

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A. M. OULHADJ - Bouira  
Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées  
Département de Génie des Procédés



# Mémoire

Présenté par  
**DJADI Melkhir**  
**NAAMANI Aicha**

Pour l'obtention du diplôme de

# MASTER

**Filière: Sciences et Génie de l'Environnement**  
**Spécialité : Génie de l'Environnement**

Electrocoagulation des solutions turbides en présence  
de biofloculant *Opuntia Ficus Indica*

Devant le jury composé de :

Mr LOUNICLI.H	Professeur	UAMO. Bouira	Encadreur
Mme ZAABAR.A	MCA	UAMO. Bouira	Examinatrice
Mme EL HANAFLI.N	MCB	UAMO. Bouira	Examinatrice

# Remerciements

*Ce travail a été effectué au sein du laboratoire de Génie des procédés, Département de Génie des procédés, Faculté des Sciences et Sciences Appliquées de l'Université Akli Mohand OULHADJ-Bouira*

*Nous avons le plaisir d'exprimer nos remerciements à tous ceux qui nous ont accompagnés au cours de la réalisation de ce mémoire.*

*En premier lieu, nous tenons à exprimer nos remerciements et reconnaissances, les plus distingués, envers notre promoteur monsieur **LOUNICI HAKIM**, qui a dirigé ce travail, pour son soutien, ses qualités humaines ses précieux conseils, ses encouragements et sa patience durant la réalisation de ce travail.*

*Nous tenons à remercier les membres de jury **Mme ZAABAR A**, **Mme EL HANAFI N**, d'avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques.*

*Nos remerciements vont aussi à tout le personnel du laboratoire de Génie des procédés de l'Université de Bouira*

*Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à notre formation et à la réalisation de ce mémoire, et dont les noms ne figurent pas dans ce document.*

*Que toutes ces personnes trouvent ici l'expression de nos profondes gratitude.*

*« Merci à tous »*

# Dédicaces

*Tous d'abord, merci et louange à ALLAH qui a nous donné  
la volonté, la force, le courage pour réaliser ce travail.*

*Je tiens à remercier chaleureusement Pr: Lounici H.*

*Qui présenter la méthodologie de cette étude*

*Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance à :*

✚ *Mes parents pour ces sacrifices afin d'atteindre mon but.*

✚ *mes sœurs. Yassmin, Amina, Fatima et ses familles, Kenza  
et Rania.*

✚ *mon frère. Abelkadere Amine*

✚ *Toute ma famille NAMANI et OTSMANE.*

✚ *La famille de ma binôme DJADI*

*Tous mes amies : Hanane, Ikram, Melkhir, Nabila, Nadjat,*

*Sarah, Siham et Soumaya Yasmine.*

*Aicha*

# Dédicaces

*Tous d'abord, merci et louange à ALLAH qui a nous donné la volonté,  
la force, le courage pour réaliser ce travail.*

*Je tiens à remercier chaleureusement Pr: Lounici. H*

*Qui présenter la méthodologie de cette étude*

*Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance à :*

✚ *Mes parents pour ces sacrifices afin d'atteindre mon but.*

✚ *mes sœurs : Nadia, Souad, Ahlem*

✚ *mes frères : Farid, Amar, Yacine*

✚ *Toute ma famille*

✚ *La famille de ma binôme NAMANI*

*Tous mes amis : Aicha, Sarah, Hanane et Nadjat.*

*Melkhir*

# Sommaire

**Listes des figures.**

**Liste des tableaux.**

**Liste des abréviations.**

**Introduction général .....1**

**Partie bibliographique :**

## **Chapitre I : Généralités sur les eaux usées.**

I.1 Clarification des eaux.....	4
I.1.1 Clarification des eaux par coagulation floculation et filtration sur lit de sable.....	4
I.1.2 Physicochimie des particules en suspension dans l'eau.....	4
I.1.3 Coagulation des colloïdes en suspension dans les eaux.....	8
I.1.4 Adsorption et pontage : floculation chimique par des polymères à longues chaînes...12	
I.1.5 Coagulation/floculation par entrainement (emprisonnement des particules ou sweep).....	12
I.1.6 Paramètres influençant la coagulation floculation.....	13
I.1.6.a Influence du pH.....	13
I.1.6.b Influence de la dose du coagulant.....	13
I.1.6.c Influence de la vitesse et temps d'agitation.....	13
I.2 Le procédé d'électrocoagulation (EC) .....	14
I.2.1 Origine et évolution du procédé d'électrocoagulation.....	14
I.2.2 Principe du procédé d'électrocoagulation.....	15
I.2.3 Réactions électrochimiques aux électrodes.....	17
I.2.4 Loi de Faraday.....	19
I.2.5 Chimie de l'aluminium.....	20
I.2.6 Avantages et inconvénients du procédé d'EC.....	22
I.2.7 Principales applications d'EC.....	23
I.2.8 Comparaison entre la floculation-coagulation chimique et l'EC.....	24
I.3 Les bio floculant .....	25
I.3.1 Présentation et mode d'action.....	25

I.3.2 Les bios polymères .....	25
I.3.2.1 Les polysaccharides .....	26
I.5 Les ressource végétales .....	31
I.5.1 Diversité des ressources .....	31
I.5.2 Condition d'application des flocculant .....	31
I.5.3 Mécanisme d'action des bio flocculant .....	31
I.6 Opuntia ficus indica .....	32
I.6.1 Généralités sur opuntia ficus indica.....	32
I.6.2 Composition chimique des cladodes.....	33
I.6.2.1 Les principaux constituants.....	33
I.6.3 Cactus Opuntia ficus indica en coagulation flocculation.....	35
I.6.3.1Présence d'éléments flocculant .....	35
I.6.3.2 Conditionnement du cactus.....	35
I.6.4 Conditions opératoires .....	36
I.6.5 Mécanismes mis en jeu.....	36

## **Partie expérimentale :**

### **Chapitre II : Matériels et méthodes.**

II.1. Introduction.....	39
II.2 Produits et réactifs.....	40
II.3 Dispositif expérimental de procédé d'électrocoagulation.....	42
II.4 Description de montage expérimental.....	43
II.5 Déroulement d'expérience.....	43
II.5.1 Cas sans cactus.....	43
III.5.2 Cas avec cactus.....	43
II.6 Le flocculant .....	46

### **Chapitre III : Résultats et discussions.**

III.1 Influence de la charge en bentonite .....	47
III.b Evolution des rendements d'abattelements en cours de l'électrocoagulation à différentes charges .....	49
III.2 Electrocoagulation des solutions turbides en présence du bio flocculant.....	50

III.3 Effet de la salinité sur l'électrocoagulation des solutions turbides.....	53
III.4 Influence du nombre d'électrodes .....	55
<b>Conclusion général .....</b>	<b>61</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>62</b>

# Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Nature et gamme de taille des particules colloïdales dans l'environnement .....	5
<b>Figure I.2</b> : Distribution ionique autour d'une particule colloïdale électronégative.....	7
<b>Figure I.3</b> : Hydrolyse d' $Al^{3+}$ : (A) cation hydrate (uniquement 4 des 6 molécules d'eau sont représentées) ; (B) perte de $H^+$ et création de $Al(OH)_2^+$ .....	9
<b>Figure I.4</b> : Produits d'hydrolyse de l'aluminium.....	9
<b>Figure I.5</b> : Les produits d'hydrolyse d'aluminium formés en fonction de la concentration..	10
<b>Figure I.6</b> : Fraction molaire des espèces monomères issues de l'hydrolyse d'al (iii), en équilibre avec l'hydroxyde amorphe, a force ionique nulle et 25°C .....	11
<b>Figure I.7</b> : Flocculation par adsorption et pontage.....	12
<b>Figure I.8</b> : Flocculation par emprisonnement (balayage ou sweep).....	12
<b>Figure I.9</b> : Schéma du principe de l'électrocoagulation.....	16
<b>Figure I.10</b> : Diagramme de Venn des principaux processus formant le procédé d'électrocoagulation.....	17
<b>Figure I.11</b> : Diagramme de prédominance des différents hydroxydes d'aluminium (sans tenir compte des formes polymères de ces hydroxydes).....	21
<b>Figure I.12</b> : Diagramme de Pourbaix de l'aluminium.....	22
<b>Figure I.13</b> : Structure chimique du chitosane.....	26
<b>Figure I.14</b> : Structure chimique de la cellulose.....	28
<b>Figure I.15</b> : Structure chimiques de l'amidon.....	28
<b>Figure I.16</b> : Morphologie d' <i>Opuntia ficus indica</i> .....	32
<b>Figure I.17</b> : Coupe transversale d'une raquette d' <i>Opuntia ficus indica</i> .....	33
<b>Figure I.18</b> : Interactions chimiques possibles dans le procédé de coagulation flocculation entre l'acide polygalacturonique en solution aqueuse et les particules chargées positivement de l'effluent (P).....	37
<b>Figure II.1</b> : Représente la Bentonite.....	41
<b>Figure II.2</b> : Cellule d'électrocoagulation.....	44
<b>Figure II.3</b> : Raquettes de Cactus.....	46
<b>Figure III.1.a</b> : Evolution de la turbidité résiduelle en cours de l'électrocoagulation à différentes charges .....	47
<b>Figure III.1.b</b> : Evolution des rendements d'abattements en cours de l'électrocoagulation à différentes charges.....	48
<b>Figure III.1.c</b> : Histogramme des rendements obtenus à différents temps d'électrocoagulation.....	48
<b>Figure III.2.a</b> : Evolution des turbidités résiduelles en fonction de la charge en présence de bio flocculant.....	49

<b>Figure III.2.b</b> : Evolution des turbidités résiduelles en fonction de la charge en présence de bio flocculant Conditions opératoires.....	50
<b>Figure III.2.c</b> : Turbidités Résiduelle obtenues après une heure de traitement.....	50
<b>Figure III.2.d</b> : Rendements d'abattement de la turbidité obtenue après une heure de traitement.....	51
<b>Figure III.3.a</b> : Influence de l'intensité appliquée sur le l'électrocoagulation des solutions turbides.....	54
<b>Figure III.3.b</b> : Influence de l'intensité appliquée sur les rendements d'abattement de la turbidité.....	54
<b>Figure III.4.a</b> : Influence du nombre d'électrodes sur l'évolution de la turbidité.....	56
<b>Figure III.4.b</b> : Influence de la salinité sur l'abattement de la turbidité en présence de coagulant.....	56
<b>Figure III.4.c</b> : Influence de la salinité sur l'abattement de la turbidité en présence de coagulant.....	57
<b>Figure III.5.a</b> : Influence du nombre d'électrodes sur l'évolution de la turbidité.....	58
<b>Figure III.5.b</b> : Influence du nombre d'électrodes sur le rendement d'abattement de la turbidité.....	59
<b>Figure III.5.c</b> : Evolution du pH en fonction du nombre d'électrodes.....	60

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau I.1</b> : Utilisation des flocculant greffés dans le traitement des eaux usées.....	32
<b>Tableau I.2</b> : Composition des cladodes en % massique.....	33
<b>Tableau I.3</b> : Conditions opératoires de traitement d'effluents par <i>Opuntia ficus indica</i> .....	38
<b>Tableau II.1</b> : Propriétés physico-chimiques de la bentonite utilisée.....	41
<b>Tableau II.2</b> : Matériels utilisés dans laboratoire.....	42

## *Liste des abréviations*

**COT** : Carbone Organique Total (mg/L).

**DCO** : Demande Chimique en Oxygène.

**E0** : Potentiel Standard (V/ESH)

**EC** : Electrocoagulation

**F** : Nombre de Faraday ( $96487 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$ )

**I** : Intensité du courant (A)

**m**: Masse du métal dissous (g)

**M** : Masse molaire de l'espèce considérée ( $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ )

**MES** : Matière en suspension

**MS** : Matière sèche

**pH** : Potentiel d'hydrogène

**NaCl** : Chlorure de sodium

**PCN** : Précipitation Charge Neutralisation

**pZ** : Potentiel zêta

**Q** : Charge électrique (C)

**SMH** : les Sels Métalliques Hydrolysables

**t** : Durée (s)

**Ve** : Nombre d'électrons

**Ø** : Rendement faradique

# INTRODUCTION

---

La protection des eaux de surface continentales en Algérie est confrontée à des défis majeurs. Les pressions anthropiques qui s'exercent sur les plans d'eau et cours d'eau sont de plus en plus fortes. Bien que la réglementation interdise de porter atteinte aux eaux de surface continentales, la protection de ces milieux vitaux, à la fois pour l'homme et la biodiversité, demeure inefficace.

Les eaux de surfaces sont principalement représentées par des cours d'eau et plans d'eau. Ils sont nombreux en Algérie. Les plus remarquables se trouvent au Nord, Les cours d'eau et plans d'eau représentent d'importants foyers de biodiversité, de grands réservoirs d'eau d'irrigation, des lieux vitaux de recharge des eaux souterraines, de précieux robinets d'approvisionnement en eau potable et de fortes potentialités pour le développement du tourisme.

Les ressources en eau en Algérie proviennent des eaux de surface et des eaux souterraines renouvelables et non renouvelables. Il est à noter que ces ressources sont très variables notamment celles qui proviennent des nappes tributaires des aléas climatiques. L'exploitation de ces ressources est très intense avec les besoins grandissants. L'utilisation de l'eau est liée aux activités économiques

Aujourd'hui encore, en Algérie, beaucoup de cours d'eau et plans d'eau continuent de recevoir des d'eaux polluées Ils restent victimes d'une importante pollu. Le secteur de l'eau reste confronté à des défis liés principalement :

- i) à la surexploitation des ressources en eau souterraine,
- ii) à la faiblesse de la valorisation des ressources en eau mobilisées notamment dans le domaine agricole
- iii) à la détérioration de la qualité à cause du retard dans l'assainissement

Plusieurs opérations unitaires sont envisageables pour le traitement des eaux impliquant des réactions d'adsorption, d'oxydation chimique et/ou électrochimique, de la séparation physique ou membranaire. Toutes ces méthodes présentent des contraintes économiques et techniques qui compliquent leur application. Parmi les différentes solutions envisageables, la coagulation-floculation permet de répondre à de nombreuses situations et elle

## INTRODUCTION

---

est mise en œuvre de manière classique pour la potabilisation des eaux de surface et de manière occasionnelle pour le traitement des eaux usées. Le procédé de coagulation crée, au sein de l'eau que l'on souhaite épurer, le transfert des colloïdes de la phase soluble vers les matières en suspension par agglomération des particules. Cette étape est associée à de nombreuses réactions d'adsorption des réactifs ou de molécules solubles de la solution. Les sels métalliques d'aluminium et de fer sont souvent utilisés avec l'hydrolyse et la formation d'hydroxydes insolubles à des valeurs de pH proches de 7 ou légèrement acide (5 à 7). Ce sont ces dernières formes qui jouent le rôle de coagulant; des agrégats de particules sont alors formés (la coagulation floculation est favorisée) et peuvent décanter pour laisser place à une eau claire et "épurée".

Ces dernières années a vu l'apparition de l'électrocoagulation ou les floculants sont produits in situ par corrosion contrôlée des électrodes à l'inverse de la coagulation floculation ou les produits sont insérés tels quels conduisant à la formation des boues de volume non négligeable.

L'utilisation de polymères synthétiques permet d'améliorer la floculation et la séparation de la matière en suspension produite. Les floculants chimiques majoritairement utilisés pour la production d'eau potable est le polyacrylamide et son monomère d'acrylamide ou d'acrylate. Les nombreux autres polymères à usage industriel peuvent présenter également un risque chimique pour la santé ou l'environnement. Ces polymères sont issus de l'industrie pétrochimique et la recherche d'alternatives dans des biofloculants et notamment ceux issus des ressources végétales, est nécessaire. En effet, ces floculants biosourcés sont non toxiques et le plus souvent biodégradables. Certains biofloculants ont fait l'objet d'expérimentation dans la production d'eau potable : alginate, amidon, xanthane. De nombreuses ressources végétales ont également été expérimentées pour leurs propriétés floculantes : *Ocimum basilicum* ; *Cocos nucifera*, ...

L'objectif de notre travail, qui consiste une application d'un procédé d'électrocoagulation EC en présence d'un biofloculant en vue de la clarification d'une eau turbide en utilisant des électrodes en aluminium.

## INTRODUCTION

---

- Le chapitre I : est une synthèse sur le procédé d'électrocoagulation, son principe, ses applications, les différentes lois qui les régissent ainsi que ces avantages et inconvénients.
- Le chapitre II décrit les matériels et les méthodes utilisés pour le traitement ainsi que le dispositif expérimental mis au point.
- Le chapitre III présente l'ensemble des résultats obtenus, il détaille l'influence des paramètres de l'électrocoagulation sur la cinétique de traitement des pollutions.
- Une conclusion générale viendra clore ce manuscrit.

## **I.1 CLARIFICATION DES EAUX**

### **I.1.1 Clarification des eaux par coagulation floculation et filtration sur lit de sable**

En traitement des eaux, la coagulation et la floculation sont des traitements qui visent à optimiser l'élimination des particules en suspension par les procédés de décantation et de filtration. Ces traitements favorisent l'agrégation des particules colloïdales en larges et denses agrégats. Ils se déroulent en deux étapes principales à savoir la déstabilisation des particules et la collision des particules déstabilisées pour former des agrégats volumineux. La déstabilisation et l'agrégation sont des phénomènes physicochimiques. La séparation par décantation et filtration met en jeu des phénomènes essentiellement physiques.

La déstabilisation est le procédé par lequel les particules stables en suspension sont modifiées de façon à leur conférer la possibilité de s'accoler entre elles ou encore de se fixer sur un support tel que des grains de sable d'un lit de filtration.

La stabilité des particules en suspension peut être rompue par l'ajout de réactifs chimiques appropriés qui réduisent ou éliminent les forces de répulsion, le système est alors dit déstabilisé. Par la suite, les particules déstabilisées sont mises en contact par une agitation mécanique extérieure, les collisions favorables favorisant la formation de flocs et d'agrégats.

La déstabilisation et l'agrégation font donc appel à une agitation externe pour favoriser le mélange des phases et promouvoir les collisions. La pratique consiste à mettre en œuvre deux séquences d'agitation : une agitation rapide qui favorise le mélange des réactifs et la déstabilisation des particules, une phase d'agitation lente pour favoriser les collisions entre les particules déstabilisées et ainsi entraîner leur agrégation.

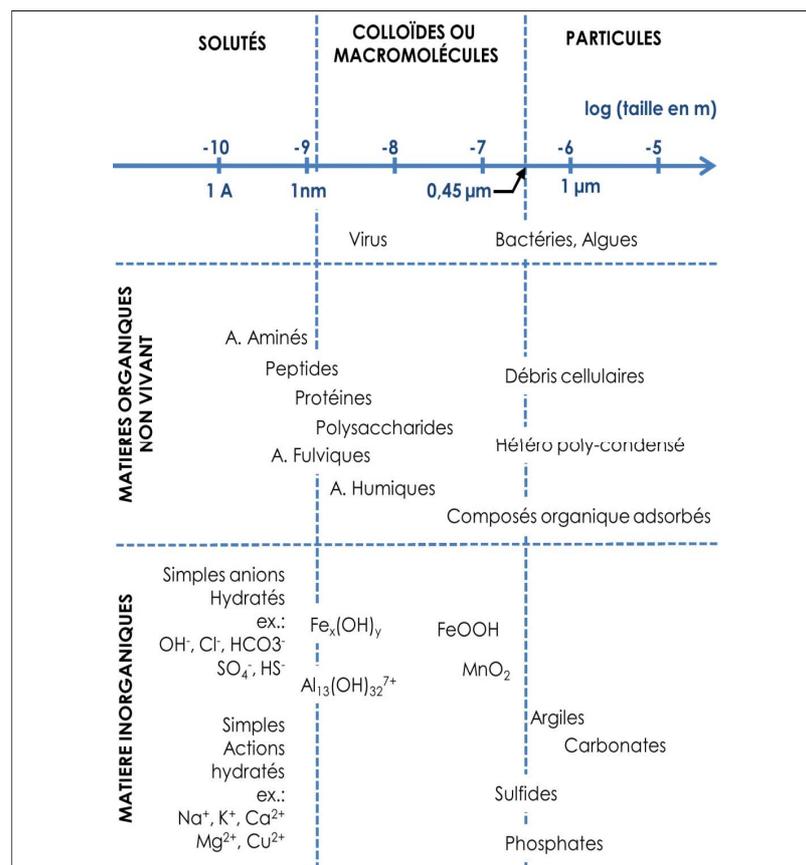
En traitement des eaux par contre, la terminologie en usage associe la coagulation à la déstabilisation du système en présence d'agitation rapide et la floculation à l'agrégation des particules déstabilisées sous agitation lente [Fiessinger.1978].

### **I.1.2 Physicochimie des particules en suspension dans l'eau**

Du point de vue de la clarification en traitement des eaux, les particules qui présentent un intérêt sont essentiellement des colloïdes. Ce sont des entités organiques ou

inorganiques assez grandes pour avoir une structure et des propriétés supramoléculaires, c'est-à-dire la possibilité de changements de conformation pour les colloïdes organiques ou l'existence d'un champ électrique de surface pour les colloïdes inorganiques. Ce sont également des entités assez petites pour ne pas sédimenter en l'absence d'agrégation pendant un laps de temps assez long (de quelques heures à quelques jours) [Buffle et al.1998]. Leur taille est fixée le plus souvent de manière arbitraire entre 1 nm et 1  $\mu\text{m}$  [Kaplan et al.1997, Kretzschmar et al.1999]. Par ailleurs, du fait de leur petite taille, les particules colloïdales ont des surfaces spécifiques importantes ( $> 10 \text{ m}^2/\text{g}$ ) et peuvent donc représenter des phases sorbantes importantes pour diverses autres impuretés. Elles présentent donc un danger potentiel pour la santé en cas d'ingestion.

Cependant, ces différents types de colloïdes sont rarement présents à l'état pur dans les eaux naturelles mais plutôt associés à différents composés réactifs pour former des particules composites de taille colloïdale.



**Figure 1.1:** Nature et gamme de taille des particules colloïdales dans l'environnement [buffle &newman, 1992].

L'élimination de ces colloïdes est difficile du fait de leurs propriétés de charge de surface et de leurs tailles. Ces propriétés et les mécanismes de création de ces charges sont essentiellement liés à leur nature, leur taille, leur structure et à leur environnement ionique.

Le temps de décantation des particules coagulées dépend du type de particules, du diamètre des particules et de leur surface spécifique [Larue et al.2003]. Il est donc impossible que certaines particules, notamment les colloïdes et les particules à surface spécifique très élevée, décantent naturellement de par leurs charges de surface et leur très faible taille.

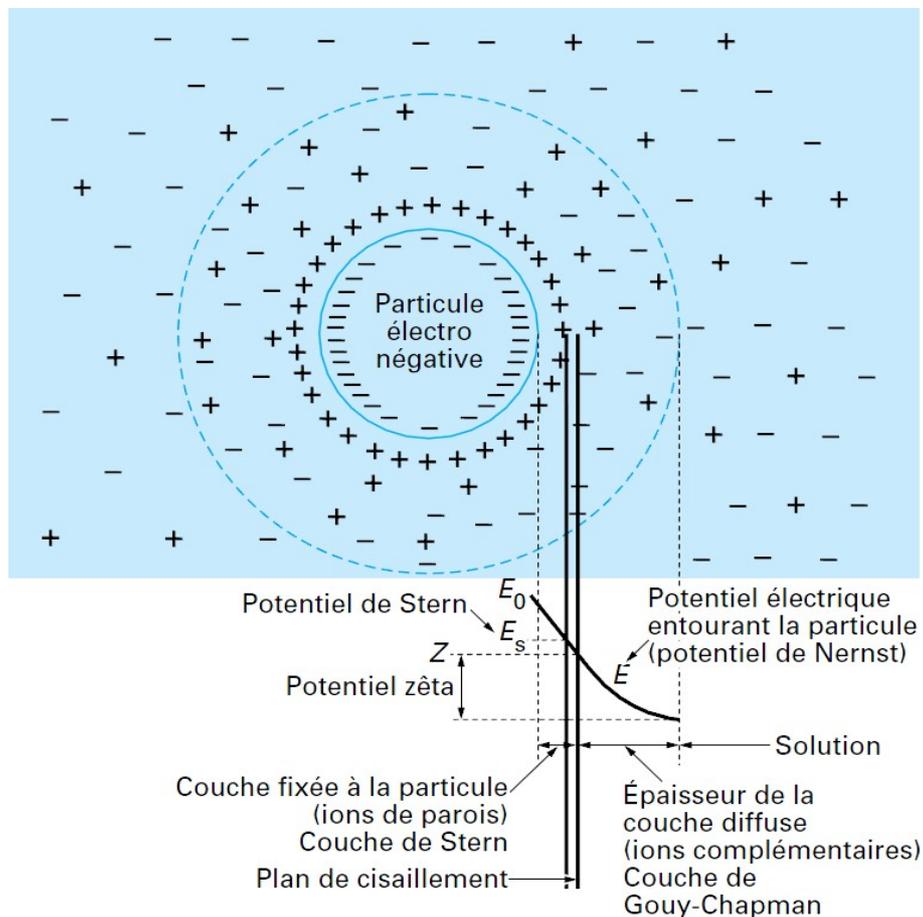
Pour obtenir la décantation de ces particules, il faut assembler un très grand nombre de colloïdes en agrégats d'au moins 10 à 100  $\mu\text{m}$ . Malheureusement, ces particules exercent entre elles des forces de répulsion de nature électrostatique empêchant leur assemblage. C'est ce phénomène qui rend certaines suspensions totalement stables. La déstabilisation des entités en suspension passe par des phénomènes d'adsorption, expliqués par la théorie de la double couche. Elle permet aussi d'expliquer comment les colloïdes sont traités par coagulation.

Les colloïdes sont des particules qui ne décantent pas naturellement de taille entre 2 nanomètre et 2  $\mu\text{m}$ , en raison de leur grande surface spécifique et de leur très faible différence de densité par rapport à la phase continue (eau). Les colloïdes sont soumis à des forces d'attraction (de Van der Waals) et à des forces de répulsion électrostatique. Ils sont généralement chargés négativement à  $\text{pH} > 3-4$ .

Afin de neutraliser cette charge négative de surface, des ions positifs présents dans l'eau brute (ou éventuellement ajoutés) sont attirés et forment une couche autour du colloïde. Lorsque la surface du solide, chargée électriquement se trouve au contact d'une solution aqueuse d'électrolytes, les ions de cette solution sont affectés par un champ de forces électrostatiques : les ions chargés de même signe que la paroi du solide sont repoussés par celle-ci, les autres étant attirés.

Il va finalement s'établir une distribution spatiale constituant une double couche ionique à l'interface solide-liquide. Elle est assimilable à un condensateur moléculaire dont une partie est une armature formée d'ions adhérant fortement à la paroi (partie fixe), tandis que l'autre partie constituée d'un nuage d'ions diffus est mobile (couche diffuse). Le concept de la double couche ionique a permis d'exprimer dans la pratique l'importance des forces

répulsives de nature électrostatique par la mesure du potentiel électrocinétique de Freundlich ou potentiel zêta, qui renseigne sur la charge électrique superficielle des colloïdes (figure I-2).



**Figure I-2:** Distribution ionique autour d'une particule colloïdale électro-négative [Godart.2000]

La coagulation est optimale pour une introduction de charges électriques positives correspondant à l'annulation du potentiel zêta, potentiel que l'on mesure en observant la vitesse de déplacement des particules colloïdales sous l'action d'un champ électrique dans un appareil d'électrophorèse dit zêta-mètre.

Le potentiel zêta s'annule ou avoisine le zéro avec la neutralisation de toutes les charges avoisinantes, ainsi il faudra que le coagulant se disperse dans l'eau pour obtenir une répartition homogène avant toute précipitation d'hydroxyde. Cela demande une forte agitation en un temps court ou, en d'autres termes, utiliser un gradient de vitesse très élevé.

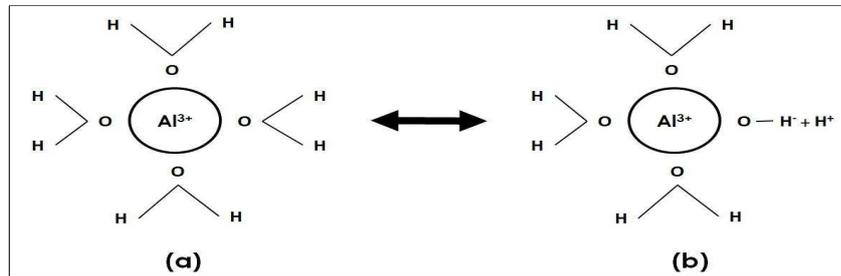
Ainsi, pour être efficace, la coagulation demande une dispersion immédiate du coagulant dans l'eau, afin que les charges électriques des particules colloïdales soient déchargées uniformément ; à cet effet, on utilise soit des mélangeurs statiques mis en place à l'intérieur d'une tuyauterie (système hélicoïdal, diaphragme, cône...) qui créent une turbulence suffisante pour permettre la diffusion instantanée du coagulant, soit des mélangeurs rapides qui comportent un agitateur.

L'efficacité du traitement dépend du pH. Le pH optimal constitue un compromis entre le pH nécessaire à la coagulation des colloïdes (leur nature et leur point isoélectrique) et le pH nécessaire à la floculation (correspondant au minimum de solubilité du métal). Par exemple, le pH optimal de coagulation-floculation est compris entre 6 et 7,4 pour l'aluminium et est supérieur à 5 pour le fer. La quantité de coagulants à ajouter peut être optimisée par une étude du potentiel zêta, le traitement idéal correspondant à un potentiel zêta de zéro. Pour rendre le traitement plus efficace, certains adjuvants tels que des polysaccharides contribuant à former des floes résistants de plus grand diamètre sont utilisés.

### **1.1.3 coagulation des colloïdes en suspension dans les eaux**

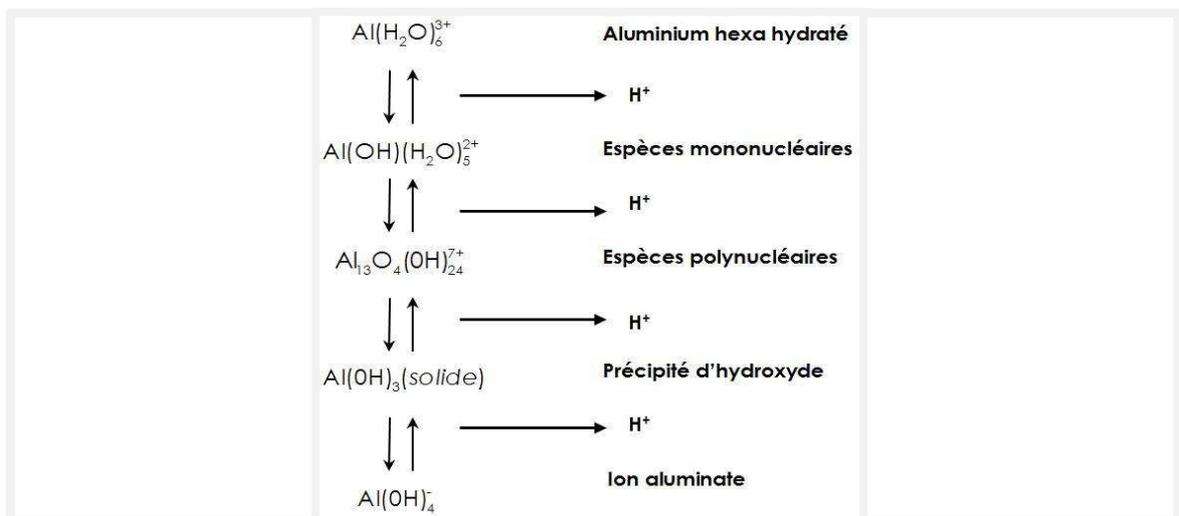
Les sels métalliques hydrolysables (SMH) et les sels métalliques pré-polymérisés sont les principaux coagulants utilisés en potabilisation des eaux. Les sels simples tels que le chlorure de sodium ne sont pas utilisés du fait de leur faible efficacité et de leur consommation excessive. Leur mécanisme d'action a été décrit au paragraphe précédent. À l'inverse, les SMH sont largement utilisés, notamment dans les zones pauvres (Afrique tropicale). Ce sont des chlorures ou sulfates d'aluminium ( $\text{Al}^{3+}$ ) ou fer ( $\text{Fe}^{3+}$ ) dont l'efficacité en coagulation est fonction des réactions de leur hydrolyse en solution, de la nature et de la quantité des produits d'hydrolyse formés [Mattson.1928, Lartiges.1994, Lartiges et al.1997].

En effet, en solution les cations métalliques des SMH créent des liaisons avec six molécules d'eau environnante (Figure a). La force de ces liaisons est telle qu'une des liaisons O-H d'une molécule d'eau s'en trouve fragilisée et l'ion  $\text{H}^+$  est rélargie dans la solution. Il se crée alors un groupement hydroxyde qui réduit la charge du cation métallique (Figure 1.3). Ce procédé de dissociation des molécules d'eau est connu sous le nom d'hydrolyse.

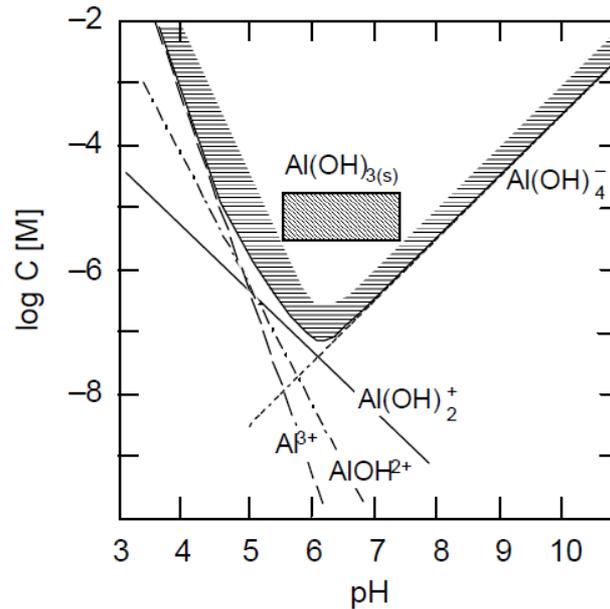


**Figure 1.3 :** Hydrolyse de  $Al^{3+}$  : (A) cation hydrate (uniquement 4 des 6 molécules d'eau sont représentées) ; (B) perte de  $H^+$  et création de  $Al(OH)^{2+}$ .

Il est important de mentionner que l'apparition de  $H^+$  provoque obligatoirement une baisse de pH et une consommation d'alcalinité. La vitesse de la réaction d'hydrolyse, tout comme la nature des espèces formées, dépend étroitement de la concentration des SMH en solution et du pH du milieu. Les produits d'hydrolyse regroupent des monomères cationiques, des polymères cationiques complexes, des microcristaux et un précipité d'hydroxyde de l'ion métallique (Figure 1.4).



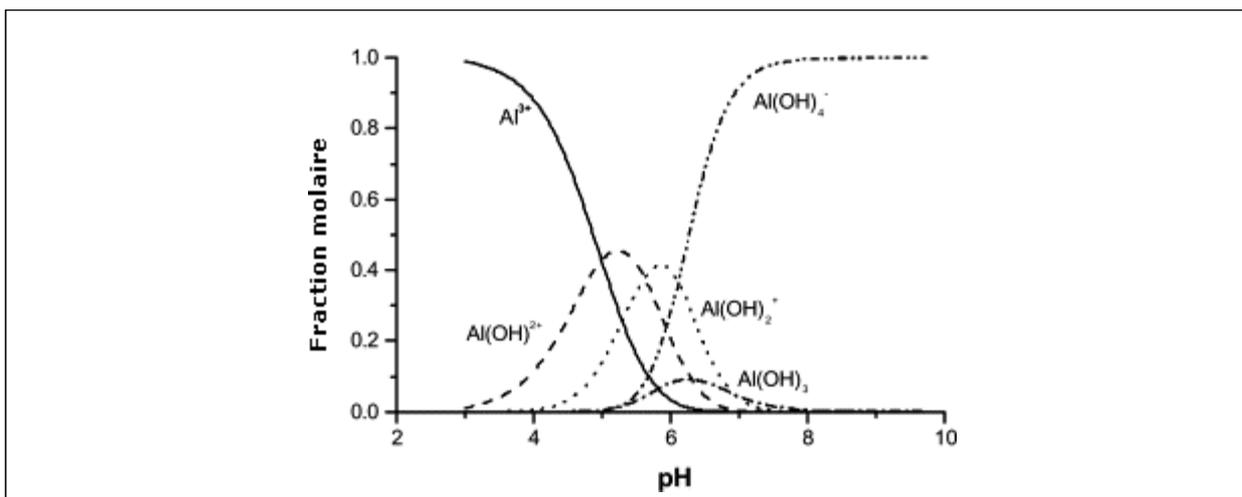
**Figure 1.4 :** Produit d'hydrolyse de l'aluminium



**Figure 1.5:** Les produits d'hydrolyse d'aluminium formés en fonction de la concentration

Aux faibles concentrations et dans des conditions de pH favorables, la coagulation par les SMH se fait par neutralisation des charges de surface des particules en suspension. Les monomères cationiques solubles issus de l'hydrolyse s'adsorbent à la surface des particules (minérales et organiques) de signe contraire et provoquent une neutralisation de leurs charges de surface. L'adsorption de ces produits d'hydrolyse est plus forte que celle de l'ion métallique ( $\text{Al}^{3+}$ ).

Cependant, dans la zone de pH des eaux naturelles (proche de la neutralité), il peut y avoir précipitation des hydroxydes même aux faibles concentrations en SMH. Dans le cas de sels d'aluminium, les hydroxydes précipités ont leur point de charge nulle (PCN) proche de pH 8. Au pH des eaux naturelles, ces hydroxydes précipités sont chargés positivement. Dans de telles conditions, on retrouve dans la suspension des monomères cationiques solubles et des hydroxydes cationiques précipités (Figure 1.6). Ces deux espèces participent donc à la neutralisation des charges de surfaces des particules en suspension suivant un modèle appelé « Précipitation Charge Neutralisation ».



**Figure 1.6 :** Fraction molaire des espèces monomères issues de l'hydrolyse d'al (iii), en équilibre avec l'hydroxyde amorphe, à force ionique nulle et 25°C.

Les sels pré-polymérisés agissent aussi par neutralisation des charges de surface des particules en suspension. Du fait de leurs charges élevées, ils sont plus efficaces que les SMH pour la déstabilisation par neutralisation de charge mais, tout comme eux, ils n'ont aucune influence sur la vitesse d'agrégation. Leur utilisation en station peut s'avérer délicate du fait du risque d'inversion des charges de surfaces des particules et de déstabilisation. Par ailleurs, ils sont plus chers que les SMH.

La coagulation par neutralisation de charge est donc un procédé lent et délicat à mettre en œuvre qui nécessite des moyens de contrôles onéreux pour des applications de traitement des eaux à l'exemple du zétamètre. Dans la pratique, les opérateurs contournent ces inconvénients en utilisant des quantités de SMH très élevées, au-delà de la solubilité des hydroxydes amorphes. Il s'en suit une précipitation intense d'hydroxydes donc une augmentation de la concentration de la suspension et par conséquent de la vitesse d'agrégation. Ce procédé, par lequel les particules de la suspension s'adsorbent aux particules d'hydroxydes précipitées, s'appelle coagulation par entraînement. Elle produit des floes plus gros et plus denses que ceux obtenus par neutralisation de charge.

Le principal avantage de ce type de coagulation est son indépendance par rapport à la nature des particules en suspension. Dans ce mode de coagulation, le dosage optimum correspond à la concentration en SMH qui donne la plus rapide précipitation d'hydroxyde. Ce dosage est donc indépendant de la teneur en solide dans la suspension et l'ajout de coagulant en excès ne provoque pas de déstabilisation du système [Stumm & O'Melia, 1968].

### I.1.4 Adsorption et pontage : floculation chimique par des polymères à longues chaînes

L'ajout de polymères de masse moléculaire élevée et possédant de multiples charges au niveau de la chaîne moléculaire, favorise la déstabilisation des matières colloïdales. Un même colloïde pouvant se faire adsorber « plusieurs » fois, on a ainsi formation du floc par pontage des polymères [Lamer et Healy.1963] comme décrit sur le schéma ci-dessous (figure 1.7). Ces polymères sont des meilleurs floculant que les sels métalliques.

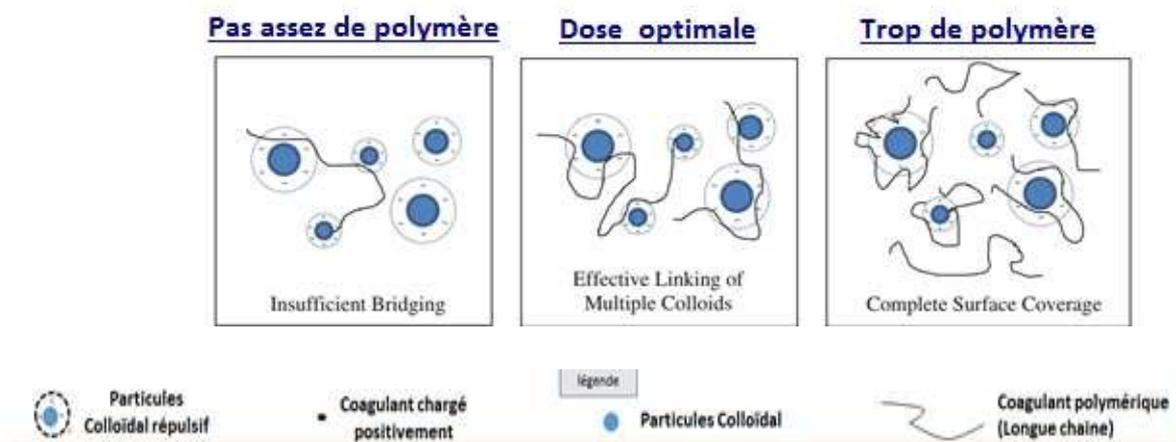


Figure 1.7: Flocculation par adsorption et pontage [Choy et al.2015].

### I.1.5 Coagulation/floculation par entrainement (emprisonnement des particules ou sweep)

Ce processus n'est plus stœchiométrique et ne dépend pas de la charge du coagulant. Il concerne les suspensions très concentrées initialement ou par l'apport d'une forte charge colloïdale d'hydroxyde métallique.

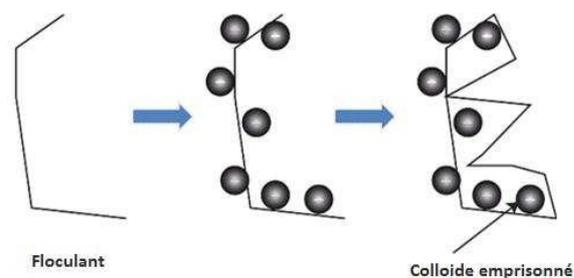


Figure 1.8: Flocculation par emprisonnement (balayage ou sweep) [Rezég .2004]

### **I.1.6 Paramètres influençant la coagulation flocculation**

Plusieurs paramètres influencent le processus de flocculation:

- Le pH
- La dose du coagulant
- La vitesse d'agitation
- Le temps d'agitation

#### **I.1.6.a Influence du pH**

Le pH fixe la spéciation du coagulant et/ou flocculant introduit mais modifie également les propriétés de l'ensemble des espèces solubles ou colloïdales présentes dans l'eau à traiter. Dans le cas des sels métalliques, la nécessité de travailler en présence des précipités d'hydroxyde colloïdale limite la zone de pH pouvant être utilisée (figure 5). Le précipité métallique peut avoir une nature différente en fonction des anions associés (phosphates, sulfates) et les réactions à la surface de l'hydroxyde (sorption) dépendront également de la valeur de pH retenue.

#### **I.1.6.b Influence de la dose du coagulant**

Parmi les mécanismes de déstabilisation, l'adsorption et la neutralisation des charges de surface des colloïdes dépend de la concentration en ions pouvant s'adsorber et donc présent en solution. Dans ce cas, au-delà de la stœchiométrie un phénomène peut apparaître par inversion de signe de la charge moyenne de la particule. Dans le cas de flocculant les doses à appliquer sont beaucoup plus difficiles à estimer car la structuration du floc peut contribuer à des phénomènes d'entraînement.

#### **I.1.6.c Influence de la vitesse et temps d'agitation**

La vitesse et le temps d'agitation sont deux paramètres en antagonisme si l'on raisonne strictement en puissance dissipée [Wang et al.2011], mais plus la vitesse est importante plus le cisaillement et la cinétique de flocculation ortho cinétique devient importante mais limite la taille maximale des floccs [Sonntag et al.1986], Ainsi, pour augmenter le nombre de chocs en limitant le cisaillement il faut absolument avoir une durée d'agitation suffisante.

## ***1.2 LE PROCÉDE D'ELECTROCOAGULATION(EC)***

### **1.2.1 Origine et évolution du procédé électrocoagulation**

Le premier document rapportant l'utilisation de l'EC pour le traitement des effluents est un brevet américain déposé en 1880 par Webster [Picard 2000] qui utilisait des électrodes en fer. La même année, une station d'épuration fut construite sur la base de ce brevet, à Salford (Grande-Bretagne) pour traiter les eaux polluées urbaines. En 1909, Harries dépose un nouveau brevet sur ce procédé : les anodes étaient alors constituées par des plaques de fer et d'aluminium [Holt 2002]. En 1912, aux Etats-Unis, deux autres stations de traitement des eaux usées furent construites sur ce principe. Cependant, leur fonctionnement fut arrêté, quelques années plus tard (1930), en raison du coût qui était deux fois plus élevé que celui d'un traitement biologique [Bennajah.2007].

L'électrocoagulation a commencé à regagner de l'importance à la fin du XXe siècle avec les progrès des procédés électrochimiques et la réglementation sur les rejets de plus en plus stricte [Khemis.2005], imposant d'étendre le spectre des solutions de traitement. Son utilisation s'est accrue et bon nombre d'industriels utilisent maintenant l'électrocoagulation pour le traitement de leurs effluents.

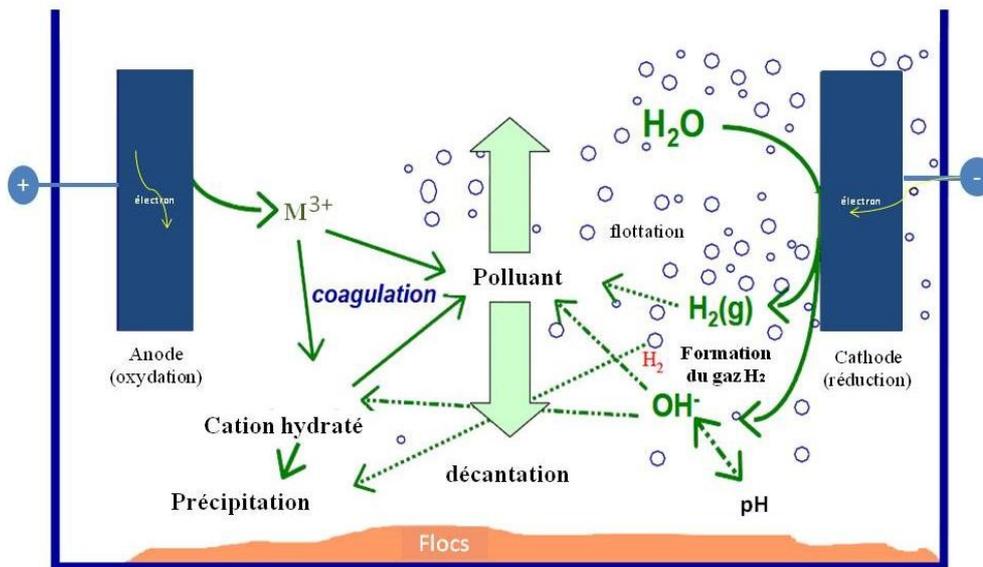
La technologie a été optimisée pour minimiser la consommation énergétique et pour augmenter l'efficacité du traitement. Celle-ci a été démontrée sur divers polluants [Daneshvar et al.2007, Petsriprasit et al.2010]. Plusieurs applications du procédé ont été réalisées sur différents types d'effluents et montrent une efficacité très élevée et un coût de traitement compétitif par rapport aux procédés classiques.

L'électrocoagulation est efficace dans le traitement des métaux lourds tels que Cr, As, Pb et Cd, mais aussi des éléments non métalliques tels que le phosphore et les composés organiques. Ce procédé a pu convaincre par son rendement d'épuration supérieur à celui des méthodes classiques pour la diminution de la Demande Chimique en Oxygène (DCO), du Carbone Organique Total (COT), des Matières En Suspension (MES), des minéraux, des colorants organiques, des huiles et graisses ; beaucoup d'autres effluents industriels variés ont été épurés avec succès [Moreno et al.2007, a]. Ce nouvel essor de l'électrocoagulation est dû en partie aux coûts d'investissement et d'exploitation relativement moins élevés que pour les autres procédés [Yilmaz et al.2007].

### **I.2.2 Principe du procédé d'électrocoagulation**

Un réacteur d'électrocoagulation est composé d'une cellule électrochimique, dans laquelle une anode en métal sacrificiel (composé généralement de fer ou d'aluminium) est utilisée pour dépolluer l'eau en générant une dose de coagulant métallique. Le procédé d'électrocoagulation crée, au sein de l'eau que l'on souhaite épurer, des floccs d'hydroxydes métalliques par électro-dissolution des anodes solubles (le fer et l'aluminium sont les matériaux les plus utilisés pour les anodes). Les floccs vont assurer l'adsorption puis la floculation des particules et des composés polluants dissous.

Lorsque l'on impose un courant continu entre l'anode et la cathode, un champ électrique se produit. Cela permet de créer un gradient de vitesse affectant toutes les particules chargées notamment les ions et les colloïdes, et facilite leur rencontre [Arslan-Alaton et al.2008] et ainsi la coagulation – floculation. D'autre part, en utilisant les anodes de fer ou d'aluminium, on arrive à faire passer en solution des quantités contrôlables d'ions métalliques indispensables à la création de floccs de taille suffisante pour la séparation. L'action directe du champ électrique sur une eau résiduaire permet de créer les conditions d'une bonne coagulation-floculation. L'électrolyse de l'eau entraîne aussi la formation de petites bulles d'oxygène (en quantité très faible) mais surtout d'hydrogène (dont la taille moyenne est inférieure à 100 micromètres) [Essadki et al.2007], à l'anode et à la cathode respectivement. La séparation des phases est réalisée par flottation ou par décantation [Linares-Hernandez et al.2007]. En général la récupération des boues s'effectue en aval du réacteur électrochimique par un système de décantation [Gao et al.2005]. Il existe aussi certaines applications où la récupération s'effectue dans le réacteur lui-même (Hansen et al. 2007) par des procédés conçus pour réaliser à la fois l'EC et la décantation-flottation. Le principe général du procédé est présenté Figure I-9.



**Figure I-9** : Schéma du principe de l'électrocoagulation.

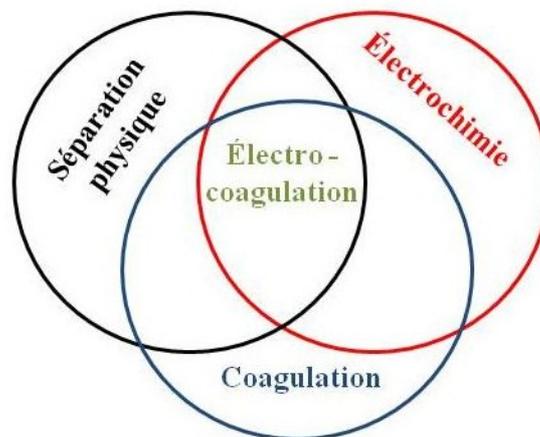
Les différentes étapes sont les suivantes [Mollah et al. 2001]

- Formation de coagulants par l'oxydation électrolytique de métaux sacrificiels.
- Déstabilisation des contaminants, des polluants, des matières en suspension et cassure des émulsions.
- Agrégation des phases déstabilisées pour former des floccs.

La figure I-9 montre le caractère complexe et interdépendant, des processus mis en œuvre lors de l'électrocoagulation. Le coagulant et ses produits d'hydrolyse peuvent avoir de nombreuses interactions avec le polluant, ainsi qu'avec d'autres espèces ioniques et les bulles du gaz électrolytique. Ces interactions sont toujours insuffisamment comprises et assez mal quantifiées. Une approche scientifique centrée sur la compréhension des mécanismes est nécessaire pour aller plus loin dans l'amélioration du procédé d'électrocoagulation.

Le procédé d'électrocoagulation peut être utilisé seul ou en série avec d'autres procédés dans une chaîne de traitement des eaux. Il est possible d'identifier trois processus : le processus électrochimique, la coagulation et la phase de séparation (par flottation ou décantation). Ces trois processus ne sont pas tout à fait indépendants, et peuvent interagir [Holt, 2002]. Le fait que ces processus sont difficiles à étudier séparément dans un réacteur opérationnel explique partiellement l'absence d'une compréhension détaillée du traitement par l'électrocoagulation.

La contribution de ces différents processus peut être conceptualisée grâce à un diagramme de Venn (Figure I-10). Des chercheurs ont déjà adopté une approche plutôt empirique pour la compréhension du traitement par électrocoagulation [Abuzaid et al.1998, Chen et al.2000]. Ils ont aussi validé la capacité de cette technologie à l'élimination de polluants, mais n'ont pas réussi à extraire (et à quantifier) les principaux mécanismes conduisant à l'abattement. Cela s'est traduit par la proposition de nombreux systèmes d'électrocoagulation conçus et exploités pour traiter et éliminer les polluants d'un effluent spécifique. Ce chapitre décrit les bases de chaque processus intervenant dans le fonctionnement global de l'électrocoagulation.



**Figure I-10:** Diagramme de Venn des principaux processus formant le procédé d'électrocoagulation [d'après Emamjomeh et al.2009, a]

### I.2.3 Réactions électrochimiques aux électrodes

Les électrodes les plus couramment utilisées en électrocoagulation, sont en aluminium ou en fer car ils possèdent des formes ioniques trivalentes. Il est nécessaire de bien connaître le comportement et les caractéristiques chimiques et électrochimiques de ces deux métaux que nous avons utilisés dans nos travaux. Les principales réactions qui se produisent aux électrodes sont les suivantes :

À l'anode se produit l'oxydation et le passage du métal de l'état solide à l'état ionique selon la réaction :

- Anode en aluminium :  $Al_{(s)} \rightarrow Al_{(aq)}^{3+} + 3e^{-}$
- Anode en fer :  $Fe_{(s)} \rightarrow Fe_{(aq)}^{2+} + 2e^{-}$

Les ions ferreux précipitent sous forme de  $Fe(OH)_2$  à un pH supérieur à 6. Cependant, les ions ferreux sont instables dans un environnement contenant de l'oxygène comme en présence d'oxygène dissous dans l'eau, ou à la surface de l'anode :

- $2Fe_{(aq)}^{2+} + 1/2O_2 + H_2O \rightarrow 2Fe_{(aq)}^{3+} + 2OH^{-}$
- $Fe_{(aq)}^{2+} \rightarrow Fe_{(aq)}^{3+} + e^{-}$

Du fait du potentiel standard très négatif du couple  $Al/Al^{3+}$ , l'aluminium réagit avec l'eau en présence d'anions catalyseurs tels que les chlorures [Zongo.2009].

- $Al + 3H_2O \rightarrow Al^{3+} + 3OH^{-} + 3/2H_2$

À la cathode, l'électrolyse de l'eau se produit. Dans le cas d'un milieu acide, on a les réactions suivantes:

- $2H_{(aq)}^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_{2(g)}$
- $2H_2O + 2e^{-} \rightarrow H_{2(g)} + 2OH^{-}$

Les cations métalliques forment des complexes avec les ions hydroxydes. L'espèce majoritaire dépend du pH. Dans le cas de l'aluminium, on trouve une multitude de complexes anioniques et cationiques [Yilmaz et al.2005]. On peut distinguer:

Les mono complexes tel que  $Al(OH)^{2+}$ ,  $Al(OH)_2^{+}$ ,  $Al(OH)_4^{-}$ . Les poly complexes tel que  $Al_2(OH)_2^{4+}$ ,  $Al_2(OH)_5^{+}$ ,  $Al_6(OH)_{15}^{3+}$ .

Les espèces amorphes et très peu solubles telles que  $Al(OH)_3$ ,  $Al_2O_3$ . Les polymères  $nAl(OH)_3 \rightarrow Al_n(OH)_{3n}$  [Can et al.2006].

Dans le cas du fer, on a les complexes tels que  $FeOH^{2+}$ ,  $Fe(OH)_2^{+}$ ,  $Fe(OH)_2$ ,  $Fe(OH)_3$ ,  $Fe(OH)_4^{-}$ ,  $FeO(OH)$ ,  $Fe_2(OH)_2^{4+}$ ,  $Fe_2(OH)_4^{2+}$  [Solak et al.2009].

Ces espèces complexes jouent le rôle de coagulant. Ils s'adsorbent sur les particules et

annulent ainsi les charges colloïdales ce qui conduit à déstabiliser l'émulsion et à la formation de précipités, puis de floccs facilement éliminables. Au voisinage de la cathode, la réduction de l'eau provoque la formation de gaz hydrogène. Ce dégagement de gaz se présente sous formes de bulles, dont le diamètre est estimé à environ 10 à 100  $\mu\text{m}$  [Essadki et al.2007], et qui contribuent à l'agitation du milieu. Dans certains cas, lorsque l'installation est conçue dans le but de réaliser une floculation après électrocoagulation, ces bulles adhèrent aux solides formés en solution (adsorbant-polluant) et favorisent leur flottation. Les données bibliographiques présentées jusqu'à nos jours s'intéressent peu aux bulles d'hydrogène formées au cours de l'EC. Leur rôle semble limité à une légère contribution dans l'agitation et dans la flottation, lorsqu'elle a lieu [Kilonzo et al.2006].

#### I.2.4 Loi de Faraday

Si l'on considère que les seules réactions chimiques qui se déroulent dans le réacteur d'électrocoagulation sont l'oxydation du métal à l'anode, et la réduction de l'eau à la cathode, il est possible de déterminer la quantité de matière produite et consommée lors d'une réaction électrochimique qui se calcule par la loi de Faraday, et qui est fonction de la durée de l'opération  $t$  et de l'intensité du courant  $I$ .

- $$m = \frac{I \cdot t \cdot M}{V_e \cdot F}$$

Où  $M$  est la masse molaire de l'espèce considérée,  $V_e$  est le nombre d'électrons et  $F$  est nombre de faraday.

La loi de Faraday est utilisée pour relier l'intensité du courant  $I$  à la masse  $m$  de matériaux générés à l'intérieur du réacteur, ce qui donne une estimation théorique de la quantité du métal dissous dans la solution. Cette relation suppose que les électrons échangés ont uniquement servi à la réaction considérée. Une partie du courant imposé peut cependant être utilisée par des réactions secondaires, d'où la notion de rendement faradique. Il se détermine par le rapport de la quantité théorique d'électricité nécessaire pour produire ou consommer une mole de B sur la quantité d'électricité réellement nécessaire pour produire ou consommer une mole de B. Le rendement faradique est donné par:

- $$\varnothing = \frac{V_e \cdot F \cdot m_B}{Q \cdot M_B}$$

Où  $Q$  la charge électrique et  $m_B$  la masse de l'espèce B formée.

Le rendement faradique peut souvent être supérieur à l'unité en raison de la dissolution chimique du métal.

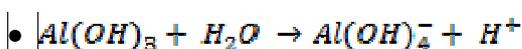
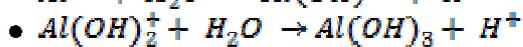
### I.2.5. Chimie de l'aluminium

L'aluminium est utilisé le plus souvent sous forme d'alliage dont les propriétés et les caractéristiques dépendent globalement des éléments ajoutés. Selon l'élément ajouté, on trouve sept familles d'alliages d'aluminium. L'aluminium réagit avec l'air pour former un oxyde  $Al_2O_3$  protecteur. La formation de ce protecteur empêche l'aluminium pur de réagir avec l'eau, l'utilisation des alliages limite ce phénomène. L'aluminium peut être attaqué par les acides minéraux.

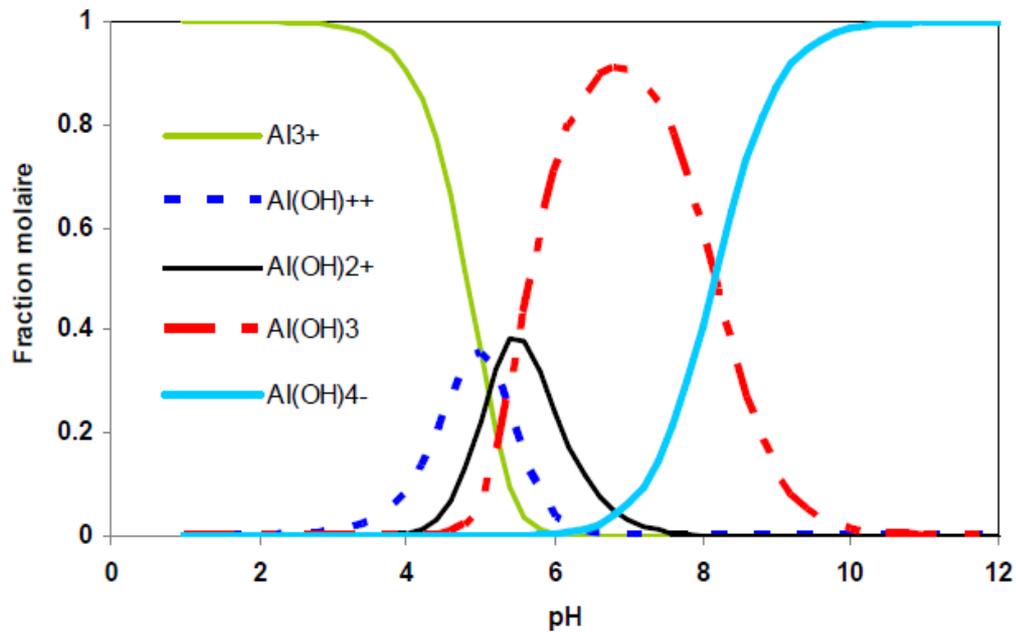
Plus l'acide est concentré, plus la dissolution est rapide. Il se dissout aussi dans les solutions aqueuses alcalines. En milieu aqueux acide, l'ion trivalent  $Al^{3+}$  se présente sous la forme hydratée  $Al(H_2O)_6^{3+}$  mais on écrit  $Al^{3+}$  pour simplifier l'écriture. L'ion  $Al^{3+}$  réagit avec l'eau en attirant les ions  $OH^-$  pour former des complexes anioniques, cationiques ou neutres selon la réaction suivante:



Les ions hydroxydes proviennent de l'électrolyse de l'eau ou de l'ajout d'une solution basique à l'effluent. En ne considérant que les espèces mononucléaires, les réactions d' $Al^{3+}$  sont résumées comme suit :



Sur la base de ces réactions, on peut établir la prédominance des espèces d'aluminium en fonction du pH, figure I-11. Pourbaix (1963) a établi les diagrammes potentiel-pH de nombreux métaux en déterminant leur réactivité en fonction du pH et du potentiel E pour les réactions électrochimiques à l'équilibre thermodynamique [Zongo2009].



**Figure I-11** : Diagramme de prédominance des différents hydroxydes d'aluminium (sans tenir compte des formes polymères de ces hydroxydes) [Zongo.2009]

Le diagramme potentiel-pH de Pourbaix représente les relations entre deux espèces en solution, une espèce en solution et une espèce solide, ou bien deux espèces solides.

Pour l'aluminium, les espèces solides sont Al, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hydraté, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> anhydre et Al(OH)<sub>3</sub>; les espèces ioniques mettent en jeu Al<sup>3+</sup> et AlO<sub>2</sub><sup>-</sup> ainsi que les réactions d'oxydation de l'aluminium permettent d'établir le diagramme d'équilibre potentiel-pH. Ce diagramme est valable en absence des espèces formant avec l'aluminium des complexes solubles ou des sels insolubles (figure I-12).

Le domaine de stabilité de l'aluminium est situé (zone III, figure I-12) en dessous de celui de l'eau (zone comprise entre les courbes a et b).

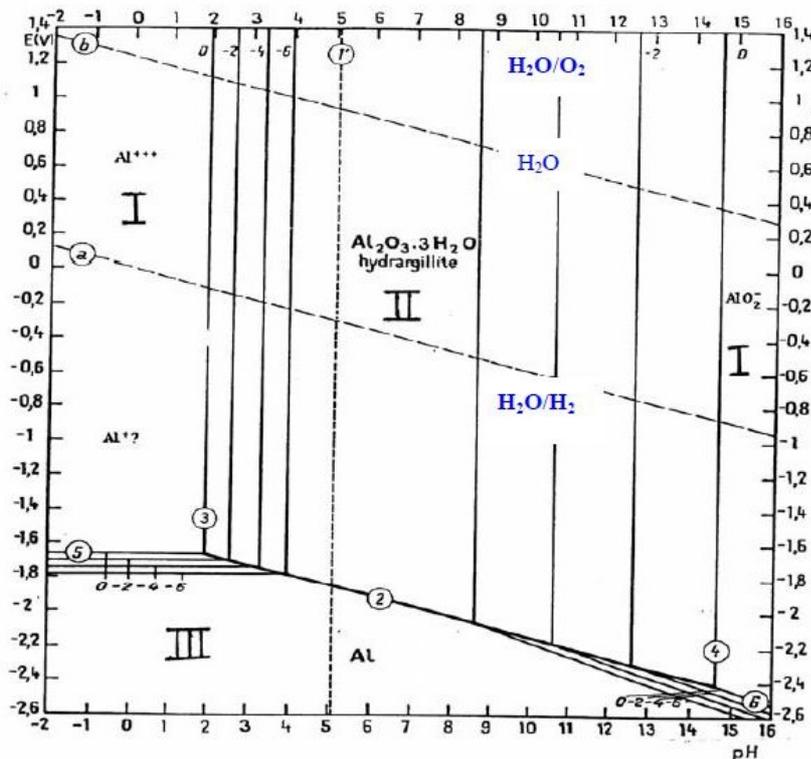


Figure I-12 : Diagramme de Pourbaix de l'aluminium [Zongo.2009 et Bensadok.2007]

### I.2.6 Avantages et inconvénients du procédé d'EC

De nombreux auteurs ont comparé le procédé d'EC avec le procédé physico-chimique classiquement réalisé par l'addition de coagulants chimiques tels que le sulfate d'aluminium et le chlorure ferrique  $FeCl_3$ . Parmi les arguments en faveur de l'électrocoagulation on peut citer les suivants:

1. Pas d'ajout de substances chimiques : même s'il semble nécessaire d'augmenter légèrement la salinité de l'effluent à traiter pour accroître la conductivité électrique de l'effluent, plusieurs études ont montré l'efficacité de l'EC sans aucune variation de Conductivité initiale du rejet à traiter, ce qui évite d'autres formes de traitement en aval.

2. Très bonne efficacité du procédé d'EC pour des polluants colloïdaux très fins. Avec d'autres procédés tel que la coagulation chimique, ces polluants imposent des étapes de traitement plus lentes et des quantités de coagulant plus élevées.

3. Les boues obtenues après traitement par EC sont plus denses et moins hydrophiles. Cela rend la décantation et la flottation plus aisée et diminue le volume des boues. Ce qui réduit le temps et les coûts de traitement des boues.

4. L'importance du champ électrique entre les électrodes qui conduit à la destruction de certaines souches de bactéries. En utilisant des électrodes en titane, des auteurs sont

confirmé cet effet bactéricide sans la formation de dérivés hypochloreux ou d'autres dérivés du chlore[**Abbas et al.2007**].

5. L'EC offre la possibilité de traiter des effluents par oxydation et réduction de plusieurs composés dissous tel que les nitrites, les sulfures, les cyanures, les sulfites, les chromates et les ions fluorures[**Tir.2008**].

6. La biodégradabilité des effluents traités par électrocoagulation est améliorée. Ce perfectionnement est dû à la non-toxicité de la forme d'aluminium utilisé à la faible salinité du milieu.

7. L'utilisation de l'EC permet de réduire le temps de traitement : ce procédé permet un grand gain en compacité des installations et une possibilité d'automatisation[**Ammouche et Slimani.2017**].

Les inconvénients majeurs de l'EC concernent principalement la conductivité souvent faible de l'eau polluée et la formation des dépôts sur les électrodes. En effet, la conductivité du rejet doit être suffisante pour permettre le passage du courant sans consommation excessive d'électricité. Lorsque la conductivité de l'eau polluée est trop faible, un rajout du chlorure de sodium est généralement nécessaire.

La présence de certains ions tels que les chlorures, permet d'éviter le phénomène de passivation des électrodes d'aluminium. Par ailleurs, une présence importante d'ions calcium et hydrogénocarbonate provoque l'apparition d'un dépôt de tartre au niveau de la cathode, augmentant ainsi, la résistance de la cellule. Pour faire face à ce problème, la manière la plus simple est de réaliser une inversion périodique de la polarité [**Zongoet al.2011**].

Il est aussi important de prévoir un nettoyage mécanique périodique des électrodes à l'aide de solutions acides. La formation et le dépôt de tartre sur les électrodes représentent une part importante de la consommation électrique du procédé. Il existe même un procédé électrochimique dont le but est de réaliser un détartrage de l'eau potable par dépôt du tartre sur la cathode[**Zongo et al.2011**].

### ***1.2.7 Principales applications d'EC***

Actuellement, les avantages du processus d'électrocoagulation le placent parmi les processus les plus prometteurs dans différents domaines du traitement. Ses domaines d'application sont très vastes et l'amélioration des procédés électrochimiques réduit la plupart des inconvénients qui ont freiné l'utilisation de l'électrocoagulation. L'électrocoagulation a le potentiel d'être le choix économiques et environnemental distinct

pour le traitement de l'eau usagée et d'autres issues relatives de gestion de l'eau. L'électrocoagulation a été appliquée avec succès dans le traitement de plusieurs types de pollution : effluents de l'industrie de textile [Kobya et al.2003].

De plus, dans les dernières décennies l'EC a été proposé comme procédé efficace pour éliminer les espèces ioniques solubles des solutions, en particulier les métaux lourds. Le processus d'électrocoagulation a été prouvé efficace dans la séparation (solide/liquide). Ce procédé l'EC a été utilisé pour le traitement de solutions colorées par différentes substances telles que le Bleu méthylène et jaune éosine [Golder et al.2005].

Le traitement de l'eau polluée par les rejets d'une industrie de raffinage mécanique et chimique, caractérisée par une teneur élevée en matières suspensions, une DCO supérieur à 500 mg /l, une concentration en cuivre de l'ordre de 100 mg /l, a permis d'atteindre 99% d'élimination du cuivre et 75% de DCO par électrocoagulation en utilisant des électrodes en fer et en aluminium [Chenet al.2003].

### **I.2.8 Comparaison entre la floculation-coagulation chimique et l'EC**

La coagulation chimique ou la floculation/coagulation chimique a souvent été opposée à l'électrocoagulation pour justifier le choix de l'une ou de l'autre. Toute coagulation est l'agrégation des particules colloïdales résultant d'une diminution de la charge statique surfacique ou/et de la création d'une liaison inter-particules, conduisant ainsi à un pontage des particules. Quand cela se fait par l'ajout de produits chimiques, on parle de coagulation chimique.

L'électrocoagulation se base sur une production in situ de cations métalliques par la dissolution d'électrodes sous l'effet d'un courant électrique. Ces agrégats produits peuvent être ensuite éliminés par décantation, filtration ou sédimentation. Malgré leur ressemblance, le procédé d'électrocoagulation et la coagulation chimique diffèrent tant sur la mise en œuvre pratique que sur les processus mis en jeu.

- Coagulation-floculation par des électrolytes : les sels les plus utilisés dans le traitement des eaux sont les sels de fer et d'aluminium. Ces sels, électrolytes forts, fournissent, par dissociation dans la solution, des cations trivalents à fort pouvoir déstabilisant. Certains électrolytes peuvent agir, par réaction ou adsorption chimique, avec les composés de la surface des particules et modifient de façon irréversible la

charge particulaire. Si la quantité d'ions adsorbés est plus élevée que le nombre de sites à la surface, on assiste à une déstabilisation due à l'inversement de la charge.

- Coagulation floculation par des poly électrolytes : dans ce cas, le coagulant est un polyélectrolyte. C'est donc un cas particulier de coagulation par adsorption, où l'un des groupes fonctionnels du polymère peut s'adsorber à la surface de la particule alors que le reste de la chaîne est momentanément libre. L'autre groupe fonctionnel peut à son tour s'adsorber sur une ou plusieurs autres particules : c'est la coagulation par pontage.

### I.3 LES BIOFLOCULANTS

#### I.3.1 Présentation et mode d'action

Les coagulants d'origine naturelle comprennent à la fois les ressources végétales et animales. Parmi les coagulants d'origine animale les plus communément utilisés, citons l'ichtyocolle obtenue à partir de la vessie de poisson [Bigget al.2000] ou le chitosane extrait de la coquille de crustacés [Bratby.2007]. Les coagulants à base de plantes ont été beaucoup plus utilisés et ont acquis une importance significative depuis les dernières années. Comparés aux flocculants chimiques conventionnels, les bioflocculants sont des polymères biodégradables, assez stables, facilement disponibles à partir de ressources agricoles durables et ne produisent aucune pollution secondaire [Bolto.2007]. Comme les polymères utilisés sont biodégradables, les boues peuvent être efficacement dégradées par les microorganismes [Renault et al.2009].

Les bioflocculants peuvent déstabiliser les particules colloïdales en augmentant la force ionique (coagulation non spécifique) [Lee et al.2014,a]. Ils peuvent également spécifiquement s'adsorber par la présence de groupes fonctionnels comme par exemple des groupes amine alcool) [Özacar et Sengil.2003]. Dans ce cas ils agissent selon un mécanisme de adsorption et pontage. Depuis de nombreuses années, les flocculants à base de bios polymères tels que le chitosane, les tanins, la cellulose, l'alginate, les gommes et le mucilage suscitent un large intérêt auprès des chercheurs.

#### 1.3.2 Les bios polymères

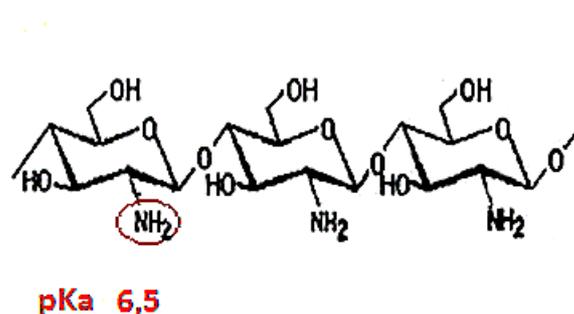
Les bios polymères sont essentiellement des polysaccharides (amidon, cellulose...), mais aussi des polyphénols (lignine et tanins) et des protéines. Dans la prochaine partie, nous décrirons les familles biochimiques des bioflocculants.

### I.3.2.1 Les polysaccharides

#### a) Le Chitosane

Puisque la plupart des colloïdes naturels sont chargés négativement, les polymères cationiques présentent un intérêt particulier en tant que flocculant. Le chitosane est un polymère avec une fonction amine (pKa 6.5) [Lee et al.2013] obtenu à partir de la désacétylation alcaline de la chitine extrait de coquillages. C'est un amino-polysaccharide hydrophile linéaire avec une structure rigide contenant à la fois des unités de glucosamine et d'acétylglucosamine (figure 1.13). Les longues chaînes de haut poids moléculaire, produisent un agent coagulant et flocculant efficace pour l'élimination des contaminants [Guibal et al.2006, Noet Meyers.2000, Renault et al.2009].

Il est insoluble dans l'eau neutre et dans les solvants organiques mais soluble dans l'eau en milieu acide [Renault et al.2009]. Une valeur de  $pH$  inférieure à 5, le chitosane devient un polymère cationique soluble à forte densité de charge [Rinaudo.2006]. Ainsi, le traitement des eaux usées par le chitosane est possible par adsorption et/ou pontage de colloïdes, d'anions métalliques, de colorants, de composés organiques [Renault et al.2009].



**Figure 1.13:** Structure chimique du chitosane [Alves et al.2008]

Plusieurs études ont montré l'efficacité de ses propriétés en coagulation flocculation pour des effluents colorés [Guibal et Roussy.2007], les effluents chargés en pulpe dans les sucreries (lignine et composés chlorés), les effluents des usines de papier [Rodrigues et al.2008], les métaux lourds, les composés

phénoliques [Renault et al. 2009], ainsi que pour les effluents synthétiques à base de kaolinite [Li et al. 2013].

### b) Cellulose

La cellulose est l'un des polysaccharides naturels les plus abondants, il a un pKa qui varie entre 11 et 12 lié à ses fonctions alcools selon [Bialik et al. 2016]. Ce bio polymère est le principal constituant de la paroi des cellules végétales. Sa structure fibreuse est constituée de longues chaînes de molécules de D-glucose, reliées les unes aux autres par des liaisons  $\beta$ -1,4-glucosidiques.

La réunion de plusieurs de ces macromolécules linéaires, parallèles, forme une fibrille, ou micelle, dont la cohésion est assurée par les liaisons hydrogènes qui s'établissent d'une macromolécule à une autre, à partir des groupements hydroxyles [Bialik et al. 2016, a] conformation et ses propriétés structurales lui permettent d'être un bon flocculant. [Zhabankov et al. 2002].

La déstabilisation des suspensions dans le cas de la cellulose, effectuée selon un processus d'emprisonnement et d'entraînement des particules dans un précipité (sweep).

### c) Amidon

L'amidon est un bio polymère, qui a attiré l'attention des industries pour le traitement des eaux usées en raison de ses fonctions d'hydroxyles, de sa biodégradabilité et de son faible coût. L'amidon représente l'un des polymères les plus abondants, il est constitué d'un mélange de deux polymères dont les taux sont variables en fonction de l'espèce végétale : l'amylose (linéaire) et l'amylopectine (ramifiée grâce aux liaisons  $\alpha$  1-6). Contrairement à la cellulose qui est fibreuse, l'amidon contient des monomères de glucose liés en  $\alpha$  1-4, ce qui permet à la molécule d'avoir une conformation hélicoïdale souple (avec des ramifications). La molécule d'amidon est donc plus réactive que la cellulose même s'il est constitué par les mêmes monomères. [Teh et al. 2014] ont étudié la possibilité de remplacer les coagulants inorganiques par l'amidon pour le traitement des eaux usées de l'industrie de fabrication d'huile de table. Une élimination de 84% des matières solides en suspension a été obtenue aux conditions optimales (pH 3 ; dose de 2 g/l de l'amidon)

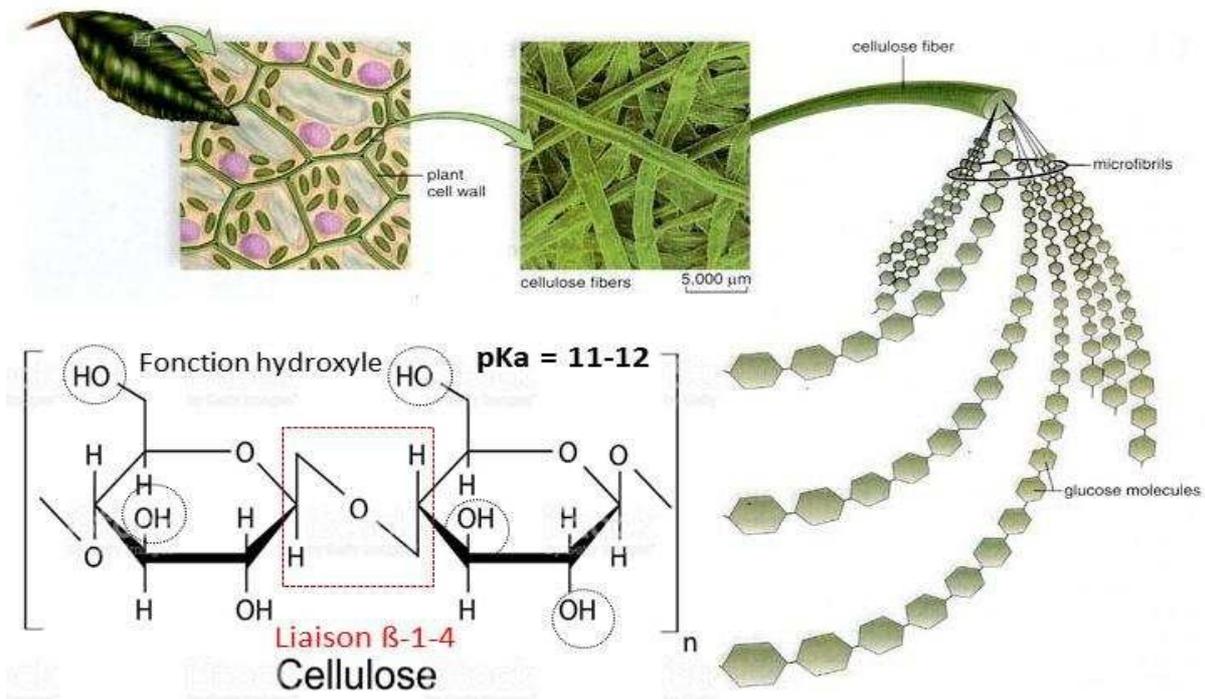


Figure 1.14: Structure chimique de la cellulose [Zhabankov et al.2002]

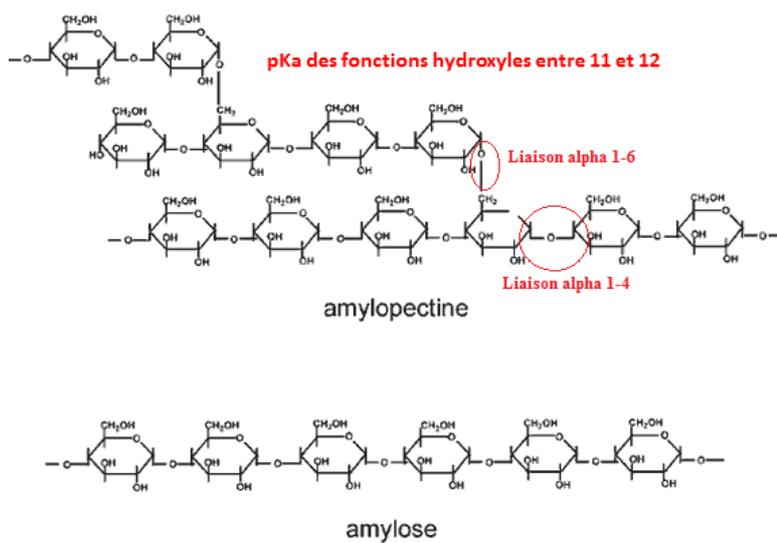


Figure 1.15: Structure chimiques de l'amidon [Teh et al. 2014]

*d) Alginate desodium*

L'alginate de sodium, est un polymère linéaire anionique soluble dans l'eau de poids moléculaire moyen de 500 000 Da [Wu et al. 2012] et un pKa de 3.2 lié à la fonction d'acide carboxylique [Rehmet al. 2009]. Les alginates, présents dans tous les types de Phéophycée (algues brunes), sont des polysaccharides structuraux capables non seulement d'apporter la rigidité à l'algue mais aussi d'en prévenir le dessèchement dû à l'exposition à l'air à marée basse.

On les trouve dans le mucilage des algues brunes, sous la forme d'un sel insoluble, constituant parfois jusqu'à 40% de l'extrait sec de ces algues [Palluault. 2010]. Ses propriétés lui permettent de jouer le rôle de flocculant. Des études de floculation pour le traitement d'effluents industriels du textiles et d'eaux synthétiques colorées en utilisant le sulfate d'aluminium comme coagulant [Wu et al. 2012] ont montré un fort pouvoir flocculant des alginates avec plus de 90% d'élimination de la couleur et une réduction de 80% de la DCO.

**Tableau I.1:** Utilisation des flocculant greffés dans le traitement des eaux usées

Coagulants	Floculants	Type de l'effluent traité	Paramètres	Abattement optimum	Références
<b>Chlorure d'aluminium</b>	Chitosan greffé avec PDMC (chlorure de poly (2-méthacryloyloxy éthyl) triméthylammonium)	Recyclage de papiers	Turbidité	98%	<b>Wang et al 2007</b>
<b>Chlorure d'aluminium</b>	Chlorure de (2-méthacryloyloxyéthyl) triméthyl ammonium (DMC) greffé avec du chitosane (cationique)	Eaux usés	Turbidité	99,4 %	<b>Wang et al 2009</b>
<b>Chlorure d'aluminium</b>	Carboxyméthylamidon greffé de polyacrylamide hydrolysé (Hyd.CMS-g-PAM)	Textile	Turbidité	44%	<b>Sen et al 2011</b>
<b>Chlorure d'aluminium</b>	Amidon-g-PAM-g-PDMC[polyacrylamide et chlorure de poly (2-méthacryloyloxy éthyl) triméthylammonium]	Eaux usés	Turbidité	99,6 %	<b>Wang et al 2011</b>
<b>Chlorure d'aluminium</b>	Gomme de guar carboxyméthylrique greffée de polyacrylamide (CMG- g-PAM)	Colorants synthétiques	DCO	63,5 %	<b>Pal et al 2012</b>
<b>Chlorure d'aluminium</b>	Gruau greffé de Polyacrylamide (OAT- g-PAM)	Eaux usées municipale	Turbidité	56%	<b>Bharti et al 2013</b>

## I.5 Les ressources végétales

### I.5.1 Diversité des ressources

De nombreux végétaux ont été envisagés pour intégrer un procédé de traitement des eaux en utilisant leurs propriétés coagulantes et floculantes.

#### ○ Préparations des floculants

Les méthodes de préparation des ressources végétales sont simples et varient selon la plante utilisée. [Patale et Parikh.2010] ont extrait le mucilage de *Coccinia indica*, par de l'eau ultrapure, puis par l'acétone. Ils ont ensuite séché l'extrait à 40 °C pendant 24 heures afin de l'utiliser directement en coagulation floculation. D'autres auteurs ont préféré garder tous les constituants et utiliser directement la poudre après une étape de séchage à 60°C [Sowemyan et al.2011, Muhammad Shahzad Zafar.2015]. D'autres chercheurs ont essayé d'extraire les constituants actifs, soit le mucilage [Shamsnejati et al.2015] soit les protéines [Fatombi et al.2013] par une extraction à l'eau en présence des sels, NaCl et KCl suivi d'une filtration.

En général, la majorité des constituants actifs responsables de la coagulation/floculation sont hydrosolubles dans l'eau ultra pure à un pH proche de la neutralité [Al-Samawi et al.1996, Mbogo et al.2008, Asrafuzzaman et al.2011].

### I.5.2 Condition d'application des floculants

Les taux de traitement optimum en bio floculant, varient entre 5 mg L<sup>-1</sup> et 8000 mg L<sup>-1</sup> pour avoir des abattements compris entre 20 % et 100 % et pour des valeurs de pH entre 6 et 10. Par comparaison, la dose de sels métalliques ajoutée pour le traitement des mêmes effluents variait entre 25 et 200 mg L<sup>-1</sup> pour des valeurs de pH de 3 à 7.

Par ailleurs, la combinaison de bio floculant à des coagulants chimiques améliore la qualité du traitement tout en réduisant la dose de sels métalliques à introduire et le volume des boues générées [Shamsnejati et al.2015, Freitas et al.2015]. Cette stratégie est donc un moyen efficace pour substituer les sels métalliques en coagulation floculation.

### I.5.3 Mécanisme d'action des biofloculants

Les bio floculants issus de végétaux sont majoritairement étudiés dans le cadre de la mise au point d'un procédé de traitement des eaux (pH et dose optimaux) et, peu ou pas d'études recherchent les constituants et les fonctions actives vis-à-vis de l'effluent à traiter. Les

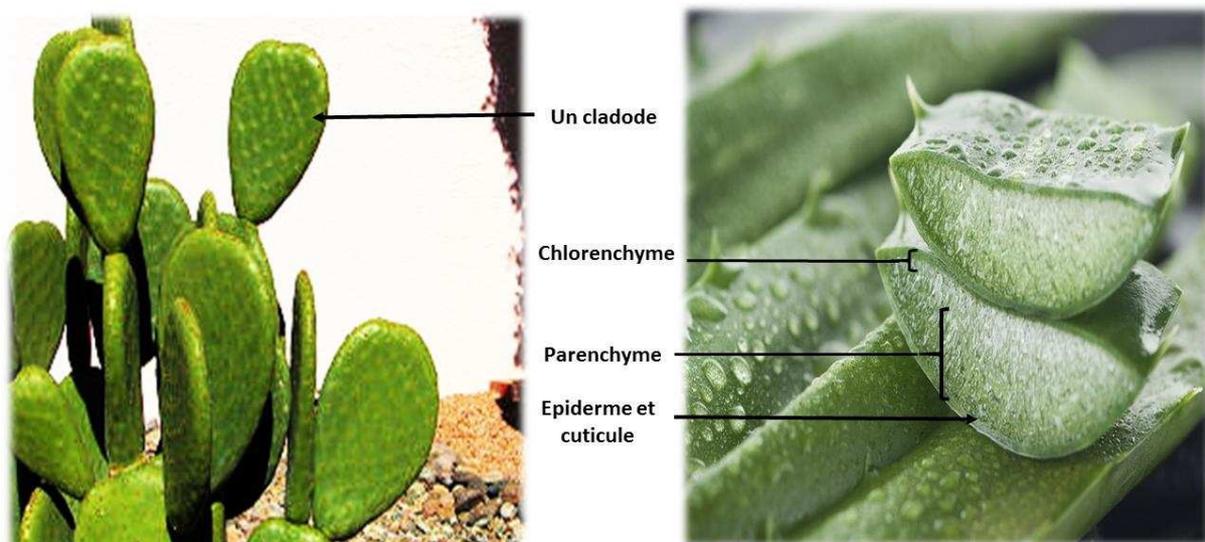
molécules actives ont cependant été identifiées pour *moringa oleifera*, *cocos nucifera*, pomme de terre [Ndabignesere et al. 1995, Fatombi et al. 2013, Zafare et al. 2015, respectivement]. Pour ces végétaux il s'agit de protéines pour *moringa oleifera* et *cocos nucifera* et d'amidon pour les pommes de terre.

## I.6 *Opuntia ficus indica*

### I.6.1 Généralités sur *Opuntia ficus indica*

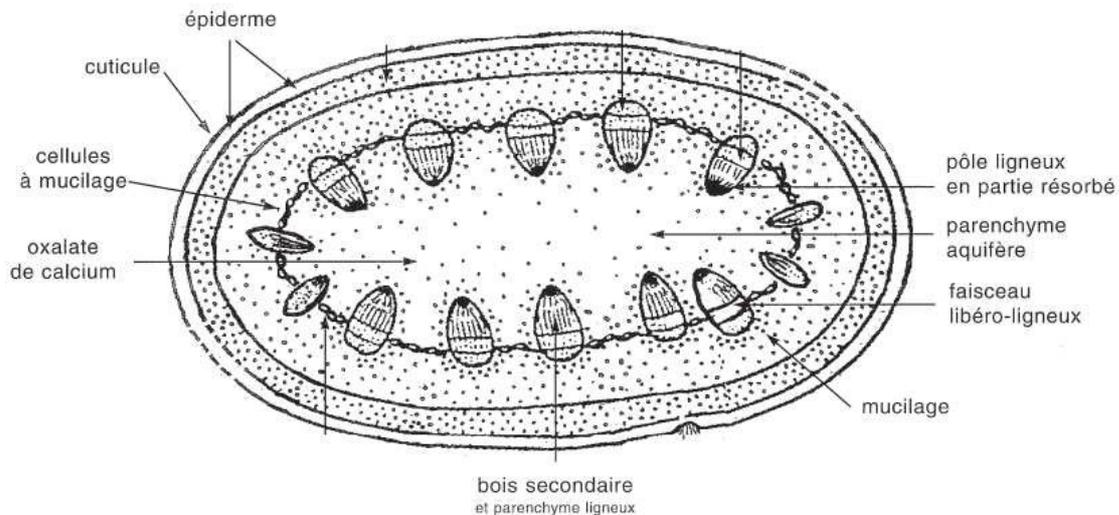
*Opuntia ficus indica*, communément appelé figuier de barbarie ou *chaphiballi*, appartient à la famille des Cactacées (figure 1.16). La famille des Cactacées contient environ 130 genres et près de 1500 espèces. Le cactus est trouvé principalement dans les zones arides (250 mm de précipitations annuelles) et semi-arides (250-450 mm précipitations annuelles) [Stintzing et al. 2005]. Les sols privilégiés sont les sols légers et acides (pH entre 5,1 et 6,7) et une teneur en argile inférieure à 20% [El Mostafa et al. 2014].

En raison de leur remarquable variabilité génétique, les *Opuntia* montrent une grande adaptabilité et peuvent donc être rencontrés sous toutes les conditions climatiques. El Mostafa et al, (2014). (Miller et al, (2008) ont montré que les cladodes de cactus, ont un fort pouvoir floculant (98% d'abattement de la turbidité) pour le traitement de eaux synthétiques de kaolin par coagulation-floculation.



**Figure 1.16:** Morphologie d'*Opuntia ficus indica*

La figure 1.17 représente un schéma de la structure des cladodes d'*Opuntia*. Le cladode est constitué essentiellement de cellules épidermiques, de parenchyme et de chlorenchyme (parenchyme chlorophyllien). Le parenchyme est le tissu fondamental des végétaux supérieurs, formé de cellules vivantes peu différenciées, aux parois cellulosiques ni épaissies ni lignifiées. La cuticule contient les tanins et la lignine.



**Figure 1.17:** Coupe transversale d'une raquette d'*Opuntia ficus indica*[Schweizer.1997]

## I.6.2. Composition chimique des cladodes

### I.6.2.1 Les principaux constituants

Le tableau 2 représente la composition biochimique de quelques éléments majeurs des cladodes: les sucres, suivis par les fibres (qui contiennent elle-même de la cellulose).

**Tableau I.2 :** Composition des cladodes en % massique

Composés identifiés dans le cladode en % (m/m)	Malainine et al., 2003	Batista et al., 2003
Minéraux	20	23.5
Sucres	48	71
Fibres (lignine cellulosehemicellulose)	25	30
Protéines	Non évaluées	10
Lipides	7.2	4

○ **Les minéraux** : Dans les cladodes, les principaux minéraux sont le potassium et le calcium, avec des quantités allant de 0,24 à 5,5 g dans 100 g de MS [Ayadi et al. 2009]. Dans la pulpe (partie molle et charnue des végétaux), le potassium est présent à 161 mg pour 100 g de MS de cladode, dépassant la concentration d'autres minéraux comme le calcium et le magnésium [Medina et al. 2007].

○ **Les sucres** : Les sucres sont présents sous forme polymérique (cellulose et amidon) ou monomérique. El Samahy et al. (2006) ont montré que le mucilage de *Opuntia ficus indica* contient du D-glucose, du D-galactose, de l'arabinose, du D-xylose et du L-rhamnose. La teneur en sucre libre est de 0,32 % du poids sec [Munoz et al. 1995]. Dans une autre étude, la fraction de sucre réducteur a été rapportée à 0,64 - 0,88 % de poids sec [Rodriguez et al. 1988].

○ **Les acides organiques** :

Le principal acide est l'acide oxalique qui se produit soit sous forme dissoute (0,61 mg de MS) ou sous forme cristalline (34,5 mg de MS) : whewellite ( $\text{Ca}_2\text{C}_2\text{O}_4\text{NH}_2\text{O}$ ) ou weddelite ( $\text{Ca}_2\text{C}_2\text{O}_4\text{N}2\text{H}_2\text{O}$ ) (Malainine et al, 2003 ; McConn et al, 2004 ; Monje et al, 2002). Teles et al. (1984) ont rapporté que la teneur en acide malonique et citrique représente 36 mg et 178 mg dans 100 g de MS, respectivement. Des traces d'acide tartrique et succinique ont été trouvées [Teles et al. 1984 et 1994] alors que les acides piscidiques et phorbiques ont été identifiés mais restent quantitativement limités. De plus, l'acide malique varie de 0,985 à 0,095 % de la MS et fait partie des acides libres [Teles et al. 1994].

○ **Les acides aminés et les protéines**

En général, les protéines varient entre 4 et 10 % de la composition chimique de cladode [Barrios et al. 1993]. L'acide aminé détecté majoritaire est la glutamine, suivie par la leucine, la lysine, la valine, l'arginine, la phénylalanine et l'isoleucine.

Les polyphénols : La lignine représente 0,2 % de la fibre totale des cladodes [El Kossori et al. 1998]. Toutes les parties des cactus sont riches en polyphénols [El Mostafa et al. 2014].

Le pourcentage des composés phénoliques de type tanins et flavonoïdes, dans le cactus, est de 0,01 % du poids sec. Le parenchyme des cladodes contient de la quercétine, du kaempférol et

de l'isorhamnétine. La méthyl-3-quercétine a également été identifiée par Burre et al. (1981). Cette dominance des dérivés de flavonol a déjà été rapportée par Richardson et al. (1978). Dans d'autres études, des nouvelles molécules ont été identifiées telles que l'isorhamnétine 3-rutinoside, l'opuntiol, le manghaslin (quercétine-3-[2G-rhamnosylrutinoside]), le phydroxybenzoïque acide, l'1-heptanécaneol, l'acide férulique, le 3,4-dihydroxybenzoïque acide, l'acide vanillique, le 3,39-diméthylquercétine, l'acide malique, le kaempférol-7-O-β-glucopyranoside et le 3-O-méthyl-quercétine (Qiu et al., 2002 et 2003).

Chougui et al. (2013) ont montré que les cladodes de cactus *Opuntia ficus indica* contiennent de 1.55 à 2.64 mg et 4.1 à 6.6 mg pour 100g de MS des flavonoïdes totaux et des tanins respectivement.

### **I.6.3 Cactus *Opuntia ficus indica* en coagulation-floculation**

#### **I.6.3.1 Présence d'éléments floculant**

Plusieurs composés des cladodes de cactus sont susceptibles d'agir comme des bio-floculants. Comme nous venons de le voir, la composition chimique des cladodes de cactus est riche en sucres, avec des monomères glucidiques tels que le D glucose, D galactose, L arabinose et le rhamnose. Ces sucres monomériques ont montré leurs pouvoirs floculants en traitement d'un effluent synthétique de kaolin avec un abattement de la turbidité de 50% [Miller et al. 2008].

De même, Majdoub et al. (2010) ont rapporté que les polysaccharides sont considérés comme les matières floculantes actives de cactus. D'autres familles biochimiques sont soupçonnées d'avoir un effet de synergie avec les polysaccharides, tels que les protéines qui ont déjà été rapportées par Ndabigengesere et al. (1995) comme la molécule responsable de la floculation pour *Moringa Oleifera*. Les polyphénols et surtout les tanins qui ont déjà montré leur efficacité en traitement des eaux par coagulation-floculation [Jeon et al. 2009], pour raient aussi expliquer le meilleur abattement de floculation (>90%) d'*Opuntia ficus indica*.

#### **I.6.3.2 Conditionnement du cactus**

Miller et al. (2008) ont observé la présence de l'activité coagulante de l'ensemble du cladode sauf de l'épiderme (figure 14). D'autre part, ils ont remarqué une relation entre l'augmentation de la température de préparation de la poudre d'*Opuntia ficus indica* et la réduction de l'activité coagulante, qui peut être expliquée par la perte des matières actives à des températures qui dépassent 80 °C. Dans la littérature, il existe d'autres modes de préparation du cactus :

- Extrait liquide du cactus : après enlèvement des épines, les cladodes sont lavés premièrement

par de l'eau potable, ensuite par de l'eau ultrapure ; ils sont coupés par la suite en petits morceaux, et broyés avec un broyeur domestique. Le jus extrait est stocké au réfrigérateur à 4°C après une dernière étape de filtration (Gebrekidan et al, 2013). D'autres chercheurs, Betatache et al. (2014), Belbahloul et al. (2014), ont inactivé les enzymes dans les cladodes en les chauffant dans de l'eau à 85 ° C pendant 20 minutes, puis en les neutralisant à pH 7 afin d'induire une dés-estérification des groupes méthoxyles, pour extraire le maximum de mucilage.

- Extrait solide de cactus : Les cladodes de cactus sont lavés, coupés, puis séchés au soleil pendant deux semaines avant d'être séchés au four à 60 °C pendant 24 heures.

#### I.6.4. Conditions opératoires

Des études ont montré l'efficacité pour le traitement d'effluents synthétiques ou réels par ajout d'extrait de cactus liquide ou solide (tableau 5). ellami et al. (2014) ont montré la possibilité de traiter deux effluents (eaux usées de l'industrie alimentaire et de l'industrie des colles) par l'ajout d'un jus de cactus sans ajuster le pH initial de ces effluents (pH 4). Les doses optimales étaient, pour l'effluent de l'industrie alimentaire et de l'industrie des colles, respectivement de 56 et 616 mg L<sup>-1</sup>.

Les différentes préparations d'*Opuntia ficus indica* ont montré leur efficacité pour des pH basiques (>8) (tableau 5), par contre d'autres types d'effluents réels ont montré un meilleur abattement en condition acide (pH 5). La variation de la dose entre 0,5 et 50 mg L<sup>-1</sup> peut être expliquée par la nature de ces effluents et de leur teneur en éléments mesurés, et ii) par l'extrait de cactus dont la nature et la quantité des molécules présentes varient selon le mode de préparation. En général, l'ajout de coagulants chimiques améliore la qualité du traitement avec un abattement plus important de la turbidité et de la DCO (Rachdi et al, 2017)

#### I.6.5 Mécanismes mis en jeu

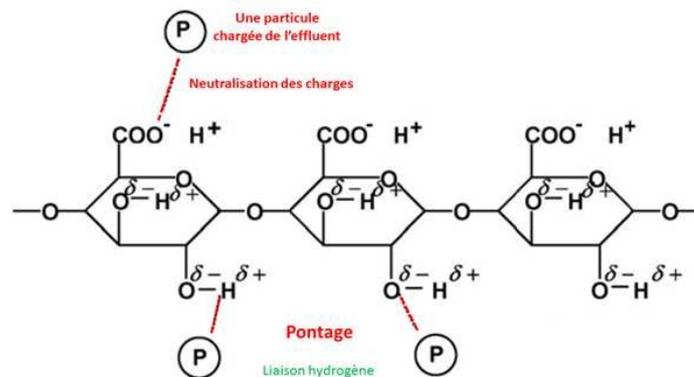
Miller et al. (2008) ont discuté le mécanisme de traitement d'un effluent synthétique de kaolin par le cactus. L'étude du potentiel zêta a éliminé la possibilité d'avoir

- un mécanisme d'adsorption inter-colloïdale et neutralisation totale des charges, puisque l'effluent et l'extrait de cactus sont chargés tous les deux négativement aux conditions de traitement.
- d'avoir une coagulation électrostatique par compression de la double couche puisque

la force ionique fournie par le cactus est insuffisante. D'autre part, l'excès en dose

de coagulant a montré une relation stœchiométrique entre l'efficacité de traitement et la dose ajoutée, ce qui correspond plutôt à un mécanisme d'adsorption et pontage. Les auteurs ont observé que l'acide galacturonique du mucilage pourrait être responsable d'une partie de l'élimination de la turbidité par le cactus.

L'acide galacturonique, ajouté de manière isolée a été capable d'éliminer plus de 50% de la turbidité initiale de l'effluent [Miller et al.2008]. Des résultats similaires ont été obtenus par Fedala et al. (2015) au cours du processus de coagulation appliqué à des eaux de surface du barrage de Taksebten Algérie. L'élimination de Pb(II) de surface par l'ajout d'*Opuntia ficus indica* en poudre a montré la coexistence de deux mécanismes : une adsorption et neutralisation des charges et un pontage par adsorption en raison de la nature anionique et macromoléculaire de l'acide polygalacturonique déprotoné dans le coagulant [Yin et al,2010].



**Figure 1.18 :** Interactions chimiques possibles dans le procédé de coagulation floculation entre l'acide polygalacturonique en solution aqueuse et les particules chargées positivement de l'effluent (P) [Yin et al.2010]

**Tableau I.3:** Conditions opératoires de traitement d'effluents par *Opuntia ficus indica*

Coagulant	Floculant	Type d'effluent	Dose du floculant en mg. L <sup>-1</sup> (SA : sulfatés d'aluminium)	PH	Paramètre mesuré et son abattement en %	Références
-	Cactus en poudre	Eaux usées municipales	0.5-16	10	Turbidité >90%	Al Saati et al., 2016
-	Cactus en poudre	Eaux synthétiques	40	-	Turbidité 92%	Jadhav and Mahajan (2014)
-	Cactus en poudre	Eaux usées des tanneries	8	8	Turbidité et DCO 70%	Swathi et al. (2014)
-	Cactus en poudre	Eaux de surface	8	5	Plomb 100% Zinc 86% Cadmium 84%	Nharingo et al., 2015
-	Jus de cactus	Eaux usées municipales	50	10	Demande chimique en oxygène (DCO) 65%	Torres et al., 2012
Sulfate d'aluminium	Jus de cactus	Eaux usées des tanneries	1.1 75 de SA	5	DCO 90%	L. Gomes et al., 2016
Sulfate d'aluminium	Jus de cactus	Eaux usées municipales	5 500 de SA	8.5	Turbidité 93% DCO 64%	Rachdi et al., 2017

### II.1. Introduction

Ce travail a été réalisé au niveau de laboratoire de Génie des Procédés, Facultés des Sciences et Sciences Appliqué, Université de Brouira.

Rappelons que cette étude a pour objectif l'évaluation du potentiel d'électrocoagulation comme alternative au procédé conventionnel de coagulation chimique pour l'étude de la décantabilité des eaux de surface étant donné que la pollution des eaux de la région de bouira est due essentiellement à la pollution humique.

Le présent chapitre porte sur le dispositif expérimental et le mode opératoire nécessaires à la conception d'unité d'électrocoagulation ainsi qu'à la réalisation d'essais empiriques en laboratoire.

Plus précisément, ce chapitre se divise en trois parties. La description de l'eau brute à traiter est présentée en premier lieu. La deuxième partie porte sur le dispositif expérimental. Une attention toute particulière a été portée à la conception de la cellule d'électrocoagulation ainsi qu'à celle des électrodes. La troisième section de ce chapitre concerne la description du mode opératoire.

Les apports d'eau les plus importants et les plus fluctuants qui alimentent les barrages de la région de Bouira sont observés pendant l'hiver et le printemps par les précipitations de pluies qui provoquent des érosions intenses et des transports solides importants, pour le reste de l'année, les apports sont faibles

Pendant les crues la turbidité subit des augmentations considérables dues essentiellement aux teneurs en matières minérales grossières. L'eau du barrage peut contenir des quantités non négligeables de matières organiques naturelles telles que les substances humiques mais aussi des composés organiques issus de divers rejets polluants ou de pratiques agricoles intensives. La matrice organique de l'eau du barrage pourrait s'avérer plus complexe et comporter de nombreuses autres substances organiques non humiques naturelles ou d'origine anthropique. Pour produire de l'eau potable, l'eau brute du barrage doit être traitée pour la débarrasser des agents polluants.

## II.2 Produits et réactifs

Les principales propriétés chimiques et physiques de bentonite sont:

**[Abdelouahab.H.et al 1988]**

- La bentonite est une argile souvent d'une cendre volcanique et essentiellement constituée de minéraux smectiques. Les smectites sont des minéraux argileux constitués de cristallites individuelles qui sont des minéraux argileux à trois couches.
- La bentonite est une argile colloïdale naturelle découverte aux Etats Unis en 1888 à fort Benton dans le Wyoming. Par rapport aux autres argiles, la bentonite a la propriété de gonfler au contact de l'eau en donnant un gel plus ou moins épais. De très nombreux gisements ont été découverts dans le monde. Selon leur origine les bentonites présentent des propriétés différentes.
- Sur le plan minéralogique, la bentonite est un silicate d'alumine hydraté du groupe des Montmorillonites qui contient principalement les cations échangeables suivants : calcium, sodium, magnésium, potassium. Dans le vin, les ions silicium et aluminium ne sont pas échangeables.
- En Algérie, les gisements de bentonite les plus importants économiquement se trouvent dans l'Oranie (ouest algérien). On relève en particulier la carrière de Maghnia (Hammam Bouhrara) dont les réserves sont estimées à un million de tonnes et de celle de Mostaganem (M'zila) avec des réserves de deux millions de tonnes.

Dans notre cas ce n'est pas ses caractéristiques sorptives qui nous ont intéressées mais sa propriété de simuler parfaitement les eaux turbides et ce à différentes charges.

Dans le cas présent ; nous avons travaillé avec une bentonite commerciale de Biochem® dont les caractéristiques physicochimiques sont les suivantes :

Tableau II.1 : Propriétés physico-chimiques de la bentonite utilisée.

<b>Etat à 20 0C</b>	Solide
<b>Valeur de pH</b>	9-10
<b>Solubilité /eau</b>	modérément
<b>Densité</b>	2,5 g/Cm3
<b>Pertes au sechage à 105 C</b>	5-12 %
<b>Pouvoir gonflant</b>	Min 24 ml
<b>Particules grossières</b>	Il reste au maximum 0,1 g le 200 no. tamis
<b>Gisement d'origine</b>	Montmorillon



Figure II.1 : Représente la Bentonite.

➤ **Les autres produits chimiques**

- HCl , H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, provenance Biochem © ;
- NaCl provenance entreprise Enasel Pureté 99.99 % (non iodé) ;
- Electrodes aluminium ; provenance commerciale pureté 99.8 % selon le fournisseur.

**Tableau II.2 :** Matériels utilisés dans laboratoire.

Matériel	Fournisseur
Générateur électrique	BAKU (BK 305 D)
pH-mètre	Adwa (AD1030)
Balance	KERN
Agitateur magnétique	VELP
Jar test	WiseStir
Turbidimètre	AQUA LYTIC

### II.3. Dispositif expérimental de procédé d'électrocoagulation

#### ○ Conception des électrodes

Dans le cadre de cette étude, une configuration d'électrodes monopolaires a été retenue, telle que présentée dans la figure 3.2. Les dimensions des électrodes devraient obéir à un compromis entre consommation électrique réduite et bonne circulation du liquide, qui ne doit pas être trop perturbée ou trop freinée. Les deux électrodes (plaques rectangulaires parallèles de dimensions 70mm x 70mm x 1mm) ont, chacune 49 cm<sup>2</sup> de surface nominale immergée.

Quant au matériau des électrodes employées, celui-ci est crucial puisqu'il influence considérablement le processus d'électrocoagulation. Il est donc important de préciser qu'anode et cathode sont faites toutes exclusivement d'aluminium ou de fer. En effet, l'utilisation d'un inverseur de polarité dans ce montage expérimental, contraint la cathode et l'anode à être constituées d'un même matériau puisqu'elles seront interverties à un pas de temps spécifique.

Le métal des électrodes peut être obtenu par récupération des déchets de fer inoxydable ou d'aluminium, ce qui rend leur coût supportable pour un procédé de dépollution. Finalement, un espacement de 1 à 3 cm qui sont des valeurs caractéristiques dans les systèmes d'électrocoagulation, est assuré par une bande de polycarbonate appliquée entre les électrodes, comme il est montré dans la figure (3.2).

#### II.4. Description de montage expérimental

- Le réacteur électrochimique à la surface active est de dimension : 17.2cm x11.2cm x12.2cm ;
- Les électrodes sont plongées dans le réacteur, et fixées l'un à coté de l'autre à une distance de 0.5 cm ;
- Elles sont reliées au générateur de courant à l'aide des fils électrique ;
- Les électrodes sont prétraitées après chaque essai par une solution d'acide chlorhydrique afin de les nettoyer et d'éviter leur passivation, et on doit les sécher avec un papier absorbant après on les pèse.

La cellule d'électrocoagulation (Figure II.1), de volume 2L, comporte deux électrodes d'aluminium, l'une servant de cathode et l'autre d'anode. Les électrodes sont de 7 cm x 7 cm et une distance inter électrodes de 0.5 cm. Un courant continu est appliqué aux électrodes par un générateur de courant (5A, 30V).

#### II.5 Déroulement d'expérience

##### II.5.1 Cas sans cactus

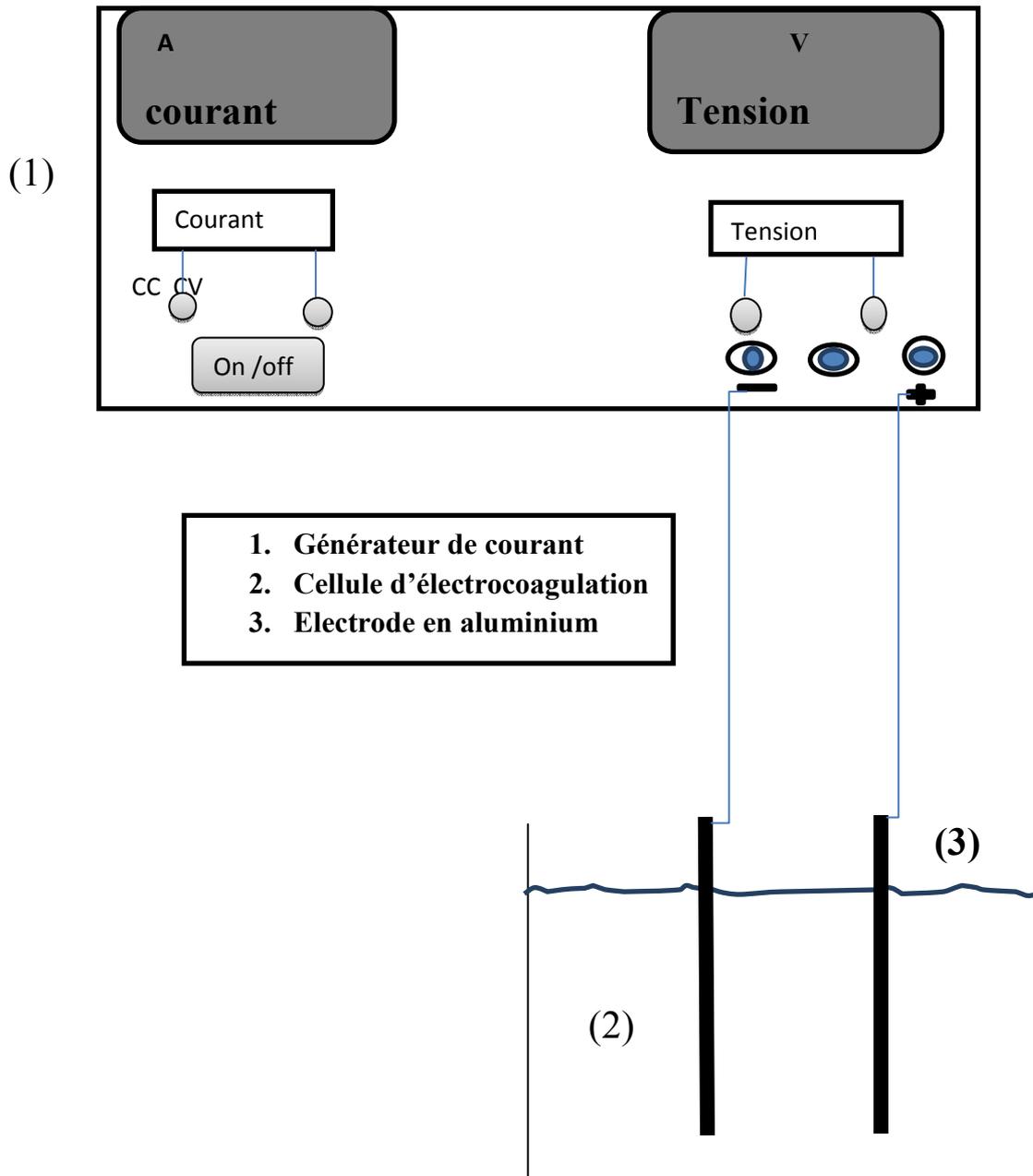
- Dans un réacteur de forme parallélépipédique de volume 2L, contenant 1L de la solution à traiter, nous avons ajouté la quantité désirée de chlorure de sodium (NaCl) ;
- Après avoir réglé l'intensité du courant choisie, on déclenche l'expérience qui est suivie pendant une durée de 1h (temps d'électrolyse) ;
- L'échantillonnage est réalisé en cours de manipulation à chaque 5 min à l'aide d'une seringue et analysée par turbidimètre ;
- L'expérience se déroule à température ambiante.

##### II.5.2 cas avec cactus

- Dans un réacteur de forme parallélépipédique de volume 2L, contenant 1L de la solution à traiter, nous avons ajouté la quantité désirée de chlorure de sodium (Na Cl) ensuite nous avons ajouté une quantité de cactus en poudre ;

- Après avoir réglé l'intensité du courant choisie, on déclenche l'expérience qui est suivie pendant une durée de 1h (temps d'électrolyse) ;
- L'échantillonnage est réalisé en cour de manipulation à chaque 5 min à l'aide d'une seringue et analysée par turbidimètre.

L'expérience se déroule à température ambiante.



**Figure II.2** : Cellule d'électrocoagulation.

Le sel de table (chlorure de sodium) a été ajouté dans certaines expériences à l'eau trouble afin d'accroître sa conductivité et d'élucider le rôle de la concentration d'ions chlorures sur l'efficacité du procédé.

La densité de courant est jugée comme un paramètre essentiel en électrocoagulation spécifiquement pour la cinétique d'abattement des polluants. Lorsque la densité de courant augmente, le temps de traitement diminue en raison de la forte dissolution des électrodes. Il en résulte donc davantage de déstabilisation des particules du polluant ; par ailleurs le taux de production des bulles d'hydrogène augmente et leur taille diminue lorsque la densité de courant augmente.

Tous ces effets sont bénéfiques pour une élimination efficace des polluants par flottation. L'augmentation de la conductivité par l'ajout de chlorure de sodium est connue aussi pour réduire la tension  $U$  entre les électrodes à une densité de courant constante, en raison de la diminution de la résistance de l'eau à traiter. La consommation énergétique, qui est proportionnelle à la tension appliquée entre électrodes, devrait donc diminuer. Le choix du chlorure de sodium découle du fait que les ions chlorures réduisent de manière significative les effets indésirables d'autres anions tels que  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ , par exemple, en évitant la précipitation du carbonate de calcium contenu dans une eau contenant du calcaire, qui pourrait former une couche d'isolant sur la surface des électrodes et augmenter ainsi la résistance de la cellule électrochimique.

Les ions chlorures peuvent également être oxydés pour donner des formes activées de chlore, tels que les anions hypochlorites qui ont un pouvoir oxydant élevé sur certains polluants. Cependant, une concentration excessive de  $\text{NaCl}$  dans l'eau polluée à traiter induit une consommation importante des électrodes par corrosion. Il en résulte donc une attaque sur la plaque de l'anode.

Les deux plaques parallèles et rectangulaires d'aluminium, ont été préalablement traitées avec un papier abrasif au niveau de leurs surfaces, dans le but d'homogénéiser celles-ci et d'éliminer les impuretés et les dépôts qui peuvent les contaminer.

Les électrodes sont extraites du réacteur, après chaque manipulation d'électrocoagulation dans le but de les examiner et de les nettoyer, étant donné que les résidus de décomposition des polluants peuvent se déposer sur leur surface.

Le nettoyage s'effectue avec une solution d'acide chlorhydrique de 0,2 N et d'hydroxyde de sodium 0.5 N pour les électrodes d'aluminium respectivement, permettant ainsi d'éliminer les dépôts des polluants pouvant former une couche résistante sur la surface.

### II.6 Le flocculant

Le flocculant organique (bio-organique) est extrait du cactus qui pousse dans la région de bouira Le produit à l'état naturel est une poudre visqueuse de coloration verte, de pH = 6.5, miscible à l'eau. L'extraction a été réalisée selon les étapes suivantes:

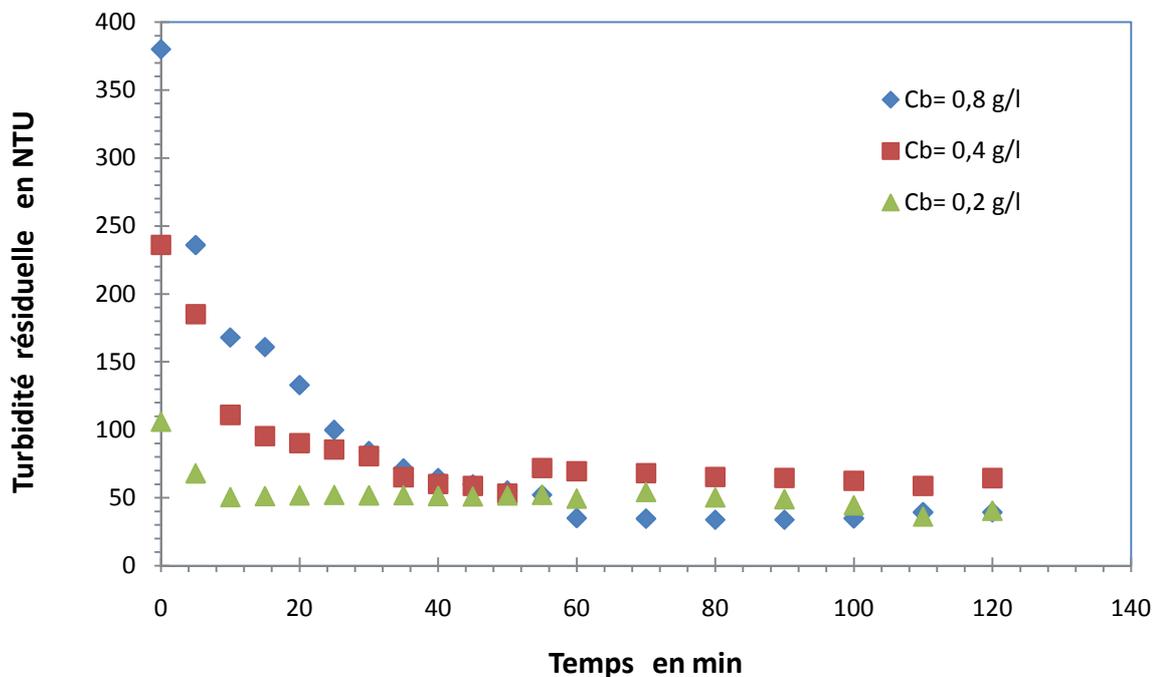
- ❖ Nettoyage des raquettes de cactus ;
- ❖ Séchage à l'étuve pendant 24 H à 60 °C ;
- ❖ Broyage par un broyeur de commerce.



**Figure II.3 :** Raquettes de Cactus.

### III.1 INFLUENCE DE LA CHARGE EN BENTONITE

Dans cette partie du travail, nous nous sommes intéressées à étudier l'influence du temps de traitement d'électrocoagulation en fonction de la charge de la bentonite donc de la turbidité, pour cela nous avons travaillé avec trois charges différentes en bentonite de 0.2 g/l, 0.4g/l, 0.8 g/l correspondantes à des turbidités initiales de 100 NTU, 240 NTU, 380 NTU respectivement et les autres paramètres opératoires sont maintenus constants (*Volume réactionnel 1 Litre, 2 Electrodes en Aluminium, la surface active des électrodes étant de 39 cm<sup>2</sup>, I= 60 mA, Température ambiante =22 C*), nous avons suivi l'évolution de la turbidité résiduelle exprimée « NTU » au cours de temps d'E.C, les résultats obtenus sont représentés sur la figure suivante III.1



**Figure III.1.a : Evolution de la turbidité résiduelle en cours de l'électrocoagulation à différentes charges :** Conditions opératoires : Volume réactionnel 1 Litre, 2 Electrodes en aluminium, Surface des électrodes 39 cm<sup>2</sup>, I= 60 mA, T. Ambiante =22 C

- On constate les profils des courbes temporelles obtenues au cours ds essais opératoires présentent une première étape ou la décroissance est assez prononcée d'un

èvement, puis on obtient un palier pratiquement pour tous les trois charges de bentonite

- Il est à noter que pour une turbidité initiale de 100 NTU correspondant à une charge 0.2g/l en bentonite, un palier est obtenu au bout de 2 minutes uniquement les autres paliers apparaissent au bout de 45 minutes et de 48 minutes respectivement pour les autres charges en bentonite (0.4g/l et 0.8 g/l).

Pour la charge maximale utilisée, on obtient une turbidité résiduelle de 40 NTU qui ne satisfait pas l'objectif visé qui est celui d'obtenir une turbidité résiduelle de 10 NTU.

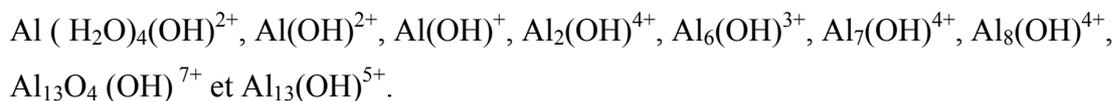
L'efficacité d'élimination de la turbidité R est calculée par la formule suivante :

$$R (\%) = \left( \frac{\text{Turb}_{\text{initiale}} - \text{Turb}_{\text{instantané}}}{\text{Turb}_{\text{initiale}}} \right) * 100$$

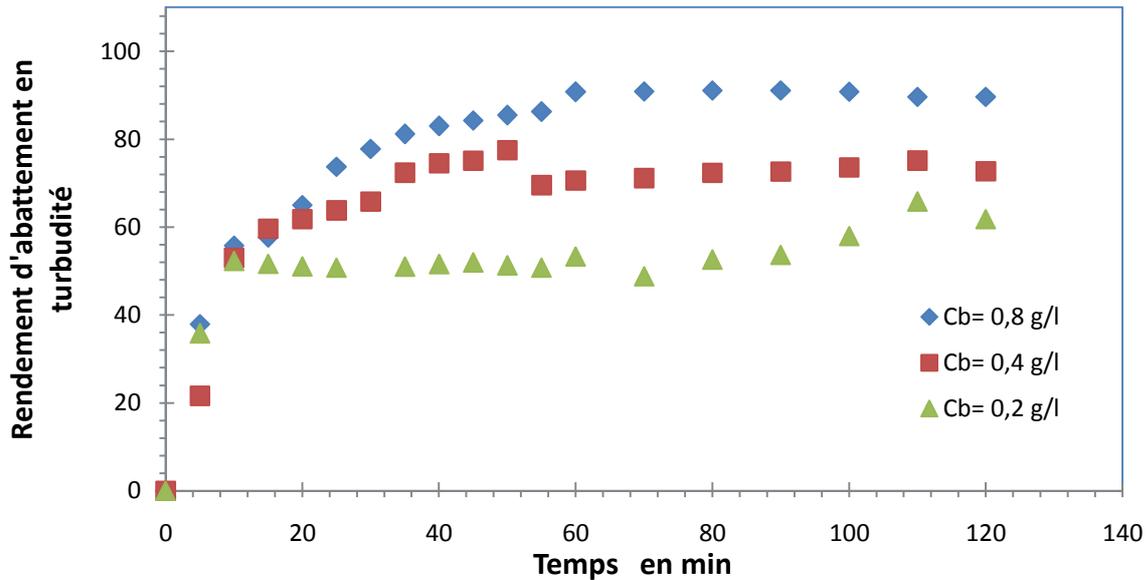
Où  $\text{Turb}_{\text{initiale}}$  est la turbidité initiale de l'eau sous traitement et  $\text{Turb}_{\text{instantané } t}$  est la turbidité instantanée à la fin de l'expérience (à une certaine valeur du courant et du temps de contact).

Nous avons calculé les rendements d'abattement respectifs pour les trois charges utilisées ; les résultats obtenus sont présentés sur la figure III.2

La diminution de la turbidité est due à la déstabilisation des colloïdes et des particules en suspension par les complexes des hydroxydes de fer et d'aluminium tels que :



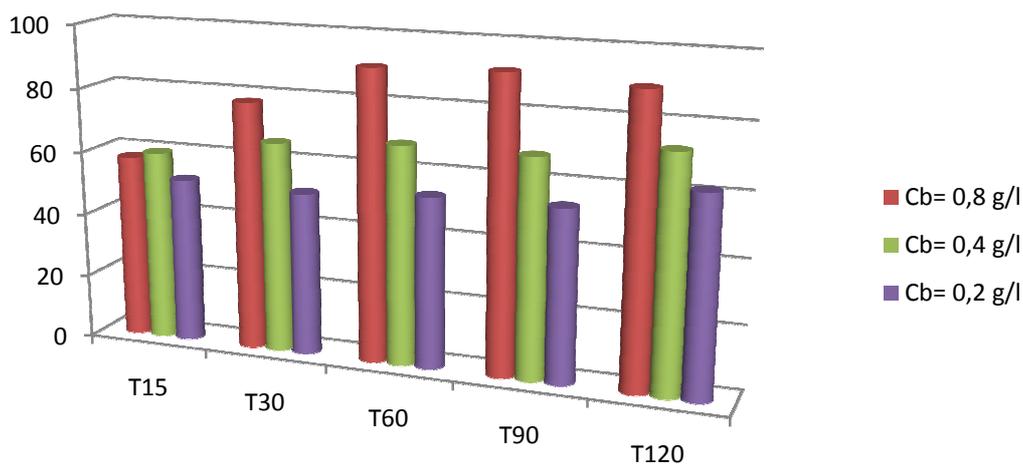
Ces complexes ont une forte affinité pour les particules dispersées ainsi que des contre ions pour provoquer la coagulation. Ces complexes porteurs de charges positives agissent par neutralisation de la charge surfacique négative des colloïdes et des matières en suspension, ce qui permet leur agglomération. Alors d'aluminium  $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ , solides amorphes, se déposent provoquant ainsi la floculation par « sweep floculation » des colloïdes stables en suspension. Les gaz dégagés au niveau des électrodes (l'oxygène à l'anode et l'hydrogène à la cathode) peuvent empiéter en haut et provoquer la flottation des matériaux coagulés.



**Figure III.1.b Evolution des rendements d'abattements en cours de l'électrocoagulation à différentes charges**

*Conditions opératoires : Volume réactionnel 1 Litre, 2 Electrodes en Alu, Surface des électrodes 39 cm<sup>2</sup>, I= 60 mA, T. Ambiante=22 C*

Pour une meilleure visualisation des profils obtenus, nous avons porté sur la figure suivante les rendements obtenus les rendements instantanés obtenus : après un quart d'heure T15, après un demi-heure T30 après une heure, une heure et demi et deux heures de travail T60, T90, T120 respectivement en fonction du temps de travail,



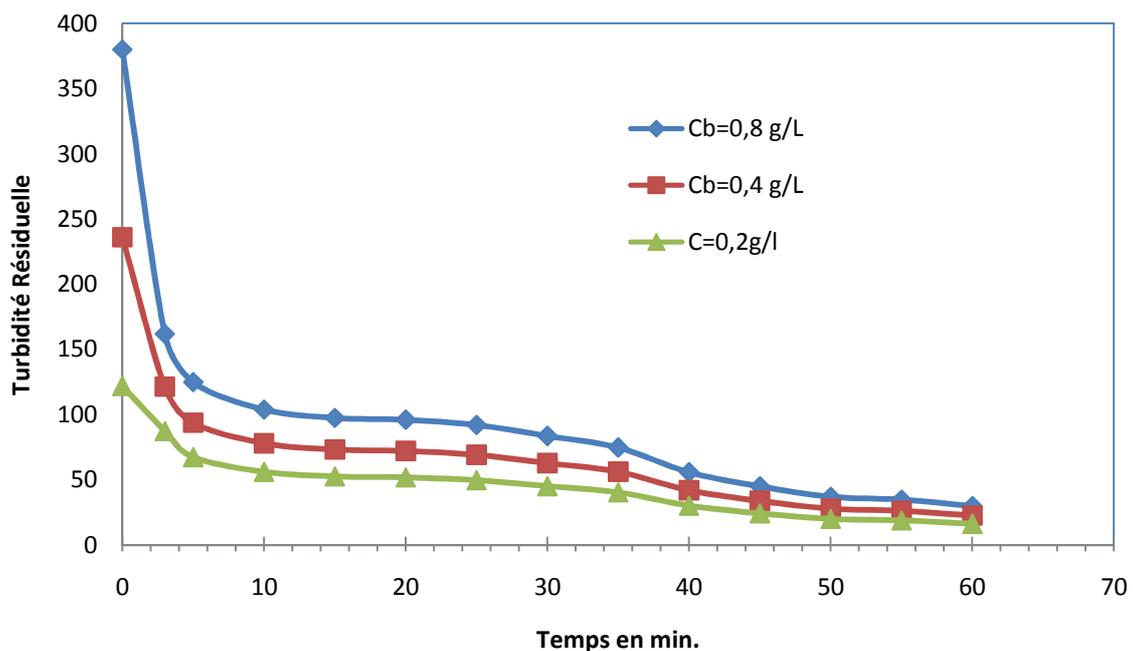
**Figure III.1.c Histogramme des rendements obtenus à différents temps d'électrocoagulation**

*Conditions opératoires : Volume réactionnel 1 Litre, 2 Electrodes en Alu, Surface des électrodes 39 cm<sup>2</sup>, I= 60 mA, T. Ambiante =22 C*

### III.2 Electrocoagulation des solutions turbides en présence du biofloculant

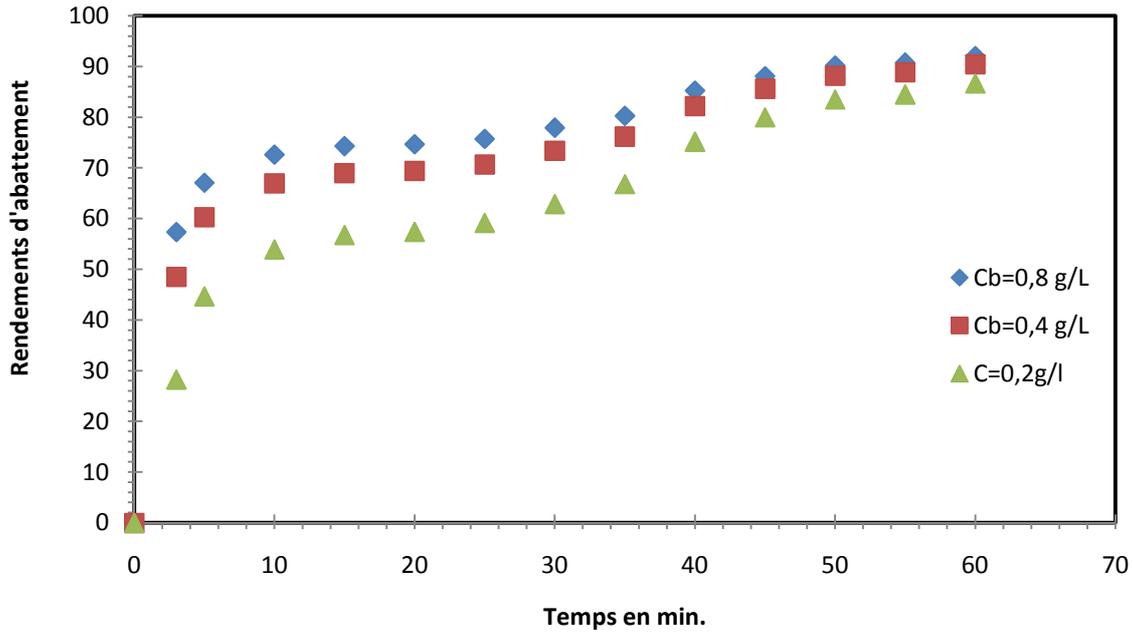
Dans les essais suivants, nous avons reproduits les mêmes conditions opératoires que les essais menés au paragraphe précédents à savoir trois charges différentes en bentonite de 0.2 g/l, 0.4g/l, 0.8 g/l utilisées correspondantes à des turbidités initiales de 100 NTU, 240 NTU, 380 NTU respectivement et les autres paramètres opératoires sont maintenus constants (*Volume réactionnel 1 Litre, 2 Electrodes en Aluminium, la surface active des électrodes étant de 39 cm<sup>2</sup>, I= 60 mA, Température ambiante =22 C*), mais en couplage avec l'utilisation du biofloculant à une teneur de 0.35 g/L sous forme de poudre et nous avons suivi l'évolution de la turbidité résiduelle exprimée « NTU » au cours de temps d'E.C, les résultats obtenus sont représentés sur les figures suivante III.2.a et III.2.b.

Il est à noter que le temps des essais a été réduit à 1 heure



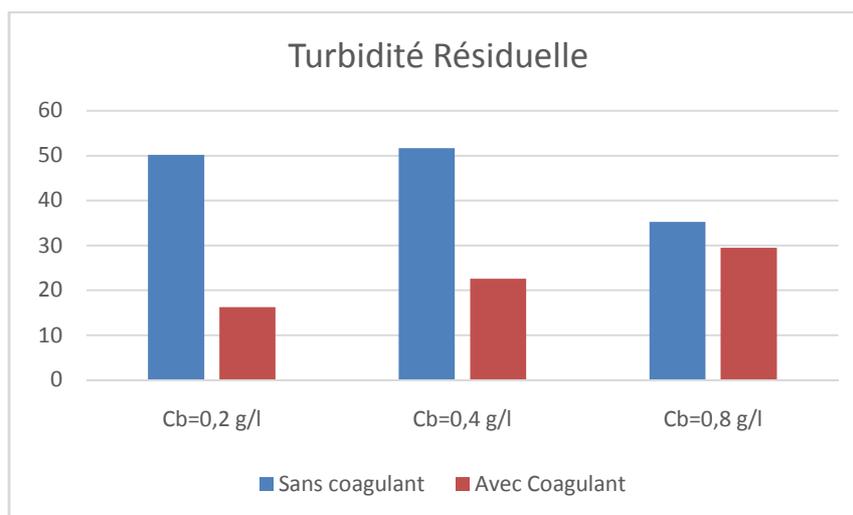
**Figure III.2.a: Evolution des turbidités résiduelles en fonction de la charge en présence de bio floculant**

*Conditions opératoires : Volume réactionnel 1 Litre, 2 Electrodes en Alu, Surface des électrodes 39 cm<sup>2</sup>, I= 60 mA, Ccoag=0,35 g/L, T. Ambiante =22 C*



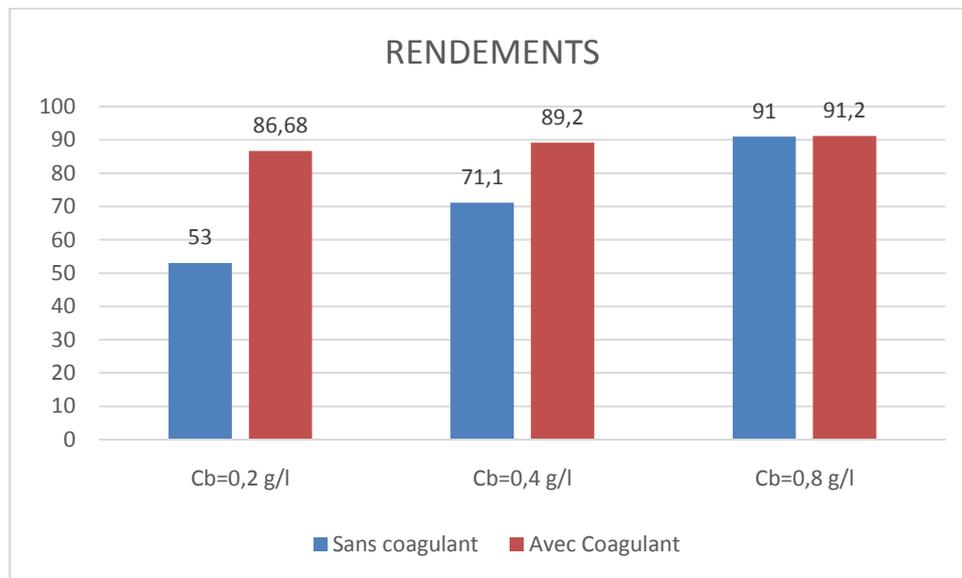
**Figure III.2.b : Evolution des turbidités résiduelles en fonction de la charge en présence de bio floculant** Conditions opératoires : Volume réactionnel 1 Litre, 2 Electrodes en Alu, Surface des électrodes 39 cm<sup>2</sup>, I= 60 mA, Ccoag=0,35 g/L, T. Ambiante =22 C

Nous constatons que c'est les mêmes profils obtenus pour les essais d'électrocoagulation sans couplage et les essais d'électrocoagulation avec couplage avec le biofloculant toutefois il est à noter que les turbidités résiduelles obtenues avec le biofloculant sont plus basses, en effet des turbidités résiduelles de l'ordre de 19 NTU sont obtenues à comparer aux valeurs de 50 NTU obtenues aux essais menées sans bio floculant.



**Figure III.2.c Turbidités Résiduelle obtenues après une heure de traitement**

Si On raisonne en termes de rendements les valeurs obtenus avec l'utilisation concomitante du biofloculant atteignent les 90 % mêmes avec les faibles charges soit une augmentation estimée à 20 %. Ce qui rend les résultats obtenus fortement intéressants



**Figure III.2.d Rendements d'abattement de la turbidité obtenue après une heure de traitement** Conditions opératoires : Volume réactionnel 1 Litre, 2 Electrodes en Alu, Surface des électrodes 39 cm<sup>2</sup>, I= 60 mA, Ccoag=0,35 g/L, T. Ambiante =22 C

Les résultats ci-dessus montrent que l'électrocoagulation est une technique efficace pour l'élimination de la turbidité de l'eau de surface. Il convient également de souligner, ici, que cette efficacité d'élimination élevée a été atteinte sans ajouter aucun électrolyte à l'eau.

### III.3 Influence de l'intensité appliquée

L'intensité du courant électrique est jugée comme un paramètre essentiel en électrocoagulation, spécifiquement pour la cinétique d'abattement de la turbidité. Lorsque l'intensité du courant augmente, le temps de traitement diminue en raison de la forte dissolution des électrodes. Il en résulte donc davantage de déstabilisation des particules du polluant ; par ailleurs le taux de production des bulles d'hydrogène augmente et leur taille diminue lorsque la densité du courant augmente. Tous ces effets seraient bénéfiques pour une élimination efficace du polluant par flottation

L'évolution de l'efficacité du procédé d'électrocoagulation en fonction de l'intensité de courant appliquée pour une charge initiale de 250 NTU est représentée sur les figures III.3.a et b

Celle-ci montre, qu'une augmentation de l'intensité de courant entraîne une augmentation de l'efficacité du procédé. Cette croissance du rendement d'élimination est influencée par la densité de courant, qui ne détermine pas seulement la quantité de coagulant généré *in situ*, mais aussi la quantité de bulles de gaz produites [HOLT *et al.*, 2005]. Ceci peut aussi s'expliquer par le fait que la quantité des ions  $Al^{3+}$  générée par la dissolution de l'anode augmente avec la densité de courant (loi de Faraday) , la vitesse de dissolution du métal est proportionnelle à la densité de courant appliquée. Les densités les plus élevées permettent de dissoudre davantage de métaux.

Il a été établi expérimentalement que, pour un temps donné, l'efficacité d'élimination augmente avec l'augmentation de la densité de courant. La quantité d'ions  $Al^{3+}$  est élevée, ce qui entraîne une quantité élevée de précipités d'hydroxydes, qui vont favoriser la formation des floes [ADHOUM et MONSEL, 2004; KHEMIS *et al.* 2006; KOBYA *et al.* 2003].

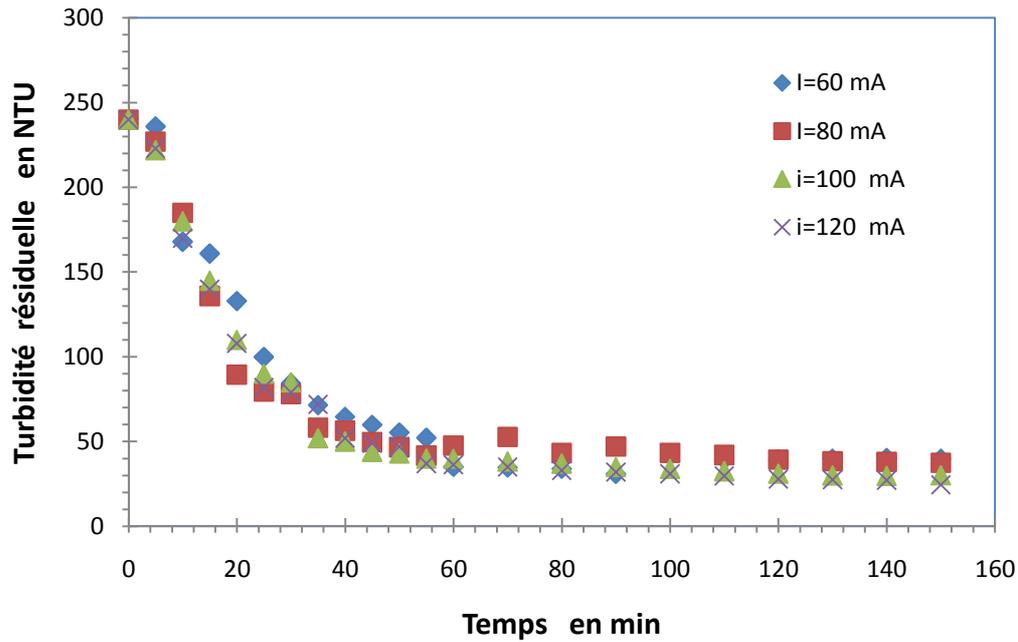


Figure III.3.a Influence de l'intensité appliquée sur le l'électrocoagulation des solutions turbides

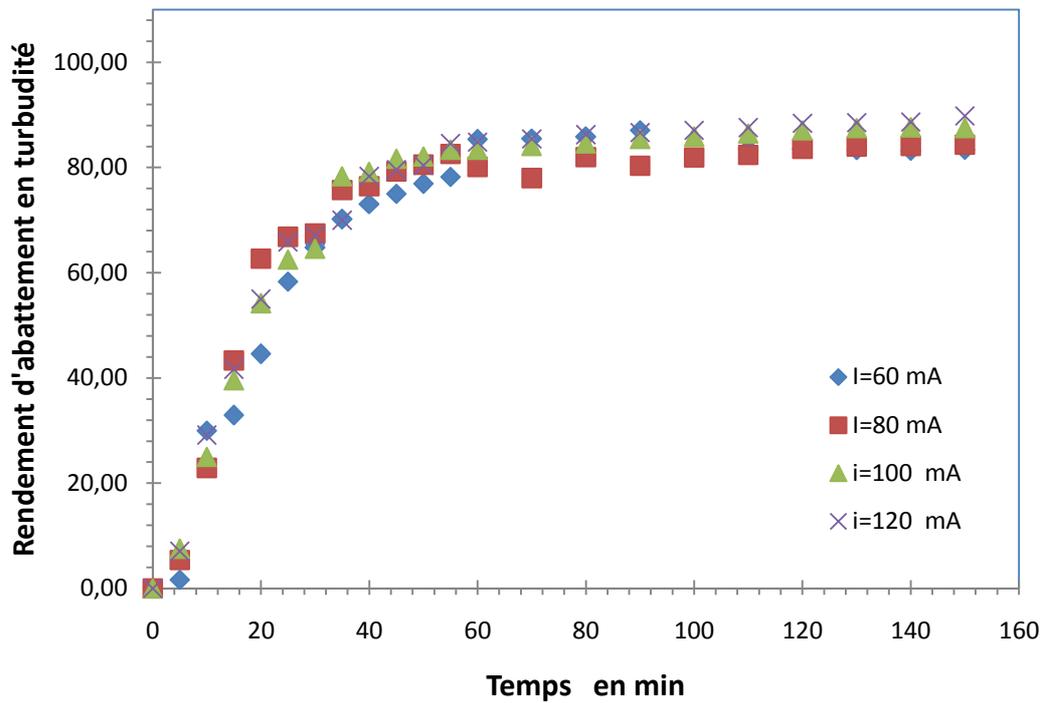


Figure III.3.b Influence de l'intensité appliquée sur les rendements d'abattement de la turbidité

### **III.4.EFFET DE LA SALINITE SUR L'ELECTROCOAGULATION DES SOLUTIONS TURBIDES**

L'augmentation de la conductivité par l'ajout de chlorure de sodium est connue pour réduire la tension entre les électrodes à une densité de courant constante, en raison de la diminution de la résistance de l'eau polluée, la consommation énergétique, qui est proportionnelle à la tension appliquée entre les électrodes, devrait donc diminuer.

Le choix du chlorure de sodium découle du fait que les ions chlorures réduisent de manière significative les effets indésirables d'autres anions tels que  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  par exemple, en évitant la précipitation du carbonate de calcium d'une eau contenant du calcaire, qui pourrait former une couche d'isolant sur la surface des électrodes et augmenter ainsi la résistance de la cellule électrochimique. Les ions chlorures peuvent également être oxydés pour donner des formes activées de chlore, tels que les anions hypochlorites qui ont un pouvoir oxydant et désinfectant élevé.

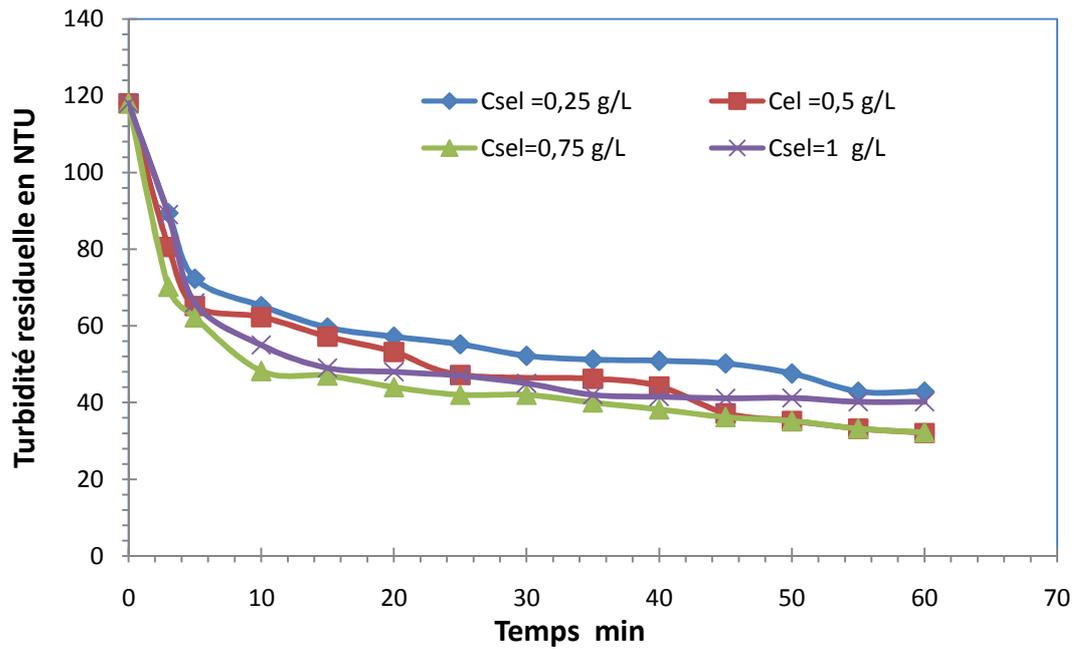
Le sel NaCl a été ajouté aux solutions préparées afin d'accroître sa conductivité et d'élucider le rôle de la concentration d'ions chlorures sur l'efficacité du procédé d'électrocoagulation.

L'effet de la salinité sur l'abattement de la turbidité, on voit que les courbes sont presque identiques dans un même graphique, avec une légère diminution de la turbidité pour l'essai mené à une teneur en ClNaCl=0.75g/L. , plusieurs auteurs ont observé le même phénomène , on obtient des meilleurs résultats avec des teneurs croissantes en sel mais il y a une valeur limite due à la quantité dissoute d'aluminium croissante qui va générer une turbidité due à la quantité accrue d'hydroxydes d'aluminium formés

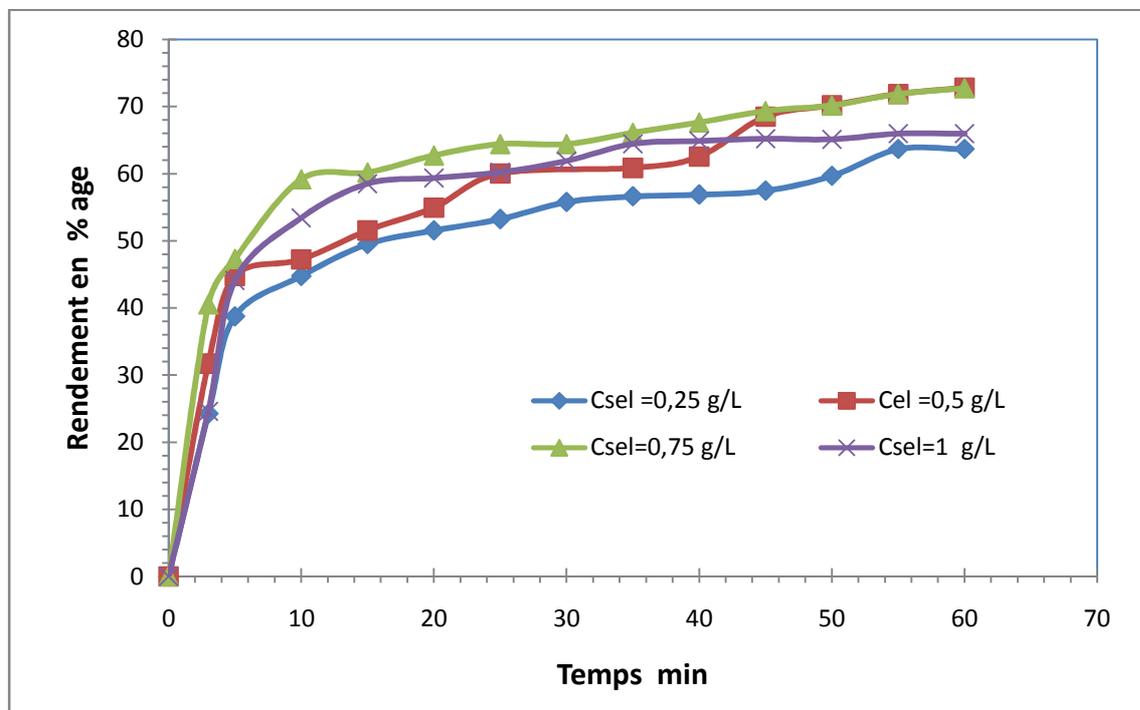
Les essais d'électrocoagulation réalisés non couplés ou couplés avec le biofloculant sont représentés sur les figures suivantes III.4

Dans les premières 8 minutes on obtient respectivement les rendements suivants 49% et 60% avec les concentrations de NaCl 0.5g/L et 0.75g/L.

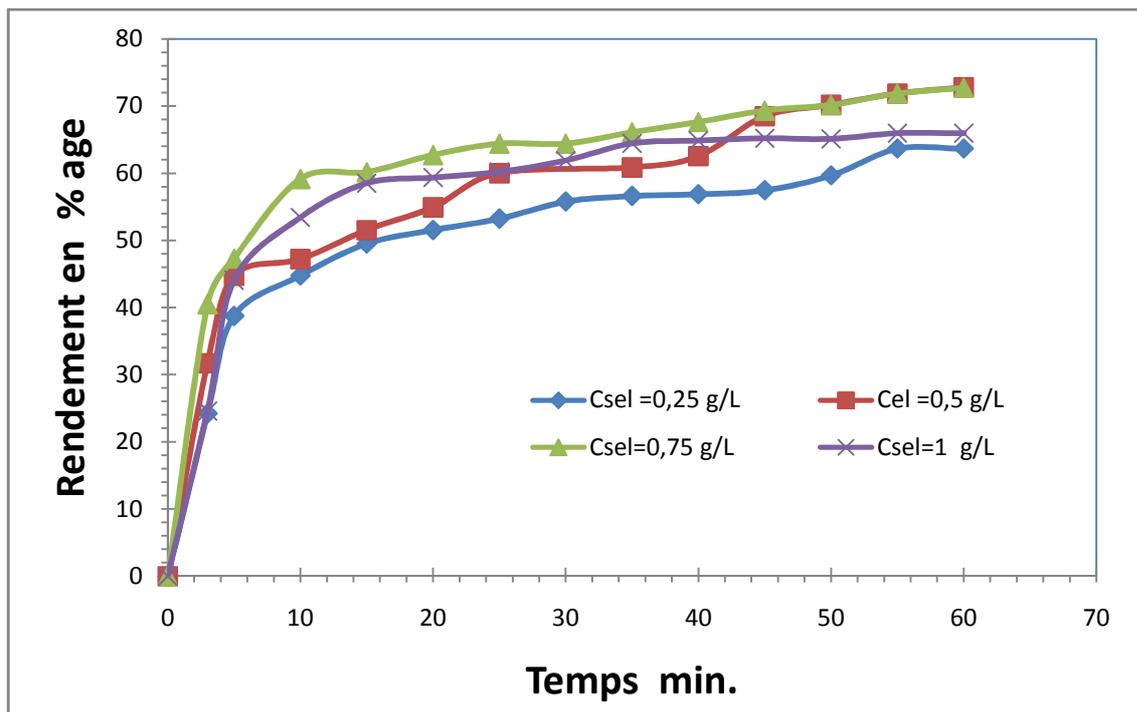
La réduction du temps de contact nécessaire à la réalisation des efficacités optimales similaires de l'élimination de la turbidité due à l'ajout de NaCl est attribuée à l'augmentation de la conductivité qui facilite le passage du courant électrique entre les électrodes, d'une part et au caractère plus coagulant des ions d'Al résultant de l'oxydation par le chlore gazeux des ions d'aluminium.



**Figure III.4.a** Influence du nombre d'électrodes sur l'évolution de la turbidité  
*Conditions opératoires : Volume réactionnel 1 Litre, 2 Electrodes en Alu, Surface des électrodes 39 cm<sup>2</sup>, A= 100 mA, T. Ambiante =22 C*



**Figure III.4.b** Influence de la salinité sur l'abattement de la turbidité en présence de coagulant



**Figure III.4.c Influence de la salinité sur l'abattement de la turbidité en présence de coagulant**

Il est à noter que l'effet du rajout du biofloculant est estompé avec la quantité du sel rajoutée, en effet les quantités d'hydroxydes d'aluminium formés lors de l'électrolyse viennent concurrencer le biofloculant utilisée.

Nous pouvons recommander l'utilisation de biofloculant que de rajouter du sel à la solution turbide ceci permettra d'éviter une salinisation des eaux potables.

### III.5. INFLUENCE DU NOMBRE D'ELECTRODES

Dans cette partie du travail, nous nous sommes intéressés à l'influence du nombre d'électrodes utilisées en mode bipolaire car il n'y a que les électrodes extrêmes qui sont

Les résultats obtenus sont portés sur les figures III.5.a à III.5.c

On remarque une diminution de la turbidité à une faible intensité de courant  $I=100$  mA, alors que l'augmentation de rendement est proportionnelle à celle d'intensité de courant ainsi que l'effet de nombre d'électrode est remarquable sur l'efficacité de procédé d'E.C au lieu d'utiliser une forte intensité de courant à 2 électrodes on utilise seulement une intensité de ( $I=10$ mA) avec 4 électrodes et le rendement va être augmenté.

Donc l'augmentation de nombre des électrodes permet d'obtenir une meilleure turbidité.

Des rendements de 80% sont atteints à des nombres d'électrodes élevées.

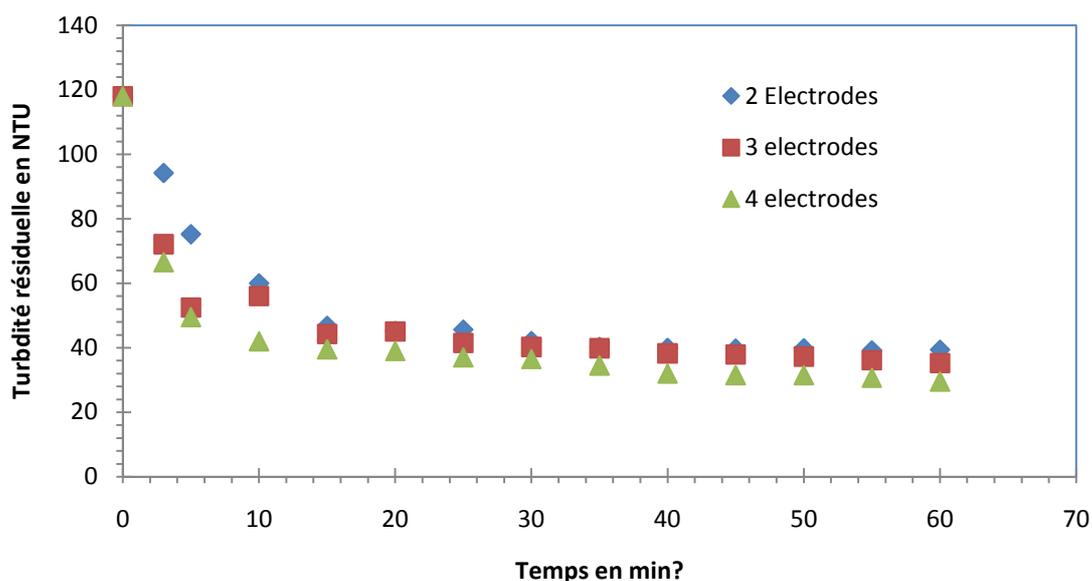
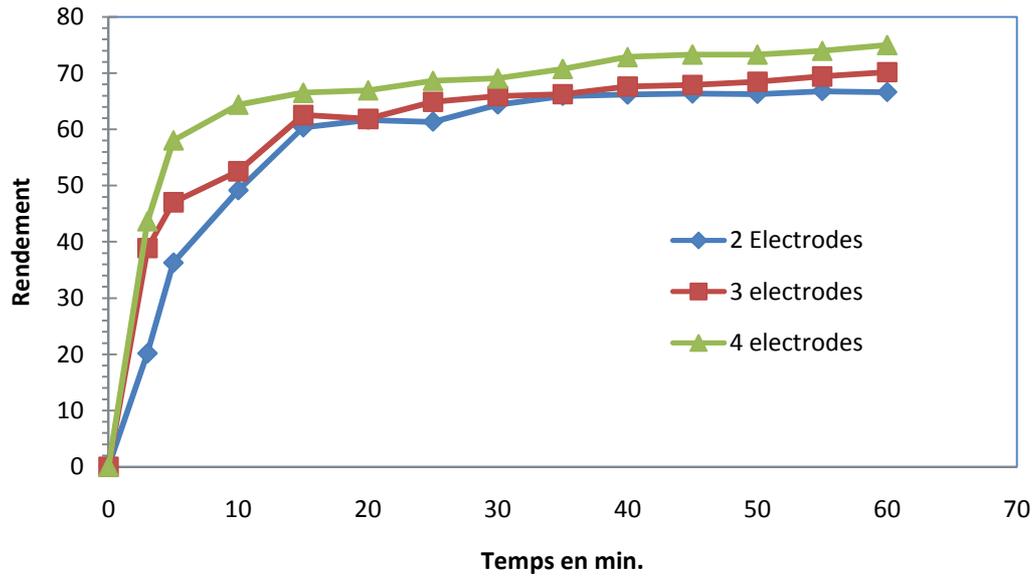


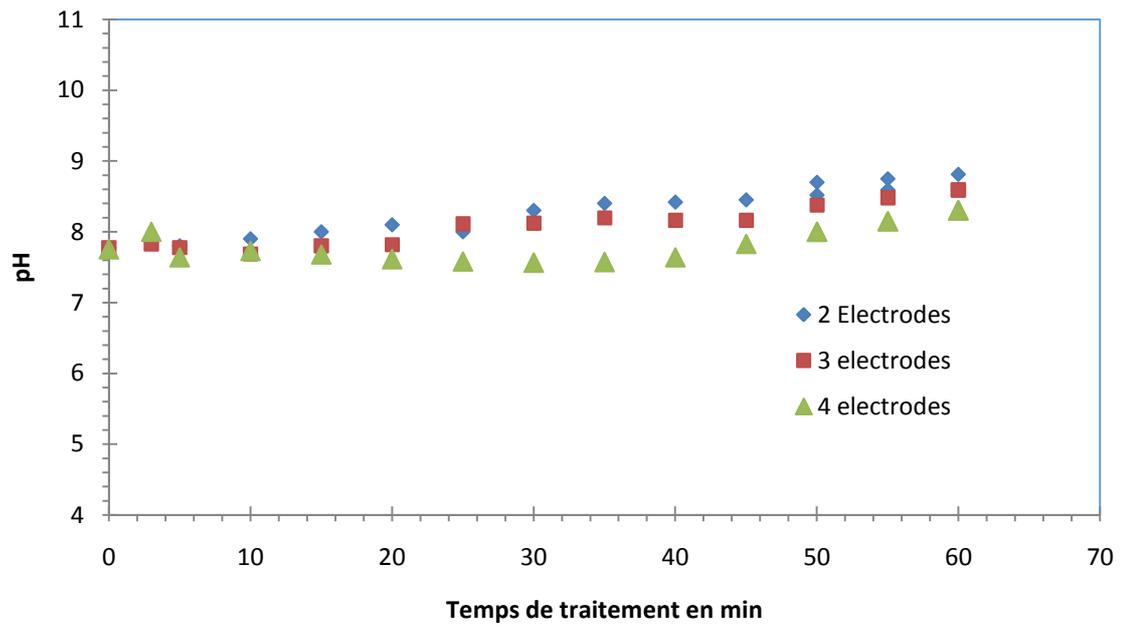
Figure III.5.a Influence du nombre d'électrodes sur l'évolution de la turbidité

Conditions opératoires :  $A= 100$  mA,  $C_{sel}=1$  g/L



**Figure III.5.b** Influence du nombre d'électrodes sur le rendement d'abattement de la turbidité Conditions opératoires :  $A = 100 \text{ mA}$ ,  $C_{\text{sel}} = 1 \text{ g/L}$

Enfin, dans la figure suivante, nous avons représenté l'évolution du pH des solutions turbides en cours des essais d'électrocoagulation nous pouvons observer que le pH varie très peu et qu'il reste dans la plage de pH allant de 7.6 à 8.6 nécessitant une faible correction du pH à réaliser ultérieurement



**Figure III.5.c Evolution du pH en fonction du nombre d'électrodes Conditions opératoires :  $A= 100 \text{ mA}$ ,  $C \text{ sel} = 1 \text{ g/L}$**

## CONCLUSION

Ce travail avait pour objectif, qui consiste une application d'un procédé d'électrocoagulation EC en présence d'un bio floculant en vue de la clarification d'une eau turbide en utilisant des électrodes en aluminium.

- En étudiant l'effet des quatre paramètres, jugés important dans le traitement électrochimique, à savoir l'effet d'intensité de courant, l'effet de la concentration de bentonite, l'effet de la salinité, l'effet de conductivité, des fortes proportionnalités entre ces paramètres et l'efficacité du procédé (rendement) sont enregistrés. Cela se résume en une proportionnalité positive entre l'efficacité du procédé et la concentration de bentonite et une proportionnalité inverse entre l'efficacité du procédé et les trois autres paramètres.
- Le choix de la valeur optimale d'un paramètre étudié se base sur la comparaison des rendements obtenus pour chaque niveau appliqué.
- L'évaluation des paramètres opératoires a montré l'effet d'intensité de courant, l'effet de conductivité, l'effet de la salinité, l'effet de la concentration de bentonite.
- L'électrocoagulation est un procédé de production de l'eau potable pour le moins attrayant. Il peut être avantageux, à plusieurs égards, d'employer cette technologie.
- D'excellents rendements épuratoires en turbidité ont été enregistrés. De plus, le pouvoir désinfectant de cette technologie mérite d'être exploité davantage.
- Il existe toutefois des effets complémentaires induits par l'électrocoagulation: la production de boues et la consommation énergétique. Il est possible de remédier à ces effets. La production de boues, bien qu'inévitable, est beaucoup moins importante que celle obtenue par le procédé classique de coagulation. Ceci confère un certain avantage au niveau de la fréquence de vidange des boues décantées dans le système d'assainissement autonome.
- La consommation énergétique de l'unité d'électrocoagulation, quant à elle, est relativement faible. Ceci laisse présager que la consommation énergétique d'une unité
- Il est à noter que l'effet du rajout du bio floculant est estompé avec la quantité du sel rajoutée, en effet les quantités d'hydroxydes d'aluminium formés lors de l'électrolyse viennent concurrencer le bio floculant utilisée.
- Nous pouvons recommander l'utilisation de bio floculant que de rajouter du sel à la solution turbide ceci permettra d'éviter une salinisation des eaux potables.

D'électrocoagulation' à l'échelle réelle sera aussi faible d'autant plus si elle est optimisée pour diminuer la résistance ohmique au sein de la cellule électrolytique. Cette faible consommation énergétique est pour le moins attrayante pour se doter d'un système efficace et économique

## Références bibliographiques :

- [1] **Abbas Meriem et Messaad Aicha:** Utilisation de l'électrocoagulation pour l'élimination de colorants des eaux usées de l'industrie textile, mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf-Msila, (2016/2017).
- [2] **Abdelouahab.H,AitbAmar.T,ZObretenov ,Gaid.A:** Physicochemical and structural characteristics of some bentonitic clays for north-western Algeria. *Analysis* 16, (1988),P(292-299),
- [3] **Abuzaid.N.S, Bukhari.A.A, Al-Hamouz.Z.M:** Removal of bentonite causing turbidity by electro-coagulation. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering* 33 (1998), P (1341-1358)
- [4] **ADHOUM N, MONSER.L:**Decolourization and removal of phenolic compound from olive mill wastewaters by electrocoagulation. *Chem. Eng. Process*, 43, (2004), P (1281-1287).
- [5] **Al Samawi.A.A, Shokralla.E.M:** An investigation into an indigenous natural coagulant. *J Environ Sci Health A Toxic Hazard Subst Environ Eng*, (1996), P (1881–1897).
- [6]**Alves.N.M, Mano.J.F:** Chitosan derivatives obtained by chemical modifications for biomedical and environmental applications. *International Journal of Biological Macromolecules* 43, (2008), P (401–414). <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2008.09.007>
- [7] **Ammouche Ahmed et Slimani Yahia :** Traitement des eaux usées par un procédé électrochimique, mémoire de master, université Akli Mohand Oulhadj, Bouira, (2016/2017).
- [8] **Amour.A, Merzouk.B, Leclerc.J.-P, Lapicque.F:** Removal of reactive textile dye from aqueous solutions by electrocoagulation in a continuous cell, *Desal. Water Treat.* 57, (2016), P (22764–22773).
- [9] **Arslan-Alaton, I. Kabdash, I. Hanbaba, Kuybu.D.E:** Electrocoagulation of a real reactive dyebath effluent using aluminum and stainless steel electrodes. *Journal of Hazardous Materials* 150 (2008), P (166-173).
- [10] **Asrafuzzaman.M, Fakhruddin.A.N.M, Hossain.M.A:** Reduction of Turbidity of Water Using Locally Available Natural Coagulants. *ISRN Microbiology*, (2011), P (1–6).  
<https://doi.org/10.5402/2011/632189>
- [11] **Ayadi.M.A, Abdelmaksoud.W, Ennouri.M, Attia.H:** Cladodes from *Opuntia ficusindica* as a source of dietary fiber: Effect on dough characteristics and cake making. *Industrial Crops and Products* 30, (2009), P (40–47).  
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.01.003>
- [12] **Barrios Pimienta.E, Barbera.G, Inglese.P:** Cactus pear (*Opuntiaspp*, Cactaceae) international network: an effort for productivity and environmental conservation for arid and semi-arid lands. *Cactus and Succulent Journal*, (1993), P (225–229).

- [13] **Bennajah.M, Maalmi.M, Darmane.Y, Touhami.M:** Defluoridation of drinking water by electrocoagulation/electrofotation, Kinetic study, *Journal of Urban and Environmental Engineering* 4, (2010), P (37-45).
- [14] **Bensadok.K:** Procédé de traitement d'émulsions huile/eau et eau/huile; cas particulier d'émulsion d'huile de coupe. Thèse de doctorat, Université d'Alger, (2007).
- [15] **Bialik.E, Stenqvist.B, Fang.Y, Östlund.Å, Furó.I, Lindman.B, Lund.M, Bernin.D:** Ionization of Cellobiose in Aqueous Alkali and the Mechanism of Cellulose Dissolution. *The Journal of Physical Chemistry Letters* 7, (2016), P (5044–5048).  
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.6b02346>
- [16] **Bialik.E, Stenqvist.B, Fang.Y, Östlund. Å, Furó.I, Lindman.B, Lund.M, Bernin.D:** Ionization of Cellobiose in Aqueous Alkali and the Mechanism of Cellulose Dissolution *J. Phys. Chem. Lett*, (2016.7.24), P (5044-5048).
- [17] **Buffle.J, Newman.M:** The use of filtration and ultrafiltration for size fractionation of aquatic particles, colloids, and macromolecules. In Buffle J. and van Leeuwen (Eds.), *Environmental particles* Lewis Publishers, Chelsea, (1992), P (171-230).
- [18] **Buffle.J, Wilkinson.K.J, Fillella.M, Zang.J.A:** Generalized description of aquatic colloidal interactions, the three-colloidal component approach. *Environmental Science & Technology*, 32, (1998), P (2887-2899).
- [19] **Biggs.S, Habgood.M, Jameson.G.J, Yan.Y:** Aggregate structures formed via a bridging flocculation mechanism, *Chemical Engineering Journal* 80, (2000), P (13–22).  
[https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(00\)00072-1](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(00)00072-1)
- [20] **Bolto.B, Gregory.J:** Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water Research* 41, (2007), P (2301–2324). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.03.012>
- [21] **Bratby.J:** Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment, 2nd edn. IWA Publishing, (2007).
- [22] **Can.O.T, Kobya.M, Demiebas.E, Bayramoglu.M:** Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. *Chemosphere* 62 (2006), P (181-187).
- [23] **Chen.L, Lai, Scheng.H, Lin:** Electrocoagulation of chemical mechanical polishing (CMP) wastewater from semiconductor fabrication. *Chemical Engineering Journal*, (2003), P (205-211).
- [24] **Chen.X, Chen.G, Yue.P.L:** Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. *Separation Purification Technology* 19 (2000), P (65-76).
- [25] **Choy.S.Y, Prasad.K.M.N, Wu.T.Y, Ramanan.R.N:** Review on common vegetables and legumes as promising plant-based natural coagulants in water clarification. *International Journal of Environmental Science and Technology* 12, (2015. A), P (367–390).  
<https://doi.org/10.1007/s13762-013-0446-2>

- [26] **Daneshvar.N, Khataee.A.R, Ghadim.A.R, Rasoulifard.M.H:**Decolorization of C.I. Acid Yellow 23 solutions by electrocoagulation process: Investigation of operational parameters and evaluation of specific electrical energy consumption (SEEC). *Journal of Hazardous Materials* 148 (2007), P 566–572.
- [27] **El Kossori.R.L, Christian.V, Essadiq.E.B, Yves.S, Luc.M:** Composition of pulp, skin and seeds of prickly pears fruit (*Opuntia ficus indica* sp.). *Plant Foods for Human Nutrition*, (1998), P (263–270).
- [28] **El-Mostafa.K, El Kharrassi.Y, Badreddine.A, Andreoletti.P, Vamecq.J, El Kebbaj.M, Latruffe.N, Lizard.G, Nasser.B, Cherkaoui-Malki.M:**Nopal Cactus (*Opuntia ficus indica*) as a Source of Bioactive Compounds for Nutrition, Health and Disease. *Molecules* 19, (2014), P (14879–14901). <https://doi.org/10.3390/molecules190914879>
- [29] **Emamjomeh.M, Sivakumar,M:** Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes. *Journal of Environmental Management* 90 (2009, a), P (1663-1679).
- [30] **Emamjomeh.M, Sivakumar.M:** Fluoride removal by a continuous flow electrocoagulation reactor. *Journal of Environmental Management* 90 (2009, c), P (1204-1212).
- [31] **Emamjomeh.M, Sivakumar.M:** Denitrification using a monopolar electrocoagulation/flotation (ECF) process. *Journal of Environmental Management* 91 (2009.b), P (516-522).
- [32] **Essadki.A.H, Bennajah.M, Gourich.B, Vial.C, Azzi.M, Delmas.H:** Electrocoagulation/electroflotation in an external-loop airlift reactor-Application to the decolorization of textile dye wastewater, a case study, *Chemical Engineering and Processing, Process Intensification* 47 (2007), P (1211-1223).
- [33] **Fatombi.J.K, Lartiges.B, Aminou.T, Barres.O, Caillet.C:** Natural coagulant protein from copra (*Cocos nucifera*): Isolation, characterization, and potential for water purification. *Separation and Purification Technology* 116, (2013.A), P (35–40). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.05.015>
- [34] **Fiessinger.F:** Coagulation and flocculation Part I: Coagulation. Congress of International Water Supply Association, Kyoto, Japan, Special subject N° 3, Kyoto, Japan, (1978).
- [35] **Freitas.T.K.F.S, Oliveira.V.M, de Souza.M.T.F, Geraldino.H.C.L, Almeida.V.C, Fávaro.S.L, Garcia.J.C:** Optimization of coagulation-flocculation process for treatment of industrial textile wastewater using okra (*A. esculentus*) mucilage as natural coagulant. *Industrial Crops and Products* 76, (2015), P (538–544). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.06.027>

- [36] **Gao.P, Chen.X, Shen.F, Chen.G:** Removal of chromium (VI) from wastewater by combined electrocoagulation-electroflotation without a filter. *Separation and Purification Technology* 43 (2005), P (117-123).
- [37] **Guibal.E, Roussy.J:** Coagulation and flocculation of dye-containing solutions using abiopolymer (Chitosan), *Reactive and Functional Polymers* 67, 33–42.  
[https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.\(2007\),2006.08.008](https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.(2007),2006.08.008)
- [38] **Godart.H :** *Eaux de distribution Clarification, Techniques de l'Ingénieur, traité construction C5199* (2000), P (1-15).
- [39] **Golder.A.K, Hridaya.N, Samanta.A.N, Ray.S:** Electrocoagulation of méthylène bleu and eosin yellowish using mild steel electrodes, *Journal of Hazardous Materials* 134-140, (2005).
- [40] **Hamsnejati.S, Chaibakhsh.N, Pendashteh.A.R, Hayeripour.S:** Mucilaginous seed of *Ocimum basilicum* as a natural coagulant for textile wastewater treatment. *Industrial Crops and Products* 69, (2015), P (40–47). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.01.045>
- [41] **Holt.P:** Electrocoagulation, unraveling and synthesizing the mechanisms behind a water treatment process, *Thèse de doctorat, Université de Sydney*, (2002).
- [42] **Holt.P, Barton.G, Mitchell.C:** The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology, *Chemosphere*, (2005) , P(355-367).
- [43] **HOLT P.K, BARTON G.W, G.W. MITCHELL G.W:** The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology. *Chemosphere* 59, (2005), P (355-367)
- [44] **Jeon.J.R, Kim.E.J, Kim.Y.M, Murugesan.K, Kim.J.H, Chang.Y.S:** Use of grape seed and its natural polyphenol extracts as a natural organic coagulant for removal of cationic dyes. *Chemosphere* 77, (2009), P (1090–1098). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.08.036>
- [45] **Kaplan.D.I, Bertsh.P.M, Ariano.D.C:** Mineralogical and physico-chemical differences between mobile and nonmobile colloidal phases in reconstructed pedons. *Soil SciSoc Am J*, 61, (1997), P (641-649).
- [46] **KOBYA.M, CAN.O.T, BAYRAMOGLU.M:** Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *J. Hazard. Mater*, B100, (2003), P (163-178).
- [47] **KHEMIS M. J.P, LECLERC, TANGUY.G, VALENTIN.G, LAPICQUE.F:** Treatment of industrial liquid wastes by electrocoagulation. Experimental investigations and an interpretation model. *Chem. Eng. Sci*61, (2006), P (3602-3609).
- [48] **Khemis.M, Tanguy.G, Leclerc.J.P, Valentin.G, Lapicque.F:** Electrocoagulation for the treatment of oil suspensions: Relation between the rates of electrodes reactions and the

efficiency of waste removal. *Process Safety and Environmental Protection* 83, (2005), P (50-57).

[49] **Kilonzo.P.M, Margaritis.A, Bergougnou.M.A, Yu.J, Qin.Y:** Influence of the baffle clearance design on hydrodynamics of a two riser rectangular airlift reactor with inverse internal loop and expanded gas-liquid separator. *Chemical Engineering Journal* 121 (2006), P (17-26).

[50] **Kobyas.M, Can.O.T, Bayramoglu.M:** Treatment of textile wastewater by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes, *Journal Hazard Mater* 100, (2003), P (163-178).

[51] **Kretzschmar.R, Borkovec.M, Grolimund.D, Elimelech.M:** Mobile subsurface colloids and their role in contaminant transport. *Adv in Agronomy*, 66, (1999), P (121-192).

[52] **Lamer.V.K, Healy.T.W:** The role of filtration in investigating flocculation and redispersion of colloidal dispersions. *Journal of Physical Chemistry*, 67, (1963), P (2417-2420).

[53] **Larue.O, Vorobiev.E, Vu.C, Durand.B:** Electrocoagulation and coagulation by iron of latex particles in aqueous suspensions. *Separation and Purification Technology*, Volume 31, Issue 2, (1 May 2003), P (177-192).

[54] **Lartiges.B.S :** Déstabilisation d'une suspension de silice colloïdale par un sel d'aluminium. Relation entre les phénomènes de surface, la structure et la granulométrie des floes.', Docteur Docteur de l'INPL, Institut National Polytechnique de Lorraine, (1994), P (1-131).

[55] **Lartiges.B.S, Bottero.J.Y, Derrendinger.L.S, Humbert.B, Tekely.P, Suty.H:** Flocculation of colloidal silica with hydrolyzed aluminium, An Al-27 solid state NMR investigation. *Langmuir*, 13, (1997), P (147-152).

[56] **Lee.D.W, Lim.C, Israelachvili.J.N, Hwang.D.S:** Strong Adhesion and Cohesion of Chitosan in Aqueous Solutions, *Langmuir* 29, 14222–14229, (2013).

<https://doi.org/10.1021/la403124u>

[57] **Lee.C.S, Chong.M.F, Robinson.J, Binner.E:** A Review on Development and Application of Plant-Based Bioflocculants and Grafted Bioflocculants. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 53, 18357–18369, (2014a).

<https://doi.org/10.1021/ie5034045>

[58] **Li.J, Jiao.S, Zhong.L, Pan.J, Ma.Q:** Optimizing coagulation and flocculation process for kaolinite suspension with chitosan. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 428, (2013), P (100–110). <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.03.034>

[59] **Linares-Hernandez.I, Barrera-Diaz.C, Roa-Morales.G, Bilyeu.B, Urena-Nunez.F.A:** Combined electrocoagulation-sorption process applied to mixed industrial wastewater. *Journal of Hazardous Materials* 144 (2007), P (240-248).

- [60] **Mattson.S:** Cataphoresis and the electrical neutralization of colloidal material. *Journal of Physical Chemistry B*, 32, (1928), P (1532-1552).
- [61] **Mbogo.S.A:** Novel technology to improve drinking water quality using natural treatment methods in rural Tanzania. *Journal Environmental health*, (2008A), P (46–50).
- [62] **Medina.E.M.D, Rodríguez.E.M.R, Romero.C.D:** Chemical characterization of *Opuntia adillenii* and *Opuntia ficus indica* fruits. *Food Chemistry* 103, (2007), P (38–45).  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.06.064>
- [63] **Miller.S.M, Fugate.E.J, Craver.V.O, Smith.J.A, Zimmerman.J.B:** Toward Understanding the Efficacy and Mechanism of *Opuntia* spp. as a Natural Coagulant for Potential Application in Water Treatment. *Environmental Science & Technology* 42, (2008), P (4274–4279). <https://doi.org/10.1021/es7025054>
- [64] **Mollah.M.Y.A, Schennach.R, Parga.J.R, Coke.D.L:** Electrocoagulation (EC) -Science and applications. *Journal of Hazardous Materials* 84, (2001), P (29-41).
- [65] **Moreno.H.A, Coke.D.L, Gomes.J.A.G, Morkovsky.P, Parga.J.R, Peterson.E, Garcia.C:** Electrochemistry behind electrocoagulation using iron electrodes. *ECS Transactions* 6, (2007, b), P (1-15).
- [66] **Moreno.H.A, Coke.D.L, Gomes.J.A.G, Morkovsky.P, Parga.J.R, Peterson.E, Garcia.C:** Electrochemistry mechanism for COD removal. *Separation and Purification Technology* 56, (2007, a), P (204-211).
- [67] **Munoz de Chavez.M, Chavez.A, Valles.V, Roldan.J.A:** The Nopal: A Plant of Manifold Qualities, in: Simopoulos, A.P. (Ed.), *World Review of Nutrition and Dietetics*. S. Karger AG, pp, (1995), P (109–134). <https://doi.org/10.1159/000424468>
- [68] **Ndabigengesere.A, Narasiah.K.S, Talbot.B.G:** Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. *Water Research* 29, (1995), P (703–710).  
[https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)00161-Y](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)00161-Y)
- [69] **No.H.K, Meyers.S.P:** Application of Chitosan for Treatment of Wastewaters. In: Ware G.W. (eds) *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, vol 163. Springer, New York, NY, (2000).
- [70] **Özacar.M, Şengil.İ:** Evaluation of tannin biopolymer as a coagulant aid for coagulation of colloidal particles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering* 187, Aspects 229, (2003), P (85–96). <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2003.07.006>
- [71] **Palluault.V :** Nouveaux traitements de surface respectueux de l'environnement par des gels polymères réticulables Application à la préparation des surfaces dans le secteur de l'aquariophilie. These France, (2010.n).
- [72] **Patale.V, Parikh.P.A:** Preliminary study on *Coccinia indica* fruit mucilage extract as coagulant-flocculant for turbid water treatment. *Journal of Pure and Applied, Sciences*, (2010), P (27–30).

- [73] **Petsriprasit.C, Namboonmee.J, Hunsom.M:** Application of the electrocoagulation technique for treating heavy metals containing wastewater from the pickling process of a billet plant. *Korean Journal of Chemical Engineering* 27, (2010), P (854-861).
- [74] **Picard.T :** Contribution à l'étude des réactions aux électrodes en vue de l'application à l'électrocoagulation. Thèse de doctorat, Université de Limoges, (2000).
- [75] **Rehm.B.H.A:** (Ed), Alginates, Biology and Applications, Microbiology Monographs. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, (2009).  
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-92679-5>
- [76] **Renault.F, Sancey.B, Charles.J, Morin-Crini.N, Badot.P.M, Winterton.P, Crini.G:** Chitosan flocculation of cardboard-mill secondary biological wastewater. *ChemicalEngineering Journal* 155, (2009), P (775–783).  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.023>
- [77] **Rezeg.A :** Elimination d'acides organiques hydroxylés et carboxylés par coagulation-floculation au sulfate d'aluminium. Master's thesis, Université Mohamed Khider – Biskra, (2004).
- [78] **Rinaudo.M:** Chitin and chitosan: Properties and applications. *Progress in Polymer Science* 31, (2006), P (603–632). <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001>
- [79] **Rodriguez-Felix.A, Cantwell.M:** Developmental changes in composition and quality of prickly pear cactus cladodes (nopalitos). *Plant Foods for Human Nutrition* 38, (1988), P (83–93). <https://doi.org/10.1007/BF01092314>
- [80] **Rodrigues.A.C, Boroski.M, Shimada.N.S, Garcia.J.C, Nozaki.J, Hioka.N:** Treatment of paper pulp and paper mill wastewater by coagulation–flocculation followed by heterogeneous photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 194, (2008), P (1–10). <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2007.07.007>
- [81] **Schweizer.M:** Nopal le médecin du bon dieu (1997).
- [82] **Solak.M, Kihç.M, Yazici.H, Sencan.A:** Removal of suspended solids and turbidity from marble processing wastewaters by electrocoagulation: comparison of electrode materials and electrode connection systems. *Journal of Hazardous Materials* 172 (2009), P (345-352).
- [83] **Sowmeyan.R, Santhosh.J, Latha.R:** Effectiveness of herbs in community water treatment, *International Research Journal Biochemistry Bioinformatic*, (2001), P (297–303).
- [84] **Stumm.W, O'Melia.C.R:** Stoichiometry of coagulation. *Journal American Water Works Association*, 60, (1968), P (514-539).
- [85] **Stintzing.F.C, Carle.R:** Cactus stems (*Opuntia* spp.): A review on their chemistry, technology, and uses. *Molecular Nutrition & Food Research* 49,(2005), P (175–194).  
<https://doi.org/10.1002/mnfr.200400071>

- [86] **The.C.Y, Wu.T.Y, Juan.J.C**: Potential use of rice starch in coagulation–flocculation process of agro-industrial wastewater: Treatment performance and flocs characterization. *Ecological Engineering* 71, (2014), P (509–519).  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.07.005>
- [87] **Teles.F.F.F, Stull.J.W, Brown.W.H, Whiting.F.M**: Amino and organic acids of the prickly pear cactus (*Opuntia ficus indica* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 35, (1984), P (421–425). <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740350410>
- [88] **Teles.F.F.F, Whiting.F.M, Price.R.L, Brown.W.H, Reid.B, Wegner.T.N, Renuncio.E**: Prickly pear (*Opuntia ficus indica*) cactus as a source of vitamin. *A. Rev. Ceres*, (1994), P (396–406).
- [89] **Tir.Mohamed** : Utilisation des techniques électrochimiques dans le traitement des émulsions hydrocarbure/eau, thèse doctorat, Université M'hamed Bougara, Boumerdes, (2008).
- [90] **Wu.C, Wang.Y, Gao.B, Zhao.Y, Yue.Q**: Coagulation performance and floc characteristics of aluminum sulfate using sodium alginate as coagulant aid for synthetic dyeing wastewater treatment. *Separation and Purification Technology* 95, (2012), P (180–187).  
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.05.009>
- [91] **Yilmaz.A.E, Boncukcuoglu.R, Kocakerim.M.M.A, Keskinler.B**: The investigation of parameters affecting boron removal by electrocoagulation method. *Journal of Hazardous Materials B125*, (2005), P (160-165).
- [92] **Yilmaz.A.E, Boncukcuoglu.R, Kocakerim.M.M.A, Keskinler.B**: Quantitative comparison between electrocoagulation and chemical coagulation for boron removal from boron containing solution, *Journal of Hazardous Materials* 149, (2007), P (475-481).
- [93] **Yin.C.Y**: Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry* 45, (2010), P (1437–1444).  
<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2010.05.030>
- [94] **Zafar.M.S, Tausif.M, Mohsin.M, Ahmad.S.W, Zia-ul-Haq.M**: Potato Starch as a Coagulant for Dye Removal from Textile Wastewater. *Water, Air, & Soil Pollution*, (2015), P (226). <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2499-y>
- [95] **Zidelkhir.R** : Application de la photovoltaïque pour le traitement d'un effluent industriel par électrocoagulation, Mémoire de fin d'études, Université de M'sila, (2016).
- [96] **Zhbankov.R, Firsov.S, Buslov.D, Nikonenko.N, Marchewka.M, Ratajczak.H**: Structural physico-chemistry of cellulose macromolecules. Vibrational spectra and structure of cellulose. *Journal of Molecular Structure* 614, (2002), P (117–125).  
[https://doi.org/10.1016/S0022-2860\(02\)00252-1](https://doi.org/10.1016/S0022-2860(02)00252-1)

**[93] Zhu.B, Clifford.A, Chellam.S:** Comparison of electrocoagulation and chemical coagulation pretreatment for enhanced virus removal using microfiltration membranes. *Water Research* 39 (2005) 3098-3109. *Materials* 149, (2007), P (475-481).

**[94] Zodi.S :** Modélisation 1D d'un clarificateur secondaire. Rapport de stage, Université de Strasbourg, (2007).

**[95] Zongo.I :** Etude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation: application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie. Thèse de doctorat, Université de Nancy, (2009).

**[96] Zongo.I, Wéthé.J, Merzouk.B, Maiga.A.H, Lapique.F, Leclerc.J.P :** Traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie par électrocoagulation. *European Journal of Scientific Research*, Vol. 62 N02, (2011), P (216-235).

## **Résumé :**

Dans ce travail, nous avons étudié Electrocoagulation de solutions turbides en présence de bio flocculant « Opuntia Ficus Indica ». Dans un premier lieu nous avons étudié l'effet de différents paramètres influençant le procédé (l'effet d'intensité de courant, l'effet de conductivité, l'effet de sel, l'effet de la concentration de bentonite) en présence de bio flocculant, on put optimiser le procédé par le mode bipolaire (ECB)

Nous avons pu conclure que l'EC est un procédé de production de l'eau potable pour le moins attrayant dans nos conditions expérimentales surtout quand l'utilisation de bio flocculant

**Mots clés :** Electrocoagulation, électrodes en aluminium, bio flocculant « Opuntia Ficus Indica »

## **Abstract :**

In this work, we studied Electrocoagulation of turbid solutions in the presence of bioflocculant "OpuntiaFicusIndica". First, we studied the effect of different parameters influencing the process (the effect of current intensity, the effect of conductivity, the effect of salt, the effect of the concentration of bentonite) in the presence of bio flocculant, we could optimize the process by the bipolar mode (ECB)

We were able to conclude that EC is an attractive drinking water production process, to say the least, under our experimental conditions, especially when the use of bio flocculant

Key words: Electrocoagulation, aluminum electrodes, bio flocculant "OpuntiaFicusIndica"

## **الملخص:**

في هذا العمل، درسنا تقنية التخثر الكهربائي بوجود الندف الحيوي، في المقام الأول قمنا بدراسة تأثير العوامل المختلفة المؤثرة على العملية (تأثير شدة التيار، تأثير الموصلية، تأثير الملح، تأثير تركيز بانتونيت) وهذا كله بوجود الندف الحيوي، كما يمكن تحسين العملية عن طريق وضع ثنائي القطب (ECB).

تمكنا من إستنتاج أن التخثر الكهربائي طريقة فعالة في إنتاج مياه صالحة للشرب، وخاصة عند إستعمال مادة الندف الحيوي.

**الكلمات المفتاحية:** التخثر الكهربائي (EC)، أقطاب الألمنيوم، الندف الحيوي.