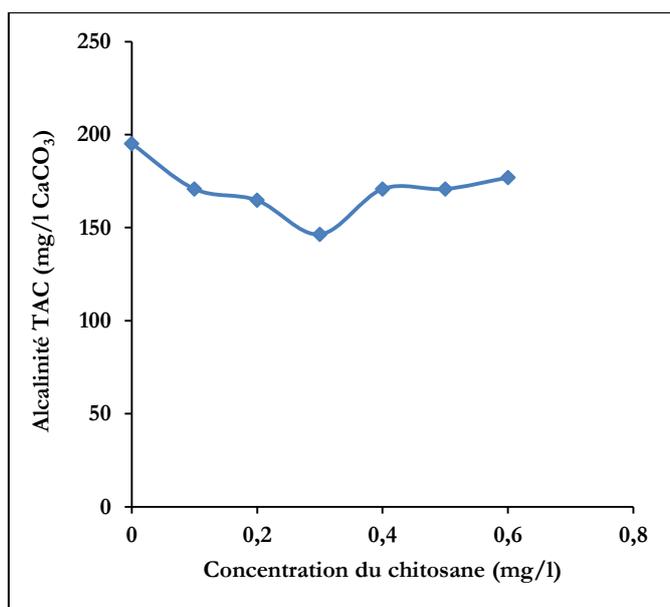


Figure V-32 : Variation de l'alcalinité de l'eau de Keddara en fonction de la concentration du chitosane utilisé comme aide coagulant à l'Alum

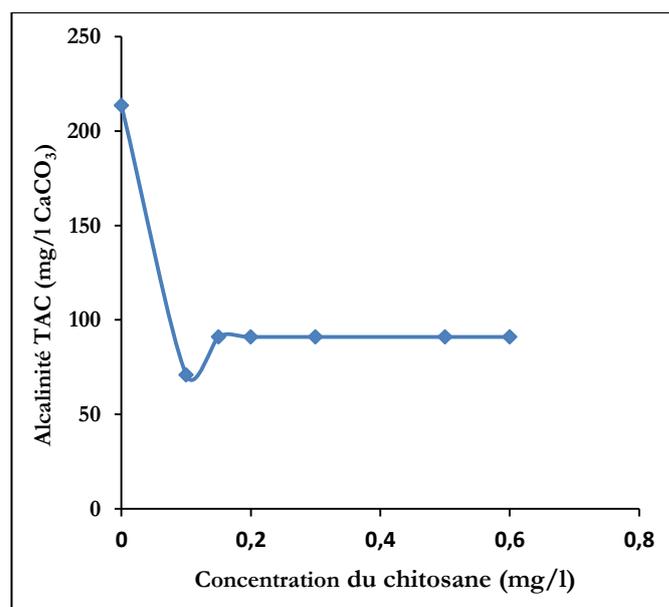


Figure V-33 : Variation de l'alcalinité de l'eau de Beni-Amrane en fonction de la concentration du chitosane utilisé comme aide coagulant à l'Alum

V.2.8.2. Etude de la dureté

Pour analyser l'effet du traitement à base d'Alum et de chitosane sur la dureté de l'eau, nous avons lancé un Jar test à partir de l'eau de Keddara ajusté au pH optimal de 7 avec 30mg/l d'Alum et des doses croissantes de chitosane. La mesure de la dureté calcique et magnésique a été faite avant et après le traitement. Les résultats sont représentés dans la figure (V-34). Nous remarquons une légère diminution de la dureté totale après traitement. En effet, la coagulation-floculation permet d'emprisonner les ions du calcium et du magnésium qui sont entraînés avec les floes. Cependant la charge positive des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} explique le faible abattement de la dureté due à la faible attraction électrostatique avec le chitosane.

Pour Beni-Amrane, l'eau est plus riche en ions bivalents, nous avons réalisé l'essai de traitabilité avec 20mg/l d'Alum et en variant la dose du chitosane. Le pH a été préalablement ajusté à 6,5. Le résultat est mentionné dans la figure (V-35). Cette figure montre que, l'abattement de la dureté totale de l'eau de Beni-Amrane est meilleur que celui de Keddara. Ceci peut-être expliqué par le fait que, plus une eau est chargée plus le chitosane est efficace. Par conséquent, l'enlèvement de la dureté est meilleur.

Selon Okuda et al (2001), la présence des cations bivalents comme les Ca^{2+} et les Mg^{2+} augmente la force ionique de la solution et la déstabilisation des particules colloïdales. Ce qui entrainerait un meilleur abattement de la dureté.

Plus la force ionique augmente, plus la coagulation-floculation est meilleure. L'abattement de la dureté, de la turbidité, de la matière organique, sont meilleurs, comme c'est le cas de l'eau de Beni-Amrane.

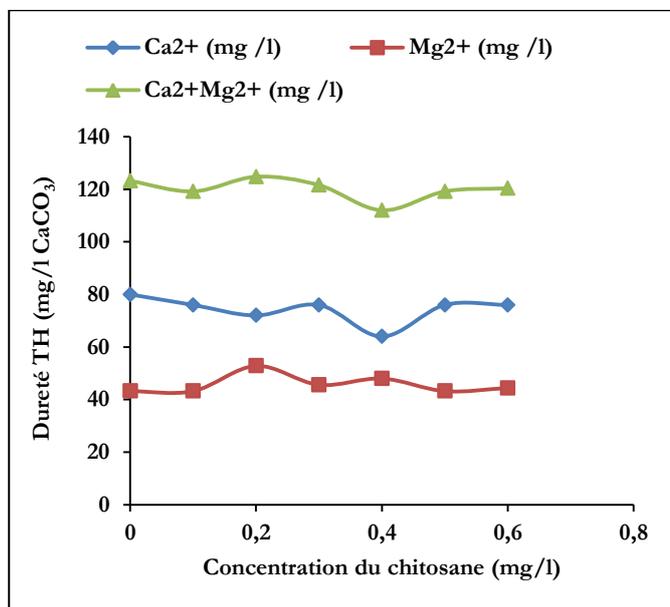


Figure V-34 : Variation de la dureté de l'eau de Keddara en fonction de la concentration du chitosane utilisé comme aide coagulant à l'Alum

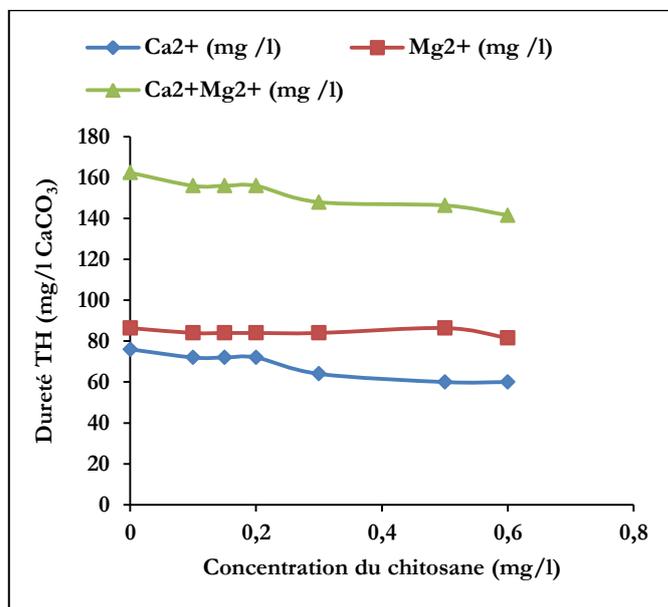


Figure V-35 : Variation de la dureté de l'eau de Beni Amrane en fonction de la concentration du chitosane utilisé comme aide coagulant à l'Alum

V.2.9. Comparaison de la demande et de la cinétique de disparition de chlore entre l'eau brute et l'eau traitée de barrage

Des essais au laboratoire ont été menés sur l'eau brute du barrage de Keddara et de Beni-Amrane pour déterminer la demande en chlore et la cinétique de disparition du chlore afin de comparer l'effet potentiel du traitement au chitosane sur ces paramètres (une augmentation potentielle de la demande en chlore en cas d'excès du biopolymère ou diminution de la demande en chlore en cas d'une bonne élimination des MON dissoutes).

La demande en chlore permet d'avoir une idée sur la matière organique présente dans l'eau. En effet, le chlore introduit est consommé par les particules organiques. Et en mesurant le chlore résiduel après deux heures de réaction à l'abri de la lumière, on obtient la valeur dite « break point » qui correspond à 0,3 mg/l de chlore résiduel.

La rémanence en chlore, permet d'avoir une idée sur la consommation du chlore dans le temps. En fait, la valeur de la demande en chlore est ajoutée à 0.3mg/l avant d'être introduite dans plusieurs échantillons d'eau. Les mesures du chlore résiduel se font par intervalle de temps donné.

Le chlore utilisé provient de l'eau de javel (NaOCl) après titration (Voir annexes).

L'eau de Keddara et de Beni-Amrane ont été traitées avec leurs doses optimales d'Alum et de chitosane après ajustement du pH à leur valeur optimale précédemment déterminée.

Sur les figures (V-36) et (V-37), sont portées les courbes de la demande en chlore de l'eau de Keddara et de Beni-Amrane, respectivement. Ces courbes montrent qu'il n'y a pas de différence importante entre les eaux traitées et non traitées avec le chitosane. Après traitement, l'eau devrait avoir une demande en chlore inférieure en raison de l'abattement de la matière organique présente. Il se pourrait que l'utilisation du chitosane, en étant d'origine organique, a contribué à augmenter cette demande, mais pas autant que sa valeur existante avant traitement.

La demande en chlore, pour l'eau de Beni-Amrane, est plus importante que celle de Keddara. Elle est égale à 1,15 mg/l et 2,7mg/l pour l'eau de Keddara et Beni-Amrane, respectivement. Ce résultat est expliqué par la charge importante en matière organique de l'eau de Beni-Amrane.

Les figures (V-38) et (V-39) représentent la rémanence en chlore de l'eau de Keddara et de Beni-Amrane, respectivement. Il se dégage des courbes obtenues, qu'il n'y a pas de grandes différences entre la vitesse de disparition du chlore de l'eau traitée et de l'eau brute de Keddara ou de Beni-Amrane. Nous observons, pour les deux cas de figure, une cinétique rapide et une cinétique lente.

Cependant, pour l'eau de Beni-Amrane, la consommation du chlore est nettement plus rapide que dans l'eau de Keddara. En effet, en moins de 500 min, le chlore résiduel a atteint des valeurs très faibles par rapport à l'eau de Keddara. Ceci est aussi attribué au fait que le chlore oxyde la matière organique, donc plus cette dernière est importante, plus elle consomme le chlore introduit rapidement.

Le chitosane est généralement considéré comme non toxique. Sa toxicité a été testée sur une culture à 1ppm après dissolution dans l'acide pour enlever les solides organiques. Par contre, aucune étude de toxicité du chitosane sur l'eau de surface, coagulée et chlorée, n'a été validée. (Rizzo et al, 2008).

Selon Huang et al (2000), le chitosane contribuerait à augmenter le COT dans l'eau. Cette augmentation peut causer la formation des sous-produits de désinfection (DBPs). Quelques-uns sont considérés potentiellement cancérogènes (USPA, 2002). Cependant, si on prend compte du faible dosage du chitosane dans cette expérience (inférieur à 1 mg /l), le taux de COT serait inférieur à 4mg/l après coagulation (Huang et al., 2000). Aussi, aucune corrélation claire n'a été retrouvée entre le taux de COT de l'eau et le processus de floculation (Bina et al., 2009).

Il existe un test de toxicité aigüe appelé « test D magna », capable de caractériser la toxicité de différents catégories d'eau et d'eau usée. Ce test peut être utilisé pour caractériser les effets potentiels toxiques des eaux potables finis (Rizzo et al, 2008). En effet, plus 500 DBPs sont reportés dans la littérature (Richardson, 1998) mais rien est encore sûr du potentiel toxique de plusieurs d'entre eux.

Le suivi des sous-produits, la détermination des composés organochlorés et de leurs dosages dans les eaux traitées après chloration, donnerait plus de précision sur l'éventuelle toxicité de l'utilisation du chitosane dans le traitement des eaux destinées à la consommation. Même en tenant compte de la biodégradabilité du chitosane, le risque associé à l'utilisation du chitosane est non négligeable et est à considérer dans les limites potentielles d'usage.

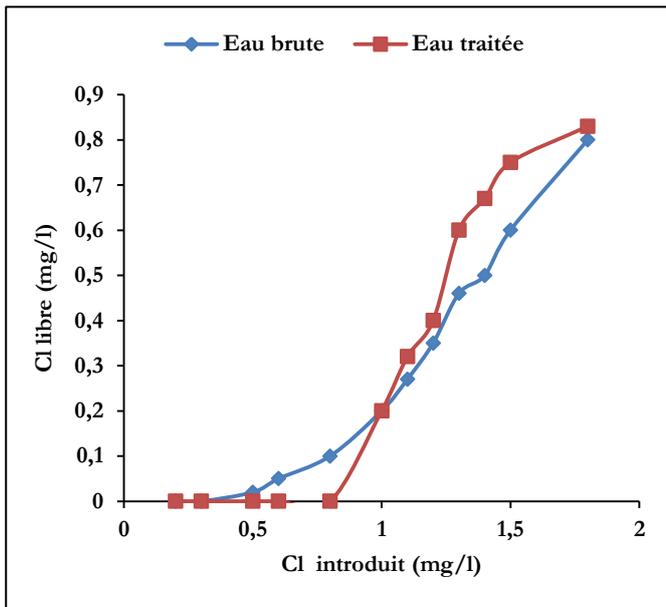


Figure V-36 : Demande en chlore de l'eau de Keddara, brute et traitée par le chitosane comme aide coagulant.

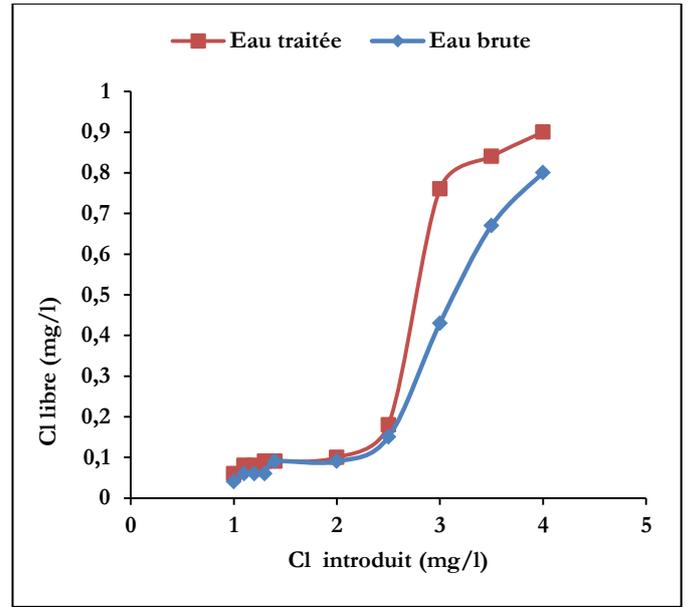


Figure V-37 : Demande en chlore de l'eau de Beni Amrane, brute et traitée par le chitosane comme aide coagulant.

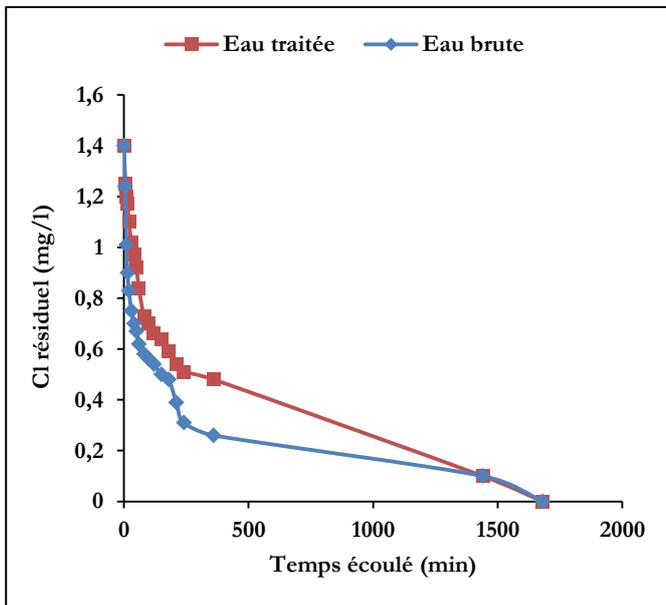


Figure V-38 : Rémanence en chlore de l'eau de Keddara, brute et traitée par le chitosane comme aide coagulant.

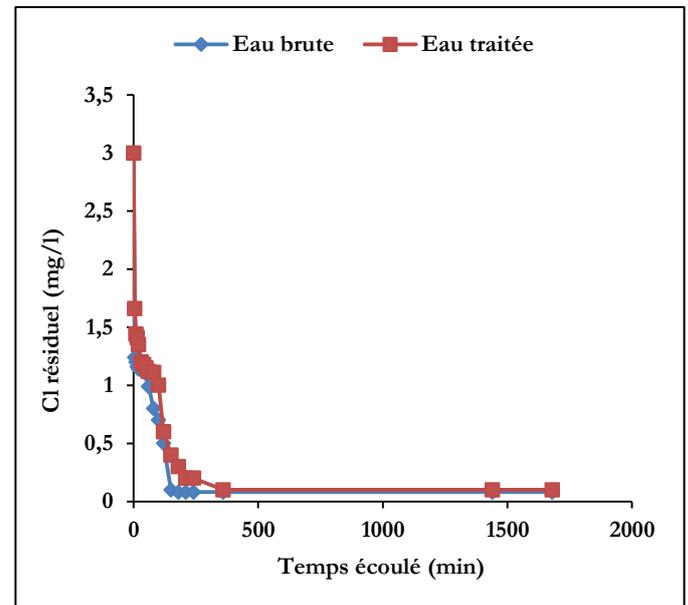


Figure V-39 : Rémanence en chlore de l'eau de Beni Amrane, brute et traitée par le chitosane comme aide coagulant.

V.3. Comparaison des taux d'aluminium résiduel dans les eaux traitées différemment

Après ajustement des conditions optimales de traitement de l'eau du barrage (dose optimale de coagulant, pH optimal), nous avons comparé les valeurs d'aluminium résiduel obtenues après traitement par l'Alum seul, l'Alum et le polyélectrolyte, et l'Alum en conjonction avec le chitosane. Les résultats obtenus sont mentionnés dans la figure (V-40). L'aluminium résiduel, représenté dans la figure, varie selon le coagulant utilisé, le chitosane pour le traitement en conjonction, le polyélectrolyte pour le traitement conventionnel, et l'Alum pour le traitement à l'Alum seul.

On observe que la variation de l'aluminium résiduel dans les eaux traitées par le chitosane, se détache nettement de la variation dans les eaux traitées autrement. En effet, l'utilisation du chitosane permet d'obtenir des valeurs d'aluminiums résiduels inférieures dans des conditions optimales. La combinaison du chitosane-Alum réduit la concentration de ce dernier de 30 à 50%, selon la qualité de l'eau brute.

Afin de constater les concentrations de l'aluminium résiduel dissous dans les eaux traitées soit les ions Al^{3+} , nous avons procédé au laboratoire à une filtration par filtre. Cette étape correspondrait à l'étape de filtration sur sable dans une usine de production d'eau potable. En fait, cette étape va permettre de retenir les composés colloïdaux- Al^{3+} qui n'ont pas été décantés. Les résultats obtenus sont représentés dans la figure (V-41).

Nous remarquons que les valeurs d'aluminium ont considérablement diminué après filtration. En effet, toutes les valeurs relevées sont inférieures à 0,1 mg/l d'aluminium dissous après traitement sous des conditions optimales de dosage et de pH.

Nous constatons aussi, que pour le traitement de l'eau de Keddara, on a obtenu presque les mêmes taux d'aluminium dissous dans l'eau pour les différents traitements réalisés. Ceci peut-être expliqué par la faible turbidité de l'eau qui empêcherait une bonne coagulation-floculation.

Par contre, pour l'eau de Beni Amrane, le résultat obtenu est meilleur. Non seulement l'Alum a été substitué en raison de 50%, en plus l'efficacité du chitosane a permis une meilleure élimination des ions Al^{3+} de l'eau.

Cependant, toutes les valeurs d'aluminium dissous enregistrés dans des conditions optimales et sous différents traitements, ont donné des valeurs inférieures à 0,2 mg/l. Cette dernière correspond au niveau maximal de contamination définie par l'US. Environmental Protection Agency(2003). (Bina et al., 2009).

Sur 186 eaux utilisées, l'agence américaine de la protection environnementale a trouvé, qu'après coagulation avec les sels d' Al^{3+} , la teneur résiduelle en Al^{3+} dans l'eau traitée varie de 0.01 à 2.37mg/l (Srinivasan, 1999). L'utilisation de l'Alum comme coagulant pour le traitement de l'eau conduit souvent à de fortes concentrations d'aluminium dans l'eau traitée, dans les boues ainsi que dans l'eau brute elle-même. Il y a une forte évidence que l'aluminium peut causer des effets néfastes sur le système nerveux (Health Protection Branch Of Health, Cannada, 2008) (Bina et al., 2009).

Ainsi l'utilisation du chitosane comme aide coagulant en conjonction avec l'Alum, on peut envisager la réduction du taux d'aluminium dissous dans l'eau. (en accord avec les résultats de Bina et al., 2009).

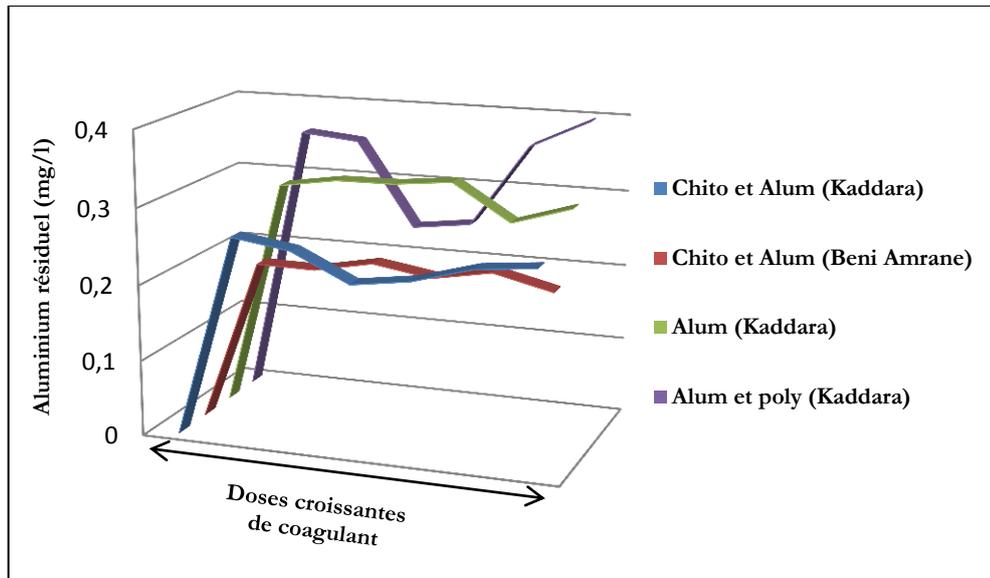


Figure V-40 : Variation de l'Aluminium résiduel détecté dans l'eau de Keddara après les différents essais de traitabilité

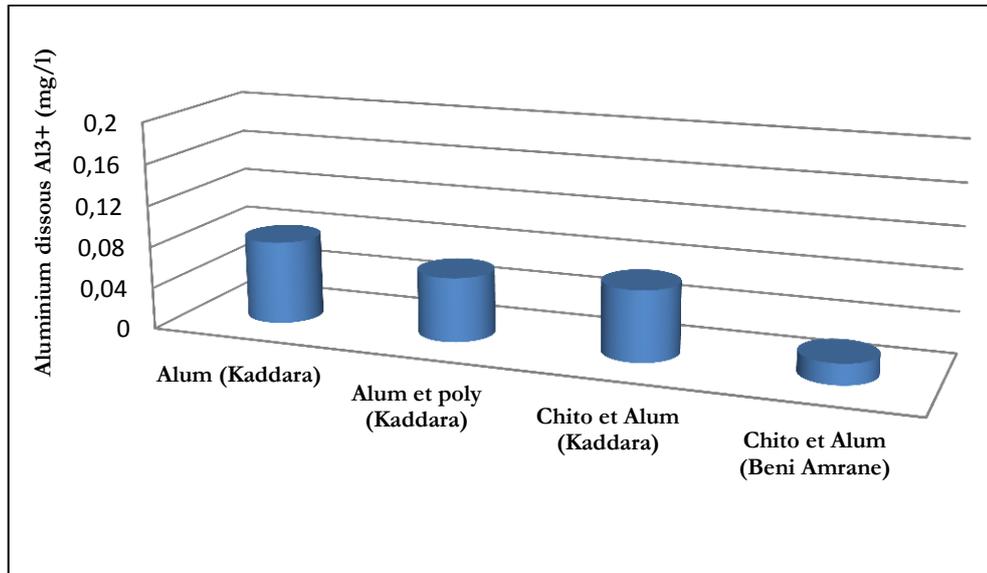


Figure V-41 : Taux d'Aluminium résiduel dissous (Al³⁺) dans l'eau de barrage traitée

V.4. Impact du chitosane sur la qualité et la quantité des boues formées

La coagulation aux sels métalliques, bien que très efficace, induit une excessive production de boue. En employant le chitosane, non seulement les volumes de boues produites se trouvent considérablement réduits mais aussi, la quantité de sels retrouvée dans les boues est réduite dans les mêmes proportions que le taux de substitution choisi.

Tous au long de notre étude, nous avons pu observer la formation de différents types de floccs pendant la coagulation-floculation. Cela en raison des différents essais de traitabilité utilisés et des types d'eaux traitées. La figure (VI-42) contient des photos prises pendant l'étape d'agitation lente de plusieurs traitements à base d'Alum et de chitosane pour l'eau de Beni-Amrane et de Keddara.

La figure (V-42) (a) présente l'aspect des floccs formés pendant le traitement conventionnel, soit l'utilisation de l'Alum et le polyélectrolyte dans l'eau de Keddara. Nous avons observé, pendant le déroulement de l'essai, la formation de micro-floccs qui grandissaient pendant l'agitation lente pour donner finalement de larges floccs bien constitués qui apparaissent dans la photo.

La figure (V-42) (b) présente l'aspect des floccs formés pendant l'utilisation du chitosane en conjonction avec l'Alum pour l'eau de Keddara. Les floccs apparaissent de petites tailles, nombreux, très légers et ressemblent à des flocons de neige.

La figure (V-42) (c) présente l'aspect des floccs formés pendant le traitement avec le chitosane et la bentonite sur l'eau de Keddara. Nous avons observé une très bonne coagulation. Plusieurs floccs blancs sont apparus rapidement, et ils ont pris du volume pendant l'agitation.

Les figures (V-42) (d) et (V-42) (e) correspondent à l'eau de Beni-Amrane, traitée par le chitosane seul et par le chitosane en conjonction, respectivement. Les floccs apparaissent en un petit temps, très colorés et volumineux. La seule différence entre les deux traitements se voit dans la quantité des floccs. Pour le traitement en conjonction, les floccs sont plus nombreux.

L'étape de décantation permet d'avoir une idée concernant la quantité des boues formées. Il est connu que le sulfate d'aluminium donne des floccs très volumineux qui occupent beaucoup de place et sont difficiles à déshydrater. L'utilisation du chitosane permet de réduire ce volume. En effet, la figure (V-43) (b') montre des résidus fibreux formant des réseaux qui ressemblent aux toiles d'araignée. Même résultat pour l'utilisation du chitosane avec la bentonite sur l'eau de Keddara, sauf que, la matière produite est plus blanchâtre comme l'indique la figure (V-43) (c').

Les figure (V-43) (d') et (V-43) (e') montrent l'aspect de la boue qui pourrait se former après décantation des floccs résultant de la coagulation-floculation par chitosane et par conjonction de chitosane avec l'Alum, respectivement, sur l'eau de Beni-Amrane. Par rapport à l'eau de Keddara, les floccs sédimentent plus rapidement (moins de 10min) et leur volume est plus important en raison de la charge plus importante de l'eau de Beni-Amrane.

En effet, plus la turbidité est élevée, plus les floccs sont larges et le temps de sédimentation est court.

Les boues obtenues à partir du traitement conventionnel, généralement, posent plusieurs problèmes et tendent à s'accumuler dans l'environnement. L'utilisation du chitosane dans le traitement serait d'une aide considérable pour diminuer le prix du traitement des boues.

Cependant, il serait recommandable de s'assurer des changements attendus du chitosane par des analyses approfondies afin de s'assurer principalement que la valorisation de ces boues, par épandage agricole, sera toujours possible. Les boues produites pourront aussi être disposées sans danger dans les décharges. (Divakaran et Pillai, 2001).

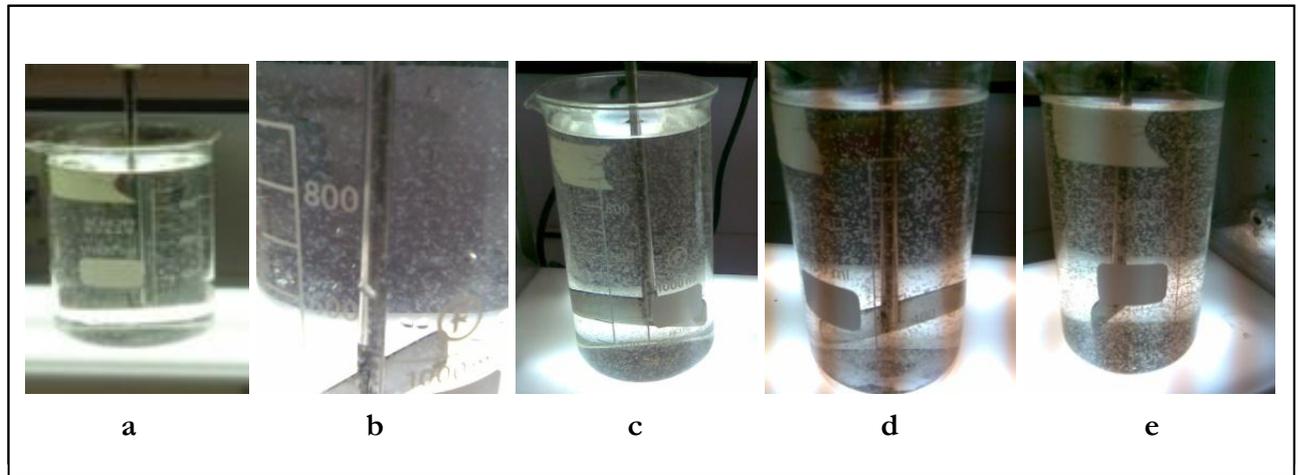


Figure V-42 : Aspect des floes formés pendant la coagulation de l'eau de Keddara et de Beni-Amrane par différentes méthodes.

- (a) Traitement à l'Alum et polyélectrolyte pour l'eau de Keddara;
- (b) Traitement à l'Alum et chitosane pour l'eau de Keddara ;
- (c) Traitement à l'Alum et bentonite pour l'eau de Keddara ;
- (d) Traitement au chitosane seul pour l'eau de Beni Amrane ;
- (e) Traitement à l'Alum et chitosane pour l'eau de Beni Amrane.

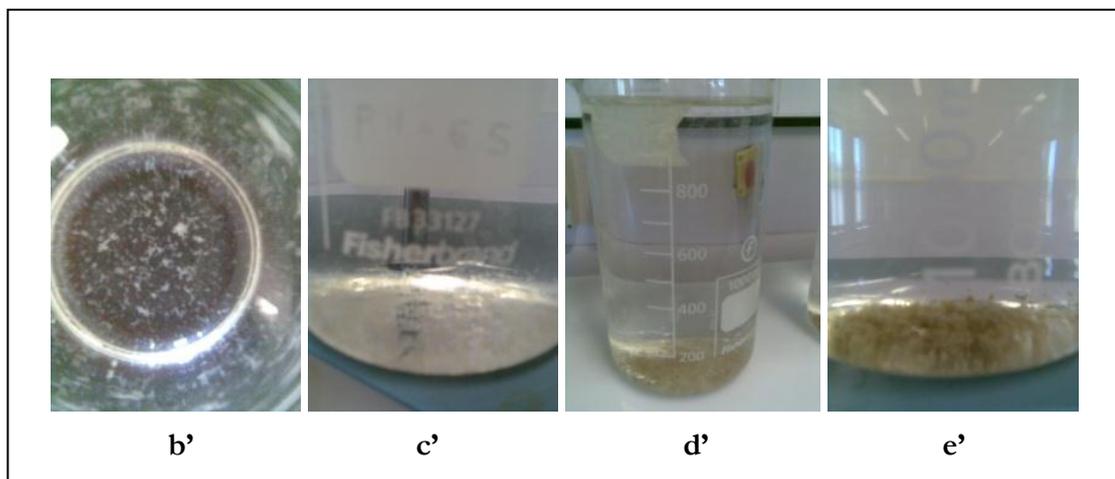


Figure V-43 : Aspect des floes décantés après différents traitements de l'eau de Keddara et de Beni-Amrane.

- (b') Traitement à l'Alum et chitosane pour l'eau de Keddara ;
- (c') Traitement à l'Alum et bentonite pour l'eau de Keddara ;
- (d') Traitement au chitosane seul pour l'eau de Beni-Amrane ;
- (e') Traitement à l'Alum et chitosane pour l'eau de Beni-Amrane.

V.5. Comparaison de l'efficacité des différents traitements utilisés

L'ensemble des séries de Jar test effectués ont permis de déterminer les conditions optimales d'utilisation du traitement de l'eau de barrage. L'efficacité de ces traitements a été comparée entre-elles en termes d'abattement de turbidité et d'absorbance UV à 254nm. Les résultats sont résumés dans des histogrammes présentés dans les figures (V-44) et (V-45).

Concernant l'abattement de la turbidité pour l'eau de Keddara, l'utilisation du traitement conventionnel (Alum et polyélectrolyte) a donné le meilleur résultat. L'utilisation de l'Alum seul et de l'Alum en conjonction avec le chitosane, ont donné le même abattement avec un taux de substitution d'Alum de 30%. Le chitosane utilisé seul a donné un faible résultat, en raison de la faible teneur en turbidité de l'eau brute. Par contre pour l'eau de Beni-Amrane, les résultats sont meilleurs. L'utilisation de l'Alum seul ou avec le polyélectrolyte ou bien avec le chitosane a donné des résultats supérieurs à 90% de réduction de turbidité.

En prenant en considération :

- ✓ le taux d'aluminium résiduel dissous dans l'eau, en raison de sa possible relation avec la maladie d'Alzheimer,
- ✓ le potentiel d'effet cancérigène dû à l'utilisation du polyacrylamide,
- ✓ la réduction considérable du taux d'Alum après conjonction avec le chitosane,
- ✓ la quantité et la qualité des boues et leur potentielle toxicité due à la présence d'aluminium,
- ✓ la biodégradabilité du chitosane et son non toxicité,

Nous pouvons classer les différents traitements étudiés d'une eau de barrage chargée (eau de Beni-Amrane) par ordre croissant d'efficacité d'enlèvement de la turbidité et par ordre décroissant d'impact négatif sur la santé humaine et l'environnement, comme suit :

Alum et polyélectrolyte > Alum seul > Alum et chitosane > chitosane seul (après amélioration de l'abattement).

Concernant l'abattement de l'UV à 254nm, les résultats obtenus sont assez faibles. En effet, il a été trouvé que le chitosane a un faible pourcentage de réduction d'absorbance. Ce résultat est soutenu par Rizzo et al (2008). Mais en conjonction avec l'Alum, les taux de réductions sont nettement meilleurs. Nous constatons aussi que les eaux chargées telles que celles de Beni-Amrane donnent un meilleur abattement, en raison de la bonne coagulation. Cependant, l'utilisation du traitement conventionnel sur l'eau de Beni-Amrane a donné le meilleur abattement de la matière organique naturelle.

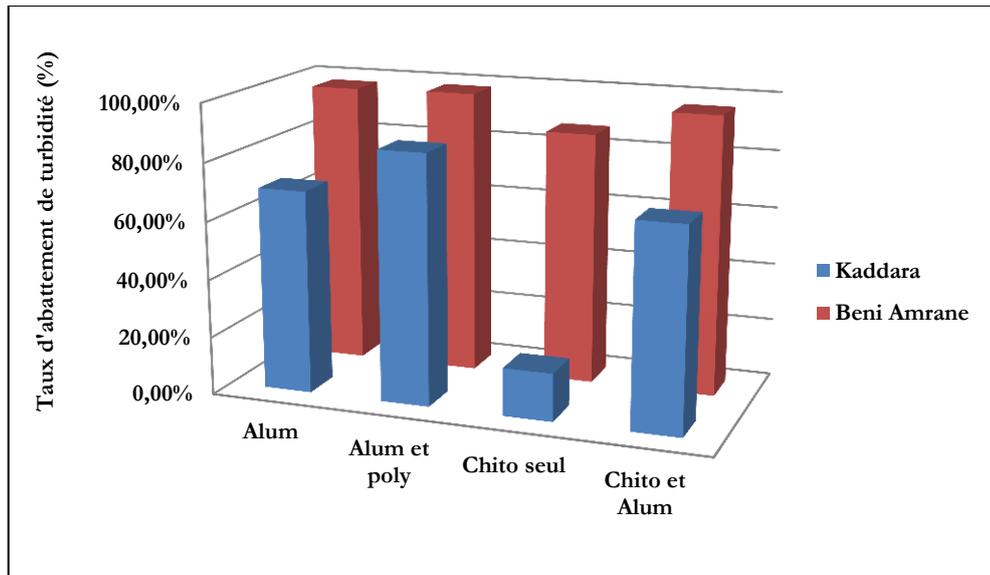


Figure V-44 : Abattement de la turbidité de l'eau de Keddara et de Beni-Amrane traitée différemment

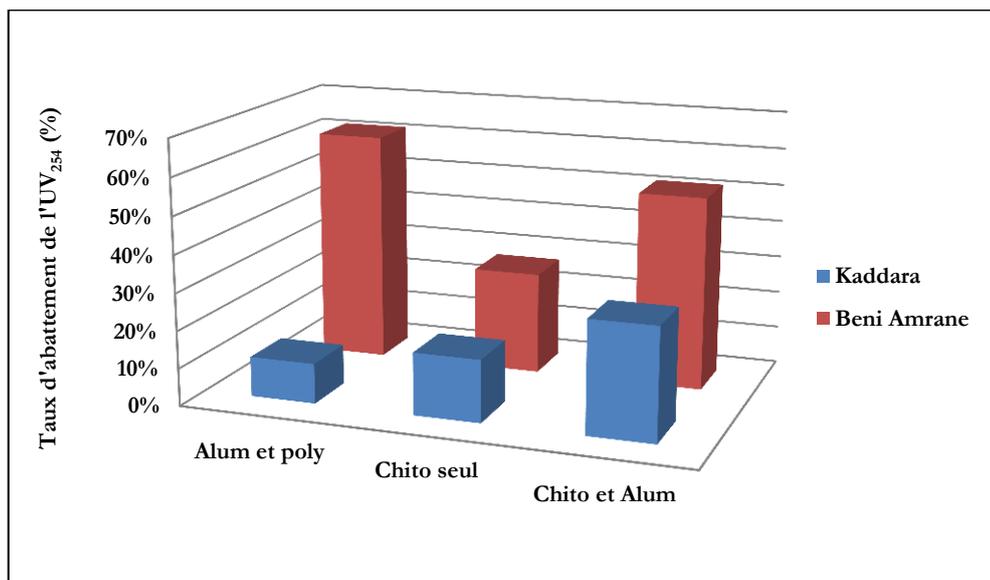


Figure V-45 : Abattement de l'absorbance UV à 254nm de l'eau de Keddara et de Beni-Amrane traitée différemment

Les différents essais de traitabilité nous ont permis de déterminer les conditions optimales (dose de coagulant ou d'aide coagulant et pH) afin de comparer l'efficacité des différents traitements possibles sur une eau de barrage faiblement turbide (Keddara) et sur une eau chargée (Beni Amrane). Cette comparaison s'est faite sous les critères d'abattement de la turbidité, de la matière organique, de la quantité résultante d'aluminium dissout dans l'eau traitée et enfin de la quantité et qualité de boues formées.

Les résultats obtenus ont permis de souligner plusieurs avantages de l'utilisation du chitosane dans le traitement de l'eau.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif global de notre travail était d'étudier la faisabilité du traitement d'une eau de surface de barrage en utilisant le chitosane. Une étude comparative entre divers traitements a été ainsi réalisée, après optimisation des conditions opératoires pour les meilleures performances de coagulation-floculation.

Cette étude a été réalisée au sein de l'usine de production d'eau potable de Boudouaou. Deux types d'eaux ont été utilisés ; celle qui arrive de Keddara et celle de Beni-Amrane. Elles diffèrent, principalement, par leur turbidité initiale.

Les résultats obtenus en laboratoire, nous ont permis de tirer les principales conclusions (ci-dessous) quant à l'intérêt de la mise en œuvre à échelle pilote, puis industrielle, du biocoagulant (chitosane) en clarification

- ✓ L'eau brute de Keddara est une eau très claire ayant une faible turbidité. Sa température varie entre 12 et 17°C et son pH varie entre 7 et 8. L'eau de Beni-Amrane est une eau jaunâtre et plus turbide.
- ✓ La solubilité du chitosane est un paramètre très important. Il dépend du milieu acide. Il n'y a pas eu, pratiquement, de différence d'efficacité d'abattement de turbidité entre les deux solutions. L'acide acétique a été choisi pour le reste de l'étude en raison de la stabilité de la solution de chitosane préparé avec.
- ✓ L'utilisation du chitosane seul n'a pas donné de résultat pour l'eau de Keddara et ce, en raison de la faible teneur de l'eau en particules et en matière organique. Il a, par contre, montré une meilleure élimination de la turbidité de l'eau de Beni-Amrane qui a une forte turbidité initiale. Plus une eau est chargée en colloïdes et en particules, plus l'abattement de sa turbidité, par le chitosane seul, est meilleure.
- ✓ L'utilisation du chitosane comme aide coagulant au sulfate d'aluminium a permis d'obtenir une coagulation-floculation avec un abattement de turbidité de 76% pour l'eau de Keddara et d'améliorer l'abattement de turbidité jusqu'à 96% pour l'eau de Beni Amrane. Le dosage du coagulant et de l'aide coagulant, diminue avec l'augmentation de la turbidité.
- ✓ Le traitement par conjonction entre l'Alum et le chitosane, permet une substitution de l'Alum de 30% pour l'eau de Keddara et de 50% pour l'eau de Beni-Amrane.
- ✓ Le chitosane permet de réduire de 30 à 50% l'utilisation de l'Alum, ainsi diminuer l'Al³⁺ résiduel dans l'eau traitée, dans les boues formées et par conséquent dans l'environnement.
- ✓ La présence du sulfate dans l'eau semble avoir un effet important durant l'adsorption de chitosane. Ainsi, la combinaison entre l'Alum et le chitosane donne de très bons résultats.
- ✓ L'utilisation de la bentonite pour améliorer l'efficacité du chitosane par augmentation de charge, n'a pas donné de bons résultats, même après optimisation du pH initial de l'eau.
- ✓ L'ajout d'une quantité croissante de solution acide de chitosane conduit à un changement du pH. Ce changement n'est pas très important, car la réduction est inférieure à une unité pH.
- ✓ Les coagulants utilisés voient leur efficacité dépendre considérablement du pH. En effet, l'utilisation du chitosane est optimisée à un pH égal à 7 ou 7,5 pour l'eau de Keddara. Pour l'eau de Beni-Amrane, un pH optimal de 6,5 est déterminé.

- ✓ La détermination du pH optimal permet d'augmenter considérablement le taux d'abattement des traitements. Pour l'eau de Keddara la conjonction de l'Alum avec le chitosane a donné 70% d'abattement de turbidité qui est légèrement inférieure à l'utilisation du traitement conventionnel 86%. L'eau plus turbide de Beni-Amrane a donné un abattement supérieur à 90% pour la conjonction de l'Alum avec le chitosane et le traitement conventionnel, et 87% de réduction pour l'utilisation du chitosane seul.
- ✓ Une légère diminution de l'alcalinité de l'eau, après traitement en utilisant le chitosane, a été enregistrée pour l'eau de Keddara. Par contre, un abaissement plus important a été constaté pour l'eau de Beni-Amrane.
- ✓ Un abattement de la dureté a été, aussi, constaté après essai de traitabilité au chitosane, avec un meilleur enlèvement pour l'eau de Beni-Amrane.
- ✓ Concernant l'abattement de la matière organique naturelle, nous avons obtenu une réduction de 30% et 51% de l'absorbance UV à 254nm pour l'eau faiblement turbide et fortement turbide, respectivement. En constate, par rapport au traitement conventionnel, qu'un meilleur abattement est obtenu avec l'eau de Keddara. Par contre, pour l'eau de Beni-Amrane, on a presque les mêmes résultats.
- ✓ La comparaison de la demande et de la cinétique de disparition du chlore entre l'eau brute et l'eau traité de Keddara et de Beni-Amrane, a donné des résultats similaires. Ce résultat n'a pas permis de conclure, si le fait d'utiliser du chitosane diminuer la MON dissoute dans l'eau ou bien le contraire.
- ✓ L'utilisation du chitosane, seul ou en conjonction, permet de réduire considérablement la quantité des boues formées après clarification. En plus du volume réduit, le chitosane permet aussi de minimiser la quantité d'aluminium retrouvée dans les boues et ainsi pouvoir les valoriser par l'épandage agricole.
- ✓ La performance du chitosane dans le traitement de l'eau de barrage, a été comparée à celle des produits chimiques conventionnels. Les résultats sont très rapprochés pour l'eau de Keddara (conjonction avec l'Alum) et l'eau de Beni-Amrane (chitosane utilisé seul ou en conjonction avec l'Alum).
- ✓ L'efficacité de l'utilisation du chitosane en conjonction a été égale à l'efficacité de l'utilisation du polyélectrolyte synthétique conventionnel pour le traitement de l'eau de barrage, avec une réduction considérable de l'utilisation de l'Alum.
- ✓ D'un point de vue technico-économique, l'utilisation du chitosane (produit naturel, prix bon marché) permet de réduire les quantités de produits chimiques généralement utilisés. Et en plus, il permet la substitution complète du polyélectrolyte synthétique qui est un flocculant très cher et potentiellement toxique, par conséquent le prix du traitement.

Il serait recommandable d'améliorer le traitement à base de chitosane, en étudiant les conditions des mélanges (régime, temps, vitesse de rotation), les caractéristiques détaillées de l'eau (pH, alcalinité, concentration des particules colloïdales, couleur, présence de sels dissous ou d'éléments trace) et ses propriétés physico-chimiques (types de particules, polarité, hydrophobicité) ainsi que l'effet de plusieurs chitosanes de différentes sources et cristallinités qui se retrouvent dans le commerce.

Dans le but de compléter notre présente investigation, il serait souhaitable d'exploiter tous les bienfaits du chitosane, comme par exemple son effet vis-à-vis des bactéries et les algues.

Un flocculateur de laboratoire ne reproduit pas de manière parfaite, les phénomènes complexes qui se produisent dans une station de traitement d'eau potable. L'extrapolation à une échelle réelle n'est pas évidente à cause de la dépendance mutuelle des processus mis en jeu.

L'essai sur pilote permet de reproduire les conditions de fonctionnement d'une vraie station est recommandé. Il est considéré comme étant le complément (de taille) des essais au laboratoire. Ainsi on pourra étudier, par exemple, l'impact du chitosane sur le colmatage des filtres à sable, l'impact de la pré-chloration de l'eau brute sur l'efficacité du chitosane, etc....

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ahmad A.L., Sumathi S., Hameed B.H. (2005). *Residual oil and suspended solid removal using natural adsorbents chitosan, bentonite and activated carbon: A comparative study*. Chemical Engineering Journal 108, 179–185.
- Aranaz I., Mengibar M., Harris R., Paños I., Miralles B., Acosta N., Galed G., Heras A. (2009). *Functional Characterization of Chitin and Chitosan*. Current Chemical Biology, 3, 203-230.
- Ashmore M., Hearn J., (2000). *Flocculation of model latex particles by chitosans of varying degrees of acetylation*. Langmuir 16 (11), 4906–4911.
- Ashmore M., Hearn J., Karpowicz K. (2001). *Flocculation of latex particles of varying surface charge densities by chitosans*. Langmuir 17: 1069-1073.
- Barnes D., Wilson F. (1983). *Chemistry and unit operations in water treatment*. Applied Science Publication.
- Beaudry J.P., Sainte Foy. (1983). *Traitement des eaux*. Éd. du Griffon d'Argile.
- Bina B. (1995). *The Use of Moringa Oleifera Seed as Natural Plant Coagulant in Removal of Clay Particles and E.coli*. Water & sewage.14 : 4-12.
- Bina B., Mehdinejad M. H., Nikaeen M., Movahedian Attar H. (2009). *Effectiveness of Chitosan As Natural Coagulant Aid In Treating Turbid Waters*. Iran. Journal.Environment. Health. Science. Engineering., 2009, Vol. 6, No. 4, pp. 247-252.
- Block J.C., Servais P., Boireau A., Cavard J. (1998). *The need for and use of chlorine*. Conference « Drinking water distribution with or without disinfectant residuals », Mülheim, 28-30, pp. IX-1-IX-11.
- Boeglin J.C. (2002). *Traitements physicochimiques de la pollution insoluble*. [G 1 270]. Technique de l'ingénieur. Base documentaire Environnement.
- Boeglin J.C. (2002). *Traitements physicochimiques de la pollution soluble*. [G 1 271]. Technique de l'ingénieur. Base documentaire Environnement.
- Boeglin J.C. (1999). *Lutte contre la pollution de l'eau. Inventaire des traitements*. [G 1 250]. Technique de l'ingénieur. Base documentaire Environnement.
- Bolto B., Gregory J. (2007). *Organic polyélectrolyte in water treatment*. Waters; 41: 2301-24.
- Bough WA. (1975). *Coagulation with chitosan an aid to recovery of byproducts from egg breaking wastes*. Poultry Science; 54:1904–12.
- Bough W.A. (1975). *Reduction of suspended solids in vegetable canning waste effluents by coagulation with chitosan*. Journal Food Science , 40:297–301.
- Bough W.A., Shewfelt A.L., Salter W.L. (1975). *Use of chitosan for the reduction and recovery of solids in poultry processing waste effluents*. Poultry Science, 54:992–1000.
- Bratby J. (2007). *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*. 2nd ed., IWA Publishing.
- Chatterjee T., Chatterjee S., HanWoo S. (2009). *Enhanced coagulation of bentonite particles in water by a modified chitosan biopolymer*. Chemical Engineering Journal 148, 414–419.

- Chen L., Chen D., Wu C. (2003) *A new approach for the flocculation mechanism of chitosan*. Journal. Polymer.Environment. 11 (3) 87-92.
- Chihpin H., Yin C. (1996) *Coagulation of colloidal particles in water by chitosan*. Journal. Chemical. Technology. Biotechnology. 66, 227-232.
- Clesceri L.S., Greenbery A.E., Trussell R.R. (1989). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 17th ed.
- CPS : *Cahier spécifique de la station de traitement de Boudouaou*.
- Crini G., Badot P.M. (2007). *Traitement et épuration des eaux industrielles polluées. Procèdes membranaires, bioadsorption et oxydation chimique*. Presses Universitaires de Franche-Comte.
- Crini G., Badot P.M. (2008). *Application of chitosan, a natural aminopolysaccharide, for dye removal from aqueous solutions by adsorption processes using batch studies: A review of recent literature*. Progress in Polymer Science, 33, 399-447.
- Crini G. (2009). *Traitement des eaux par du chitosane : intérêts, méthodes et perspectives*. *Technique de l'ingénieur*. RE 126-1.
- Degremont, (1989). *Mémento technique de l'eau*. Edition du cinquantenaire, Paris, France.
- Degrémont. (1989). *Mémento technique de l'eau*. Tec & Doc Lavoisier.
- Degrémont. (1996). *Mémento technique de l'eau*. 10^{ème} édition, Tome 1et 2. Protocole d'analyse du laboratoire.
- Degremont (2005). *Mémento technique de l'eau : Tome 2* », Lavoisier, SAS – Lexique technique de l'eau, dixième édition, Paris, France.
- Desbrieres J. (2002). *Chitine et chitosane*. Actualite Chimique, 11/12, 39-44.
- Desjardins R. (1997). *Traitement des eaux*. Éd. École Polytechnique de Montréal.
- Desjardins C. (1999). *Simulation et étude en laboratoire de la flocculation lestée (ACTIFLO) à l'aide d'une procédure modifiée de jar test*. Mémoire de Maîtrise Es Sciences Appliquées (Génie Civil), Département Des Génies Civil, Géologique et des Mines, Ecole Polytechnique de Montréal, Canada.
- Diaz A., Rincon N., Escorihuela A., Fernandez N., Chacin E., Forster C.F., (1999). *A preliminary evaluation of turbidity removal by natural coagulants indigenous to Venezuela*. Process Biochemistry. 35: 391-395.
- Divakaran R., Pillai V.N.S. (2001). *Flocculation of kaolinite suspensions in water by chitosan*. Water Research. 35 (16), 3904–3908.
- Divakaran R., Sivasankara Pillai V. N. (2002). *Flocculation of river silt using chitosan*. Water Research 36: 2414-2418.
- Driscoll C. T., Letterman R. D. (1995). *Factors regulating residual aluminium concentrations in treated waters*. Environmetrics 6, 287-309.
- Ebeling J.M., Sibrell P., Ogden S., Summerfelt S.(2003). *Evaluation of chemical coagulation_/flocculation aids for the removal of suspended solids and phosphorus from intensive recirculating aquaculture effluent discharge*. Aquacultural Engineering. 29: 23-42.

- Edeline F. (1998). *Épuration physicochimique des eaux*. CEBEDOC. Tec & Doc.
- EPA .(2003). *National Primary Drinking Water Standards*. EPA 816-F- 03-016.
- Felt O., Baeyens V., Zignani M., Buri P., Gurny R. (1999). In *The Encyclopedia of controlled drug delivery* E. Mathiowitz ed., Wiley and Sons, Inc., 605-626, New York, USA.
- Fernandez M., Fox P.F. (1997). *Fractionation of cheese nitrogen using chitosan*. *Food Chemistry*. 58 (4), 319–322.
- Folkard G. K., Sutherland J., Sha R. (2000). *Water clarification using Moringa oleifera seed coagulant*. On Electronic products: <http://www.lboro.ac.uk/well/resources/technical-briefs/60> .
- Gamage A., Shahidi F. (2007). *Use of chitosan of metal ion contaminants and proteins from water*. *Food Chemistry*.
- Gardner J., PEEL M. (1998). *Sterilization, Disinfection and Infection Control*. Churchill Livingstone.
- Gidas M.B. (1998). *Etude de la performance du chitosan comme coagulant pour l'enlèvement du cuivre et de la turbidité des eaux usées (Performance study of chitosan as acoagulant for removing copper and turbidity of wastewater)*. In *Mémoire de Maîtrise Es Sciences Appliquées (Génie Civil), Département des Génies Civil, Géologique et des Mines(CGM), Ecole Polytechnique de Montréal, Canada*.
- Godart H. (2000). *Eaux de distribution. Clarification*. *Technique de l'ingénieur*. C 5 199 Technologies de l'eau.
- Godart H. (2000). *Eaux de distribution. Traitements spécifique*. *Technique de l'ingénieur*. C 5 201 Technologies de l'eau.
- Godart H. (2000). *Eaux de distribution. Traitements unitaires*. *Technique de l'ingénieur*. C 5 200 Technologies de l'eau.
- Guerrero F., Omil R., Méndez, Lema J. M. (1998). *Protein recovery during the overall treatment of wastewaters from fish-meal factories*. *Bioresource Technology*. 63: (3). 221-229.
- Guibal E., Roussy J. (2007). *Coagulation and flocculation of dye-containing solutions using a biopolymer*. *Reactive and functional polymers* 67: 33-42.
- Guibal E. (2004). *Interactions of metal ions with chitosan-based adsorbents: a review*. *Separation and Purification Technology*, 38, 43-74.
- Health Protection Branch of Health Canada. (2008). *Aluminum in Drinking Water and Human Health. The facts about human and aluminum in drinking water*. Canada publications. Ottawa, KIA 0K9, 1-4.
- Hernández De León H. R. (2006). *Supervision et diagnostic des procédés de production d'eau potable*. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France.
- Huang C.M., Chen S., Pan J.R. (1999). *Optimal Condition For Modification Of Chitosan: A Biopolymer For Coagulation Of Colloidal Particles*. *Water. Research*. Vol. 34, No. 3, pp. 1057-1062.
- Huang C.M., Chen S., Pan J. R. (2000). *Optimal condition for modification of chitosan: a biopolymer for coagulation of colloidal particles*. *Water Research* 34: 1057-1062.
- Huang C.M, Chen S., Pan J. R., Chung Y. C. (1999). *Evaluation of a modified chitosan biopolymer for coagulation of colloidal particles*. *Colloids and Surfaces A. Physicochemical. Engineering. Aspects* 147, 359-364.

- Iranian Institute of Standard and Industrial Researches*. (1993). Water Quality Company, Tehran, Iran. <http://www.isiri.org>.
- Jourdin Philippe. (2001). *Les crustacés contre les eaux usées*. La Science au Québec.
- Kaufhold S., Dohrmann R. (2007). *Detachment of colloidal particles from bentonite in water*. Clay Science: 39, 50-59.
- Kawamura S. (1991). *Effectiveness of natural polyelectrolytes in water treatment*. Journal. American Water Works Association 10, 88-91.
- Keong Jun H., Sook Kim J., Kyoon No H., Meyers S.P. (1994). *Chitosan as a Coagulant for recovery of proteinaceous Solids from tofu Wastewater*. Journal. Agricol. Food Chemistry. 42: 1834-1838.
- Knorr D. (1983). *Dye binding properties of chitin and chitosan*. Journal. Food Science. 48, 3-41.
- Krajewska B. (2005). *Membrane-based processes performed with use of chitin/chitosan materials*. Separation and Purification Technology. 41 (3): 305-312.
- Kurita K. (2001). *Controlled functionalization of the polysaccharide chitin*. Progress in Polymer Science 26: 1921-1971.
- Kurita K. (2006). *Chitin and chitosan: functional biopolymers from marine crustaceans*. Marine Biotechnology, 8, 203-226.
- Lafleur C., Fortier J., Kharoune L., Kharoune M. (2008). *Enlèvement du phosphore et des matières en suspension optimisé par l'utilisation du chitosane et traitement des boues par digestion anaérobie*. Ecole de technologie supérieure (ETS). Montréal (Québec).
- Lafleur C., Fortier J., Kharoune L., Kharoune M. (2008). *Evaluation d'un procédé de coagulation-floculation au chitosane pour l'enlèvement du phosphore dans les effluents piscicoles*. Ecole de technologie supérieure (ETS). Montréal (Québec).
- Lee V.F. (1997). *Solution and shear properties of chitin and chitosan*. Ph.D. Dissertation. University of Washington.
- Lengo K. M. (1994). *Effets comparés de divers coagulants sur l'enlèvement de la matière organique des eaux à potabiliser - influence de la préhydrolytation*. Mémoire de Maîtrise, Département de Génie Civil, École Polytechnique de Montréal, Canada.
- Lind (1994). *Coagulation Control and Optimization*. Part 1, Public Works.
- Li, Q., Dunn E., Grandmaison T.S., W., Goosen M. F. A. (1992). *Application and properties of chitosan*. Journal. Bioactive. Compacted. Polymer
- Li, Q., Kegley, L. (2005). *Assessing the effectiveness and environmental impacts of using natural flocculants to manage turbidity*. Oregon Department of Transportation Research Unit, USA.
- Lin S.D., Evans R.L., Beuscher D.B. (1971). *Algal Removal by Alum Coagulation*. Illinois State Water Survey Division, Report of Investigation 68, Urbana , 1-19.
- Majeti N.V.R.K. (2000). *A review of chitin and chitosan applications*. Reactive. Functional. Polymer. 46 1–27.
- Marinard Biotech. (2001). *Utilisation du chitosane pour une réduction du phosphate à l'effluent d'entreprises aquacoles*.

- Mary A.M., Rogers, David G. Simon. (1999). *A preliminary study of dietary aluminium intake and risk of Alzheimer's disease*. Age and Ageing, 28: 205-209.
- Masschelein W. (1996). *Processus unitaires du traitement de l'eau potable*. CEBEDOC, Tec & Doc Lavoisier.
- McLachlan D. R. C. (1995). *Aluminum and the risk for Alzheimer's disease*. Environmetrics 6, 233-275.
- Mehdinejad M. H., Bina B., Nikaeen M., Movahedian Attar H. (2009). *Effectiveness of chitosan as natural coagulant aid in removal of turbidity and bacteria from turbid waters*. Journal of Food, Agriculture & Environment Vol.7 (3&4): 845 - 850.
- Meysami B., Kasaeian A. B. (2005). *Use of coagulations in treatment of olive oil wastewater model solutions by induced air flotation*. Bioresource Technology 96: 303- 307.
- Mohd Ariffin A.H., Tan Pei L., Zainura Z. N. (2007). *Coagulation and flocculation treatment of wastewater in textile industry using chitosane*. Journal of Chemical and Natural Resources Engineering. Vol. 4 (1): 43-53.
- Moles J. (2000). *Eaux de distribution. Désinfection*. Technique de l'ingénieur. W5 500 Technologies de l'eau.
- Montgomery M. (1985). *Water Treatment Principles and Design*. John Wiley & Sons.
- Muzzarelli R. (1977). *Chitin*. Pergamon. Oxford.
- Nabi Bidhendi G.R., Torabian A., Ensani H., Razmkhah N. (2007). *Evaluation of industrial deing wastewater areatment with coagulants ANand polyelectrolyte as a coagulant aid*. Iran. Journal.Environment. Health. Science. Engineering., Vol. 4, No. 1, PP. 29 – 36.
- No H.K., Meyers S.P. (2000). *Application of chitosan for treatment of wastewaters*. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 163, 1-28.
- Okuda T., Baes A., Nishijimam W., Okadam M. (2001). *Coagulation Mechanism of Salt Solution extracted active component in Moringa Oleifera seeds*. Water. Research., 35(3):830-834.
- Osman Z., Arof A.K. (2003). *FTIR studies of chitosan acetate based polymer electrolytes*. Electrochimica. Acta 48 (8) 993–999.
- Peter M.G. (1995). *Applications and environmental aspects of chitin and chitosan*. J.M.S.-Pure Applied. Chemistry. A32, 629-640.
- Peters C.J., Young R.J., Perry R. (1980). *Factors influencing formation of haloforms in the chlorination of humic materials*. Environment. Science. Technology 14 (11) 1391 – 1395.
- Pinotti A., Bevilacqua A., Zaritsky N. (1997). *Optimization of the flocculation stage in a model system of food emulsion waste using chitosan as polyelectrolyte*. Journal. Food Engineering. 32 (1), 69–81.
- Pontius F.W.(2000). *Regulations for aluminum in drinking water*. Journal American Water Works Association 92(4):1822.
- Randon G. (1997). *Removal of micro-organisms by clarification and filtration processes*. 21^e congrès de l'PAIDE, Madrid, 20-26 p. IR6/18-19.

- Ravi Divakaran V.N., Pillai S. (2004). *Mechanism of kaolinite and titanium dioxide flocculation using chitosan—assistance by fulvic acids*. Water Research 38,2135–2143.
- Ravi Kumar (M.N.V). (2000). *A review of chitin and chitosan applications*. Reactive. Functional. Polymers. 46 (1): 1-27.
- Reckow D.A., Singer P.C., Malcom R.L. (1990). *Chlorination of humic materials : byproduct formation and chemical interpretation, Environment. Science. Technology*. 24 (11) 1655 – 1664.
- Renault F., Sancey B., Badot P.M., Crini G. (2009). *Chitosan for coagulation/flocculation processes—an eco-friendly approach*. European. Polymer. Journal. 45 1337–1348.
- Renault F., Sancey B., Charles J., Morin-crini N., Badot P.M., Winterton P., Crini G. (2009). *Chitosan flocculation of cardboard-mill secondary biological wastewater*. Chemical Engineering Journal 155 775–783.
- Richardson S.D. (1998). *Drinking water disinfection byproducts*, in : R.A. Meyers(Ed), the Encyclopaedia of Environmental Analysis and Remediation, vol. 3, John Wiley & Sons, pp. 1398 – 1421.
- Rizzo L., Di Gennaro A., Gallo M., Belgiorno V. (2008). *Coagulation/chlorination of surface water: A comparison between chitosan and metal salts*. Separation and Purification Technology 62: 79-85.
- Roberts (G.A.F.). (1992). *Chitin chemistry*. Mac- Millan Press London.
- Rodier J. (1996). *L'analyse de l'eau. Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer*. 8 e éd. Paris, Dunod.
- Rondeau V., Commenges D., Jacqmin-Gadda H., Dartigues J.F. (2000). *Relation between aluminum concentrations in drinking water and Alzheimer's disease: an 8-year follow-up study*. American Journal Epidemiology. 152(1): 59–66.
- Rook J.J. (1974). *Haloforms in drinking water*. Water Treatment. Examination. 23
- Roussy J., Van Vooren M., Guibal E. (2004). *Chitosan for the coagulation and flocculation of mineral colloids*. Journal. Dispersion. Science. Technology. 25 (5), 663–677.
- Roussy J., Van Vooren M., Guibal E., Chastellan P. (2005). *Treatment of ink-containing wastewater by coagulation/flocculation using biopolymers*. ISSN 0378-4738 = Water South African Vol. 31 No. 3.
- Roussy J., Van Vooren M., Guibal E., Dempsey B. A. (2005). *Influence of chitosan characteristics on the coagulation and the flocculation of bentonite suspensions*. Water Research 39.3247–3258.
- Ruhsing Pan J., Huang C., Chen S., Chung Y.C. (1999). *Evaluation of a modified chitosane biopolymer for coagulation of colloidal particles*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical. Engineering. Aspects. 147 (3):. 359-364.
- Sandhya B., Tonni A.K. (2003). *Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review*. Journal. Hazardous. Materials. B97219–243.
- Savant V.D., Torres J.A. (2000). *Chitosan-based coagulating agents for treatment of cheddar cheese whey*. Biotechnology. Progress. 16 (6), 1091-1097.
- Skjak-Braek G., Anthonsen T., Sandford P. (1989). *Chitin and chitosan. Sources, chemistry, biochemistry, physical properties and applications*. Elsevier London and New York.

- Smart J.V. (1999). *Bentonite*. Department of Mines and Energy, Mineral Information Leaflet no.1, Queensland, Australia .
- Smidsrod O., Varum K.M. (2005). *Twenty years of chitosan research in Norway*. Journal of Metals, Materials and Minerals. Vol.15 No. 1 pp. 83-88.
- Sorlier P., Denuzière A., Viton C., Domard A. (2001). *Relation between degree of acetylation and electrostatic properties of chitin and chitosan*. Biomacro Molécules 2. (3), 765-772.
- Srinivasan P.T., Viraraghavan T., Subramanian K.S. (1999). *Aluminum in drinking water*. An overview Water South African., 25(1): 47- 55.
- Stauber J.L., Florence T.M., Davies C.M., Adams M.S., Buchanan S.J.(1999). *Bioavailability of Al in alum-treated drinking water*. Journal American Water Works Association, 91(11):84–93.
- Stechemesser H., Dobiás B. (2005). *Coagulation and flocculation*. Surfactant Sciences Series, vol. 126, 2nd ed., CRC Press.
- Strand S.P., Nordengen N., Ostgaard K. (2002). *Efficiency of chitosans applied for flocculation of different bacteria*. Water Research. 36 (19), 4745–4752.
- Strand S.P., Varum K.M., Ostgaard K., Vandvik M.S. (2001). *Screening of chitosan and conditions for bacterial flocculation* .Biomacromolecules 2 (1), 126–133.
- Strand S. P., Varum K. M., Ostgaard K. (2003). *Interactions between chitosan and bacterial suspension-adsorption and flocculation*. Colloid Surface B 27 (1), 71-81.
- Sun L.M., Meunier F. (2003). *Adsorption. Aspects théoriques*. [J 2 730]. Technique de l'ingénieur. Base documentaire. Opérations unitaires Génie de la réaction chimique.
- Suyatma N. E. (2006). *Développement de films biodégradables à base de chitosane: Etudes du mélange chitosane/PLA, de la plastification et de la comptabilisation*. Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale : Sciences Exactes et Biologie, Discipline : Chimie des Matériaux, Université de Reims - Champagne Ardenne.
- Szygula A., Guibal E. (2008). *The removal of sulphonated azo- dyes by coagulation with chitosan*. Colloids and Surfaces A. Physicochemical. Engineering. Aspects 330: 219-226.
- Takahashi T., Imai M., Suzuki I. (2005). *High-potential Molecular properties of Chitosan and Reaction Conditions for Removing p-quinone form the Aqueous Phase*. Biochemical Engineering Journal.25. 7-13.
- Tripathy T., Bhagat RP., Singh RP. (2001) *The flocculation performance of grafted sodium alginate and other polymeric flocculants in relation to iron ore slime suspension*. European. Polymers. Journal. 37 (1) 125-130.
- Truong T.O., Hausler R., Monette F., Niquette P. (2007). *The valorization of industrial fishery waste through the hydrothermal-chemical transformation of chitosane*. Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 20, n° 3, 2007, p. 253-262.
- US EPA. (2003). *National Primary Drinking Water Standards*. EPA 816-F-03-016.
- Vaidya M.V., Bulusu K.R. (1984). *Chitosan as coagulant and coagulant aid*. Journal.Environment 64:43-48.
- Valentin N. (2000). *Construction d'un capteur logiciel pour le contrôle automatique du procédé de coagulation en traitement d'eau potable*. Thèse de Doctorat à l'Université de Technologie de Compiègne, France.

- Van Duin P.J., Hermans J.J. (1959). *Light scattering and viscosities of chitosan in aqueous solutions of sodium chloride*. Journal. Polymer. Science. 36 (130), 295–304.
- Wang D., Sun W., Xu Y., Tang H., Gregory J. (2004). *Speciation stability of inorganic polymer flocculant–PACl*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical. Engineering. Aspects. 243 (1-3): 1-10.
- Weir S., Ramsden D.K., Hughes J. (1993). *The effect of complex growth media on microbial flocculation by the cationic polyelectrolyte chitosan*. Biotechnology. Technology. 7 (2), 111–116.
- Weir S., Ramsden D.K., Hughes J., Le Thomas F. (1993). *The flocculation of yeast with chitosan in complex fermentation media: the effect of biomass concentration and mode of flocculant addition*. Biotechnology. Technology. 7 (3), 199–204.
- WHO. (1996). *Water Quality Monitoring- A practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programs*. Published on behalf of United Nations Environment Program and the World Health Organization, Geneva. ISBN 0 419 22320 7 (Hbk) 0 419 21730 4 (Pbk).
- Wibowo S., Velazquez G., Savant V., Torres J.A. (2005). *Surimi wash water treatment for protein recovery: effect of chitosan–alginate complex concentration and treatment time on protein adsorption*. Bioresearch. Technology. 96 (6): 665-671.
- Zemmouri H., Kadouche S., Lounici H., Hadioui M., Mameri N. (2011). *Use of chitosan in caogulation flocculation of raw water of Keddara and Beni Amrane dams*. Water Science & Technology : Water Supply.
- Zemmouri H. (2008). *Utilisation du chitosane comme agent flocculant dans le traitement des eaux*. Mémoire de magister. École nationale polytechnique. Alger.

ANNEXES

Annexe I : PRESENTATION DE LA STATION DE TRAITEMENT DES EAUX DE BOUDOUAOU

Avant l'année 1987, l'alimentation en eau potable du Grand-Alger était assurée par les champs de captage du Mazafran, de Baraki et du Hamiz. La quantité d'eaux n'arrivait plus à couvrir les besoins, toujours grandissants, des consommateurs. Pour combler le déficit en eau potable de la région Algéroise, un nouveau système d'approvisionnement (24/24 h) a été mis en service à partir de 1987. Il consistait à mobiliser des eaux superficielles des oueds Isser, de Boudouaou et de Keddara.

Ce chapitre permettra de découvrir la station de traitement où s'est déroulée notre étude expérimentale.

Présentation de la station du traitement des eaux de Boudouaou

L'usine de traitement des eaux de Boudouaou a été mise en service en Avril 1987 pour alimenter, en eau potable, le grand d'Alger. Cette station se situe entre la ville de Boudouaou et d'Ouled Moussa à environ 8 km du barrage de Keddara. Elle occupe une superficie de 17 hectares pour traiter un débit d'eau maximal de 540 000 m³/j.

L'eau qui alimente la station de Boudouaou arrive gravitationnellement de la retenue de Keddara (Voir figure VI- 1). Le barrage de Keddara, qui occupe une superficie de 93 km², est situé dans la wilaya de Boumerdès à 8 km du sud de la localité de Boudouaou et à 40 km de l'est d'Alger. D'une capacité de retenue de 145,6 millions m³, il est alimenté, en grande partie, du barrage de Beni Amrane (capacité de stockage de 16 millions de m³) par une station de pompage (Voir Figure VI- 2). Le barrage de Beni Amrane est alimenté à son tour par oued Isser et par le barrage du Hamiz.

L'eau, avant d'être distribuée aux consommateurs, subit une chaîne de traitement à l'entrée et à la sortie de la station de Boudouaou.

Différentes structures de la station

La station regorge d'un personnel qualifié répartie sur trois services :

✓ Service d'exploitation :

Son rôle consiste à faire le comptage des dilutions, le lavage des filtres quand il y'a colmatage, le contrôle du dosage des réactifs injectés, l'examen du niveau de boue et sa concentration et la surveillance des niveaux dans les bacs des réactifs.

✓ Service de maintenance :

Il permet de suivre le fonctionnement des machines et de les réparer en cas de panne. Il effectue les opérations curative et préventive.

✓ Service laboratoire :

Il assure le suivi des analyses pour le contrôle du traitement de l'eau brute. Ce service contient deux laboratoires. Un laboratoire d'analyse physico-chimique et un laboratoire d'analyse bactériologique.



Figure IV- 1 : Photo du barrage de Keddara.



Figure IV- 2 : Photo du barrage de Beni Amrane.

Procès de traitement

Après l'étape d'aération qui sert à oxyder les cations de fer et de manganèse et aussi les matières organiques, l'eau provenant du barrage de Keddara à la station de Boudouaou subit une série d'opération de traitement avant d'être distribuée aux consommateurs. Les opérations sont :

La correction du pH, la pré-chloration, la pré-oxydation si nécessaire, la coagulation-floculation, la décantation, la filtration, la désinfection, la neutralisation, le stockage et la distribution. La figure (IV-3) représente les différentes filières de traitement de la station et la figure (IV-4) représente la synoptique de traitement.

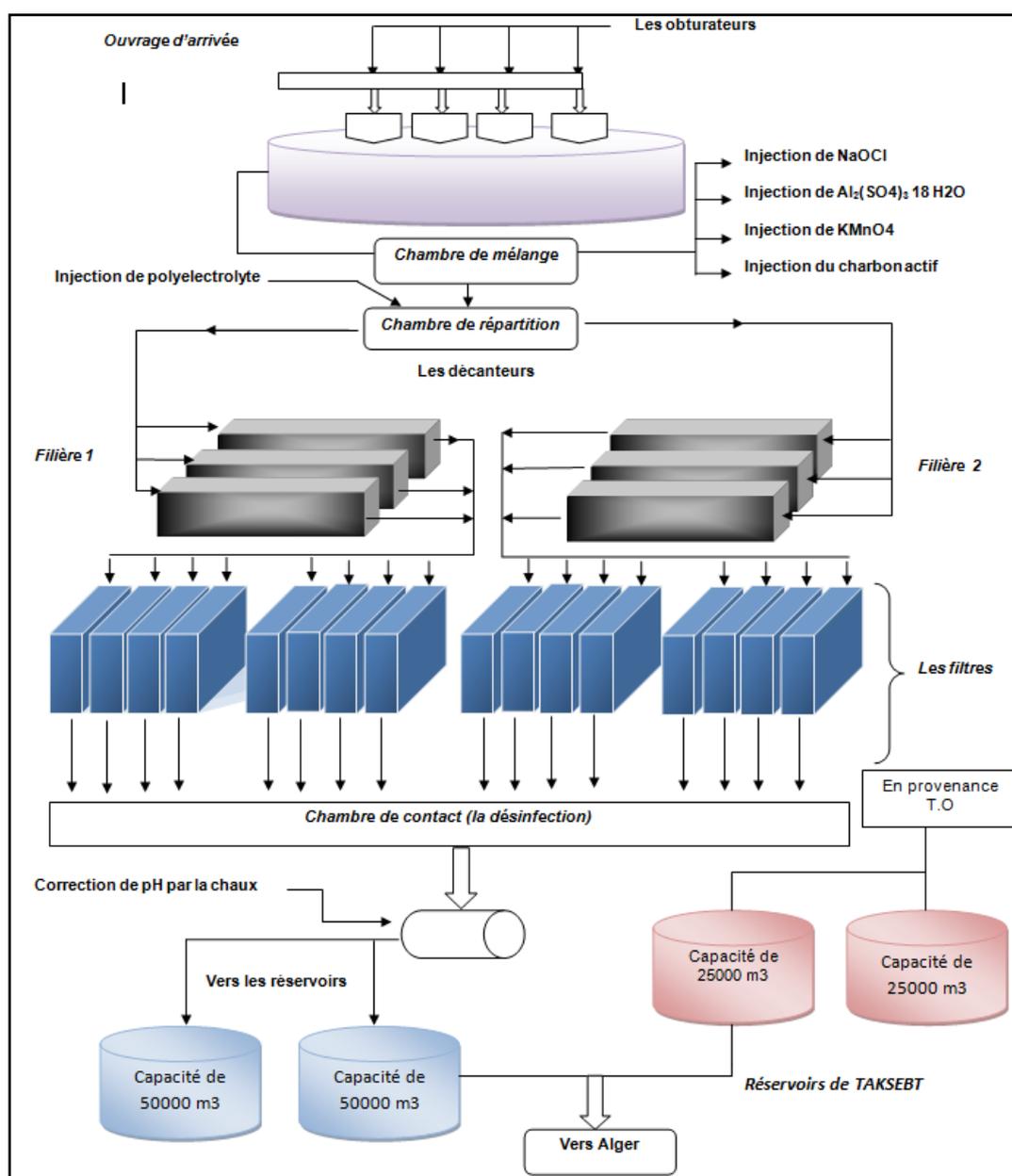


Figure IV- 3 : Les différentes filières de traitement de la station.

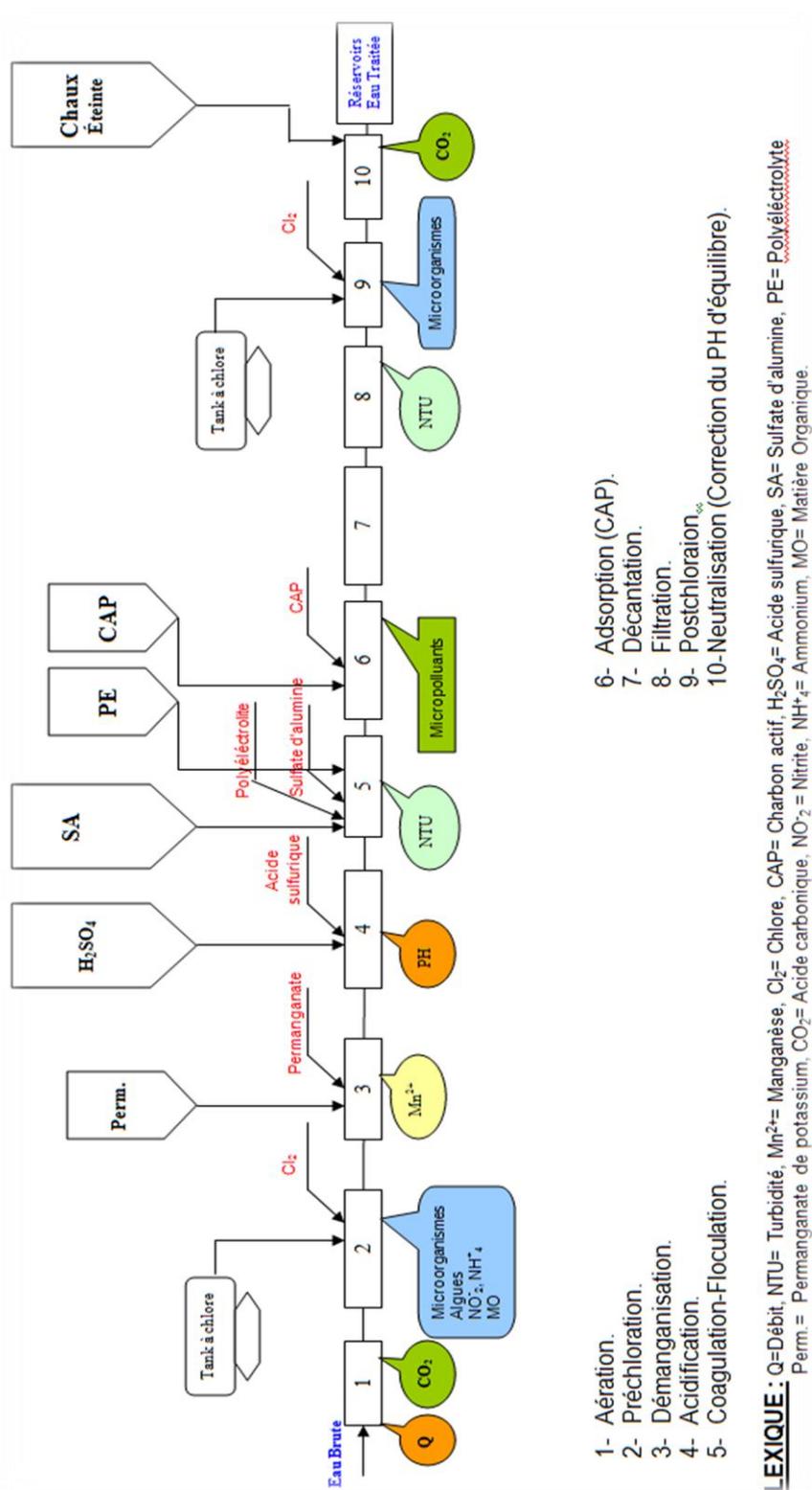


Figure IV- 4 : Schéma synoptique de la filière de traitement.

La station est construite en deux filières décantation-filtration identiques et en équilibre hydraulique, mises en service successivement en 1987 pour la première filière et en 1988 pour la seconde.

Deux conduites de DN 1500mm amènent, par gravité, l'eau brute de la retenue de Keddara. Cette eau arrive dans une chambre de dissipation d'énergie (ouvrage d'arrivée) à travers quatre obturateurs à disque sous capot. (Figure IV- 5).



Figure IV- 5 : Photo des obturateurs.

Les obturateurs permettent la dissipation de la charge à l'entrée de l'usine (environ 50 m). Ils réalisent, en outre, l'aération de l'eau ainsi que la régulation du débit d'entrée grâce à la motorisation du positionnement du disque.



L'eau à traiter passe ensuite par un couloir de mélange (Figure IV- 6) où est réalisée la dispersion homogène des produits chimiques, puis arrive dans la chambre de répartition qui assure, par un ensemble de déversoirs identiques, l'équipartition du débit entre tous les décanteurs.

Figure IV- 6 : Photo du couloir de mélange.

A partir de cette chambre, chaque décanteur est isolable individuellement par une vanne murale. L'eau floclée est introduite d'abord dans la partie haute de la cloche à vide du décanteur Pulsator. (Figure IV- 7).

Cette cloche, située au-dessus du plan d'eau du décanteur, est équipée d'un ventilateur fonctionnant en pompe à vide et de deux vannes de mise à l'atmosphère commandées par un contacteur à flotteur. Elle permet d'introduire, par pulsations au travers des ramifications inférieures, l'eau brute floclée.



Figure IV- 7 : Photo du décanteur Pulsator

Ce courant d'eau pulsée traverse le lit de boues de bas en haut et le maintient en expansion homogène.

Pendant le temps d'aspiration, les vannes étant fermées, seule une fraction du débit passe dans le bassin de décantation. L'eau s'élevant, de 70 cm en 20 à 40 s, dans la partie supérieure de la cloche. Le lit de boues se tasse, les floccs se resserrent entre-eux.

Pendant le temps de chasse, les vannes sont ouvertes et le débit d'eau brute floclée augmente et induit l'augmentation du débit de vidange de la tranche d'eau aspirée préalablement dans la cloche ; le lit de boue prend du volume. Le temps de chasse varie entre 5 et 15 s.

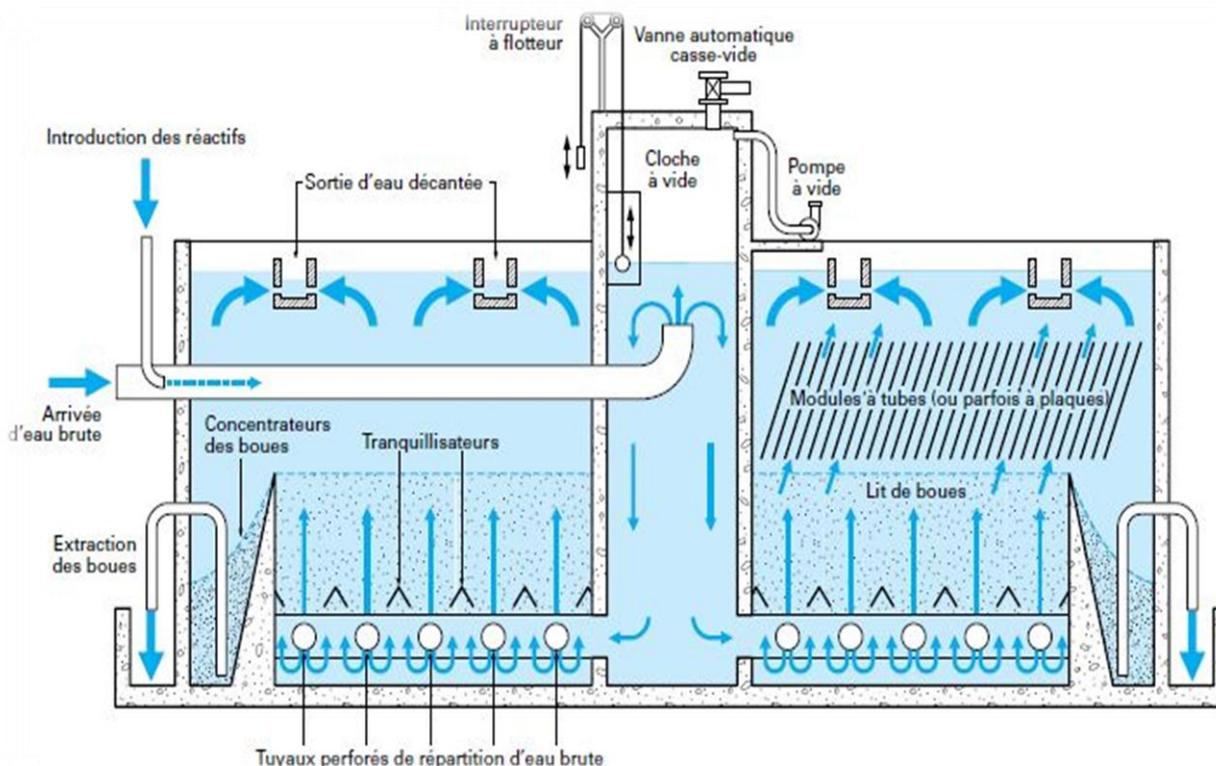


Figure IV- 8 : Schéma du décanteur lamellaire à lit de boue *Pulsator*. (Degrémont, 1996).

Le Pulsator est un décanteur à lit de boues (Figure IV- 8) composé d'un fond plat. Il comporte un réseau de ramifications perforées surmontées de tranquillisateurs. La hauteur du lit de boues est limitée, par son déversement dans les concentrateurs, à mi-hauteur de la cuve. L'eau est recueillie à la partie supérieure par les goulottes de collecte d'eau décantée.

L'action du lit de boues homogène, sur l'eau brute chargée de floccs en formation, a deux effets :

1. D'une part, formation complète et rapide du flocc par le contact intime avec les boues déjà formées,
2. D'autre part, filtration de ce flocc l'eau décantée étant recueillie à la partie supérieure du décanteur dans les goulottes.

L'apport de nouvelles boues flocculées tend à augmenter le volume du lit de boues, qui se déverse dans les concentrateurs.

C'est à partir de ces concentrateurs que l'on effectue les extractions de boues d'une manière intermittente.



Lorsque l'ensemble des décanteurs est isolé, l'eau brute additionnée des réactifs, passe en trop-plein directement vers les filtres via les quatre canaux latéraux de départ d'eau clarifiée.

L'eau décantée pénètre dans le filtre (Figure IV- 9) par l'orifice situé à l'extrémité de la goulotte en ' V'. Elle traverse le lit filtrant composé d'une couche de sable à granulométrie homogène, d'un mètre d'épaisseur.

Figure IV- 9 : Photo du filtre en filtration.

L'eau filtrée passe à travers les bosselures du plancher en béton pour être reprise, sous le plancher, par la tubulure de sortie d'eau filtrée, puis acheminée par le canal vers les citernes d'eau traitée après avoir subi une désinfection et, éventuellement, une neutralisation à la chaux du CO₂ agressif.

Un degré d'encrassement correspondant à une perte de charge de 1.5mCE. Le filtre est lavé à contre-courant, simultanément à l'air et à l'eau. (Figure IV- 10).

Le lavage d'un filtre comprend trois phases :

1. décolmatage très rapide,
2. soufflage (air+eau),
3. rinçage.



Figure IV- 10 : Photo du filtre en lavage.

La durée totale du lavage est d'environ 20 minutes et le volume nécessaire au lavage d'un filtre est de quelques milliers de m³.

Les eaux de lavage des filtres s'écoulent gravitationnellement dans une bêche de stockage d'où elles sont refoulées par des groupes électropompes dans l'ouvrage d'arrivée d'eau brute.

Le laboratoire permet de contrôler la qualité de l'eau produite grâce à un ensemble d'analyses physico-chimique (pH, turbidité, conductivité, température, alcalinité, dureté, résidu sec, chlorures, nitrites, nitrate, Fe⁺⁺, Zn⁺⁺, Cd, Pd, Na⁺, K⁺ ...) et d'analyses bactériologiques (coliformes, streptocoques...).

Annexe II : DESCRIPTION DES TECHNIQUES D'ANALYSES

Détermination de l'aluminium résiduel par Spectrophotométrie :

Principe :

La méthode s'applique au dosage de faibles concentration des ions Al^{3+} jusqu'à 0.02mg/l, en utilisant une méthode colorimétrique à l'eriochrome cyanine. La présente méthode s'applique à l'analyse des eaux destinées à la consommation humaine et sur les eaux lors des différentes phases de traitement.

La réaction de l'aluminium avec l'eriochrome cyanine à un pH de 5,9 en présence d'acétate d'ammonium : apparition d'une coloration rouge.

Réactifs :

- Acide sulfurique (0,04 N).
- Acide ascorbique (0,5g d'acide dillué dans 50 ml d'eau distillée).
- Solution tampon pH 6,2.
- Solution fille d'eriochrome cyanine (1ml s^o mère dillué dans 100ml d'eau distillé).

Mode opératoire :

- Prendre 25 ml de chaque échantillon d'eau à analyser.
- Ajouter 1ml d'acide sulfurique.
- Ajouter 1ml d'acide ascorbique.
- Ajouter 10ml de solution tampon.
- Ajouter 5ml de Solution fille d'eriochrome cyanine.
- Ajouter 50ml d'eau distillée.
- Laisser agir 10min.
- Mesurer au spectrophotomètre.

Détermination de l'alcalinité (HCO_3^-)**Référence** NF T0-036**Réactifs :**

- Solution d'acide chlorhydrique à 1N.
- Solution de HCl à 0,1 N.

Mode Opérateur :

- Prendre 100 ml d'eau à analyser.
- Noter son pH puis titrer avec HCl à 0,1 N jusqu'à obtention d'un PH de 4,4.

$$\frac{(V_A \times N_A \times M_{\text{HCO}_3^-} \times 1000)}{P_E}$$

$$\frac{V_A \times 0,1 \times 61 \times 1000}{100}$$

$$V_A \times 61 = \text{mg/l } \text{HCO}_3^-$$

 V_A = Volume d'acide versé. N_A = Normalité d'acide versé. $M_{\text{HCO}_3^-}$ = Masse des bicarbonates (HCO_3^-). P_E = Prise d'essai**Remarque :**

Si le pH de l'échantillon est supérieure à 8,3 titrer jusqu'à cette valeur (volume d'HCl obtenue correspond au CO_3^{2-}) puis continuer le dosage jusqu'à un pH de 4,4.

$$[\text{CO}_3^{2-}] \text{ mg / l} = V_A \times 60$$

Détermination de la dureté (calcium Ca^{2+} et magnésium Mg^{2+})

Référence : ISO N° 6058 ou NF T90-003

Principe

Titrage molaire des ions calcium et magnésium avec une solution de sel disodique de l'acide éthylènediaminetétraacétique(EDTA) à pH=10. Le noir érichrome T, qui donne une couleur rouge foncé ou violette en présence des ions calcium et magnésium, est utilisé comme indicateur.

Réactifs

- Solution d'E.D.T.A N/50 ($\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) : (0,02N ou 0,01M)
- Solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) 2 N :
- Solution d'hydroxyde d'ammonium (NH_4OH) pH = 10,1:
- Noir érichrome T: quelque goutte

Mode opératoire

(V₁) Ca^{2+} : - Prendre 50 ml d'eau à analyser.
 - Ajouter 2 ml de NaOH à 2 N.
 - Ajouter du Murexide.
 - Et titrer avec l'E.D.T.A jusqu'au virage (violet).

(V₂) $\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+}$: - Prendre 50 ml d'eau à analyser.
 - Ajouter 2 ml de NH_4OH (10,1).
 - Ajouter noir érichrome.
 - Et titrer avec l'E.D.T.A jusqu'au virage (bleu).

Expression des résultats

La détermination du mg/l de Calcium est donnée par la formule suivante:

$$\text{Ca}_{2+} = \frac{V_1 * C_{EDTA} * F * M_{Ca^{2+}}}{P.E} * 1000$$

V_1 : Volume d'EDTA nécessaire pour une concentration donnée.

C : Concentration molaire d'EDTA (0,01 M/l).

$M_{Ca^{2+}}$: Masse molaire du calcium en g.

P.E : Prise d'essai (volume de l'échantillon nécessaire pour ce dosage).

F : Facteur de dilution

Donc $Ca^{2+} \text{ (mg/l)} = V1 \times F \times 8.016$

La détermination du mg/l de Magnésium est donnée par la formule suivante:

$$Mg^{2+} = \frac{(V_2 - V_1) * C_{EDTA} * F * M_{Mg^{2+}}}{P.E} * 1000$$

V_2 : Volume total d'E.D.T.A

V_1 : Volume d'EDTA nécessaire pour une concentration donnée.

C : Concentration molaire d'EDTA (0,01 M/l).

$M_{Mg^{2+}}$: Masse molaire du Magnésium en g.

P.E : Prise d'essai (volume de l'échantillon nécessaire pour ce dosage).

F : Facteur de dilution

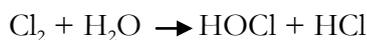
Donc la formule finale est :

$$Mg^{2+} \text{ (mg/l)} = (V2-V1) \times F \times 4.86$$

Détermination de la demande en chlore

Référence : Suez environnement 15463

Le chlore se dissout dans l'eau et forme de l'acide hypochloreux (HClO) qui s'ionise pour donner :



L'équilibre formé est fonction du pH de la solution et dans une moindre mesure de la température.

Le chlore réagit très rapidement entre autre avec l'ammoniaque pour former des composés appelés chloramines :



Le chlore réagit également avec les composés et plus particulièrement avec certains dérivés azotés. Il y a formation de dérivés chloroazotés qui se comportent comme de véritables chloramines.

La terminologie suivante est utilisée pour les différentes formes du chlore :

HOCl + OCl ⁻	Chlore libre
Chloramines minérales et organiques	Chlore combiné
Chlore libre + chlore combinés	Chlore total

Break-point, point de rupture ou point critique : point au-delà duquel la quasi-totalité du chlore introduit se retrouve sous forme de chlore libre

Principe

Deux expériences sont réalisées avec des temps de contact de 1 et 2 heures.

A des fractions d'un échantillon d'eau, on ajoute des doses croissantes de chlore. Après le temps de contact de 1 et 2 heures, on effectue les dosages de chlore libre et de chlore total dans ces différentes fractions.

Remarque : le temps de contact dépend des objectifs de l'étude, il peut être différent des temps indiqués ci-dessus. Il peut, par exemple, correspondre au temps de séjour de l'eau dans une bache de post chloration ou dans une conduite de distribution d'eau potable (plusieurs heures).

Après avoir tracé la courbe de demande en chlore, on détermine le taux de traitement en chlore qui permet de se trouver au seuil, au Break-Point, ou en présence de chlore libre.

Réactifs et étalons

Solution mère de chlore de concentration connue à 1 g/l environ. Cette solution est préparée par dilution à partir d'eau de javel du commerce en berlingot (150 g/l environ). Pour cela, il faut prendre 6,7 ml de la solution de javel à diluer dans 1 litre d'eau distillée ou eau Millipore. La concentration de la solution finale doit être titrée.

Appareillage et matériel

- Dix flacons en verre brun à col rodé de 1 litre numérotés de 1 à 10, lavés puis rincés avec l'eau à étudier.
- Trois pipettes graduées de 0,5 ml, 1 ml et 2 ml.
- Chronomètre.
- Matériel classique de laboratoire (pipettes, fioles, etc.).
- Le matériel et réactifs pour doser le chlore libre et total.
- Le matériel et réactifs pour doser l'ammonium dans l'eau.
- Thermomètre.

Mode opératoire

Deux demandes en chlore sont réalisées avec un temps de contact de 1 et de 2 heures.

Il faut opérer sur de l'eau fraîchement prélevée (< 24 h). Dès le prélèvement, effectuer le dosage de l'ammonium à l'aide d'un kit de dosage (Merk, Hach, ou autre).

Dans chacun des flacons de 1 litre numérotés de 1 à 10, on introduit précisément 1 litre d'eau à traiter.

On ajoute ensuite une dose croissante de chlore provenant de la solution mère à 1 g/l. On laisse un intervalle de 5 minutes entre l'introduction du chlore dans chaque flacon. Ce décalage permet, en fin de test, de se ménager le temps nécessaire aux dosages de chlore résiduel tout en gardant un temps de contact identique pour chaque flacon.

Mettre les flacons à l'abri de la lumière et travailler à la température du laboratoire ($20 \pm 1^\circ\text{C}$).

Calcul et expression des résultats

Les résultats sont exploités graphiquement sur lequel on trace les concentrations en chlore résiduel libre et total en fonction du taux de chlore introduit. Il est alors possible de déterminer le seuil et le break-point.

Détermination de la Rémanence en chlore

Référence : Protocole Suez environnement 15464

Principe

A un volume d'eau à traiter, on ajoute au temps $t = 0$ une dose de chlore définie. La concentration en chlore libre résiduel est ensuite déterminée en fonction du temps.

Le taux de chlore à injecter dépend de la qualité de l'eau. Elle est égale à la valeur du break-point additionnée de 0,3 mg/l.

Si l'eau ne contient pas d'ammonium, le taux de chlore à injecter est égal à la valeur du point d'apparition du chlore libre additionné de 0,3 mg/l. Faire référence à la demande en chlore.

Le temps de contact indicatif est de 48 heures. Cette valeur peut être modifiée selon les besoins. La fréquence des prélèvements s'établit comme suit :

- première 1/2 heure → toutes les 5 minutes (soit $t=5, 10, 15, 20, 25, 30$ min)
- deuxième 1/2 heure → toutes les 10 minutes (soit $t=40, 50, 60$ min)
- deuxième heure → toutes les 20 minutes (soit $t=80, 100, 120$ min)
- troisième et quatrième heure → toutes les 30 minutes (soit $t=150, 180, 210, 240$ min)
- de la 4^{ème} à la 48^{ème} heure → 5 à 6 points le mieux répartis possible.

Réactifs et étalons

Solution mère de chlore de concentration connue à 1 g/l environ. Cette solution est préparée par dilution à partir d'eau de javel du commerce en berlingot (150 g/l environ). Pour cela, il faut prendre 6,7 ml de la solution de javel à diluer dans 1 litre d'eau distillée ou d'eau Millipore. La concentration de la solution finale doit être titrée par la méthode indiquée en référence (J. Rodier : analyse des eaux et extrait de Javel).

Appareillage et matériel

- Un flacon en verre brun de 10 litres (à défaut de verre brun, un flacon en verre blanc entouré de papier aluminium) pour éviter la lumière.
- Un chronomètre.
- Matériel classique de laboratoire (pipettes, fioles, etc.).
- Le matériel et réactifs pour doser le chlore libre.
- Thermomètre.

Mode opératoire

- Bien rincer le flacon avec l'eau à traiter.
- Remplir le flacon avec 10 litres d'eau à étudier.
- Ajouter le chlore à l'aide d'une pipette au temps $t = 0$.
- Fermer le flacon.
- Agiter immédiatement pour homogénéiser la solution.

- L'agitation ne doit pas être trop violente afin d'éviter la création de bulles d'air qui conduiraient au dégazage de chlore. L'injection du chlore et l'agitation doivent être effectuées le plus rapidement possible (< 30 sec).
- Prélever aussitôt pour doser le chlore libre au point $t = 0$ afin de contrôler la quantité de chlore ajoutée.
- Prélever ensuite en fonction du temps (Voir section 5.1). Effectuer le dosage de chlore libre résiduel immédiatement après chaque prise d'échantillon suivant la méthode indiquée en référence.

Calcul et expression des résultats

Les résultats s'exploitent graphiquement en traçant la concentration en chlore libre résiduel en fonction du temps.

Titration NaOCl (de l'eau de javel)

Référence : J. Rodier : analyse des eaux et extrait de Javel

Réactifs

- Acide acétique.
- Solution primaire (1ml d'eau de javel diluée dans 100ml d'eau distillé).
- Thiosulfate de sodium 0.1N.
- Iodide de potassium (KI).
- Thiodeme.

Mode opératoire

- Prendre 100 ml d'eau distillé.
- Ajouter 5ml acide acétique.
- Ajouter 1 pincé d'iodide de potassium.
- Ajouter 10ml de solution primaire.
- Titrer au thiosulfate de sodium.
- Mesurer le volume du thiosulfate ajouté.

Calcul et expression des résultats

La solution obtenue est de couleur rouge, elle vire au jaune pâle après titration. L'ajout d'une pincé du thiodeme peut être ajouté pour faciliter la titration, il donne une couleur bleu qui vire au transparent avec la titration.

La concentration de l'eau de javel = $\frac{F*N*V*MM}{V'}$

F : Facteur de dilution.

N : Normalité du thiosulfate.

V : volume de la solution primaire.

MM : Masse molaire.

V' : Volume de la prise d'essai.

Annexe III : DEFINITION DES TERMES UTILISES

Alcalinité

Capacité de l'eau à neutraliser des acides. Cette propriété dépend entre autres de la concentration en carbonate, bicarbonate et hydroxydes de l'eau. L'alcalinité se mesure en milligramme par litre équivalent carbonate de calcium (mg/l CaCO₃).

Clarification

Processus d'élimination de la turbidité d'un milieu aqueux par décantation des solides en suspension. Il peut être accéléré par ajout de réactif provoquant une coagulation.

Coagulation

Procédé de traitement de l'eau permettant, par ajout d'un coagulant, de réduire les charges négatives portées par les particules en suspension dans l'eau (colloïdes). Leur agglomération est alors rendu possible, suivi du phénomène de floculation puis de précipitation.

Coagulant

Produit chimique ou organique utilisé afin de favoriser la coagulation des colloïdes contenus dans l'eau à traiter. On peut citer comme coagulant : le sulfate d'alumine, l'aluminate de sodium, le chlorure ferrique.

Colloïdes

On appelle colloïdes les particules de très petite dimension contenues dans l'eau, dont le diamètre fait entre 1 et 100 nanomètres responsables entre autre de la couleur et de la turbidité des eaux de surface. La coagulation-floculation A pour but de provoquer la précipitation de telles particules.

Conductivité

La conductivité d'une eau est sa capacité à conduire plus ou moins bien un courant électrique la traversant. La conductivité est proportionnelle à la concentration d'ions présent dans la solution.

DCO et DBO

La DCO, Demande Chimique en Oxygène, représente la quantité de dioxygène nécessaire à l'oxydation de l'ensemble des matières organiques et minérales contenues dans l'eau, par oxydoréduction. Cette donnée est représentative de la pollution organique et chimique.

La DBO, Demande Biochimique en Oxygène, représente le besoin en dioxygène d'une eau pour assurer la dégradation biochimique des matières organiques. Si la DBO est trop élevée, cela peut aboutir à une désoxygénation de l'eau.

Degré français °F

C'est l'unité du titre hydrotimétrique (TH) caractérisant la dureté de l'eau utilisée en France. Un degré français correspond à la dureté d'une solution contenant 10 mg/l de CaCO₃. Il équivaut à 4 mg de calcium par litre et à 2,4 mg de magnésium par litre ; un milliéquivalent (1 meq ou 1 mval) d'ion calcium correspond à 5 degrés français.

Décantation

Procédé de séparation par gravité des matières solides sédimentables : élimination de solides en suspension de densité supérieure à celle de l'eau par l'action exclusive de la force de la gravité.

Désinfection

Opération dont l'objectif est de réduire la population microbienne de façon suffisante supprimer tout risque d'infection ou de contamination par des organismes pathogènes.

Dureté (de l'eau)

La dureté d'une eau est déterminée par la présence d'ion calcium et magnésium. Lorsque ces 2 ions sont présents en forte concentration, l'eau est dite dure. Dans le cas contraire, elle est dite douce. Lorsqu'une eau dure en chauffée, on observe l'apparition d'un précipité : il s'agit du tartre, ou calcaire. L'unité utilisée pour la dureté de l'eau est le degré français (titre hydrotimétrique).

Eau déminéralisée

L'eau déminéralisée ne contient plus d'ions minéraux dissous. Afin d'obtenir ce résultat, on peut utiliser un système à échangeur d'ions (les particules non chargée et les colloïdes ne sont pas enlevés).

Eau distillée

La distillation de l'eau "imite" le processus naturel d'évaporation. L'eau à distiller est évaporée, et ainsi débarrassée de toutes les particules dissoutes et divers polluants. L'eau distillée est utilisée dans de nombreux processus industriels, en chimie, et peut également être consommée dans l'alimentation.

Eau minérale

Les eaux minérales contiennent des minéraux dissous en grande quantité, tels que calcium, magnésium, sodium et fer. On considère qu'une eau est minérale lorsqu'elle contient au minimum 250 parties par million de solide dissout. Les eaux minérales ont la particularité d'avoir une composition constante dans le temps à la source.

Eau potable

On dit qu'une eau est potable lorsque sa consommation n'a pas de dangers pour la santé humaine

Eau de surface

Les eaux de surfaces sont constituées par les eaux de récupérations provenant de la pluie ou de la neige, mais également par tous lacs et océans et rivières

Filtration

La filtration est un procédé physique permettant de séparer les substances solides en présentes solution dans un liquide. La filtration se fait à travers des substances poreuses, calibrée pour ne retenir que les particules d'une certaine taille.

Floculant

Substance qui a la propriété de flocculer, ou d'agréger sous la forme de flocons, des particules de colloïdes en suspension dans un solvant.

Floculation

La formation d'un floc est amorcée par la coagulation. Afin d'assurer une bonne précipitation, il est nécessaire d'accroître la taille de celui-ci et sa cohésion. La floculation est en fait la phase d'agglomération et de précipitation des colloïdes coagulés. Elle est facilitée par l'ajout de floculants (ou adjuvants de floculation), pouvant être d'origine minérale ou organique, synthétiques ou naturels. On peut citer comme floculants : la silice activée, la bentonite, certaines argiles.

Flottation

Technique de séparation des particules en suspension par introduction de fines bulles de gaz (souvent de l'air). Les graisses sont, par exemple, facilement extraites avec cette méthode.

Hydrophile

Qui montre une forte affinité pour l'eau. Qui attire, se dissout dans l'eau ou l'absorbe.

Hydrophobe

Qui montre une forte répulsion pour l'eau, qui repousse l'eau.

Hypochlorites

L'ion hypochlorite est ClO^- . L'hypochlorite de sodium (NaClO) en solution est utilisé comme désinfectant, notamment pour la désinfection des eaux de piscines. Sous forme diluée, il s'agit de l'eau de Javel (Solution aqueuse d'hypochlorite et de chlorure de sodium).

Microfiltration

La microfiltration est un procédé membranaire basse pression, utilisé pour la filtration des colloïdes ayant une taille comprise entre 0.05 et 10 microns. Il est notamment utilisé pour le traitement des eaux issues de processus de fermentation.

Nanofiltration

La nanofiltration est un procédé de filtrage utilisé lorsque l'osmose inverse et l'ultrafiltration sont inefficaces. Le procédé est utilisé pour la déminéralisation, le traitement de la couleur de l'eau et le dessalement de l'eau de mer.

NTU (Nephelometric Turbidity Unit)

Unité standard de mesure de la turbidité. $1 \text{ NTU} = 1 \text{ FNU}$ (Formazin Nephelometric Unit)

- $\text{NTU} < 5$: eau claire
- $5 < \text{NTU} < 30$: eau légèrement trouble
- $\text{NTU} > 50$: eau trouble

Oxydation

L'oxydation est une réaction chimique lors de laquelle un produit fixe de l'oxygène. En perdant des électrons, une substance oxydée est alors sous sa forme réduite. L'oxydation est un phénomène chimique important, par exemple pour les êtres vivants lors de la production d'énergie (oxydation des sucres, des protéines, etc.). Une illustration quotidienne et visible du phénomène d'oxydation est l'oxydation du fer, donnant la rouille.

Ozone

Gaz de formule O₃. Lors de son utilisation dans l'industrie, l'ozone se présente sous la forme d'un gaz incolore. Il dégage une odeur piquante, similaire à celle présente dans l'air lors d'un orage, après un éclair ou un coup de foudre. Le nez détecte généralement la présence d'ozone pour des concentrations comprises entre 0.02 et 0.05 ppm, soit environ 1/100^{ème} de l'exposition maximum pendant 15 min. L'ozone est un gaz instable, se décomposant en dioxygène à température ambiante. L'ozone est un oxydant puissant, utilisé depuis de nombreuses années pour le traitement de l'eau. Pour les applications industrielles, celui-ci est produit par des générateurs d'ozone.

Percolation

Traitement biochimique : processus consistant à faire passer l'eau résiduaire à travers des filtres auxquels la biomasse va adhérer. Le remplissage est fait de pierres ou, en général, pour un meilleur rendement, de matériaux plastiques, de façon que les micro-organismes adhèrent à la surface en formant une pellicule autour de ces matériaux

pH

Le pH (potentiel hydrogène) est une des caractéristiques fondamentales de l'eau. Celui-ci est représentatif de la concentration en ions H⁺ (hydrogène) dans l'eau. La valeur du pH est à prendre en considération lors de la majorité des opérations de traitement de l'eau, surtout lorsque celle-ci font appel à une réaction chimique.

Polyélectrolyte

Macromolécule à longue chaîne augmentant considérablement les performances de la floculation.

Polymère

Grosse molécule formée par addition ou condensation de molécules relativement simples ou monomères (la polymérisation du styrène donne le polystyrène).

Précipitation

Passage à l'état solide de composés dissous dans une solution.

Sédimentation

Technique de séparation par gravité, des particules de densité plus faible que celle de l'eau.

Titre de l'eau

Des paramètres globaux permettent de mesurer les concentrations d'ions d'une même "famille" : les titres (unité: meq.l⁻¹ ou °f). Les titres permettent dans la plupart des traitements, de connaître suffisamment les caractéristiques de l'eau pour les dimensionner ou les conduire

Traitement biologique

Procédé de transformation contrôlée de matières fermentescibles produisant un résidu organique plu, stable susceptible d'être utilisé en tant qu'amendement organique ou support de culture. Ce processus est utilisé pour l'épuration des eaux résiduaires urbaines et industrielles contenant des matières organiques biodégradables.

Traitement physico-chimique

Le traitement physico-chimique peut être défini comme l'ensemble des réactions chimiques visant à transformer les substances polluantes solubles en solutions, en précipités ou en solides stables qui après solidification (traitements d'élaboration de déchets ultimes).

Turbidité

La turbidité est représentative de la transparence d'une eau. Cette transparence peut être affectée par la présence de particules en suspension et de matières colloïdales dans l'eau (limons, argiles, micro-organismes...). La turbidité est un paramètre important dans les différentes normes fixant la qualité des eaux potables.

Ultrafiltration

Il s'agit d'un procédé de filtration haute pression (environ 10 bar) à travers une membrane. Il permet de filtrer des particules donc la taille est comprise en 0.005 et 0.10 micromètres. Les micro-organismes, macromolécules et les émulsions d'huiles peuvent ainsi être traitées.

UV

Le rayonnement UV est utilisé afin de désinfecter l'eau. Les longueurs d'ondes émises permettent de pénétrer le noyau des cellules et l'ADN, afin d'inactiver les micro-organismes.

Viscosité

Caractéristique d'un fluide à s'opposer aux forces de dissociation et de mise en mouvement. Cette grandeur est fortement associée aux notions de pertes de charge et de dissipation de l'énergie.

Annexe IV : LIMITES DE QUALITE DES EAUX DESTINEES A LA CONSOMMATION HUMAINE SELON LES NORMES ALGERIENNES

➤ Facteurs biologiques :

	Paramètres	Unité	Niveau guide	Concentration maximale admissible	Méthode	Observations
Eau traitée relevée à l'entrée du réseau	Coliformes fécaux	Nbr /100ml	-	0	NA 764	Turbidité <1NTU pour la désinfection au chlore, il est préférable que le pH<6
	Coliformes	Nbr /100ml	-	0	NA 764	Chlore libre résiduel 0.2 à 0.5 mg/l après 30min (minimum de contact)
Eau non traitée à l'entrée du réseau	Coliformes fécaux	Nbr /100ml	-	0	NA 764	Dans 98% des échantillons examinés au cours de l'année dans le cas de gros débit et d'échantillons prélevés en nombre suffisant
	Coliformes	Nbr /100ml	-	<10	NA 764	Occasionnellement, mais jamais des prélèvements consécutifs
Eau prélevée dans le réseau	Coliformes fécaux	Nbr /100ml	-	0	NA 764	
	Coliformes	Nbr /100ml	-	<10	NA 764	Occasionnellement, mais jamais des prélèvements consécutifs
Eau de boisson en bouteille	Coliformes	Nbr /100ml	-	0	NA 764	La source doit être exempte de contamination fécale
Eau potable de source	Coliformes	Nbr /100ml	-	0	NA 764	Avertir la population de javelliser ou faire bouillir l'eau, au cas où l'on n'arrive pas à respecter les valeurs indicatives
	Germes totaux 37°C 24h 22°C 24h	Nbr /1ml Nbr /1ml	10 100	- -	NA 763	Dans une eau traitée, le dénombrement des germes totaux effectué à l'extrémité du réseau de distribution ne doit pas excéder 20 fois le taux obtenu, dans 90% des échantillons analysés au cours de l'année
	Streptocoqu fécaux	Nbr /100ml	-	0	NA 765 Ou NA 766	

➤ *Facteurs physico-chimiques :*

Paramètres	Unité	Niveau guide	Concentration maximale admissible	Méthodes	Observations
pH	1		2000	NA 751	
Conductivité	µs/cm à 23°C	-	2000	NA 749	En correspondance avec la minéralisation des eaux
Résidu sec	Mg/l après séchage à 105°C	-	500	NA 6356	
Dureté totale	Mg/l CaCO ₃	200	200	NA 752	
Calcium		75	150	NA 1655	
Magnésium	Mg/l	-	200	NA 752 NA 1655	
Sodium	Mg/l	-	20	NA 1652 NA 1653	
Potassium	Mg/l	-	20	NA 1652 NA 1653	
Sulfates	Mg/l	200	400	NA 6361	
Chlorures	Mg/l	200	500	NA 6362	
Nitrates	Mg/l	-	50	NA 1656	
Nitrites	Mg/l	-	0.1	NA 1657	
Ammonium	Mg/l	0.05	0.5	NA 1879 NA 1852	
Phosphate	Mg/l	-	0.5	NA 2364	
Oxydabilité au KMnO ₄	Mg/l	-		NA 2064	Mesure faite à chaud et en milieu solide
Oxygène dissous	Mg/l	-		NA1654	
Aluminium	Mg/l	-	0.2	NA 6372	

ملخص

يكمن بحثنا في دراسة فعالية الكيتوزان كعامل تخثر-تجمع في معالجة مياه السد في محطة إنتاج المياه الصالحة للشرب. لهذا، حضرنا محلولين من نفس الكيتوزان التجاري بخصائص مختلفين وأجريت الدراسة على مياه قدارة و مياه بني عمران التي تختلف اساسا في درجة التعكر.

تم اختبار المخثر الطبيعي (الكيتوزان) كمخثر اولي، كمساعد مخثر وايضا مع الطين. قُدرت جودة التخثر -التجمع- ونوعية الماء المعالج من خلال قياس التكدر المتبقي، درجة الحموضة ، امتصاص الأشعة فوق البنفسجية (254nm) ، الالمنيوم المتبقي، قوة الهدروجين، الصلابة ، طلب الكلور واستهلاك الكلور في الماء. النتائج المتحصل عليها لا تظهر اختلافا في فعالية محلولي الكيتوزان واكن اختلافا ملحوظا في فعالية الكيتوزان على المياه المختلفة التعكر مع نتائج افضل في المياه الاكثر تعكرا. وعلاوة على ذلك، تم مقارنة فعالية المخثر الطبيعي مع المخثر الاصطناعي. النتائج كانت متقاربة جدا.

الكلمات المفتاحية: الكيتوزان ، التخثر ، التجمع ، علاج مياه السد.

Résumé

Notre investigation consiste à étudier l'efficacité du chitosane comme agent coagulant-floculant dans le traitement de l'eau de barrage au niveau d'une usine de production d'eau potable. Pour cela, nous avons préparé deux solutions du même chitosane commercial avec deux acides différents.

L'étude a été réalisée sur l'eau de Keddara et l'eau de Beni-Amrane qui diffèrent, principalement, par la turbidité. Le biocoagulant (chitosane) a été testé comme coagulant primaire, comme aide coagulant et aussi avec la bentonite.

La performance de la coagulation-floculation ainsi que la qualité de l'eau traitée, a été évaluée par la mesure de la turbidité résiduelle, du pH, de l'absorbance UV à 254nm, de l'Aluminium résiduel, de l'alcalinité, de la dureté, de la demande en chlore et de la rémanence en chlore de l'eau.

Les résultats obtenus ne montrent pas de différence concernant l'efficacité des différentes solutions de chitosane, mais une divergence significative concernant l'efficacité du chitosane sur les eaux différemment chargées avec un meilleur abattement pour l'eau la plus turbide, riche en MES.

Par ailleurs, la performance du biocoagulant a été comparée à celle du coagulant synthétique (sulfate d'aluminium). Les résultats sont très rapprochés.

Mots clés: chitosane, coagulation-floculation, traitement des eaux de barrage.

Abstrat

Our investigation is to study the effectiveness of chitosan as coagulant-floculant in water treatment dam at a plant producing drinking water. For this, we prepared two solutions of the same commercial chitosan with two different acids.

The study was carried out on water of Keddara and water of Beni Amrane which differ mainly by turbidity.

The biocoagulant (chitosan) was tested as a primary coagulant, coagulant aid and with bentonite.

The performance of coagulation-floculation and the quality of treated water was evaluated by measuring the residual turbidity, pH, absorbance UV à 254nm, the residual aluminum, alkalinity, the hardness, chlorine demand and the afterglow of chlorine in the water.

The results showed no difference in the effectiveness of different solutions of chitosan but a significant divergence regarding the effectiveness of chitosan on different waters loaded with a better removal for the more turbid water, rich in MES.

Moreover, the performance of biocoagulant was compared to that of synthetic coagulant (alum). The results are very close.

Keywords: chitosan, coagulation-floculation, water treatment dam.