



*République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique*



Université Saad Dahlab - Blida

Faculté de Technologie

Département de Chimie Industrielle

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

***En vue de l'obtention du Diplôme Master en Génie des
Procédés***

Option : Eau, Environnement et Développement Durable

THEME

***Utilisation du mucilage du cactus dans le
traitement des eaux de surface***

Réalisé par :

M^{elle} ZAHAR Assia

Encadré par :

Pr AOUABED Ali

Promotion 2012-2013

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes tendres parents : eux qui par leur présence et soutiens ont rendu chaque moment de ma vie un véritable bonheur.

Pour l'éducation qu'ils m'ont inculqués ainsi que les vrais valeurs de la vie.

Pour leurs soutiens moraux et matériels dont j'ai bénéficiée.

Pour les encouragements qui m'ont donné la force d'aller jusqu'au bout,

Pour le dévouement qu'ils m'ont insufflés.

Pour tous les sacrifices, et l'amour dont ils m'ont nourrie, leur confiance, et consolation quand j'avais le plus besoin, je vous dis merci.

A mes frères, beaux frères et sœurs.

A toute ma famille : mon grand père et ma grande mère, oncles, tantes, cousins et cousines.

A vous Ahlem, Amel, Amina, Fethia, Hadjer, Meriem, Nabila, Nadjlaa, Radia, Rihab, Souad et Sadjia qui n'ont jamais cessés de me soutenir et de m'encourager.

A tous mes collègues du Master.

Remerciements

Avant tout, je dois remercier ALLAH le tout puissant qui m'a accordé la force, la patience, le courage, la volonté et la santé sans lesquelles mon travail n'aurait jamais pu voir la lumière de ce jour.

Je tiens à remercier très sincèrement le Professeur AOUABED Ali, mon encadreur et directeur de thèse. Qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect et de ma profonde gratitude, pour leur orientation, leur disponibilité, leurs encouragements, leurs précieux conseils qui m'ont été indispensables. Je lui serai reconnaissante de la confiance qu'il m'a témoignée. Ce fut un grand plaisir de travailler avec lui, durant la préparation de ce mémoire.

Je remercie également les membres de jury ; président et examinateurs qui ont bien voulu assister, examiner et juger ce travail.

J'exprime toute mes remerciements à Mr FEKHAR qui m'a donnée la chance de continuer mon stage au niveau de laboratoire d'analyse de SEEAL de la station de Mitidja-Ouest de Ahmer El Ain Tipaza.

Je remercie tout particulièrement Pr. BOURAS Omar pour leur aide, leur accueil et leur serviabilité. Professionnellement, j'ai beaucoup appris avec lui tout au long de ces deux années d'études, où à maintes reprises leur expérience et leurs conseils m'ont été d'une grande utilité et d'un apport inestimable pour ma formation du Master.

J'adresse mes remerciements aussi à tout le personnel de l'institut de chimie industrielle ; mes enseignants, les ingénieurs et les techniciens.

Avec une mention spéciale pour Pr Naceur, Pr Badis, Dr Zermane, Dr Cheknane, Dr. Lezhari, Dr Laribi, Dr Houari et M^{elle} Grini.

Merci

ملخص

الهدف الرئيسي لهذه الدراسة هو معالجة المياه العكرة بالطين المكدر ، حيث استعملنا صمغ الصبار المستخرج من نبات الصبار كمادة طبيعية لتنقية المياه العكرة، إذ تحصلنا على نسبة جيدة مقارنة مع المادة الكيميائية و هي كبريتات الألمنيوم حيث أعطت معدل 98.90% كتخفيض لنسبة تعكر المياه المكدره بالطين عن طريق المعالجة الكيميائية بكبريتات الألمنيوم ، في حين أعطت المعالجة الطبيعية بصمغ الصبار نسبة تخفيض لتعكر المياه المكدره بالطين بمعدل 96.10% . و هذا ما أكدته الدراسة الميدانية على مياه سد بورومي أين تحصلنا على معدلات 99.14% في الحد من تعكر مياه السد باستخدام كبريتات الألمنيوم و 96.42% باستخدام صمغ الصبار. أفضل نسبة تحصلنا عليها في تخفيض الأحماض الدبالية باستخدام كبريتات الألمنيوم هي 82.64%

الكلمات المفتاحية: صمغ الصبار ، تجمع ،تعكر، الأحماض الدبالية ،معالجة المياه.

Abstract

This study consists to use the cactus mucilage extracted from cactus pads as it's used like a natural coagulant and bioflocculant by coagulation-flocculation process for treating synthetic water based from bentonite. The comparative study with aluminium sulphate which gives 98.90% rates of turbidity removed to comparing with the natural coagulant which gives a 96.10% rates of reduction turbidity which corresponds to an optimal concentration of the both coagulants is 20 ppm, which implies the efficiency of cactus mucilage in reducing turbidity, knowing that the NE is effective at pH range between 7 and 8. Moreover, it had % R of turbidity removed is 99.04% corresponds to 0.06 ppm of an non ionic polyelectrolyte, based on 2 ppm of NE can give 99.03% rates in reducing turbidity . An application on the dam waters Bouroumi gave as 99.14% rates of reducing turbidity at 20 ppm of aluminium sulphate compared with 20 ppm of NE gives 96.42% rates of reducing turbidity. In addition, the % R of turbidity is 99.18% corresponds at 0.06 ppm of non-ionic polyelectrolyte, based on 2 ppm of NE to give 99.33% rates of reducing turbidity. Best of rates of humic acids with Aluminium Sulphate is 82.64%.

Key words: cactus mucilage, coagulant, flocculant, humic acid , turbidity, water treatment.

Résumé

Cette étude consiste à utiliser un nouveau bioflocculant (le mucilage du cactus). Le bioflocculant naturel utilisé en tant que coagulant donne un pourcentage de réduction de 96,10 % pour une concentration de 20 mg/l. ce résultat est comparable au 20 mg/l du sulfate d'aluminium qui donne un pourcentage de réduction de 98,90 %. Les résultats obtenus en tant que bioflocculant (un %R de la turbidité de 99 %) sont comparables a ceux obtenus avec le polyelectrolyte. Une application sur les eaux du barrage Bouroumi a donné un %R de la turbidité de 99,14 % à 20 mg/l du Sulfate d'Aluminium par rapport à 96,42 % à 20 mg/l du NE. L'ajout du bioflocculant en tant que flocculant a permis d'améliorer les %R de la turbidité des eaux de barrage (>99 %). Le meilleur %R des AH par le Sulfate d'Aluminium est 82,64%
Mots clés : mucilage du cactus, coagulant, flocculant, acide humique, turbidité, traitement des eaux.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE	
Chapitre I : Coagulation-floculation	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Caractéristique des particules à enlever.....	3
I.3. Coagulation-floculation.....	7
I.4. Effet de la présence des acides humique dans l'eau.....	15
I.5. Coagulation-floculation de la matière organique naturelle dissoute dans les eaux de surface.....	15
I.6. Conclusion.....	19
Chapitre II : Le mucilage du cactus dans le traitement des eaux	
II.1. Introduction.....	21
II.2. Utilisation actuelle du cactus.....	21
II.3. Mucilage d'opuntia ficus indica.....	22
II.4. Recherches scientifiques sur le cactus.....	25
II.5. Applications courantes.....	26
II.6. Coagulant naturel issu des extraits du cactus.....	26
II.7. Conclusion.....	27
PARTIE EXPERIMENTALE	
Chapitre III : Matériels et méthodes	
III.1. Méthode d'extraction du mucilage du cactus.....	28
III.2. Traitement de l'eau synthétique par la procédure de la coagulation-floculation.....	30
III.3. La réduction de la matière organique naturelle AH par le processus de la coagulation-floculation.....	33
III.4. Application aux eaux du barrage Bouroumi.....	35
Chapitre IV :	
IV.1. La réduction de la turbidité par coagulation-floculation.....	40
IV.2. La réduction de la matière organique naturelle AH par le processus de la coagulation-floculation.....	55
IV.3. Application aux eaux du barrage Bouroumi.....	61

CONCLUSION GENERALE.....63

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Conclusion générale

L'objectif principal de notre travail consiste à étudier le pouvoir coagulant et floculant du mucilage du cactus dans le traitement d'une eau synthétique à base de bentonite ainsi qu'une application aux eaux du barrage Bouroumi.

Il ressort de notre étude expérimentale les principales conclusions suivantes :

- Les résultats donnant le pourcentage de la réduction de la turbidité en fonction de la dose du mucilage du cactus, pour différentes concentrations de ce coagulant naturel, mettent en évidence une dose optimale qui permet un abattement quasi-total de la turbidité. Cette dose optimale est de 20 mg/l du NE à des pH de 7 et 8 qui correspondent respectivement à des pourcentages de réduction de la turbidité allant de 96,10 % et 98,40 % qui impliquent l'efficacité du mucilage du cactus dans les milieux alcalins.
- Le mucilage du cactus est inefficace dans un milieu acide où on a obtenu un pourcentage de réduction de la turbidité de 33,50 % correspond à une dose optimale du coagulant naturel de 30 mg/l.
- Le mucilage (agent floculant) est efficace dans une gamme du pH 7 et 8 qu'on obtient des %R = 99,03% pour une faible dose du mucilage (2mg/l).
- Les résultats obtenus avec le mucilage du cactus sont très proches de ceux obtenus par le Sulfate d'Aluminium dans les mêmes conditions.
- Une application sur les eaux du barrage Bouroumi a confirmé les résultats obtenus par la suspension de la bentonite. En effet, une réduction de la turbidité initiale de 109 NTU à une turbidité finale de 3,9 NTU a été obtenue avec le coagulant naturel.
- Vu sa biodégradabilité, le mucilage du cactus permet d'éviter d'éventuels problèmes liés à la santé humaine et à l'environnement causés par certains produits chimiques. Du fait qu'il est naturel, il permet de réduire considérablement le coût de traitement tel qu'on a obtenu 5 grammes du mucilage du cactus à partir de deux raquettes du cactus d'une masse de 640 g, ce qui implique que 1 gramme du mucilage du cactus permet de traiter 250 litre d'eau turbide à 100 NTU.
- En étudiant l'effet de coagulation-floculation sur l'élimination de la MON dans l'eau synthétique contenant 10 mg/l d'acide humique, on peut conclure ce qui suit :
 - L'élimination de la MON est régit par deux facteurs principaux à savoir le pH et la concentration du Sulfate d'Aluminium. ;

- L'existence de deux zones : une zone à des pH acide mais pour des faibles concentrations du Sulfate d'Aluminium, et une deuxième zone pour des pH basique mais pour fortes concentrations du Sulfate d'Aluminium.
- En perspective, c'est d'étudier la réduction des AH par l'utilisation du mucilage du cactus.

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Dérivés des sels d'aluminium et de fer.....	13
Tableau I.2 : Classification de la matière organique naturelle.....	16
Tableau I.3 : Comparaison des valeurs du pH optimal proposées par certains chercheurs pour la coagulation-floculation par $Al_2(SO_4)_3$ et $FeCl_3$	18
Tableau II.1 : La composition du mucilage du cactus.....	23
Tableau III.1. Concentration et volume du solution fille d' Al^{3+}	36
Tableau IV.1: Bilan de l'eau du barrage Bouroumi par coagulant naturel.....	61
Tableau IV.2: Bilan de l'eau du barrage Bouroumi par biofloculant	62

Liste des figures

Figure I-1 : Temps de décantation des particules en fonction de leur taille.....	4
Figure I-2 : Double couche de Stern d'une particule colloïdale.....	5
Figure I-3 : Stabilité d'une suspension colloïdale.....	7
Figure I-4 : Adsorption et pontage à l'aide de polymères.....	9
Figure I.5 : Surface de collision, dans le processus de floculation.....	12
Figure II.1 : Photo du cactus en Algérie (Chr�a, Blida).....	21
Figure III.1 : Patins du cactus coupés en d�s.....	28
Figure III.2 : Ebullition des patins du cactus.....	28
Figure III .3 : Filtration du NE en utilisant une pompe.....	29
Figure III .4 : Mucilage du cactus « NE » après séchage dans l'étuve.....	29
Figure III .5 : Dispositif expérimental de la coagulation floculation « Jar-test ».....	31
Figure III .6 : Turbidimètre.....	32
Figure III .7 : pH-mètre.....	32
Figure IV .1 : Variation du pourcentage de réduction de la turbidité en fonction de la concentration du Sulfate d'Aluminium à pH = 4.....	40
Figure IV .2 : Variation du pourcentage de réduction de la turbidité en fonction de la concentration du Sulfate d'Aluminium à pH = 7.....	41
Figure IV .3 Variation du pourcentage de réduction de la turbidité en fonction de la concentration du Sulfate d'Aluminium à pH = 8.....	42
Figure IV .4 : Diagramme de solubilité dans l'eau de Al(OH) ₃ (S) amorphe à 25�C.....	43
Figure IV.5 : Variation du pourcentage de réduction de la turbidité en fonction de la concentration du coagulant naturel à pH = 4.....	44
Figure IV .6 : Variation du pourcentage de réduction de la turbidité en fonction de la concentration du mucilage du cactus à pH _i = 7.....	45

Figure IV .7 : Variation du pourcentage de la réduction de la turbidité en fonction de la concentration du NE à pH = 8.....	46
Figure IV.8 : Variation du pourcentage de la réduction de la turbidité en fonction de la concentration du floculant synthétique à pH = 4.....	48
Figure IV .9 : Variation du pourcentage de la réduction de la turbidité en fonction de la concentration du floculant synthétique à pH = 7.....	49
Figure IV .10 Variation du pourcentage de la réduction de la turbidité en fonction de la concentration du floculant synthétique à pH = 8.....	50
Figure IV .11 : Variation du pourcentage de la réduction de la turbidité en fonction de la concentration du floculant naturel à pH = 4.....	52
Figure IV.12 : Variation du pourcentage de la réduction de la turbidité en fonction de la concentration du coagulant synthétique à pH = 7.....	53
Figure IV .13 Variation du pourcentage de la réduction de la turbidité en fonction de la concentration du coagulant synthétique à pH = 8.....	54
Figure IV.14 : Pourcentage de la réduction des AH en fonction de la concentration du Sulfate d'Aluminium à pH=4.....	55
Figure IV.15 : Pourcentage de la réduction des AH en fonction de la concentration du Sulfate d'Aluminium à pH=4,5.....	55
Figure IV.16 : Pourcentage de la réduction des AH en fonction de la concentration du Sulfate d'Aluminium à pH=5.....	56
Figure IV.17 : Pourcentage de la réduction de la matière organique en fonction de la concentration du sulfate d'aluminium à pH = 5,5.....	56
Figure IV.18 : Pourcentage de la réduction de la matière organique en fonction de la concentration du Sulfate d'Aluminium à pH = 6.....	57
Figure IV.19 : Pourcentage de la réduction de la matière organique en fonction de la concentration du Sulfate d'Aluminium à pH = 6,5.....	57

Figure IV.20 : Pourcentage de la réduction de la matière organique en fonction de la concentration du Sulfate d'Aluminium à pH = 7.....58

Figure IV.21 : Pourcentage de la réduction de la matière organique en fonction de la concentration du Sulfate d'Aluminium à pH = 7,5.....58

Figure IV.22: Pourcentage de la réduction de la matière organique en fonction de la concentration du Sulfate d'Aluminium à pH = 8.....59

Figure IV.23 : Pourcentage de la réduction de la matière organique par le Sulfate d'Aluminium en fonction du pH.....60

Figure IV.24 : Pourcentage de la réduction de la turbidité en fonction de la concentration du sulfate d'aluminium à pH = 8,40.....

Liste des abréviations

AF : Acide Fulvique

AH : Acide Humique

ANBT : Agence Nationale de Transfert des Barrages

COD : Carbone Organique Dissout

COT : Carbone Organique Totale

DO : Densité Optique

Ech : Echantillon

EDTA : Ethylène Diamine Tetra Acétique

GE : Gelling Extract

MES : Matière En Suspension

MON : Matière Organique Naturelle

NE : Non-gelling Extract

NTU : Nephelometric Turbidity Unit

pH : potentiel d'hydrogène

PM : Poids Moléculaire

ppm : partie par million

THM : Trihalométhane

USA : United States American

UV : Ultra Violet

λ : Longueur d'onde

%R : pourcentage de réduction de la turbidité

Introduction générale

Introduction générale

L'environnement est le véritable défi du 21^{ème} siècle dans un contexte de qualité totale et du développement durable. Ce défi implique non seulement la prévention de la pollution de l'environnement, mais également, l'élimination du potentiel de perturbation environnementale dans une perspective de développement durable. La dépollution des eaux est l'un des objectifs importants des pays industrialisés ainsi que des pays en développement. Pour y parvenir, des technologies de traitement doivent être utilisées, permettant de respecter les normes de qualité fixées par la réglementation.

Le traitement de l'eau potable implique plusieurs processus unitaires selon la qualité de la source d'eau et l'accessibilité.

La technique de la coagulation-floculation pour traiter les eaux de surfaces est la plus répandue. Les coagulants les plus utilisés sont des sels métalliques ; chlorure ferrique et sulfate d'aluminium ; malgré leurs efficacités, ces produits chimiques génèrent des sous-produits pouvant être nocifs et associés aux problèmes de la santé humaine et d'environnement. De plus la boue issue du bassin de décantation est chargée en aluminium nocif à l'environnement. En outre, une overdose d'aluminium pouvant causer à long terme la maladie d'Alzheimer [1].

Ces dernières années, on observe de plus en plus l'utilisation des matières naturelles parmi ces produits, le mucilage du cactus obtenu à partir des raquettes du cactus par un processus d'extraction est employé dans le domaine du traitement des eaux de surfaces, vu sa biodégradabilité, sa biocompatibilité, sa propriété d'adsorption, son aptitude à la floculation, et ses possibilités de régénération. Le mucilage est apte à remédier aux insuffisances des coagulants traditionnels. Il est recommandé en tant que flocculant adéquat dans de nombreuses applications. Nous citons les industries alimentaires, le domaine médical, de part son utilisation comme agent émulsifiants.

Cette étude présente une investigation sur l'application du mucilage du cactus NE (Non-gelling Extract) pour la coagulation-floculation.

Des essais ont été effectués au laboratoire, en utilisant des suspensions aqueuses synthétique à base de bentonite comme modèle d'eau turbide. On a utilisé le sulfate d'aluminium comme coagulant synthétique et le mucilage du cactus comme coagulant naturel

Introduction générale

pour réduire de la turbidité de l'eau. De plus on a utilisé un polyelectrolyte non ionique pour le comparer avec le biofloculant NE (Non-gelling Extract). La performance de la coagulation-floculation est évaluée par la mesure de la turbidité résiduelle du surnageant de la solution aqueuses. Des expériences de coagulation-floculation ont été réalisées en variant la dose de chaque coagulant, et le pH de l'eau turbide.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres distincts. Dans le premier chapitre, on présente les différentes théories sur le traitement des eaux par la technique classique de la coagulation-floculation, plus une partie sur les acides humiques. On expose également les différents paramètres physicochimiques influençant le bon fonctionnement du procédé.

Le deuxième chapitre comporte des généralités sur le cactus et le mucilage. Il s'agit plus particulièrement de la source et la composition du mucilage, ainsi que leur différente application.

Le troisième chapitre décrit les techniques expérimentales adoptées et aux matériels utilisés, relatifs au travail fait au niveau de laboratoire.

Les résultats expérimentaux ainsi que leurs interprétations et discussions sont exposés dans le quatrième chapitre de plus d'une application sur les eaux du barrage Bouroumi.

Ce mémoire de fin d'étude est clôturé par une conclusion générale représentant une synthèse globale de ce modeste travail.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

PARTIE
BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I

Coagulation-floculation

CHAPITRE II

Le mucilage du cactus dans le traitement des eaux

CHAPITRE III

Matériels et méthodes

PARTIE
EXPÉRIMENTALE

*RÉSULTATS ET
DISCUSSIONS*

CONCLUSION GÉNÉRALE

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

I.1. Introduction

La turbidité est principalement causée par des particules très petites, dites particules colloïdales, pouvant rester en suspension dans l'eau durant de très longues périodes. Par ailleurs, du fait de leur grande stabilité, ces particules n'ont pas tendance à s'accrocher les unes aux autres. Pour éliminer ces particules, on a recours aux procédés de coagulation et de floculation. La coagulation a pour but principal de déstabiliser les particules en suspension, c'est-à-dire de faciliter leur agglomération. En pratique, ce procédé est caractérisé par l'injection et la dispersion de coagulants. La floculation a pour but de favoriser sous agitation lente, les contacts entre les particules déstabilisées. Ces particules s'agglomèrent pour former un flocc qu'on pourra facilement éliminer par décantation et/ou filtration.

I.2. Caractéristiques des particules à enlever

La très grande majorité des eaux naturelles (et en particulier, celle des eaux de surface), contient des impuretés qui affectent leur apparence et peuvent avoir des effets néfastes pour le consommateur. Ces impuretés peuvent être classés en impuretés dissoutes (sels minéraux dissous, molécules organiques), colloïdes ou solides en suspension.

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

Les colloïdes présentent un diamètre compris entre 1 nm et 1 μm . Les matières colloïdales sont des MES de même origine mais de diamètre inférieur à 1 micron. Leur vitesse de décantation est faible (figure I-1) . Elle peut nécessiter théoriquement jusqu'à 666 000 années. Les matières dissoutes, quant à elles, sont généralement des cations ou anions de quelques nanomètres de diamètre, elles décantent donc encore plus lentement [2 ; 3].

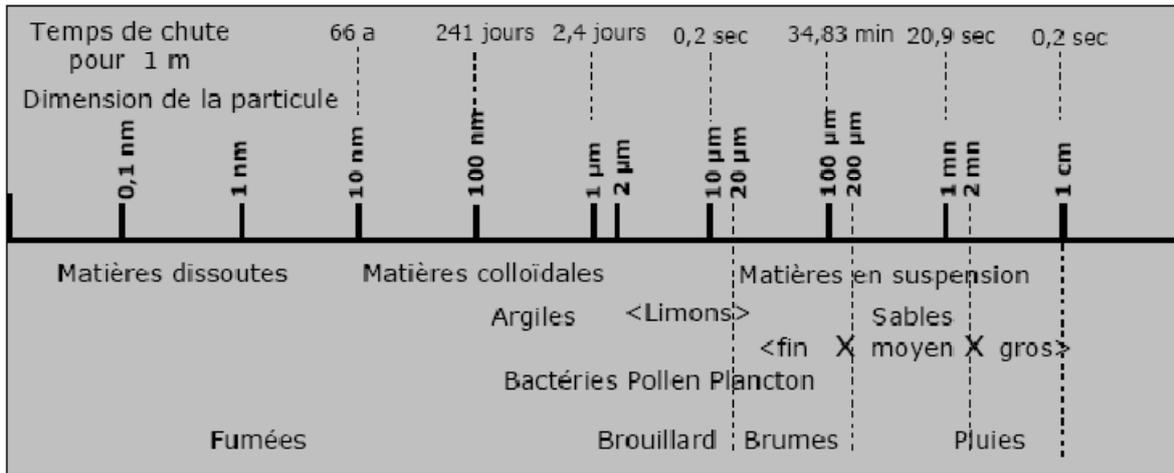


Figure I-1 : Temps de décantation des particules en fonction de leur taille [4].

Cette classification résulte de la taille des particules. A cette notion de dimension, s'ajoutent deux autres encore plus importantes, qui sont celles du rapport surface/volume des particules colloïdales qui leur confère des propriétés d'adsorption très prononcées, et celle de leur charge électrique de surface. Cette charge peut provenir de la dissociation de groupes ionisables appartenant au colloïde lui-même, de l'adsorption d'ions contenus dans la solution, ou d'une substitution isomorphique (remplacement dans un réseau macromoléculaire d'un atome par un autre atome de valence différente) ; c'est le cas général des argiles. Ce phénomène explique en partie l'existence de particules électriques à leur surface. Ces charges, souvent négatives, engendrent des forces de répulsion intercolloïdales.

L'existence des systèmes colloïdaux dépend de l'interaction entre deux particules. Elle met en jeu deux forces contraires :

- Une force de répulsion qui tend à écarter les particules les unes des autres. Cette force dépend de la charge des particules qui sont de même signe ;
- Une force d'attraction (de type Van der Waals) qui tend à rassembler les particules pour atteindre l'énergie potentielle minimale. Cette force est en fonction de la distance entre particules.

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

On observe qu'à une densité égale, les particules plus petites ont une durée de chute plus longue. Cela conduit à l'impossibilité pratique d'utiliser la décantation seule pour éliminer le maximum de particules. Cette remarque est surtout valable pour les colloïdes, c'est-à-dire les particules dont la taille est comprise entre 1 nm et 1 μm . La chute d'une particule dans l'eau est régie par la loi de Stokes [4].

$$V_o = \frac{g}{18\eta} \cdot (\rho_s - \rho_l) d^2 \text{ en unités S.I.} \quad (\text{I.1})$$

v : vitesse de décantation de la particule (m/s) ;

g : accélération de la pesanteur (m/s^2) ;

η : viscosité dynamique (pa.s);

ρ_s : masse volumique de la particule (kg/m^3) ;

ρ_l : masse volumique du liquide (kg/m^3);

d : diamètre de la particule (m).

La vitesse de la chute d'une particule est proportionnelle au carré du diamètre et à la différence des masses volumiques.

I.2.1. Stabilité des particules

Les particules colloïdales dans l'eau possèdent une charge électrique qui est généralement négative. Comme elles ont toutes la même charge, elles se repoussent et n'ont pas tendance à former des agrégats plus gros et donc plus facile à éliminer. Elles demeurent donc stables. Une particule typique est représentée sur la figure (I-2).

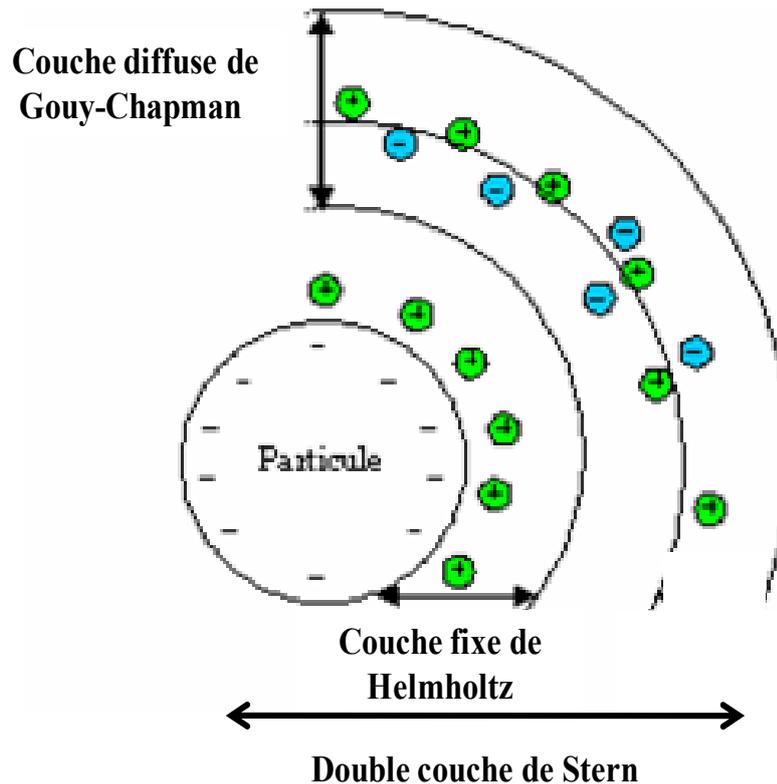


Figure I-2 : Double couche de Stern d'une particule colloïdale [5]

Les ions positifs présents dans l'eau neutralisent la charge à la surface de la particule, et forment, selon la théorie de Helmholtz, une «couche liée ». Cette dernière se déplace avec la particule. Cette couche attire à son tour des ions négatifs inégalement répartie et forme, selon la théorie de Gouy-Chapman, la « couche diffuse ». Cette dernière ne se déplace pas avec la particule, d'où l'inégalité dans la densité et la répartition des ions qu'ils la composent.

La figure (I.2) est, en fait, un rassemblement des deux théories, communément appelée théorie de la « double couche ». Lorsque deux particules sont sur le point d'entrer en contact, elles sont essentiellement soumises à deux forces : la force d'attraction de Van der Waals, et celle de répulsion électrostatique.

Le potentiel de répulsion est défini par E_B , et le potentiel d'attraction est défini par E_A . La résultante E des deux potentiels traduit l'interaction énergétique nette entre les deux particules telle que décrite dans la figure (I-3).

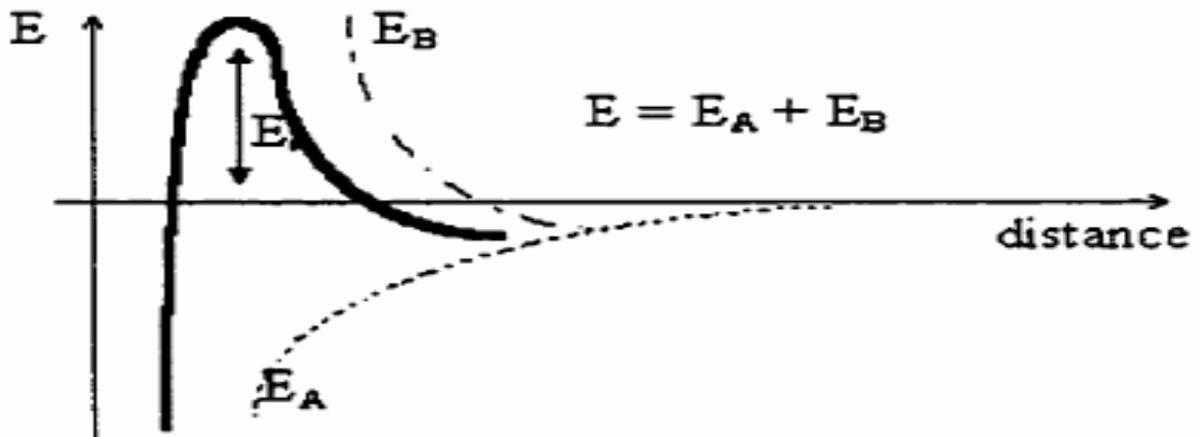


Figure I-3 : Stabilité d'une suspension colloïdale [5]

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

I.2.2. Potentiel Zêta

Le potentiel Zêta est le plan de cisaillement entre la couche fixe et la couche diffuse. Le potentiel Zêta se situe à la limite extérieure de la couche liée. C'est ce potentiel qui persiste lorsque la particule se déplace. Lorsqu'un champ électrique est appliqué, les particules ayant un potentiel Zêta négatif se déplacent en direction de l'électrode positive. [3]

Le potentiel Zêta est important, car il définit le comportement électrocinétique des particules, et par voie de conséquence, leur stabilité dans la solution. L'annulation du potentiel Zêta est l'objectif de la coagulation. Cela permet de déstabiliser les particules et de favoriser leurs agglomérations [3].

I.3. Coagulation-Floculation

L'opération de la coagulation-floculation a pour but de la croissance des particules (qui sont essentiellement colloïdales) par déstabilisation, puis formation de flocs par adsorption et agrégation [6].

I.3.1 Coagulation

Le mot coagulation vient du latin coagulare qui signifie agglomérer [7]. La couleur et la turbidité d'une eau de surface sont dues à la présence de particules de très faible diamètre : les colloïdes. Leur élimination ne peut se baser sur la simple décantation.

Les particules colloïdales en solution sont « naturellement » chargées négativement. Ainsi, elles tendent à se repousser mutuellement et restent en suspension. On dit qu'il y a une stabilisation des particules dans la solution. La coagulation consiste en la déstabilisation des particules en suspension par la neutralisation de leurs charges négatives. Par ce procédé, on peut surmonter aux forces répulsives, et les particules se rapprochent suffisamment les unes des autres. Les forces de Van der Waals deviennent donc prédominantes. On utilise, pour ce faire, des réactifs nommés coagulants. Le procédé nécessite une agitation importante.

I.3.1.1 Mécanismes de la coagulation

Quatre mécanismes sont proposés pour expliquer la déstabilisation des particules et leurs agglomérations :

I.3.1.1.a Compression de la double couche

L'augmentation de la force ionique de l'eau réduit le volume et l'épaisseur de la couche diffuse. Les forces de répulsion sont considérablement réduites alors que les forces d'attraction de Van der Waals ne sont pas affectées [4]. La force ionique est donnée par

l'équation:
$$I = \frac{1}{2} \sum C_i \times Z_i^2 \quad (1.2)$$

I : Force ionique (mol/l) ;

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

Z_n : valence de l'ion n .

I.3.1.1.b Adsorption et neutralisation des charges

Ce mécanisme repose sur l'ajout suffisant de cations, afin de neutraliser la charge négative des particules stables par adsorption des cations sur leur surface. Par contre, la surdose de coagulant, source de cations, peut résulter en une adsorption trop importante de

cations et inverser la charge des particules qui devient alors positive. Les particules seraient ainsi réstabilisées [5].

I.3.1.1.c Emprisonnement et piégeage des particules dans un précipité

Lorsque des quantités suffisantes de coagulant comme le $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ou le FeCl_3 sont ajoutées, ils forment un précipité possédant généralement une charge positive. Le pH de l'eau doit se situer dans une plage où la solubilité des sels est minimale. Le précipité formé, appelé floc, entre en contact avec les particules de charge négative et les emprisonne. Les particules sont ensuite entraînées lors de la décantation [4].

Ce mécanisme implique l'utilisation de polymères cationiques, non-anioniques ou anioniques, ayant une masse moléculaire élevée et une structure longitudinale. Un polymère en présence d'un colloïde l'adsorbe à une de ses extrémités à l'aide d'un de ces groupes fonctionnels. Les autres extrémités demeurent libres et peuvent adsorber un autre colloïde. Ce mécanisme permet donc l'agglomération des particules par pontage des polymères (Figure I-4). Par contre, une concentration de polymères trop élevée peut réstabiliser les colloïdes.

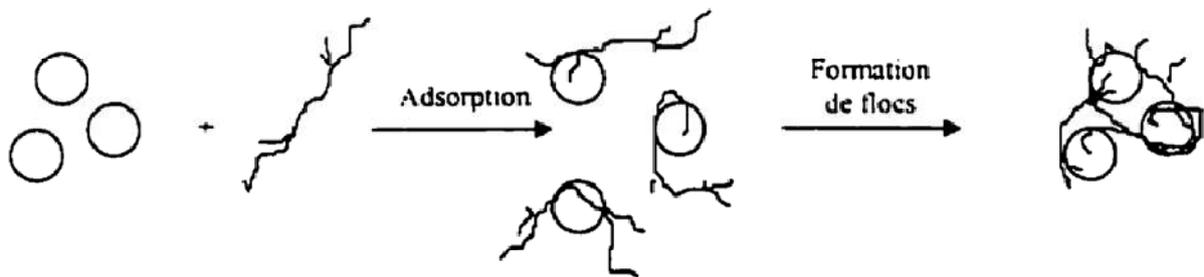


Figure I-4 : Adsorption et pontage à l'aide de polymères [4].

I.3.1.2 Paramètres affectant la coagulation

Le processus de coagulation est un procédé complexe. Ce dernier peut être influencé par plusieurs paramètres, certains sont liés à la qualité de l'eau brute, d'autres le sont au traitement lui-même. Dans un souci de concision, quelques facteurs sont abordés dans le cadre de notre recherche [8]. Toutefois, il convient de préciser que d'autres paramètres sont importants, tels que la couleur, et le potentiel Zéta.

I.1.3.1.2.1 Paramètres liés à la qualité de l'eau brute

a) Effets du pH et d'alcalinité : Le pH est un des paramètres qui affecte le plus la coagulation-floculation. Son contrôle est donc suggéré. Selon les caractéristiques d'une eau, il existe un pH optimal permettant la meilleure coagulation. Ce pH se situe souvent dans la plage où la solubilité du coagulant utilisé est minimale, ce qui permet une meilleure précipitation. Le contrôle du pH permet aussi d'améliorer la coagulation lorsque la température de l'eau est faible.

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

c) Effet des sels dissous : Les sels dissous dans une eau influent beaucoup sur la coagulation et la floculation. Ils peuvent modifier la plage du pH optimale, le temps requis pour la coagulation, et la quantité du coagulant.

d) Influence de la turbidité : La turbidité est, elle aussi, un paramètre influant sur le bon fonctionnement du procédé de la coagulation. Dans une certaine plage de la turbidité, l'augmentation de la concentration en particules doit être suivie d'une augmentation de la dose de coagulant. Quand la turbidité de l'eau est trop faible, on peut augmenter la concentration en particules par addition d'argiles. Enfin, pour grossir et alourdir le floc, on ajoute un adjuvant de floculation.

I.3.2 Floculation

La floculation est le processus qui favorise les contacts entre les particules colloïdales déstabilisées et leur agglomération. Deux mécanismes assurent la mobilité des particules :

I.3.2.1 Floculation péricinétique

Le mouvement brownien des particules est fonction de la température de l'eau. Lorsqu'elles entrent en contact, les particules ont tendance à s'agglutiner les unes aux autres. Le taux de variation du nombre de particules, lors de la floculation péricinétique, est important lorsque la taille des particules est inférieure à 1 micron. Au-delà de cette taille,

d'autres mécanismes doivent être utilisés afin d'assurer un taux raisonnable d'agrégation des particules. Le nombre total de particules varient donc selon le modèle de Von Smoluchowski réalisé en 1917 [3] :

$$F_p = - \frac{dn}{dt} = \frac{4 \times \alpha \times k \times T \times n^2}{3 \mu} \quad \text{(I.4)}$$

Où :

n : Nombre de particules par unité de volume ;

α : Fraction du nombre de chocs productive de floc ;

k : Constante de Boltzman qui vaut $13,8 \times 10^{-24} \text{ J.K}^{-1}$;

μ : Viscosité dynamique de l'eau (Pa .s) ;

T : Température absolue (°K) ;

$\frac{dn}{dt}$: Variation du nombre de particule à un instant t.

I.3.2.2 Floculation orthocinétique

Ce type de floculation est fonction de l'énergie dissipée dans le fluide. Elle est donc causée par le brassage de l'eau qui permet d'augmenter les chances de contacts entre les particules. La vitesse du fluide varie dans l'espace et dans le temps et est caractérisée par le gradient de vitesse, G. L'efficacité du processus est exprimée selon l'équation suivante lorsque le régime est turbulent [3] :

$$\frac{dA}{dZ} = \sqrt{2 R_{ij}^2 - Z^2} \quad \text{(I.5)}$$

Où :

$\frac{dA}{dZ}$: Gradient de masse ;

R_{ij} : Rayon effectif de la collision ;

Le débit à travers cette surface :

$$dQ = Z \frac{dV}{dZ} 2\sqrt{R_{ij}^2 - Z^2} dZ \tag{I.6}$$

A travers la sphère entière, le débit vaut :

$$Q = 2 \int_0^{R_{ij}} G \sqrt{R_{ij}^2 - Z^2} \cdot 2Z dZ = \frac{4}{3} G \cdot R_{ij}^2 \tag{I.7}$$

Où Q : débit volumique.

En conséquence, si les particules suivent un flux laminaire, probabilité d'une collision consécutive à une agitation s'exprime comme suit, selon cette théorie :

$$F_0 = \frac{4}{3} R_{ij}^2 n_i n_j \frac{dV}{dZ} \tag{I.8}$$

Où $\frac{dV}{dZ}$ est le gradient de vitesse en flux laminaire et R_{ij} , le rayon de la sphère de contact.

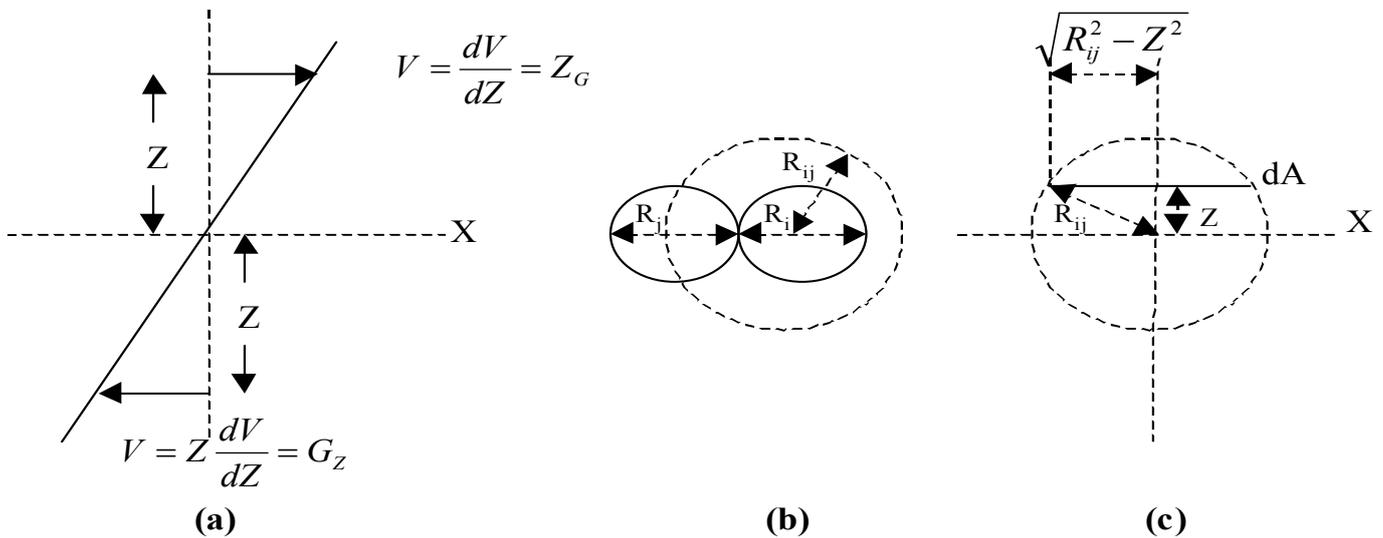


Figure I.5 : surface de collision, dans le processus de floculation [4].

Dans les systèmes de floculation, les gradients de vitesse s’obtiennent par mélange mécanique ou par perturbation du flux au travers d’un lit de boue ou des strates d’un filtre. Les conditions locales de mélange sont inconnues et généralement turbulentes.

Camp et Stein ont alors assimilé le terme de gradient de vitesse au gradient moyen de vitesse globale, exprimé par G (en S⁻¹) [4].

$$G = \left(\frac{P}{\mu V} \right)^{1/2} \quad (I.9)$$

Où P : puissance dissipée dans le fluide ;

μ : viscosité dynamique (pa.s) ;

V : volume du fluide (m³).

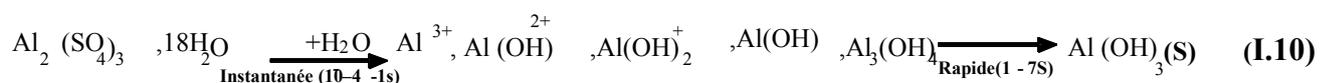
I.3.3 Coagulants synthétiques utilisés

Le type du coagulant et la dose ont une influence sur : la bonne ou la mauvaise qualité de l’eau clarifiée. Les coagulants les plus efficaces sont cités dans le tableau (I-1) [8].

Tableau I-1 : Dérivés des sels d’aluminium et de fer [8].

Sels d’aluminium	Formule chimique	Sels de fer	Formules
Sulfate d’Aluminium	Al ₂ (SO ₄) ₃	Chlorure ferrique	FeCl ₃
Chlorure d’Aluminium	AlCl ₃	Sulfate ferrique	Fe(SO ₄) ₃
Aluminium de Sodium	NaAlO ₂	Sulfate ferreux	FeSO ₄

Les produits les plus utilisés sont l'alun et le chlorure ferrique. Ces coagulants, une fois introduits dans l'eau, forment des produits hydrolysés, déterminant l'efficacité de la coagulation [8]. L’hydrolyse du Sulfate d’Aluminium se déroule en deux étapes comme le montre la réaction suivante :



L'étape 1 est une phase d'hydrolyse. Des intermédiaires polychargés positifs se forment. Ces composés assez fugaces présentent un atome d'aluminium dont le nombre d'oxydation est très grand. Ces intermédiaires sont très efficaces pour neutraliser la charge primaire négative des colloïdes. Il s'agit de la véritable forme coagulante, qui déstabilise les particules chargées négativement. L'étape 1 dépend de la température et nécessite un pH compatible avec l'existence de ces intermédiaires polychargés. Le temps de formation de ces composés est de l'ordre de 0,5 s.

L'étape 2 dépend de l'agitation du milieu et permet la formation du précipité $\text{Al}(\text{OH})_3$. Ce dernier assure le pontage et la coalescence entre les colloïdes déstabilisés : c'est la forme floculante. Par ailleurs, il y a une complexation avec des ligands contenus dans l'eau. Cette complexation expliquerait la présence d'aluminium résiduel dans l'eau décantée [8].

I.3.4 Polyélectrolytes en solution

Les polymères sont des molécules composées d'un très grand nombre de maillons élémentaires (motifs) appelés monomères. Lorsque ces derniers sont chargés, on parle de polyélectrolytes. Une des propriétés les plus importantes des polyélectrolytes est leur solubilité dans l'eau, ce qui permet d'accéder à une large gamme de formulations non toxiques, compatibles avec l'environnement. L'existence de charges électrostatiques le long de la chaîne macromoléculaire confère aux polyélectrolytes des propriétés physico-chimiques remarquables. Ainsi, depuis les dernières décennies, l'intérêt des scientifiques et des industriels pour les polyélectrolytes n'a cessé de croître en raison de leur vaste domaine d'application [9].

Il existe une telle variété de polyélectrolytes que les scientifiques et les industriels les ont classés dans différentes catégories selon leur rigidité, leur flexibilité, ou leur origine (naturelle ou synthétique).

I.3.5. Polyélectrolytes synthétiques

Les polyélectrolytes de synthèses sont des composés de petites molécules porteuses d'une charge électrique polymérisées en longue chaîne. Leur synthèse est réalisée soit par polymérisation d'un monomère ionisable, soit par ionisation d'un polymère déjà formé [9].

Ils peuvent être fabriqués en grande quantité, à haute pureté et avec une grande régularité dans l'enchaînement des monomères. L'intérêt de ces polyélectrolytes est leurs

effets sur le grossissement des flocons. Les polyacrilamides sont les polyélectrolytes les plus utilisés dans le traitement des eaux potables.

I.4. Effets de la présence des acides humiques dans l'eau

En ce qui concerne la présence des acides humiques (teneurs en substances humiques) dans les eaux destinées à la potabilisation, les conséquences connues sont les suivantes :

- Ils sont souvent à l'origine de colorations ou de mauvais goûts rebutants pour le consommateur ;
- Modification du transfert de micropolluants: les matières humiques peuvent absorber d'autres molécules organiques comme les pesticides et inhiber leur dégradation. Elles peuvent également former des complexes solubles ou insolubles avec certains éléments métalliques ;
- Dans les eaux distribuées, les acides humiques favorisent la présence des THM de toxicité reconnue.

I.5. Coagulation-floculation de la matière organique naturelle dissoute dans les eaux de surface

La coagulation a souvent fourni une efficacité remarquable dans l'élimination des substances organiques dissoutes. Plusieurs études détaillées ont été mise au point sur le traitement des eaux contenant des matières organiques naturelles dissoutes [10 ; 11]. Ces études ont montrés que la coagulation des substances organiques dissoutes dépend principalement du pH, de la dose du coagulant et de la concentration de ces substances dans l'eau [12].

Les rendements d'élimination des substances organiques dissoutes sont variables suivant la distribution de leurs masses moléculaires : les fractions de masse moléculaire élevée qui sont hydrophobes peuvent être plus facilement éliminées [13]. Edzwald a proposé une classification des substances organiques naturelles présentes dans l'eau [14] illustrant en tableau I.2.

Tableau I.2 : Classification de la matière organique naturelle [14].

	Fractions	Groupements chimiques
hydrophobes	Acides forts	Acides humiques, fulviques, acides alkyl monocarboxyliques, dicarboxyliques à poids moléculaire élevé et acides aromatiques.
	Acides faibles	Phénols, tannins, acides alkyl mono et dicarboxyliques à poids moléculaire moyen.
	Bases	Protéines, amines, aromatiques, alkyls, amines à poids moléculaire élevé.
	Neutres	Carbohydrates, aldéhydes, méthylcéton, alcool (PM élevé)
Hydrophiles	Acides	Les hydroxylacides, les sucres, les acides mono et dicarboxyliques avec faible poids moléculaire.
	Bases	Acides aminés, pyrimidines et alkylaminés à poids moléculaire faible.
	Neutres	Polysaccharides, aldéhydes, cétones, alcool à poids moléculaire faible.

La coagulation des substances organiques naturelle présente certaines particularités. Alors que la coagulation classique est définie en termes de déstabilisation des particules colloïdales, celle des substances organiques naturelles entraîne plutôt un changement de phase qui va permettre la formation des particules qui s'agglomèrent plus aisément lors de la floculation [14].

Des recherches qui ont faites par des chercheurs au domaine du traitement de l'eau ont montré que la coagulation des substances organiques se fait par une réaction de complexation des composés organiques avec des sels métalliques. Elle engendre la neutralisation des charges et la précipitation de cette macromolécule ou encore son adsorption sur l'hydroxyde métallique formé après addition du coagulant $Al(OH)_3$ [14 ;15].

I .5.1.Principaux paramètres influençant l'élimination de la matière organique naturelle par coagulation-floculation

Les caractéristiques structurales de la matière organiques dissoutes gouvernent son aptitude à coaguler-floculer, notamment la charge, sa solubilité et la taille moléculaire [16].

De plus, en admettant que cette élimination passe par une neutralisation des charges négatives de la matière organique estimées entre 5 à 15 $\mu\text{eq}/\text{mg COD}$ [17], deux paramètres réactionnels apparaissent alors comme fondamentaux, le pH et la dose du coagulant.

➤ Le pH et la dose du coagulant

Il est évident que le pH est un paramètre très important : la plupart des études sur la coagulation-floculation de la matière organique naturelle sont consacrées à l'influence du pH.

Tableau I.3 : Comparaison des valeurs du pH optimal proposées par certains chercheurs pour la coagulation-floculation par $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ et FeCl_3 .

Auteurs	Eaux utilisés	COT _{initial} (mg/l)	Ech, filtré sur membrane	Coagulant	pH optimal
Tambo et al [18]	Rivière (Japon)	5	oui	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	5,0-5,5
Hundt et O'Melia [19]	AH extrait de rivière(USA)	3,5	oui	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	variable
Lefebvre et Legube [20]	AH extrait de barrage (France)	7,5	non	FeCl_3	4,5
Semmens et Field [21]	Extrait de rivière (USA)	14	oui	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	5,0-5,5
Babcock et Singer [22]	AF et AH extrait de tourbe	10 et 50	non	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	4,5-5,5
Vik et al [23]	Lac(Norvège)	6-15	oui	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	5,5-6,5
Hall et Packham [24]	AF et AH extrait de rivière(USA)	5-50	oui	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ FeCl_3	5-6 3,5-4,5
Van Benschoten et al [25]	AF extrait de rivière(USA)	02-10	oui	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	variable
Amirtharajah et al [26]	Rivière(USA) 3,4 et 13	3,4 et 13	oui	FeCl_3	04-6

A la lecture du tableau I.3, nous pouvons constater qu'il n'y pas un accord sur le pH optimale.

Cela pourrait résulter :

1. De la concentration et du type de la matière organique ;
2. De la dose appliquée du coagulant ;
3. Du protocole expérimental.

Certaines valeurs du pH optimal qui figurent dans le tableau I.3 sont obtenues avec une seule dose du coagulant ou des doses peu différentes. Cependant, la plupart des chercheurs ont montré que pH optimal varie en fonction de la dose du coagulant appliquée. Quand on augmente la dose du coagulant, le rendement d'élimination croit et la zone du pH optimal s'élargit surtout lorsque l'échantillon est filtré sur membrane [23;25].

Dans les expériences de Tambo et Kamei, des doses de 0, 8,2 ,4 et 4,8 mg/l d'aluminium sont utilisés pour la plus faible dose, le rendement d'élimination maximale de 50% est obtenu à pH 5 ; lorsque la dose est de 2.4 mg/l , 70% de la couleur est éliminé au tour de pH 5.2 tandis qu'à une dose plus élevée, le pH optimal se trouve entre 5 et 6.8 avec une élimination de 80% [18].

➤ **Nature de la matière organique naturelle**

Les travaux menés par Lefebvre et Legube ont montrés que l'abattement en COD peut atteindre 90% lors de la coagulation-floculation d'acides humiques par le fer ferrique [20]. Des rendements comparables ont été observés par Kavanavgh avec l'aluminium [27].

Dans les mêmes conditions expérimentales, Lefevre et Legube montrent que les acides fulviques sont plus éliminés sont plus difficilement éliminés par le Fe **III** que les acides humiques de même origine avec un abattement de l'ordre 60%[20]. Edzwald cité par Kavannaugh a montré qu'il fallait trois fois plus d'aluminium pour les acides fulviques afin d'obtenir une élimination semblable à celle des acides humiques [17 ; 27].

En travaillant avec un acide humique extrait de tourbe, Babcock et Singer ont montrés que pour un pH inférieur à 5.5 et une dose supérieur à 5mg Al /mg C, la couleur était totalement éliminée comparativement au COD dont le résiduel atteignait environ 10% [22].

Enfin, soulignons que Collins [28] et Lefebvre et Légube [20] ont relevés l'importance des fonctions carboxyliques présentes au sein de la structure de la matière organique dans le mécanisme de coagulation-floculation. Pour les huit acides humiques étudiés ,Lefbvre et Legube ont montrés que cette fraction est d'autant mieux éliminée qu'elle contient un nombre important de groupements carboxyliques. Les travaux réalisés par Lefebvre et Légube [20] et Rani [29] sur des composés aromatiques modèles précisent que le nombre et la place des groupements oxygénés (-OH , -COOH) sur le cycle est un facteur déterminant dans leur aptitude à coaguler-floculer en présence de sels métalliques.

I.6.Conclusion

L'unité de la coagulation-floculation est une étape clé dans la production de l'eau potable. La dose du coagulant à injecter est la variable principale utilisée pour conduire une unité de la coagulation. Le dosage est le plus souvent déterminé par l'analyse chimique effectuée en laboratoire, « Jar test ». Cette technique d'analyse nécessite un prélèvement et un temps d'analyse relativement important. Un surdosage du coagulant amène à des surcoûts

accrus de traitement, tandis qu'un sous-dosage conduit à un non-respect des spécifications en termes de qualité de l'eau produite en sortie de la station.

II.1. Introduction

Ce chapitre a pour but de proposer un nouveau produit naturel dans le domaine de traitement de l'eau, qui sert à traiter l'eau trouble par l'utilisation du mucilage du cactus.

Le genre d'Opuntia est le plus important de la famille des cactacées. Les espèces Opuntia ont été choisies pour ce projet de fin d'étude, Opuntia ficus indica, est également connu sous le nom de poire nopal ou figuier, qui est cultivée dans l'Algérie où elle pousse dans des proportions arborescentes (**figure II. 1**). Le nopal cactus est proposé comme une source flocculant vu son omniprésence en Algérie. En Amérique latine, le mucilage du cactus a été utilisé pour réduire la turbidité et la dureté des eaux [30].



Figure II.1 : photo du cactus en Algérie (Chr a, Blida)

II.2. Utilisation actuelle du cactus

Opuntia ficus-indica est largement utilisé pour sa valeur nutritive. Il est utilisé comme une récolte de fruits et une récolte de légumes pour la consommation humaine [31 ; 32], et en tant que fourrage récolte pour le bétail en période de la sécheresse [31]. Le fruit de l'Opuntia est communément dénommé thons, leur nom espagnol [34]. En règle générale, le fruit est séché pour une utilisation pendant l'hiver, mais parfois une sauce est faite à partir de la coque,

les fruits verts. Ils sont également utilisés pour leurs peaux, (colorant alimentaire), leur sirop (miel du cactus), fermentées et de boissons non fermentés, et sous forme séchée comme fromage du cactus [35]. Les graines du nopal ont également été broyées et utilisé comme un repas par certains Indiens d'Amérique.

L'avantage d'utiliser *Opuntia* comme une récolte de fruits est la capacité de croître le cactus dans autrement fertile, le sol rocheux. Les concentrations de cultures de 20.000 kg de fruits hectare-1 ont été produites, ce qui est équivalent à environ 2800 kg de sucre [34].

L'utilisation d'*Opuntia* comme une culture de légumes est moins populaire. En règle générale, seule les jeunes articulations du cactus (nopalitos) sont utilisées comme une légume dans les hispaniques ménages [37]. Ils sont généralement cuits comme un légume vert ou marinés dans le cadre d'une salade [31]. La peau et les épines du cactus peuvent être facilement enlevées, laissant les entrailles comestibles des pads du cactus [37]. Les raquettes d'*Opuntia* sont composées de 87% d'eau, 1% de protéines, 0,1% de matières grasses, 1,3% de cendres, de fibres brutes de 1,1% et 5,4% des hydrates de carbone [36].

Dans des conditions de la sécheresse, quand les herbes et autres plantes fourragères ne sont plus comestibles, le cactus d'*Opuntia* reste vert et est utilisé comme aliment d'urgence récolte pour le bétail allant à la fois dans le sud des États-Unis et le Mexique [37]. Les épines sont brûlées, trempées dans l'eau, ou lavés avec la soude pour éliminer leurs effets néfastes sur le bétail. Les moutons ont vécu jusqu'à 8 mois mangé entièrement *Opuntia* [31].

Les plantes d'*Opuntia* n'ont pas utilisés exclusivement comme une source de nourriture. Ils sont populaires comme des plantes ornementales et de la couverture ainsi que la tige du cactus est utilisée dans la production des éléments décoratifs [31].

II.3. Mucilage d'*Opuntia ficus Indica*

Le mucilage du cactus est un liquide visqueux incolore sécrété produit par les plaquettes du cactus quand ils sont coupés ou pressés. La production du mucilage est une caractéristique de la famille des Cactacées. Il joue un rôle clé dans la rétention d'eau et la libération [38].

Les termes " mucilage du cactus ", " pectine du cactus » et « gomme du mucilage » ont été utilisés dans la littérature pour désigner deux fractions de polymères glucidiques distinctes; un extrait gélifié et un extrait non gélifié [39]. Le terme mucilage est générique tandis que les deux extraits spécifiques seront différenciés comme extrait de gélification GE pour la pectine, et NE l'extrait non gélifié. Avec une référence spécifique à *Opuntia ficus-indica*,

communément connu sous le nom du figuier de barbarie en Amérique ou nopal en Mexique ou cactus en Algérie, le NE est un mélange hétéropolysaccharide comprenant principalement arabinose, D-galactose, le L-rhamnose et D-xylose ainsi que l'acide galacturonique [41;42;43;44;45]. Le NE est produit dans les cellules mucilagineuses trouvées principalement dans le parenchyme (tissu blanchâtre intérieure), mais aussi dans le chlorenchyma (peau extérieure verte) des raquettes du cactus [46]. Le GE est également connu comme la pectine du cactus. La pectine se trouve principalement entre les cellules et dans les parois cellulaires primaires dans la plupart des plantes [47]. Le GE a été montré pour avoir une similarité du groupe chimique considérable à la pectine d'agrumes plus largement étudiée [39]. Les sucres neutres trouvés dans le GE ressemblent fortement les sucres dans le NE, à savoir le L-arabinose, le D-galactose, le L-rhamnose et le D-xylose et l'acide galacturonique. Cependant, la principale différence est que le GE a une proportion beaucoup plus élevée d'acide galacturonique [39]. Le tableau ci-dessous montre quelques compositions du mucilage du GE et NE.

Tableau II.1 : La composition du mucilage du cactus

source	composition(%)
McGarvie et Parolis [42]	Galactose 18,4 Arabinose 42,4 Xylose 24,5 Rhamnose 6,4 Acide galacturonique 8,4
Paulsen and Lund [43]	Les sucres similaires mais avec différentes fractions d'extraire.
Amin et al. [40]	Arabinose 37.5 Rhamnose 11.5

Il ya eu des différences rapportées dans la littérature concernant les composants des extraits du cactus. Plusieurs facteurs sont responsables y compris des différentes méthodes d'extraction du GE et NE, qui se produit lorsque le parenchyme et des cellules de la peau ne sont pas séparées. Le GE et le NE contenu varient selon les variétés d'*Opuntia ficus-indica* [38;48], et également avec le temps ou la saison de la récolte [42]. L'irrigation et la température aussi influencé sur la production du mucilage [38].

II.3.1. Méthodes d'extraction du mucilage du cactus

Il y a plusieurs méthodes utilisés pour l'extraction du mucilage du cactus parmi eux on a :

- **Méthode de CSP (Cut - Scoop –Press)**

Les raquettes du cactus ont été lavées, séchés et pesés puis couper en deux moitiés. Le parenchyme (blanc à l'intérieur charnu) des plaquettes a été creusé avec une cuillère et pressé à travers une presse de pomme de terre. Notez que la fonction de la presse de pomme de terre était d'écraser le parenchyme afin de briser les cellules mucilagineuses et libérer le mucilage. Cette étape pourrait être réalisée avec des outils encore plus simples comme l'écrasement du matériau avec une pierre. Le liquide pressé été recueillis et les solides ont été mis au rebut. L'isopropanol a été ajouté pour le liquide dans un rapport de 3: 2 liquide sur alcool pour précipiter le mucilage. Le précipité a été lavé avec un volume de 10 ml de l'isopropanol. Le précipité est placé sur une boîte à pétri et séché dans l'étuve à 50 ° C pendant une nuit. Le précipité sec a été pulvérisé avec un mortier et un pilon et stockée dans un récipient hermétique.

- **Méthode de DBP (Dice -Boil –Press)**

Les raquettes du cactus ont été lavées, séchées, pesées et coupées en cubes d'environ 1 cm, et on été par la suite immergé dans une solution de 1 % de chlorure de sodium dans une masse de 1:1 rapport masse sur volume. Au moins suffisamment de liquide a été utilisé pour couvrir le cactus. Le mélange a été bouilli pendant 20 minutes puis refroidis. Le liquide et les solides ont été pressés dans un presseoir de pommes de terre ; le liquide a été maintenu et les solides résiduels ont été rejetés. L'isopropanol a été ajouté au liquide dans un rapport liquide à alcool de 3/2 rapport liquide pour précipiter le mucilage. Le précipité est lavé avec 10 ml de l'isopropanol. Le précipité a été placé sur une boîte à Pétri et sécher à 50 °C dans l'étuve

pendant une nuit. Le précipité sec a ensuite été pulvérisé avec un mortier et un pilon et stockée dans un flacon en plastique hermétique.

- **Méthode de Grated -Boil -Press (GBP)**

Cette méthode est la même que pour la méthode DBP à l'exception que les plaquettes étaient pelée et râpée au lieu de d'être couper en dés.

II.4. Recherches scientifiques sur le cactus

En 2008, Miller et al. ont fait une étude sur l'efficacité du mucilage du cactus comme étant un coagulant naturel, où on atteint une réduction de la turbidité de 98% [57].

En 2009, Abid et al. ont utilisés le jus du cactus pour traiter des rejets liquides chargés en cuivre, en zinc et en matière en suspension. Cette étude a montée un effet significatif sur l'élimination du zinc, du cuivre et des matières en suspension. Le pourcentage d'abattement des métaux lourds dépasse 95% pour le cuivre et le zinc. De plus, dans une solution riche en argile, la turbidité passe de 900 NTU à des valeurs avoisinantes du 1 NTU [58].

En 2009, Buttice a examiné le rôle du mucilage du cactus pour l'élimination de la turbidité. Il a observé que pour les deux extraits étudiés (GE et NE), la fixation de kaolin augmentaient avec la force ionique de l'eau [59]. Ce tassement a également augmenté avec l'augmentation de la concentration du GE et NE, mais jusqu'à un point optimal. Tel que, l'élimination de la turbidité a été montrée une agglomération des particules déstabilisées du kaolin (floculation). Dans une nouvelle application de l'extrait du cactus, Il a également enquêté sur l'élimination des bactéries de l'eau, les taux d'élimination optimale sont entre 95-99% [59].

En 2011, Alcantar et al. ont réalisés une étude sur la conception et la mise en œuvre de la séparation des métaux lourds par le mucilage du cactus, où on été atteints un pourcentage de réduction de 96 % [60].

En 2012, Pichler et al. ont effectués une étude sur l'élimination de la turbidité dans l'eau en utilisant le mucilage du cactus. Cette étude a permis de prouver l'efficacité du mucilage du cactus dans la réduction de la turbidité par décantation piston, où ils ont atteint une vitesse de sédimentation 300 fois plus grande que le Sulfate d'Aluminium [61].

II.5. Applications courantes

Le mucilage d'Opuntia a été extrait et évalué pour des utilisations alimentaires, y compris le fibre [30], médicinales [49 ; 50], digestif [51;49], additif de mortier [50], et des agents émulsifiants [52].

L'Opuntia est utilisé comme une source de nourriture par beaucoup d'Américains et la composante du mucilage d'Opuntia contribue à la diététique composant de la fibre du cactus [30]. Le mucilage a également été étudié pour son utilisation dans les niveaux du glucose sanguin pour le contrôle chez les diabétiques et de cholestérol dans Guinée porcs nourris avec un régime riche en cholestérol. Il a réduit de manière significative à la fois la glycémie et le taux de cholestérol [53; 54 ; 55].

En Mexique, le jus de nopal est parfois ajouté au mortier de chaux pour réduire la fissuration et la pénétration de l'eau. Cependant, dans les enquêtes sur le rôle du mucilage du cactus dans la force du mortier, Cárdenas et al., a constaté que, tandis que le mucilage du cactus à diminuer la pénétration de l'eau et du craquage, il permet également de réduire la résistance mécanique des mortiers de la chaux [50]. Le mucilage a également été suggéré pour une utilisation dans l'industrie alimentaire en raison de son efficacité dans la stabilisation des émulsions huile-eau [52].

II.6.coagulant naturel issu des extraits du cactus

La pratique d'utiliser le mucilage du cactus pour traiter l'eau trouble est indigène au Mexique et remonte à des temps reculés. Young, Pichler et al 2008 ont été informés par la communication personnelle que le destructeur utilisé pour faire bouillir les patins du cactus a été ajouté à l'eau trouble qui deviendra clair [56]. Cependant, il n'y avait pas de compréhension scientifique du mécanisme par lequel le mucilage du cactus à traiter l'eau turbide. Cela a motivé le groupe Alcantar d'entreprendre le travail du pionnier. En 2012, T. Pichler et al. utilisent l'eau trouble avec des suspensions de kaolin et comparés la capacité du mucilage du cactus pour le traitement de l'eau trouble contre le sulfate d'aluminium (alun), un coagulant commercial en comparant le taux de décantation de kaolin dans une éprouvette d'eau trouble. Ils ont déclarés que le mucilage du cactus est mieux que le Sulfate d'Aluminium. La vitesse de sédimentation de kaolin est 300 fois plus que la vitesse avec le Sulfate d'Aluminium [61].

II.6. Conclusion

D'après les études faites par les différents chercheurs, on peut dire que le mucilage du cactus présente un large domaine d'application. De plus de la découverte de sa capacité de traiter l'eau.

III. Méthodes et techniques expérimentales

Ce chapitre présente les différentes expériences réalisées durant cette étude, ainsi la procédure et le protocole expérimental utilisé.

III. 1 .Méthode d'extraction du mucilage du cactus

Dans ce projet de fin d'étude, on a travaillé par la méthode de Goycoolea et al. selon la procédure ci-dessous [62] :

III. 1.1. Préparation des raquettes du cactus

Deux fractions du mucilage ont été extraites à partir des raquettes du cactus, un extrait de gélification (GE) et un extrait non gélifiant (NE). L'extraction du NE a été faite suite à une modification de la méthode utilisée par Goycoolea et al. [62]. Les patins étaient d'abord nettoyés en enlevant des épines et des taches brunes, lavés, séchés et pesés. Les coussinets ont été coupés en dés et chauffé pendant 20 minutes 85°C dans une solution de 1 % de NaCl (1:1 masse au volume) afin d'inactiver les enzymes. Après refroidissement, le mélange a été liquéfié dans un mixeur commercial (high star technologie) , puis neutralisée avec 1M d'hydroxyde de sodium (NaOH) . Le mélange est ensuite centrifugé à 4000 tr/min pendant 10 minutes pour séparer le liquide et les matières solides.



Figure III.1 : Patins du cactus coupés en dés.



Figure III.2 : Ebullition des patins du cactus.

III. 1.2. Extraction de NE

Le surnageant du cactus est filtré en utilisant un papier filtre Whatman 41. Le NE a été précipité avec l'acétone dans un rapport de 2:3 du surnageant par le solvant. Le précipité a été lavé avec des mélanges éthanol - eau dans une série graduée de (70 %, 80%, 90%, 95 %) pour éliminer toutes les impuretés restantes. Le précipité est séché à 50 °C dans l'étuve pendant une nuit. Le produit a été pulvérisé avec un mortier en céramique et un pilon et stocké dans un récipient fermé à température ambiante.



Figure III .3 : Filtration du NE en utilisant une pompe.



Figure III .4 : Mucilage du cactus « NE » après séchage dans l'étuve.

III.2. Traitement de l'eau synthétique par la procédure de la coagulation-floculation**III.2.1. Préparation de l'eau synthétique**

Une eau synthétique a été préparée par l'ajout de la bentonite dans l'eau distillée. 2 grammes de la bentonite ont été ajoutée à un litre d'eau distillée. La suspension est mise sous une agitation magnétique à l'aide d'un barreau magnétique pendant 30min et après on la laisse décanter pendant 24 heures. Le surnageant a été prélevé doucement à l'aide d'un siphon et stocké dans un erlenmeyer on l'agitant encore une fois et on mesure la turbidité initiale du surnageant à l'aide d'un turbidimètre.

III.2.2. Préparation de la solution mère du polyelectrolyte non ionique

Dans un erlenmeyer de 250 ml, nous avons versés doucement ; sous une agitation magnétique à l'aide d'un barreau magnétique ; 1,25 g du polyelectrolyte non ionique dissout dans l'eau distillée pour avoir une concentration mère du floculant de 5g/l.

III.2.3. Protocole expérimentale

Après avoir rempli chacun des six béchers de 500 ml d'eau à traiter, les échantillons sont mélangés à grande vitesse de 150 tr/min, en fixant au départ le pH en ajoutant une base (la soude 0,1N) ou un acide (acide chlorhydrique à 0,1N), puis on ajoute des concentrations croissantes du coagulant (Sulfate d'Aluminium ou mucilage du cactus NE) d'une concentration mère de 1 g/l. Cette vitesse du mélange est maintenue pendant 2 minutes. Cette étape est suivie d'une agitation lente (floculation) effectuée à 40 tr/min pendant 20 min. Après 30 min de décantation, on prélève environ 50 ml du surnageant à l'aide d'une pipette placée à une profondeur constante de 3 cm dans chaque bécher. Les mesures de la turbidité finale pour chaque bécher ainsi la mesure de l'absorbance UV à 254 nm et le pH se font immédiatement.

Le même principe lorsqu'on est utilisé des concentrations croissantes du polyelectrolyte non ionique avec la dose optimale du Sulfate d'Aluminium. En outre on ajoute des concentrations ascendantes du mucilage du cactus NE comme biofloculant avec la dose optimale du sulfate d'aluminium. Sachant que la concentration mère du mucilage du cactus NE que ce soit un coagulant naturel ou bien comme étant biofloculant est de 1g/l.

III.2.4. Technique expérimentale

III.2.4.1. Jar-test

Sa simplicité d'emploi et une bonne reproductibilité des résultats en font un appareil bien adapté à l'étude de la coagulation-floculation.

Le Jar-test que nous avons utilisé, de marque AQUA LYTIC, comporte 6 agitateurs dont la vitesse de rotation peut varier entre 20 et 300 tr/min. Les pales sont de type à hélices (75mm x 20mm) et le volume des béchers est de 1 litre (hauteur 185 mm, diamètre extérieur 94 mm).



Figure III .5: Dispositif expérimental de la coagulation-floculation « Jar-test ».

III .2.4.2. Turbidimètre

Le turbidimètre HACH 2100 N mesure la turbidité dans une plage de mesure de 0,01 à 1100 NTU/FNU. La source de lumière utilisée est une DEL (diode électroluminescente) de longueur d'onde 860 nm.

La lumière rayonnée est réfléchiée par les particules (turbidité) existantes. La lumière diffusée est ensuite mesurée par un photodétecteur disposé en angle droit (90°C) par rapport à la source lumineuse.

Ce principe dit nephelométrique est décrit en détail dans la norme DIN EN ISO 7027, qualité de l'eau .L'étalon standard international de turbidité est la formazine. Fondé sur ce

dernier, le turbidimètre HACH 2100 N détermine la turbidité des liquides aqueux en FNU (Formazine Nephelometric Units - Unités Nephelométriques de Formazine).



Figure III .6: Turbidimètre.

III.2.4.3. pH-mètre

Le pH-mètre utilisé dans ce projet est constitué d'un boîtier électronique permettant l'affichage de la valeur numérique du pH et d'une sonde de pH constituée d'une électrode de verre permettant la mesure et d'une électrode de référence. Son fonctionnement est basé sur le rapport qui existe entre la concentration en ions H_3O^+ (définition du pH) et la différence de potentiel électrochimique qui s'établit dans le pH-mètre une fois plongé dans la solution étudiée.



Figure III .7: pH-mètre

III.3. La réduction de la matière organique naturelle (AH) par le processus de la coagulation-floculation

Les substances humiques (SH) représentent la majeure partie du carbone organique globalement distribué dans les environnements aquatiques et terrestres. Elles sont formées par des réactions de polycondensations au cours de la décomposition des résidus végétaux et animaux et par des transformations microbiologiques des biomolécules provenant de ces matériaux. En général, ces substances sont des mélanges très complexes dont la composition est fortement influencée par les processus d'humification. Selon leur solubilité dans l'eau, les SH sont classées en trois fractions distinctes [63] :

- Acides Fulviques (AF) : fraction soluble dans toute la gamme du pH ;
- Acides Humiques (AH) : fraction soluble en milieu alcalin et insoluble en milieu acide ($\text{pH} < 2$) ;
- Humine (H) : fraction insoluble quel que soit le pH du milieu.

Les acides humiques AH utilisés, de solubilité dans l'eau $S_{\text{eau}} = 5 \text{ g.L}^{-1}$ et de longueur d'onde maximale $\lambda_{\text{max}} = 254 \text{ nm}$, ont été obtenus après purification des AH de type ACROS.

III.3.1. Préparation de la solution mère

La solution des AH utilisés est préparée à des concentrations inférieures à leur solubilité, dans des flacons teintés ou sombres. Cette solution, de concentration molaire de 10 mg.L^{-1} est préparée à partir d'une solution mère de 1 g.L^{-1} préalablement préparée (1 g des acides humiques synthétique de marque « ACROS-Sodium Salt. New Jersey USA $\text{C}_{10}\text{H}_{12}\text{O}_5\text{N}$ » dilué dans 62,4 mL de NaOH (2N), complété à 1L de l'eau distillée. La solution obtenue est mise sous une agitation pendant 48 heures, avec une couverture anti-lumière (utilisation du papier aluminium) afin d'éviter la dégradation des acides humiques par les UV. La conservation de la solution se fait dans un endroit sombre et à une température de $4 \text{ }^\circ\text{C}$.

L'eau distillée utilisé pour la préparation des solutions a un $\text{pH} = 6$.

III.3.2. Etablissement de la courbe d'étalonnage

Pour dresser la courbe d'étalonnage, une série de six solutions des AH de concentrations différentes allant de 2 ; 4 jusqu'à 10 mg.L^{-1} est préparée par dilutions successives dans des fioles teintées ou sombres à partir d'une solution mère de concentration donnée. Ces solutions étalons

sont, par la suite, analysées par spectrophotométries UV-Visible, ce qui permet d'obtenir l'absorbance qui correspond à chaque concentration (annexe C).

III.3.3. Protocole expérimentale

C'est la même procédure écrite en III.2.3. , sauf qu'on travail par une eau synthétique d'acide humique d'une concentration de 10 mg/l.

III.3.4. Méthode d'analyse utilisée

- **Spectrophotométrie UV-VISIBLE**

La spectrophotométrie est une méthode du dosage directe qui ne nécessite pas la détermination de standard [64]. Elle est basée sur l'étude de la variation d'absorption de la lumière par un milieu, en fonction de la variation de la concentration d'un composé dont le domaine du spectre UV (entre 200-400 nm) et celui du visible (entre 400-700 nm).

La concentration d'une substance donnée est calculée en mesurant l'absorption relative de la lumière par rapport à celle d'une substance de concentration connue.

En analyse spectrophotométrique, la lumière utilisée est monochromatique. Cette analyse permet de travailler sur de faibles quantités de substances et elle est sans incidence sur l'échantillon.

La spectrophotométrie UV-Visible est basée sur les transitions électroniques des électrons de valence par absorption. Pour avoir des spectres UV-Visible, on procède de la manière suivante :

Une source de lumière est rendue monochromatique à travers un système dispersent (prisme) ou un système diffractant (réseau). Le faisceau est alors dédoublé. Un faisceau traverse la cuve du solvant. Un photomultiplicateur enregistre le spectre de transmittance ($T=I/I_0$) puis traite l'information pour donner les absorptions aux différentes longueurs d'ondes. Les spectres des acides humiques ne présentent pas des bandes d'absorption bien définies [64].

Dans ce travail, les matières organiques (AH) présentes dans l'échantillon à analyser absorbent la lumière à la longueur d'onde $\lambda= 254$ nm.

III.3.5. Mesure de l'absorbance (D.O) en utilisant l'appareil (HACH DR 4000U)

- Presser l'interrupteur placée à gauche en dos de l'appareil (on/off) ;
- Attendre que le bip retentisse et soulever l'écran pour réaliser et soulever l'écran pour réaliser la programmation. Régler la longueur d'onde en allant à λ unique ;
- Appuyer sur « aller à λ », saisir la valeur de 254 nm, puis appuyer sur « entrer » ;
- Attendre l'indication sur l'écran de l'appareil affiche 254 nm ;
- Remplir la cuve en quartz de 1 cm de trajet optique avec de l'eau purifiée ;
- S'assurer qu'il n y pas de bulles d'air et bien essuyer les parois de la cuve ;
- Insérer la cuve avec l'eau purifiée et appuyer sur « zéro », l'écran affiche =0,000 ;
- Insérer la cuve avec l'étalon (solution fille) et appuyer sur « lire », l'écran affiche une valeur entre 0.011 et 0.013 ;
- Vider la cuve et remplir avec l'échantillon à analyser, fermé le couvercle de l'appareil et mesurer ensuite l'absorbance en notant la première valeur DO affichée.

III.4. Application aux eaux du barrage Bouroumi**III.4.1. Méthodes d'analyses utilisées****III.4.1.1. Dosage d'Aluminium**

- Réactifs
 - Thiosulfate de sodium, concentration 0,028 N

Introduire, dans un bécher de 1 litre, 28,2 ml de thiosulfate de sodium (1N).

- Acide sulfurique, concentration 0,05 N

Introduire dans un bécher de 1 litre, 40 ml d'acide sulfurique (1N), et compléter à 1000 ml avec l'eau distillée.

- Acide ascorbique, concentration 10 g/l

Dissoudre 1 g d'acide ascorbique ($C_6H_8O_6$) dans 100 ml d'eau distillée.

- Solution tampon de pH 6,2

Dissoudre 37,2 g d'acétate d'ammonium dans un bécher d'un litre. Compléter à 1000 ml avec l'eau distillée. Ajouter de l'acide acétique, sous une agitation, jusqu'à obtenir un pH de 6,2 mesuré avec une électrode de mesure.

- Solution mère d'ériochrome cyanine (indicateur coloré), concentration 10g/l

Dissoudre 10 g d'ériochrome cyanine dans un bécher d'un litre, compléter à 1000 ml d'eau distillée.

- Solution fille d'ériochrome cyanine (indicateur coloré), concentration de 0,1 g/l.

Verser 1 ml de la solution mère et compléter à 100 ml avec de l'eau distillée.

- Solution mère de l'Aluminium de 1 g/l.
- Solution fille d'Aluminium de concentration 0,001 g/l

Verser 1ml de la solution mère et compléter à 1000 ml avec l'eau distillée.

- Préparation et mesure de la gamme d'étalonnage

Tableau III.1. Concentration et volume du solution fille d' Al^{3+} :

Volume de solution fille d' Al^{3+} (ml)	Concentration en Al^{3+} (mg/l)
0	0
2	0,04
3	0,06
4	0,08
5	0,1
6	0,12
7	0,14
8	0,16
9	0,19
10	0,2
15	0,3

- Verser 25 ml de chaque étalon dans une fiole de 50 ml ;
- Ajouter à chaque étalon les réactifs dans l'ordre suivant ;
 - 0,5 ml de thiosulfate de sodium 0.028 N ;
 - 1 ml d'acide ascorbique de concentration 10 g/l ;
 - 1 ml d'acide sulfurique de 0,04 N ;
 - 10 ml de la solution tampon (pH = 6,2) ;
 - 5 ml de la solution fille d'ériochrome cyanine.
 - Compléter chaque fiole à 50 ml avec l'eau distillée, et homogénéiser ;
 - Effectuer la lecture spectrophotométrique à la longueur d'onde 535 nm.

- Mesure de l'échantillon
- Verser 25 ml d'échantillon à analyser dans une fiole de 50 ml ;
- Ajouter à chaque étalon les réactifs dans l'ordre suivant :
 - 0,5 ml de thiosulfate de sodium 0,028 N et agiter ;
 - 1 ml d'acide ascorbique concentration 10 g/l ;
 - 1 ml d'acide sulfurique 0,04 N ;
 - 10 ml de la solution tampon pH = 6,2 ;
 - 5 ml de la solution fille d'ériochrome cyanine.
- Compléter chaque fiole à 50 ml avec de l'eau distillée, et homogéniser ;
- Laisser reposer 10 min avant mesure au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 535 nm ;
- Allumer l'appareil ;
- Appuyer sur « programme utilisé » ;
- Introduire le numéro du programme Al^{3+} ;
- Insérer la cuve avec l'eau distillée, et appuyer sur « zéro » ;
- Remplir la cuve avec l'échantillon à analyser et appuyer sur « lire » ;
- La concentration en Al^{3+} est affichée sur l'écran en mg/l.

III.4.1.2. Dosage du Sulfate

- **Réactifs**
 - Solution mère du Sulfate du Sodium, concentration 1g/l
 - Solution stabilisante : dans une fiole jaugée de 1000 ml, mettre 100 ml d'eau distillée. Ajouter 60 ml d'acide chlorhydrique pur (densité 1,19) puis 200 ml d'éthanol, 150 g de Chlorure de Sodium (NaCl) et 100 ml de Glycérol. Compléter à 1000 ml avec de l'eau distillée.
 - Solution de Chlorure de Baryum, 0,01 N : Peser 150 g de Chlorure de Baryum ($BaCl_2$), verser dans une fiole de 1000 ml et y ajouter 5 ml d'acide Chlorhydrique pur. Compléter à 1000 ml avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.
- Spectrophotomètre Jasco V-530
 - Allumer l'ordinateur ;
 - Allumer l'appareil ;
 - Cliquer sur l'icône « spectra-manager » ;
 - Cliquer sur file, puis open ;
 - Cliquer sur méthode ;

- Choisir le programme SO_4^{2-} ;
- Insérer la cuve avec l'eau distillée ;
- Appuyez sur auto-zéro ;

La détermination de la teneur en SO_4^{2-} se fait de la manière suivante :

- Prendre 20 ml d'échantillon à analyser et ajouter 5 ml de la solution stabilisante ;
- Ajouter 2 ml de chlorure de Baryum ;
- Compléter avec 100 ml d'eau distillée ;
- Laisser pendant 1 min sous agitation mécanique rapide ;
- Remplir rapidement la cuve avec l'échantillon à analyser puis appuyer sur start ;
- La concentration des SO_4^{2-} est affichée sur l'écran en mg/l.

III.4.1.3. Dosage de la dureté

III.4.1.3.1. Dosage du Calcium par la méthode titrimétrique de l'EDTA

- **Principe**

Titration des ions de Calcium avec une solution aqueuse de l'EDTA à un pH compris entre 12 et 13. L'indicateur utilisé est le murexide, qui forme un complexe rose avec le calcium. Lors du titrage, l'EDTA réagit avec les ions calcium, l'indicateur vire alors de la couleur violet.

- **Réactifs**

- Hydroxyde de sodium, solution 2 N : Dissoudre 8 g d'hydroxyde de sodium (NaOH) dans 100 ml d'eau distillée, conserver dans une bouteille en polyéthylène.
- Calcium, solution de référence à 100 mg/l :
- Une solution mère de commerce titrisol à 1 g/l en calcium peut être utilisée ;
- Préparation de la solution fille à 100 mg/l de calcium : Introduire 5 ml de la solution mère à 1 g/l de calcium à l'aide d'une solution de concentration 100 mg/l.
- EDTA, solution titré 0,01 mol/l : sécher une portion d'EDTA à 80 °C pendant 2 heures (étuve), dissoudre ensuite 3,725 g du sel sec dans l'eau distillée et diluer à 1000 ml.

- **Dosage**

Prélever une prise d'essai de 50 ml de l'échantillon, ajouter 2 ml de la solution d'hydroxyde 2N et une pincé d'indicateur (Murexide). Bien mélanger le tout. Titrer avec la solution d'EDTA, en versant lentement. Le virage est atteint lorsque la couleur devient nettement violette. La couleur ne doit plus changer avec l'ajout d'une goutte supplémentaire de la solution d'EDTA.

La teneur en Ca^{2+} , exprimée en mg/l, et donnée par l'équation :

$$\text{Ca}^{2+} = \frac{C_1 \cdot V_1 \cdot A}{V_0} \cdot 1000$$

Avec :

C_1 : Concentration de l'EDTA (mol/l) ;

V_0 : Volume de l'échantillon 50 ml (ml) ;

V_1 : Volume de la solution d'EDTA (ml) ;

A : Masse atomique du calcium (40 g) .

III.4.1.3.2. Dosage de la somme des ions de Ca^{2+} et Mg^{2+} par la méthode titrimétrique à l'EDTA

- **Principe**

Titration par complexométrie des ions calcium et magnésium avec une solution d'EDTA à pH 10. L'indicateur utilisé est le noir ériochrome T, qui donne une couleur rose en présence des ions du calcium et magnésium. Lors de titration avec l'EDTA la solution vire au bleu.

- Solution tampon de pH = 10 : dissoudre 67,5 g de chlorure d'ammonium (NH_4Cl) dans 570 ml de solution ammoniacale à 25 % et diluer à 1000 ml avec l'eau distillée.

- **Dosage**

Prélever une prise d'essai de 50 ml. Ajouter 4 ml de solution tampon pH 10 et une pincée de l'indicateur, bien mélanger. La solution doit se colorer en rose. Titrer immédiatement à l'aide de la solution EDTA, en versant lentement tout en agitant constamment jusqu'au virage au bleu.

Les résultats ainsi que leurs interprétations et discussions seront exposés dans le chapitre IV.

Des essais expérimentaux ont été menés pour évaluer la faisabilité et l'efficacité de l'utilisation du mucilage du cactus, pour la coagulation d'une suspension synthétique à base de bentonite

IV.1. La réduction de la turbidité par coagulation-floculation

IV.1.1. coagulation au Sulfate d'Aluminium

Les résultats obtenus lors des essais de la coagulation-floculation sur l'eau synthétique avec le Sulfate d'Aluminium à différents pH sont reportés dans les tableaux IV.1, IV.2, IV.3. Les figures IV.1, IV.2, IV.3 représentent l'évolution du pourcentage de réduction de la turbidité en fonction de la concentration du Sulfate d'Aluminium.

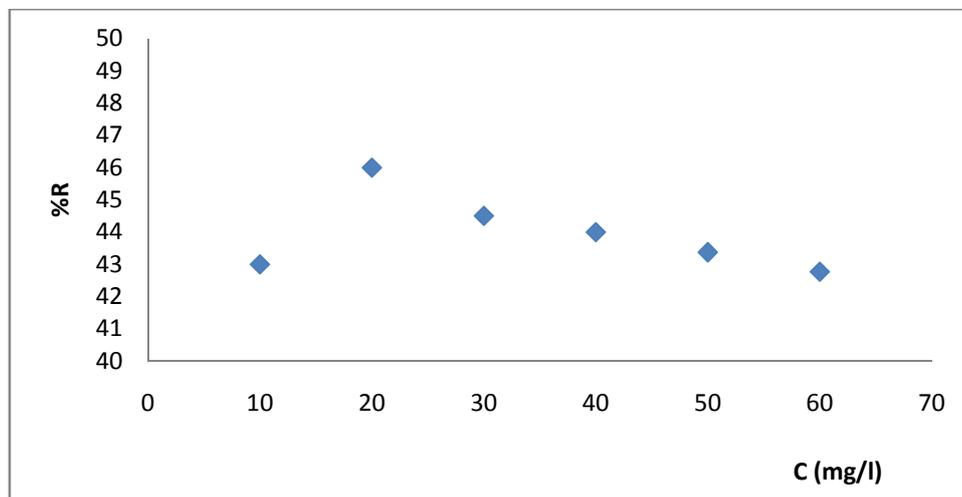


Figure IV .1 : Variation du pourcentage de réduction de la turbidité en fonction de la concentration du Sulfate d'Aluminium à pH = 4.

Les pourcentages de réduction de la turbidité obtenus n'excède pas les 46% à pH=4. Le meilleur résultats obtenu à une concentration optimale du Sulfate d'Aluminium de 20 mg/l correspond à un pourcentage de réduction 46 %. Ce résultat est du essentiellement à la faible valeur du pH choisie qui n'est pas dans la gamme du pH optimal du Sulfate d'Aluminium.

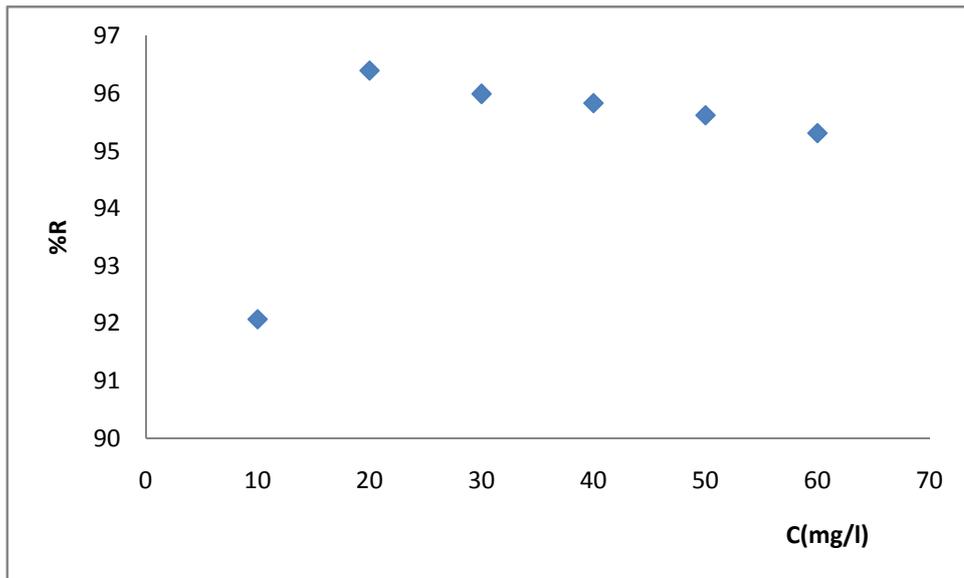


Figure IV .2 : Variation du pourcentage de réduction de la turbidité en fonction de la concentration du Sulfate d'Aluminium à pH = 7.

La concentration optimale du Sulfate d'Aluminium est de 20 mg/l pour un pourcentage de réduction de 98,90% à pH =7. Ce pourcentage est très important montrant l'efficacité de ce coagulant au pH neutre.

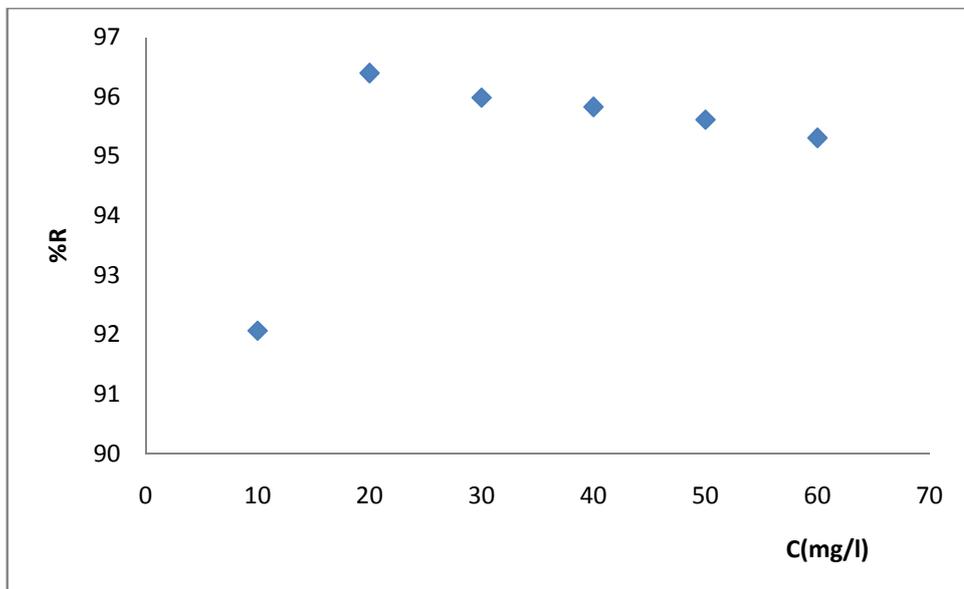


Figure IV .3 Variation du pourcentage de réduction de la turbidité en fonction de la concentration du Sulfate d'Aluminium à pH = 8.

La concentration optimale du Sulfate d'Aluminium est de 20 mg/l pour un pourcentage de réduction de 96,40% à pH =8. Ce pourcentage est très important montrant l'efficacité de ce coagulant au pH légèrement basique.

Dans les trois cas (pH = 4, 7, 8), on note une diminution du pH lors de l'ajout du coagulant. En effet, l'ajout du Sulfate d'Aluminium contribue à rendre le milieu acide par la libération de l'acide sulfurique suivant la réaction IV .1



Par ailleurs, le pH est un facteur très important puisque les espèces d'Aluminium présentées dépendent du pH (Figure IV .4)

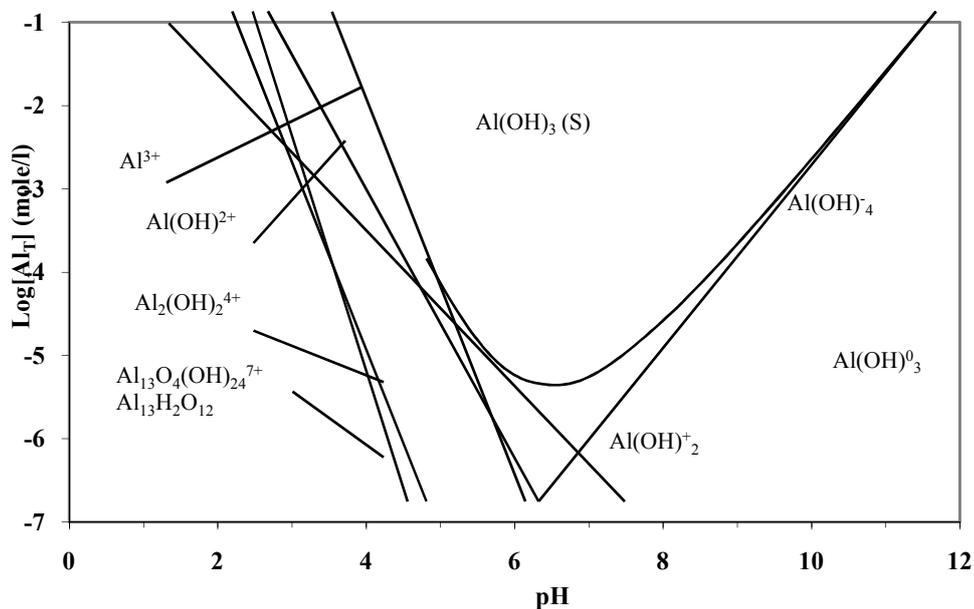


Figure IV .4 : Diagramme de solubilité dans l'eau de Al(OH)₃ (S) amorphe à 25°C.

La solubilité du Sulfate d'Aluminium est reportée dans de nombreuses expériences est en accord avec la figure IV.4. La formation du précipité formé à partir de l'hydrolyse du Sulfate d'Aluminium en jar-test [63] peut exactement se représenter par la solubilité de Al(OH)₃ (S) amorphe.

Amirtharajah et O'MELIA [5] ont étudié la spécification du Sulfate d'Aluminium en fonction du pH et ont montré que :

- pH < 4,5, les espèces prédominantes sont des monomères et des polymères de petite taille;
- pH 4,5 à 5,0, le précipité de $\text{Al}(\text{OH})_3$ (s) retenu par une membrane 0,45 μm augmente de 50% à 92 % environ ;
- pH 5,0 à 7,0, 92 à 99% d'Aluminium est sous forme de précipité de $\text{Al}(\text{OH})_3$ (s).

Dans un $7 < \text{pH} < 8$: dans cette gamme du pH le mécanisme prédominant est la sweep coagulation, le floc constitué de molécules de $\text{Al}(\text{OH})_3$ possède habituellement une charge positive. La présence de certains anions et de particules colloïdales dans la solution accélère la formation du précipité, c'est l'étape de la "sweep coagulation" .

La « sweep coagulation » est beaucoup plus rapide que la coagulation par adsorption, mais elle fournit un floc moins compact et moins résistant.

IV.2.2. coagulant naturel « mucilage du cactus NE »

Les résultats obtenus lors des essais de la coagulation-floculation sur l'eau synthétique avec le mucilage du cactus à différents pH sont reportés dans les tableaux IV.5, IV.6, IV.7.

Les figures IV.5, IV.6, IV.7 représentent l'évolution du pourcentage de réduction de la turbidité en fonction de la concentration du mucilage du cactus.

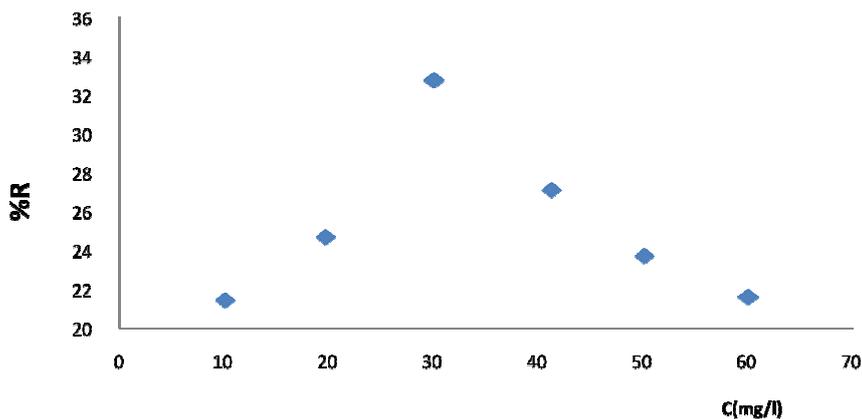


Figure IV.5 : Variation du pourcentage de réduction de la turbidité en fonction de la concentration du coagulant naturel à pH = 4.

La concentration optimale du mucilage du cactus est de 30 mg/l pour un pourcentage de réduction de 33,50% à un pH = 4. Ce faible pourcentage indique l'inefficacité du mucilage du cactus au milieu acide.

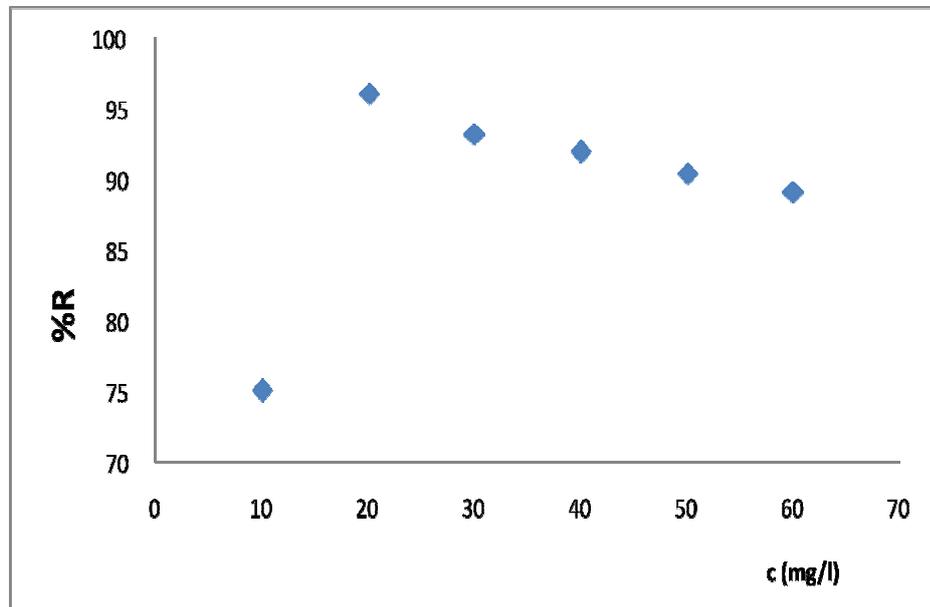


Figure IV .6 : Variation du pourcentage de réduction de la turbidité en fonction de la concentration du mucilage du cactus à $\text{pH}_i = 7$.

Le meilleur résultats obtenu à une concentration optimale du mucilage du cactus de 20 mg/l correspond à un pourcentage de réduction de 96,10 %. Cet important pourcentage indique l'efficacité du mucilage du cactus pour la réduction de la turbidité.

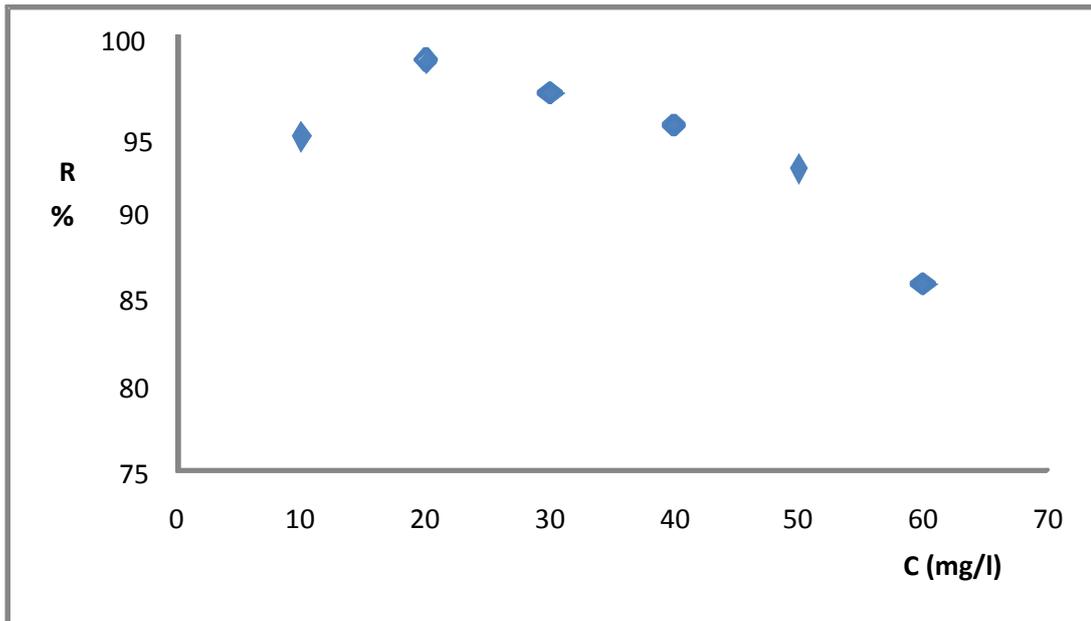


Figure IV .7 : Variation du pourcentage de la réduction de la turbidité en fonction de la concentration du NE à pH = 8.

Le mucilage du cactus a réduit considérablement la turbidité avec un pourcentage de réduction de 98,40 % correspond à 20 mg/l comme concentration optimale.

On remarque que le pH reste constant et ne varie pas avec l'ajout de la concentration du mucilage du cactus.

Pour proposer le mécanisme prédominant dans ce cas du mucilage du cactus. Miller et al. [57] ont trouvés que le potentiel zêta reste négatif et relativement constant avec l'ajout du mucilage du cactus. Ce résultat élimine le mécanisme de neutralisation de charge. De plus, le point isoélectrique du kaolin est de 2,8 qui a une surface négatif calculer à pH 10, le potentiel zêta exécuté que le mucilage du cactus possède un point isoélectrique égal à 2 qui a une charge superficielle négative à pH 10, ce qui explique le meilleur résultat de réduction de la turbidité obtenu dans un pH 8. Cette répulsion électrostatique, élimine le mécanisme de la neutralisation de charge.

La sweep coagulation, ne peut pas être le mécanisme prédominant à cause de la corrélation positive observée entre la dose optimale et la turbidité initiale. Si le mécanisme n'est pas la sweep coagulation, ni la neutralisation de charge, il nous reste que la compression de la double couche et l'adsorption et pontage.

La force ionique nécessaire pour le mécanisme de compression de la double couche. Cependant, l'analyse de la conductivité de l'eau traitée par le mucilage du cactus indique que la force ionique fournie par le mucilage du cactus lui-même n'est pas suffisante pour provoquer la coagulation par le mécanisme de la compression de double couche.

D'après ces informations, le mécanisme prédominant dans cas est l'adsorption et pontage.

IV.2.3. floculant synthétique « polyelectrolyte non ionique »

Les résultats obtenus lors des essais de la coagulation-floculation sur l'eau synthétique avec le polyelectrolyte non ionique à différents pH sont reportés dans les tableaux IV.7, IV.8, IV.9. Les figures IV.8, IV.9, IV.10 représentent l'évolution du pourcentage de réduction de la turbidité en fonction de la concentration de polyelectrolyte non ionique.

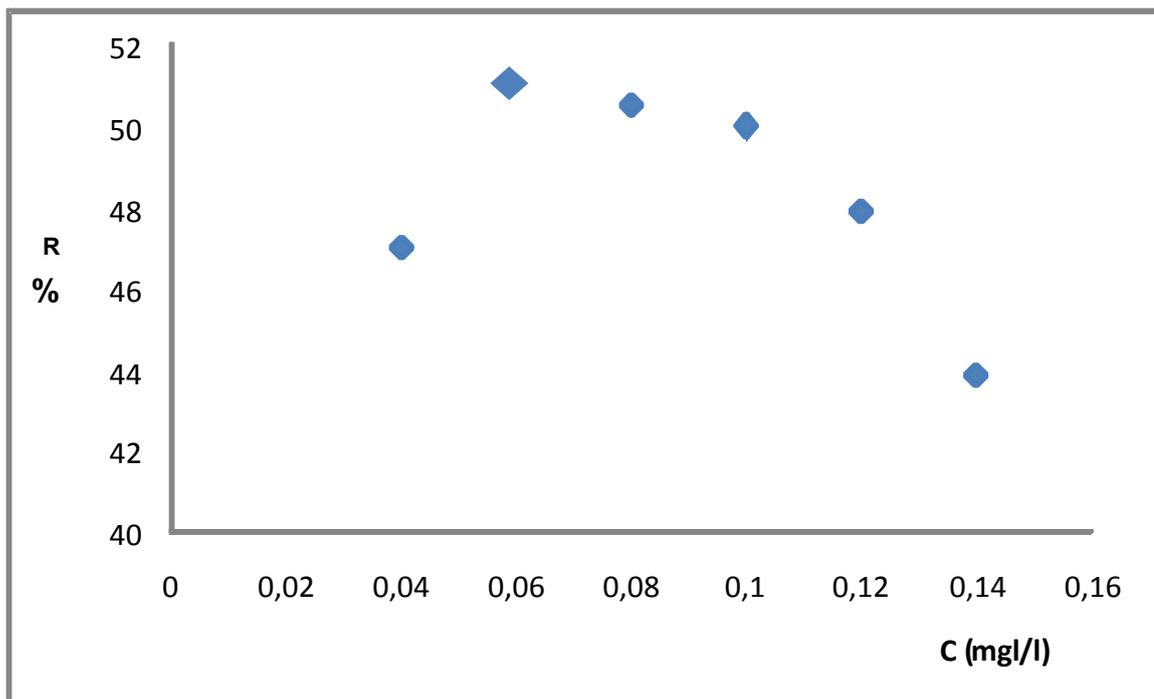


Figure IV.8 : Variation du pourcentage de la réduction de la turbidité en fonction de la concentration du floculant synthétique à pH = 4.

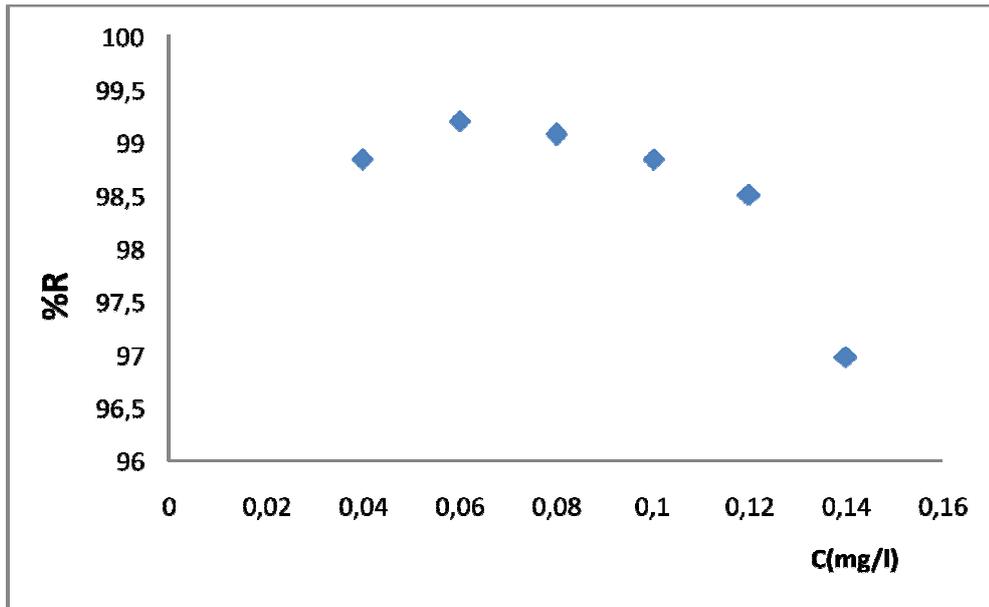


Figure IV .9 : Variation du pourcentage de la réduction de la turbidité en fonction de la concentration du floculant synthétique à pH = 7.

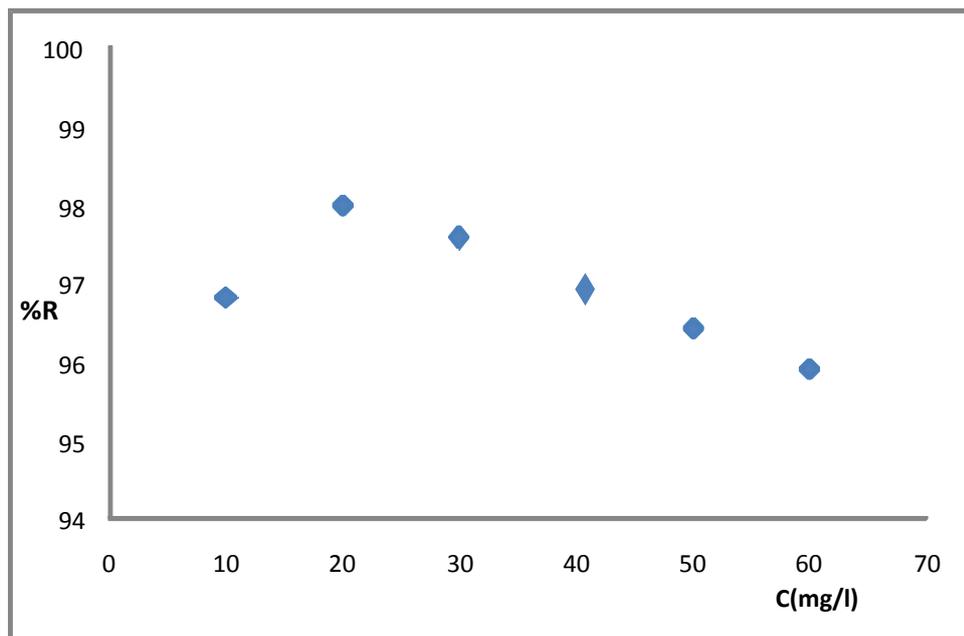
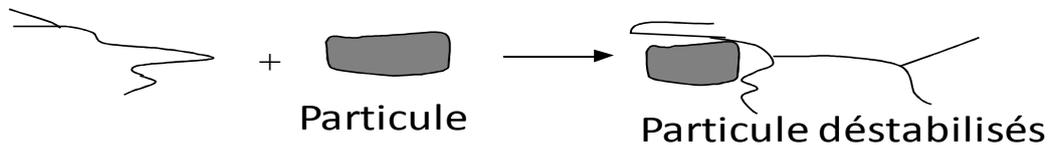


Figure IV .10 Variation du pourcentage de la réduction de la turbidité en fonction de la concentration du floculant synthétique à pH = 8.

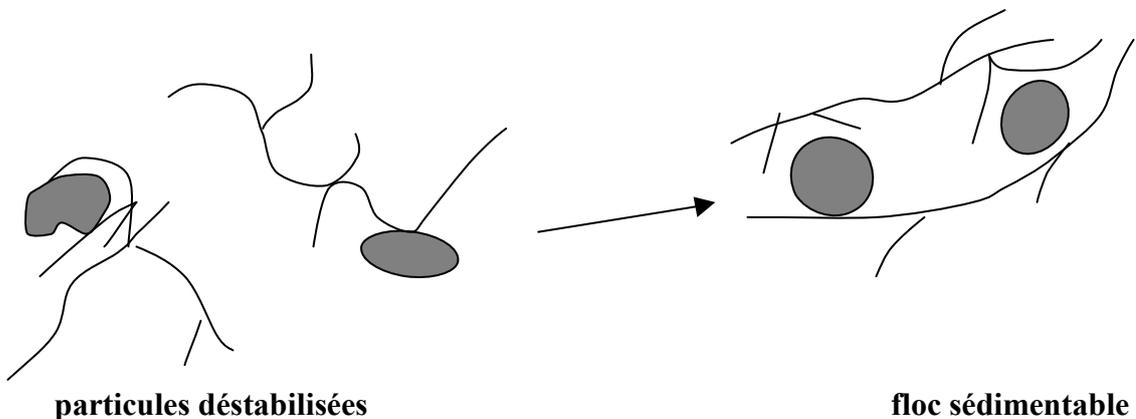
D'après ces résultats obtenus, le polyelectrolyte non ionique a permis d'augmenter le pourcentage de réduction de la turbidité par leur agrandissement du floc formés lors de la coagulation-floculation. Citons aussi que le polyelectrolyte n'as pas changé le pH finale où le pH reste constant après l'ajout du floculant.

Le mécanisme prédominant dans ce cas est le pontage, lorsqu'on utilise des polyelectrolyte constituées par des molécules de très longues chaînes contenant des groupements chimiques qui peuvent adsorber des particules colloïdales à l'une de leurs extrémités, ainsi que d'autres sites sont libres pour adsorber d'autres particules. On dit alors que les molécules de polymères forment des "ponts" entre les particules colloïdales. Il peut y'avoir une restabilisation de la suspension, la restabilisation imputable à une concentration excessive de polymères. Dans ces conditions, les sites libres de plusieurs molécules de polymères s'accrochent à une même particule colloïdale.

Coagulation par adsorption



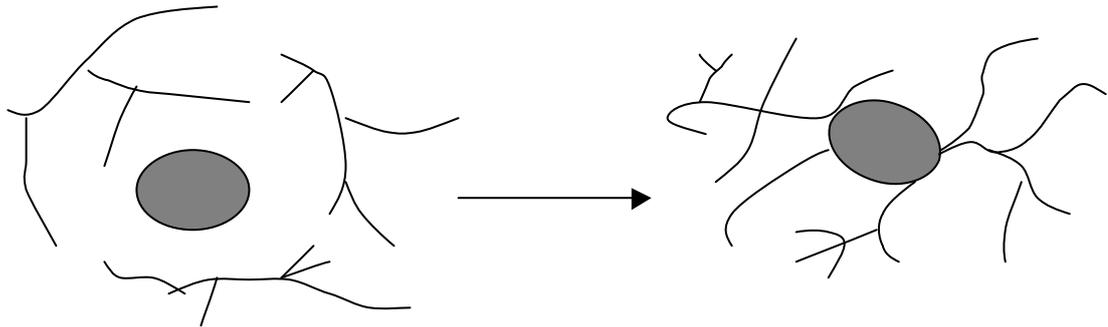
La déstabilisation optimale causée par la coagulation adsorptive s'effectue lorsqu'une partie seulement des sites d'adsorption disponibles est occupée, en laissant d'autres positions disponibles pour une seconde adsorption par pontage :



⊕ Coagulation par pontage

Les quantités de coagulant qui saturent les surfaces disponibles de la phase dispersée (colloïde) produisent un colloïde restabilisé :

⊕ Ajout en excès



IV.2.4. flocculant naturel « mucilage du cactus NE »

Les résultats obtenus lors des essais de la coagulation-floculation sur l'eau trouble, nous a permis de montrer les tableaux suivants avec leurs courbes qui illustrent le pourcentage de la réduction de la turbidité en fonction de la concentration du mucilage du cactus « NE » dans un milieu du pH acide, neutre, basique.

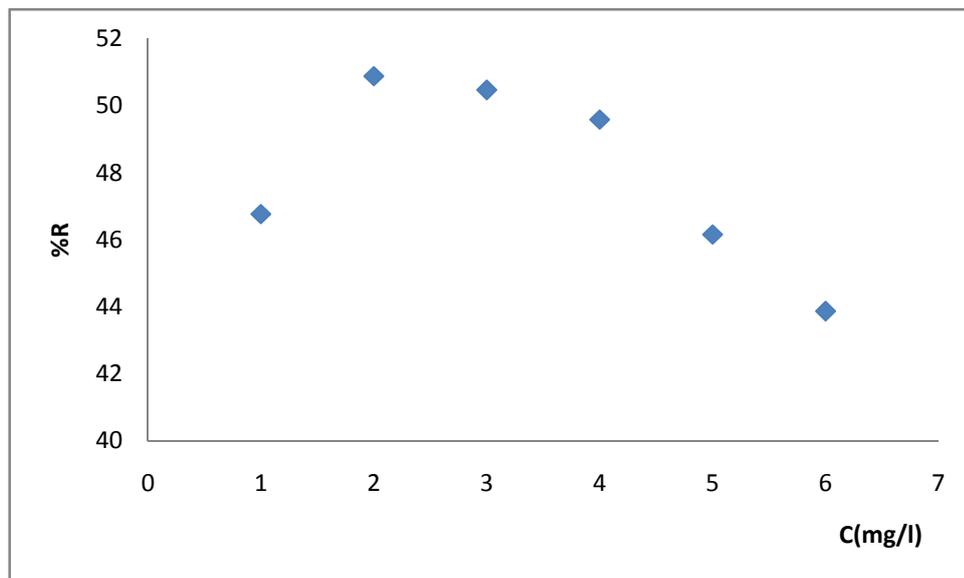


Figure IV .11 : Variation du pourcentage de la réduction de la turbidité en fonction de la concentration du flocculant naturel à pH = 4.

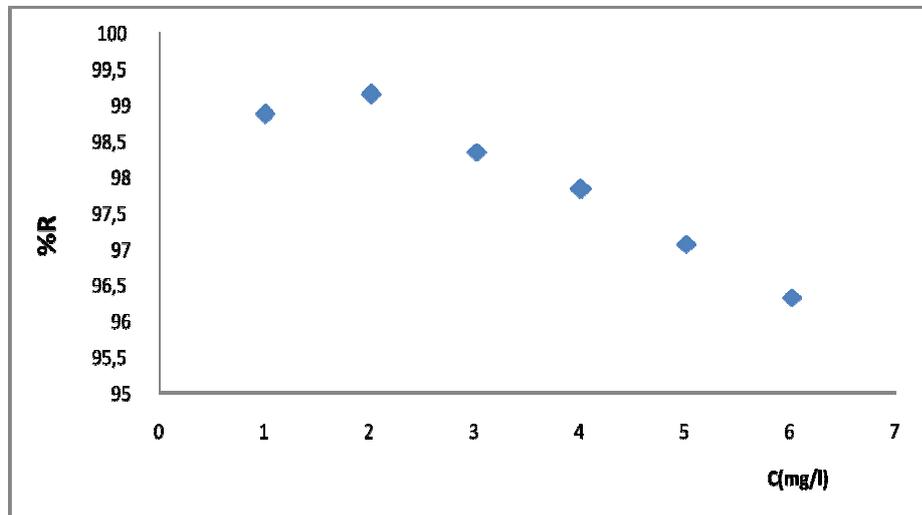


Figure IV.12 : Variation du pourcentage de la réduction de la turbidité en fonction de la concentration du flocculant naturel pH = 7.

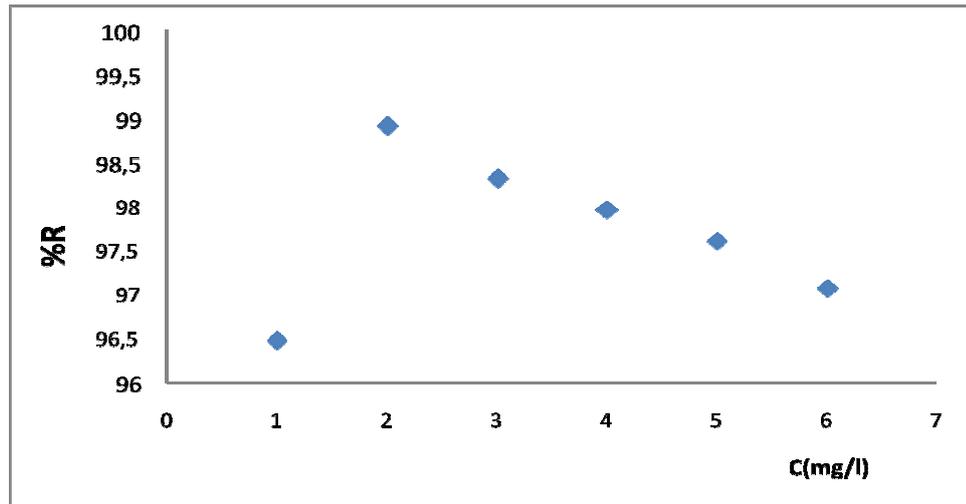


Figure IV .13 Variation du pourcentage de la réduction de la turbidité en fonction de la concentration du flocculant naturel à pH = 8.

Les résultats obtenus lors de l'utilisation du mucilage du cactus comme un bioflocculant, ont augmentés le pourcentage de réduction de la turbidité, ce qui implique l'efficacité du mucilage du cactus même à des très faibles valeurs ajoutées. Le mécanisme prépondérant dans ce cas est le pontage.

IV.2. La réduction de la matière organique naturelle AH par le processus de la coagulation floculation

Les résultats obtenus lors des essais de la coagulation-floculation sur une eau synthétique, nous a permet de montrer les tableaux suivants avec leurs courbes qui illustrent le pourcentage de la réduction de l'AH en fonction de la concentration du sulfate d'aluminium dans des différents milieux du pH.

❖ $DO_i = 0.196$; $pH_i = 4$

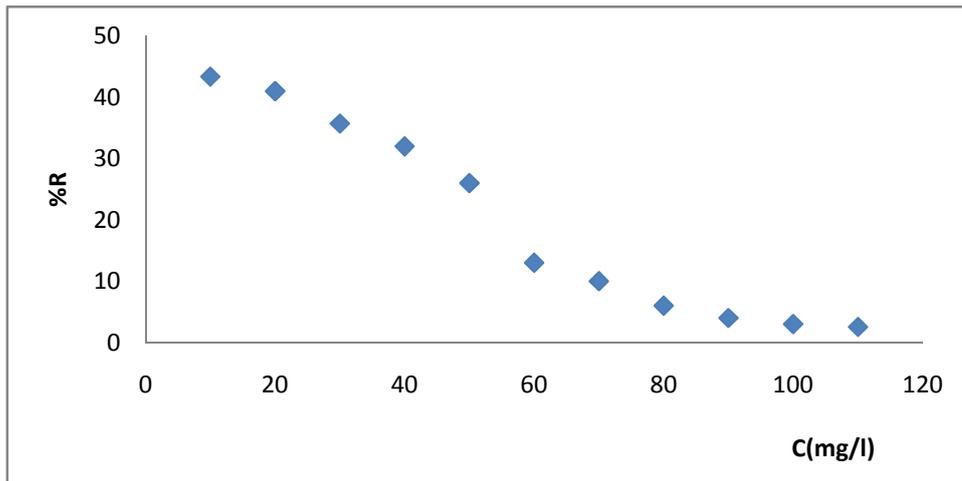


Figure IV.14 : Pourcentage de la réduction des AH en fonction de la concentration du Sulfate d'Aluminium à pH=4.

❖ $DO_i = 0,2$; $pH_i = 4,5$

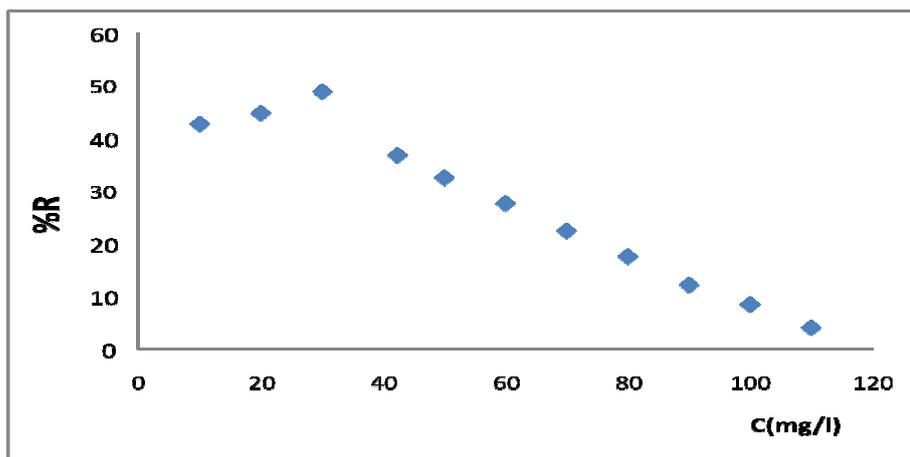


Figure IV.15 : Pourcentage de la réduction des AH en fonction de la concentration du Sulfate d'Aluminium à pH=4,5.

❖ $DO_i = 0,196$; $pH_i = 5$

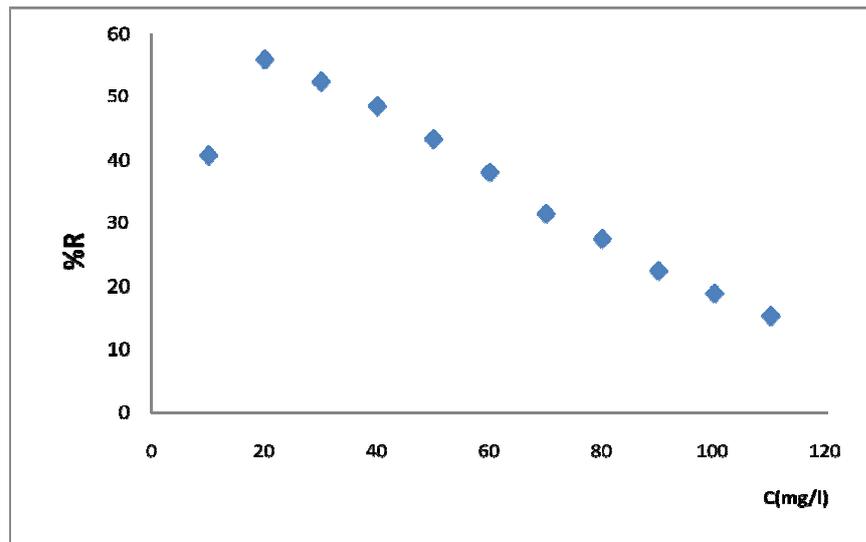


Figure IV.16 : Pourcentage de la réduction des AH en fonction de la concentration du Sulfate d'Aluminium à pH=5.

❖ $DO_i = 0,196$; $pH = 5,5$

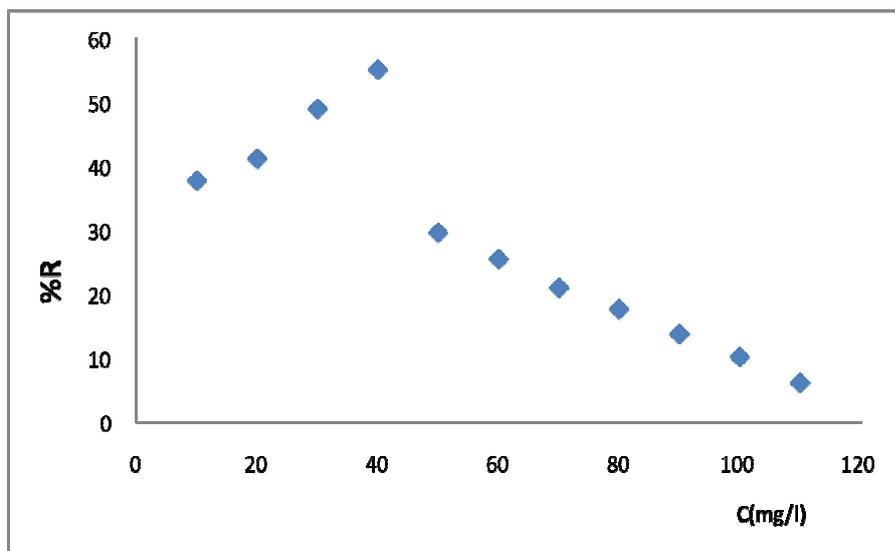


Figure IV.17 : Pourcentage de la réduction de la matière organique en fonction de la concentration du sulfate d'aluminium à pH = 5,5.

❖ $DO_i = 0,196$; $pH_i = 6$

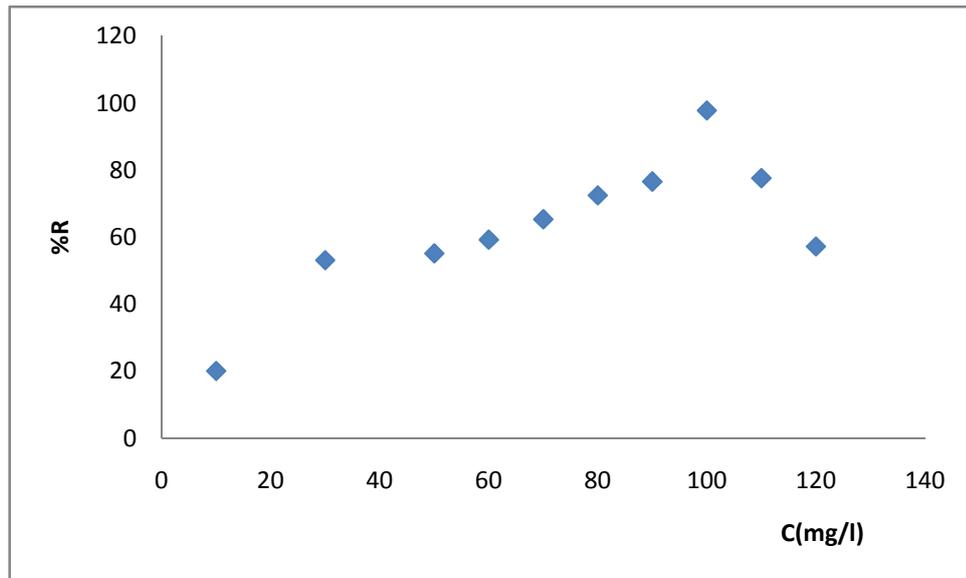


Figure IV.18 : Pourcentage de la réduction de la matière organique en fonction de la concentration du Sulfate d'Aluminium à pH = 6.

❖ $DO_i = 0,196$; $pH_i = 6,5$

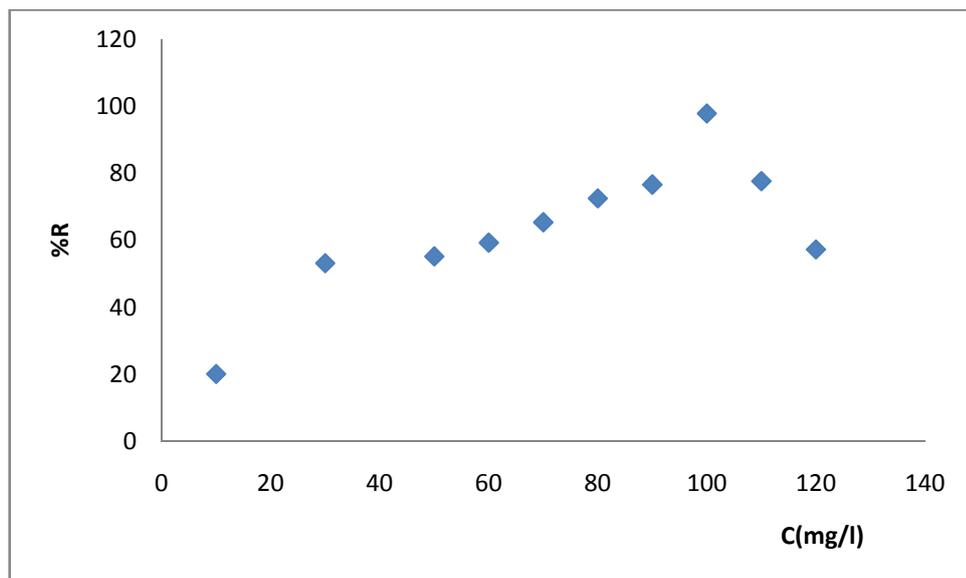


Figure IV.19 : Pourcentage de la réduction de la matière organique en fonction de la concentration du Sulfate d'Aluminium à pH = 6,5.

❖ $DO_i = 0,198$; $pH_i = 7$

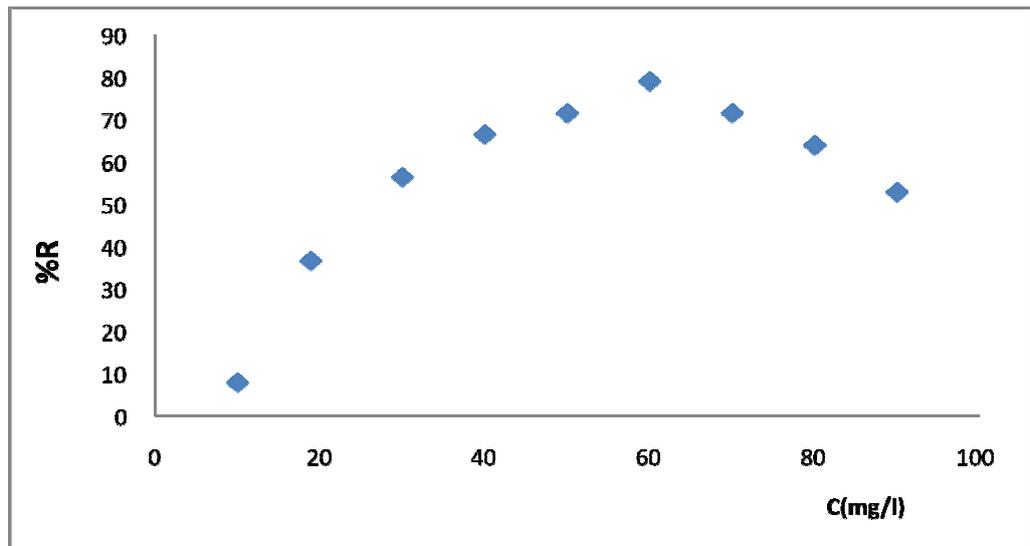


Figure IV.20 : Pourcentage de la réduction de la matière organique en fonction de la concentration du Sulfate d'Aluminium à pH = 7.

❖ $DO_i = 0,196$; $pH_i = 7,5$

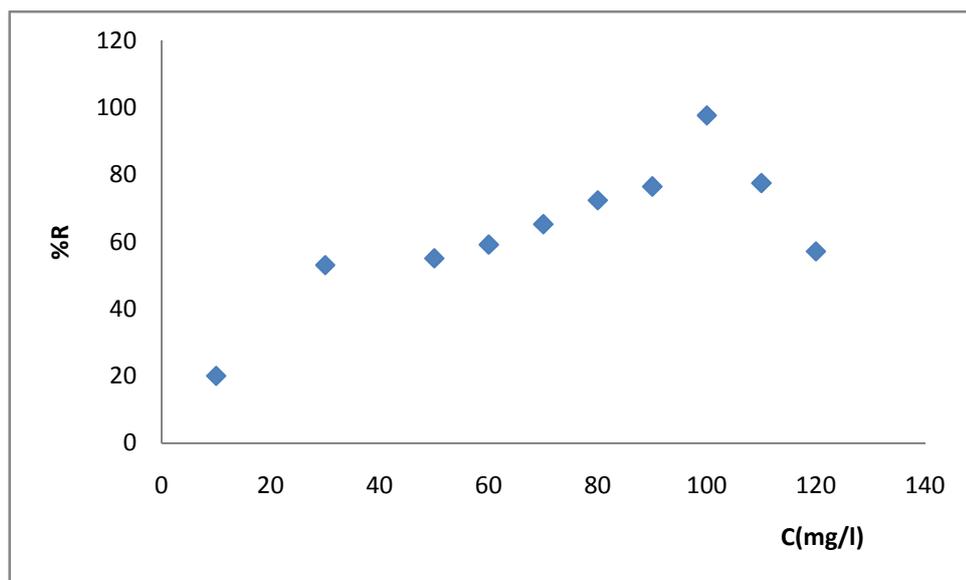


Figure IV.21 : Pourcentage de la réduction de la matière organique en fonction de la concentration du Sulfate d'Aluminium à pH = 7,5.

❖ $DO_i = 0,196$; $pH_i = 8$

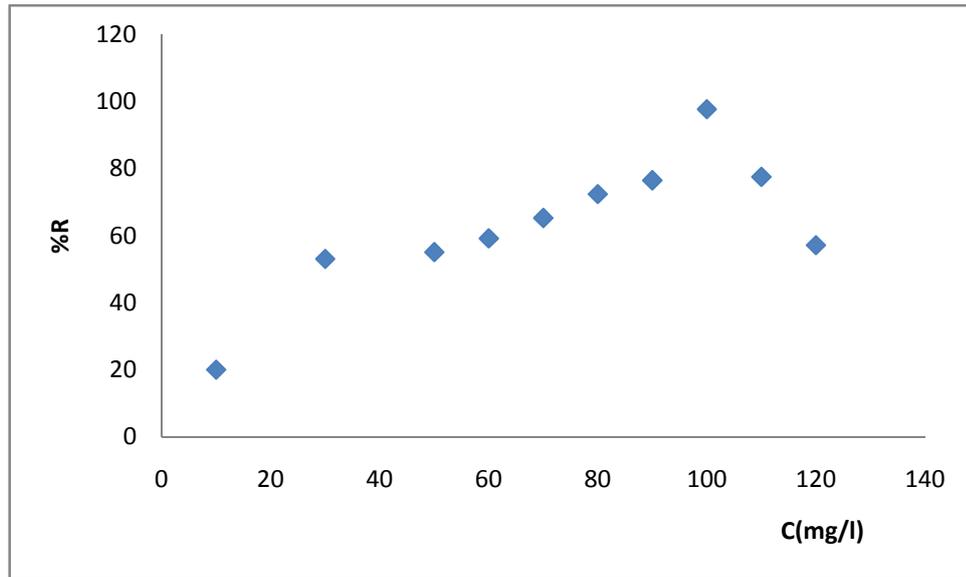
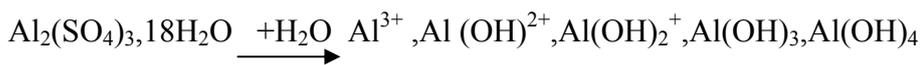


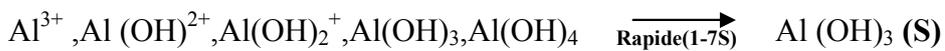
Figure IV.22: Pourcentage de la réduction de la matière organique en fonction de la concentration du Sulfate d’Aluminium à pH = 8.

L’examen de ces différents résultats nous a permis de confirmer plusieurs hypothèses concernant les différents mécanismes réactionnels entre la matière organique et l’espèce prédominante du coagulant pour chaque gamme du pH considéré.

La réaction d’hydrolyse du sulfate d’aluminium donne les espèces suivantes :



Instantanée (10⁻⁴ – 1s)



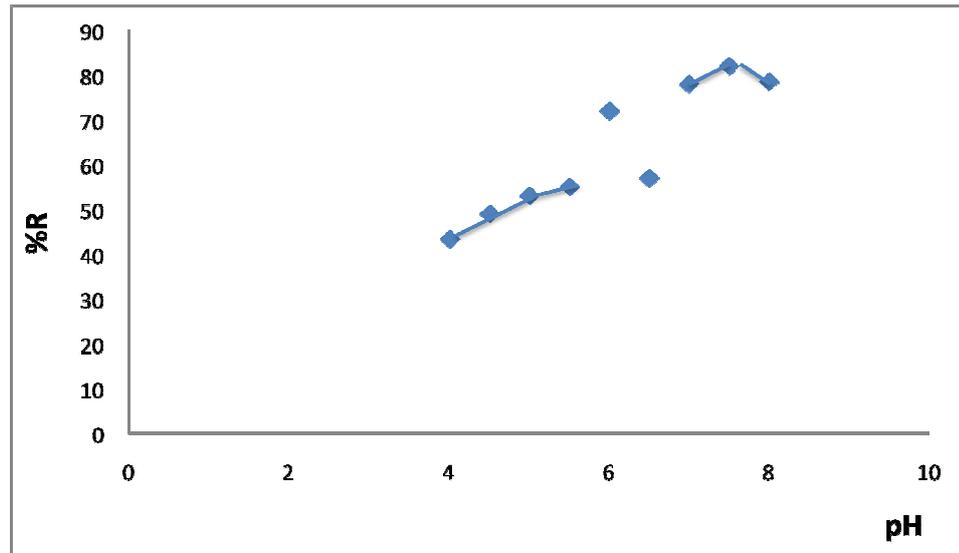


Figure IV.23 : Pourcentage de la réduction de la matière organique par le Sulfate d'Aluminium en fonction du pH.

- $\text{pH} \leq 4$: le faible pourcentage de réduction de la matière organique naturelle dissoute dans l'eau synthétique est enregistré à ces pH n'est pas essentiellement due à la précipitation de la matière organique par effet du pH très acide mais peut être aussi la conséquence d'une complexation entre les cations Al^{3+} majoritaire à ces pH et une partie de la matière organique dont la masse molaire est très élevée.
- $4 < \text{pH} \leq 6$: à ces pH les formes prédominantes de l'hydrolyse de l'aluminium sont les suivantes :



La présence majoritaire d'espèces de valence élevées va entraîner une neutralisation des charges de la matière organique naturelle dissoute dans l'eau synthétique qui favorise l'agglomération des particules.

Les réactions mises en jeu sont probablement compte tenu de la présence majoritaire de plusieurs composés d'hydroxydes d'aluminium (soluble ou insoluble).

- $6 < \text{pH} < 8$: à ces pH, la forme prédominante est $\text{Al}(\text{OH})_3 (\text{S})$. Dans ce cas, les mécanismes sont différents, les charges amenées par les espèces hydrolysées de l'aluminium ne sont pas suffisantes pour neutraliser les charges.

On assiste alors à un changement de l'état de surface de la matière organique naturelle, soit par adsorption soit par la formation d'un complexe de surface. Ce changement de l'état

de surface de la matière organique, va favoriser leur précipitation par les hydroxydes d'aluminium $\text{Al}(\text{OH})_3$ majoritaire à ces pH. Un mécanisme à déjà proposé par Dempsey [33] et Sauvart et al. [65] .

En dernier, on peut résumer que deux phénomènes importants agissent en fonction du pH (acide, basique), de la concentration d'Al (faible et forte concentration) , d'une part, et des espèces d'aluminium présentes, d'autre part, semblent régler les mécanismes de coagulation-floculation de la matière organique naturelle dissoute dans l'eau synthétique.

- ❖ Un mécanisme d'adsorption-neutralisation de la matière organique naturelle dissoute dans l'eau synthétique, sur le précipité d'hydroxyde d'aluminium chargé positivement.
- ❖ Une complexation entre la matière organique naturelle contenue dans l'eau synthétique, et les espèces monomères d'aluminium prédominante pour chaque gamme du pH considéré.

IV .3.Application aux eaux du barrage Bouroumi

IV .3.1.Introduction

La station de traitement des eaux Mitidja-Ouest a été installée en 1987 comme station du pompage, et en 2004 a devenue une mini-station pour répondre aux besoins en eaux potable des deux communes : Ahmer El-Ain et Bourkika. Cette mini-station se trouve à la cité Brahim Ben Omar à Ahmer El-Ain wilaya de Tipaza.

Le barrage Bouroumi se trouve à 8 km à l'est du village de Bou-Medfaa. Selon ANBT il a une capacité totale de 188.10^6 m^3 , il permet d'assurer l'irrigation de la Mitidja-ouest et l'alimentation de la mini-station de SEEAL de traitement des eaux potable.

IV.3.2.Coagulant synthétique « sulfate d'aluminium »

Tableau IV.13 : Turbidité initiale = **109 NTU** ; Conductivité initiale = **1117 $\mu\text{s}/\text{cm}$** ;
Température = **22°C** ; pH_i = **8,40**

[sulfate d'aluminium] (mg/l)	10	20	30	40	50	60
pH	8,09	7,94	7,80	7,67	7,56	7,46
turbidité	2,37	0,93	1,22	1,3	1,56	1,72
%R	97,83	99,14	98,88	98,80	98,57	98,42

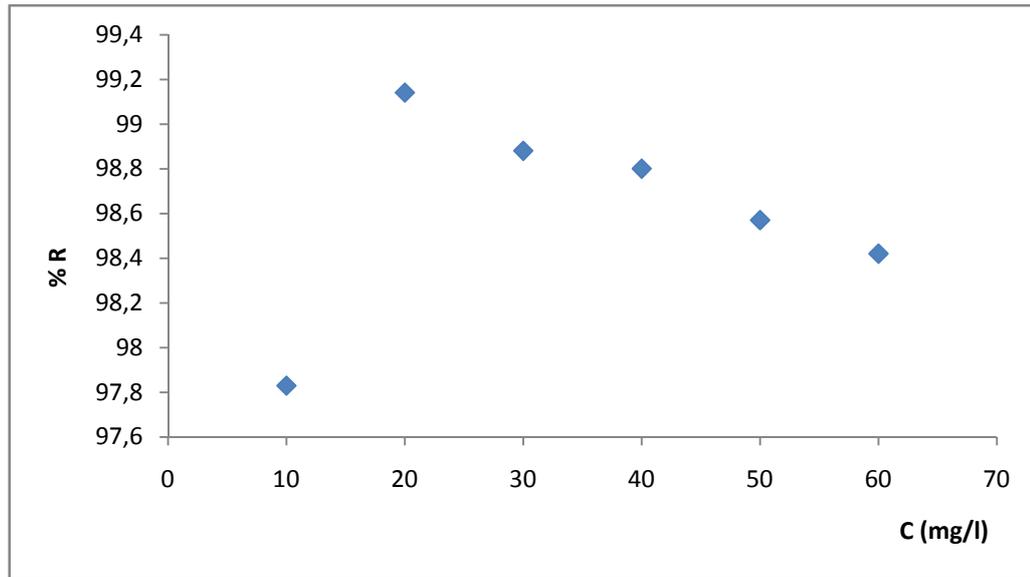


Figure IV.24 : Pourcentage de la réduction de la turbidité en fonction de la concentration du sulfate d’aluminium à pH = 8,40.

La concentration optimale du Sulfate d’Aluminium est de 20 mg/l pour un pourcentage de réduction de 99,14 % à pH 8. Ce pourcentage est très important montrant l’efficacité de ce coagulant au pH légèrement basique. On remarque une diminution du pH due à l’ajout du Sulfate d’Aluminium.

IV .3.3. Flocculant synthétique « polyelectrolyte non ionique »

Tableau IV.1 : Turbidité initiale = 109 NTU ; Conductivité initiale = 1117µs/cm ;
Température = 22°C ; pH_i = 8,40

[sulfate d'aluminium] (mg/l)	20	20	20	20	20	20
floculant (mg/l)	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14
pH	7,94	7,94	7,94	7,94	7,94	7,94
turbidité	0,92	0,89	0,95	0,98	1,23	1,25
%R	99,15	99,18	99,13	99,10	98,87	98,85

D'après ces résultats obtenus, le polyelectrolyte non ionique a permis d'augmenter le pourcentage de réduction de la turbidité par leur accroissement du floc formés lors de la coagulation-floculation. Citons aussi que le polyelectrolyte n'as pas changé le pH finale où le pH reste constant après l'ajout du floculant.

Le tableau ci-dessous tableau IV.15 résume les différentes analyses faites sur l'eau de barrage Bouroumi en amont et à l'aval du traitement par le procédé de la coagulation-floculation en utilisant un coagulant synthétique.

Tableau IV.2: Bilan de l'eau du barrage Bouroumi

Paramètre	Eau brute	Eau traitée
Turbidité (NTU)	109	0,89
Conductivité ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	1117	1182
pH	8,40	7,83
Température ($^{\circ}\text{C}$)	22,3	24,00
O ₂ dissous (mg/l)	6,08	5,52
Al ³⁺ (mg/l)	0.00	0,38

On a obtenu un pourcentage de réduction de la turbidité de 96,42 % avec une dose optimale du NE de 20 mg/l. Ce résultat indique l'efficacité du NE pour la réduction de la turbidité.

On a obtenu un pourcentage de réduction de la turbidité de 99,33 % avec une dose optimale du NE de 2 mg/l. Ce résultat indique l'efficacité du NE comme étant un biofloculant pour la réduction de la turbidité.

Le tableau IV.18 récapitule les différentes analyses faites sur l'eau du barrage Bouroumi en amont et à l'aval du traitement par le processus de la coagulation-floculation en utilisant un coagulant naturel.

Tableau IV.3: Bilan de l'eau du barrage Bouroumi

Paramètre	Eau brute	Eau traitée
Turbidité (NTU)	109	3,9
Conductivité (µs/cm)	1117	1023
pH	8,4	8,4
Température (°C)	22,3	24
O2 dissous (mg/l)	6,08	5,52
Al ³⁺ (mg/l)	0	0
Dureté (°F)	50	35
Sulfate (mg/l)	125	125

Le tableau ci-dessous résume les différentes analyses faites sur l'eau du barrage Bouroumi en amont et à l'aval du traitement par le processus de la coagulation-floculation en utilisant un biofloculant.

Tableau IV.4: Bilan de l'eau du barrage Bouroumi

Paramètre	Eau brute	Eau traitée
Turbidité (NTU)	109	0,73
Conductivité (µs/cm)	1117	1180
pH	8,40	7,94
Température (°C)	22,3	24,0
O2 dissous (mg/l)	6,08	5,52
Al ³⁺ (mg/l)	0,00	0,38
Dureté (°F)	50	23
Sulfate (mg/l)	125,00	198,25

D'après ces résultats, on remarque qu'il y a une diminution de la conductivité ainsi de la dureté à cause de la capacité du mucilage du cactus à capter les ions bivalents. De plus, l'inexistence du sulfate dans l'eau traitée par le mucilage considéré comme un avantage pour qu'on évite d'éventuelle effets nocifs que se soit sur l'environnement ou

bien par sur la santé humaine. Vu que l'aluminium résiduel dépasse la norme OMS qui est 25µg/l pour l'eau traitée.