



جامعة بجاية  
Tasdawit n'Bgayet  
Université de Béjaïa



Faculté de Technologie  
Département d'Hydraulique

## MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par :

**ALEM SALIM**

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER en Hydraulique**

Option : **Ouvrages et Aménagements Hydrauliques**

### INTITULE:

## **ETUDE COMPARATIVE ENTRE COAGULATION- FLOCCULATION ET ELECTROCOAGULATION- ELECTROFLOTTATON**

Soutenu le .... /.... /.....Devant le jury composé de :

- Président : **YAKOUBI MOUHAMED**
- Promoteur (s) :
  - **MERABET SMAIL**
  - **KADJI BELAID**
- Examineur (s) : **SAOU A. HAMID**

## *Remerciements*

*Tout d'abord, je remercie Dieu, le Généreux qui a enseigné à l'Homme ce qu'il ne savait pas et aussi de m'avoir donné la force afin d'accomplir ce travail.*

*Ma profonde gratitude est exprimée à mes promoteurs Mr MERABET SMAIL et Mr KADJI BELAID qui m'ont fait l'honneur de diriger ce travail et m'ont guidé tout au long de sa réalisation, ainsi que pour la qualité de leur encadrement, leur disponibilité, leur conseils et leur gentillesse.*

*Je voudrais également remercier l'honorable jury d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Enfin, mes remerciements s'adressent à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire à toutes les personnes qui m'ont  
soutenu durant sa réalisation surtout à :*

*Mes chers et précieux parents pour leur bonté par  
excellence, qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont  
donné un magnifique modèle de labeur et de  
persévérance, de tendresse, d'amour et de force. Je suis  
fière et reconnaissante de vous avoir comme parents.*

*A mes frères et sœurs et leurs enfants.*

*A mes amis : Hcen, Nadine, Abdou, Fatima, Lydia,  
Farid, Fatiha, Younes, Samir, Mounir, Idir, Wassim,  
Said, Moh, Adel, Kamel, Hakim, Rabeh, Salim, Hamza,  
Toufik, Djaafar, Kousaila.*

*Salim*

# Sommaire

## Liste des Abréviations

## Liste des Figures

## Liste des Tableaux

## Introduction 1

### Partie théorique

#### Chapitre I : Généralités sur la pollution des eaux et les méthodes de traitements

##### Introduction 3

##### I.1. Pollution des eaux résiduaires 3

##### I.1.1. Définition 3

##### *I.1.1.1. Origine domestique 4*

##### *I.1.1.2. Origine agricole 4*

##### *I.1.1.3 Origine industrielle 4*

##### I.1.2. Définition des eaux résiduaires industrielles 5

##### I.1.2.1. Différents types de pollution industrielle 5

##### I.2. Les rejets de l'industrie textile 6

##### I.2.1. Les colorants textiles 8

##### I.2.1.1. Nature des colorants 8

##### I.2.1.2. Structure chimique des colorants 10

##### I.2.1.3. Classification des colorants 11

##### I.2.1.4. Colorants azoïques 12

##### *I.2.1.4.1. Définition des colorants azoïques 12*

##### *I.2.1.4.2. Synthèse des colorants azoïques*

##### *I.2.1.4.3. réactivité des colorants azoïques 12*

##### I.2.2. Problèmes environnementaux issus de l'industrie textile 13

##### I.2.2.1. Les dangers évidents 13

##### I.2.2.2. Les dangers à long terme 14

##### I.3. Procédés de traitement des effluents textiles 15

##### I.4. Conclusion 17

#### Chapitre II : Coagulation-floculation

##### Introduction 19

##### II.1. Coagulation-floculation 19

##### II.2. Matières en suspension et colloïdes 21

##### II.2.1. Les suspensions colloïdales 21

# Sommaire

II.2.2. Décantation des suspensions colloïdales	22
II.3. Théorie de la double couche	23
II.4. Phénomène de coagulation	23
II.4.1. Compression de la double couche	23
II.4.2. Adsorption et neutralisation des charges	24
II.4.3. Emprisonnement des particules dans un précipité	24
II.4.4. Adsorption et pontage	25
II.5. Phénomène de floculation	25
II.6. Les étapes de l'agrégation	26
II.7. Coagulants utilisés	27
II.9. Choix du coagulant	27
II.10. Facteurs influençant la coagulation	28
II.10.1. Influence du pH	28
II.10.2. Influence des sels dissous	29
II.10.3. Influence de la température de l'eau	29
II.10.4. Influence du coagulant	30
II.10.5. Influence du mélange	30
II.10.6. Influence De la turbidité	31
II.10.7. Coagulation de la couleur	32
II.10.8. Grosseurs et concentration des particules colloïdales	32
II.10.9. Etat d'hydratation	33
II.11. Avantages et inconvénients	33
II.11.1. Les avantages	33
II.11.2. Les inconvénients	34
II.12. Domaines d'application	34
<b>Chapitre III : Electrocoagulation-électroflottation</b>	
Introduction	35
III.1. Electrocoagulation	35
III.1.1. Définition	35
III.1.2. Principe	35
III.1.3. Les principaux paramètres liés au fonctionnement de l'électrocoagulation	36
III.1.3.1. Types d'électrodes	36
III.1.3.2. Mécanisme de formation des hydroxydes	37

# Sommaire

III.1.3.3. Configuration des électrodes	39
III.1.3.4. Source de courant	40
III.1.3.5. Intensité de courant imposée	40
III.1.3.6. Conductivité de l'eau brute	41
III.1.3.7. pH de l'eau brute	41
III.1.3.8. Température initiale de l'eau brute	42
III.1.3.9. Autres facteurs influençant l'électrocoagulation	42
III.1.4. Quelques applications de l'électrocoagulation et différents matériaux utilisés pour les électrodes	43
III.2. Electroflottation	44
III.2.1. Définition et mécanisme	44
III.2.2. Exemples des désignes typiques des cellules d'électroflottation	45
III.2.2.1. Cellule combinant l'électroflottation et l'électrocoagulation	45
III.2.2.2. Cellule d'électroflottation combinée à des médias fluidisés	46
III.2.2.3. Cellule d'électroflottation menée de cloisons	46
III.2.2.4. Cellule d'électroflottation à co-courant et à contre-courant	47
III.2.2.5. Cellule d'électroflottation menée de deux sections séparées par une cloison	47
III.2.3. Facteurs influençant l'électroflottation	48
III.2.3.1. Effet du pH	49
III.2.3.2. Effet de la densité du courant	49
III.2.3.3. Effet d'arrangement des électrodes	49
III.2.4. Quelques applications de l'électroflottation et différents matériaux utilisés pour les électrodes	51

## Chapitre VI : Matériel et méthodes.

Introduction	52
IV.1. Produits chimiques	52
IV.1.1. Le substrat	52
IV.1.2. Les matériaux d'électrodes	52
IV.1.3. Les réactifs	52
IV.2. Dispositifs expérimentaux	53

# Sommaire

IV.2.1. Jar Test	53
IV.2.2. Réacteur électrochimique	54
IV.2.2.1 Déroulement de l'expérience	54
IV.3. Procédure expérimentale	55
IV.3.1. Préparation des solutions	55
IV.3.2. Echantillonnage	55
IV.4. Méthodes d'analyse	56
IV.4.1. Mesure de la turbidité	56
IV.4.2. Mesure de la conductivité et de la salinité	57
IV.4.3. Mesure du TDS (Total Dissolved Solids)	58
IV.4.4. Mesure du pH	59
<b>Chapitre V : Résultats et discussions</b>	
Introduction	60
V.1. Traitement par coagulation-floculation chimique	60
V.1.1. Choix du coagulant	60
V.1.1.1. Coagulant C1 ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ )	60
V.1.1.2. Coagulant C2 ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ )	61
V.2. Traitement par électrocoagulation-électroflottation	62
V.2.1. Choix de matériaux des électrodes et du temps d'électrolyse	62
V.3. Choix de l'intensité du courant	67
V.4. Choix de la technique de traitement	69
Conclusion	71
Référence	

## Liste d'abréviations

°C : Degré Celsius

μm : micromètre

μS/cm : microsiemens par centimètre

A : ampère

A/m<sup>2</sup> : ampère par mètre carré

C<sub>1</sub> : coagulant 1

C<sub>2</sub> : coagulant 2

cm : centimètre

DBO : demande biochimique en oxygène

DCO : demande chimique en oxygène

g : gramme

g.l<sup>-1</sup> : gramme par litre

H<sub>2</sub> : gaz d'hydrogène

m<sup>2</sup>.m<sup>-3</sup> : mètre au carré par mètre cube

mA/cm<sup>2</sup> : milliampère par mètre carré

mg /l : milligramme par litre

mg/l : milligramme par litre

min , mn : minute

ml : millilitre

mm : millimètre

mS /cm : millisiemens par centimètre

nm : nanomètre



## Liste d'abréviations

NTU : nephelometric turbidity unit

pH : potentiel d'hydrogène

ppm : partie par million

S /cm : siemens par centimètre

TDS : Total dissolved solids

tr/min : tour par minute

V : volt

# Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Dangers des rejets textiles.....	14
<b>Figure II.1</b> : phénomène de coagulation-floculation chimique.....	20
<b>Figure II.2</b> : Emprisonnement des particules dans les floes pendant la décantation.....	24
<b>Figure II.3</b> : Adsorption et pontage a l'aide d'un polymère.....	25
<b>Figure III.1</b> : schéma de principe de l'électrocoagulation.....	36
<b>Figure III.2</b> : Configuration des électrodes.....	40
<b>Figure III.3</b> : Combinaison d'électrocoagulation et d'électroflottation.....	45
<b>Figure III.4</b> : Electroflottation avec des médias fluidisés.....	46
<b>Figure III.5</b> : Electroflottation avec de cloisons intégrées.....	46
<b>Figure III.6</b> : Electroflottation à co-courant.....	47
<b>Figure III.7</b> : Electroflottation à contre-courant.....	47
<b>Figure III.8</b> : Electroflottation à deux sections, (a) vue de coté et (b) vue de haut.....	48
<b>Figure III.9</b> : Arrangement conventionnel des électrodes pour l'électroflottation.....	49
<b>Figure III.10</b> : Arrangement original des anodes pour l'électroflottation.....	50
<b>Figure III.11</b> : Arrangement alternatif des électrodes pour l'électroflottation.....	51
<b>Figure IV.1</b> : Jar test (floculateur).....	53
<b>Figure IV.2</b> : Réacteur électrochimique.....	54
<b>Figure IV.3</b> : Turbidimètre type HANNA.....	56
<b>Figure IV.4</b> : conductimètre de référence (CONSORT C831).....	59
<b>Figure IV.5</b> : pH mètre de type HANNA .....	60
<b>Figure V.1</b> : Evolution du pH ; la turbidité ; la conductivité, la salinité et des TDS en fonction dutemps d'électrolyse (électrodes en aluminium).....	63
<b>Figure V.2</b> : Evolution du pH ; la turbidité ; la conductivité, la salinité et des TDS en fonction dutemps d'électrolyse (électrodes en Fer).....	65
<b>Figure V.3</b> : Les rendements d'élimination du colorant en fonction du matériau d'électrodes et du temps d'électrolyse.....	66
<b>Figure V.4</b> : Effet de l'intensité du courant sur l'abattement de la turbidité et l'évolution du pH, de la conductivité, les TDS et la salinité.....	68

## Liste des figures

<b>Figure V.5</b> : Comparaison entre la coagulation chimique et l'électrocoagulation .....	69
<b>Figure V.6</b> : comparaison entre la coagulation chimique et l'électrocoagulation .....	70

## Liste des figures

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Présentation des différentes activités d'une entreprise textile et les effluents associés.....	7
<b>Tableau I.2</b> : Les plantes et /ou insecte qu'on peut extraire des couleurs.....	9
<b>Tableau I.3</b> : Principaux groupes chromophores et auxochromes .....	10
<b>Tableau I.4</b> : Classification des colorants .....	11
<b>Tableau I.5</b> : Comparaison des technologies de dépollution des effluents textiles en fonction des avantages et des inconvénients .....	16
<b>Tableau II.1</b> : temps de décantation de différentes particules d'après la loi de stokes.....	22
<b>Tableau II.2</b> : Les étapes de l'agrégation .....	26
<b>Tableau II.3</b> : Caractéristiques de quelques coagulants.....	28
<b>Tableau IV.1</b> : Valeur de conductivité pour l'eau.....	58
<b>Tableau IV.2</b> : La relation entre la minéralisation et la conductivité.....	58
<b>Tableau V.1</b> : Effet de la dose du coagulant C1 sur l'élimination du colorant.....	60
<b>Tableau V.2</b> : Effet de la dose du coagulant C2 sur l'élimination du colorant.....	61

## Liste des tableaux



# ***INTRODUCTION***

# Introduction

La protection de l'environnement est un problème majeur pour l'humanité. Un volet important et vital concerne la préservation des ressources en eaux, en effet ces dernières sont menacées par une pollution diffuse et multiforme aggravée par le progrès dans le bien être de l'homme, une industrialisation sauvage et une démographie galopante.

Les activités industrielles représentent une source de pollution très importante et contribuent d'une façon certaine à la détérioration de l'environnement et de la santé publique. En effet, les effluents d'origine industrielle sont souvent chargés de polluants peu ou non biodégradables. Ces activités génératrices de pollution couvrent plusieurs domaines comme : l'agroalimentaire, l'extraction et la transformation du phosphate, la production d'énergie et l'industrie textile.

La présence de matières colorantes dans les rejets textiles peut constituer une menace sérieuse pour l'environnement quand ils sont rejetés directement sans traitement préalable dans le milieu naturel. Un traitement sera donc indispensable pour éliminer ces matières néfastes à l'environnement.

Une technique de traitement adéquate doit assurer une bonne efficacité dans le traitement des eaux. De plus que les méthodes traditionnelles de traitement ne répondent pas à cette exigence, elles sont aussi très coûteuses. Pour cela le recours à de nouveaux procédés prometteurs et moins coûteux est à entreprendre. Sur lequel se focalise l'objectif de notre travail, qui consiste en l'application de deux procédés en vue de la dégradation du colorant textile (Réactive Brown 18) à savoir : la coagulation-floculation chimique, est effectué au Jar Test en utilisant deux coagulant le premier est le sulfate d'aluminium  $Al_2(SO_4)_3$  et le second est le sulfate ferrique  $Fe_2(SO_4)_3$  l'électrocoagulation-électroflotation est effectué dans un réacteur en verre en utilisant deux types d'électrodes (aluminium, Acier inoxydable).

L'intérêt dans l'essai de coagulation-floculation été donné pour le choix du coagulant ainsi la dose optimale de ce dernier, pour l'électrocoagulation-électroflotation, l'objectif été le choix du matériau d'électrode et le temps d'électrolyse et l'intensité du courant.

Pour présenter le travail réalisé, nous l'avons scindé en cinq chapitres :

- Le premier chapitre rappellera les différents types de la pollution des eaux résiduaires industriels, les procédés de fabrication d'un produit textile, un aperçu général sur les



# Introduction

colorants textile et leur impact environnemental, ainsi que les principaux procédés de traitement des rejets de l'industrie textile ;

- Le deuxième chapitre est consacré à présenter le procédé de coagulation-floculation chimique, ainsi de présenter son principe, les facteurs influençant ce procédé, ces avantages et ces inconvénients et les domaines d'applications de ce procédé ;
- Le troisième chapitre présentera un procédé électrochimique qui a prouvé son efficacité dans le traitement des effluents de l'industrie textile qui est électrocoagulation l'électroflottation, de présenter son principe, les paramètres influençant le procédé et son domaines d'applications ;
- Le quatrième chapitre, c'est de faire une description du matériel et de la méthodologie suivis.
- Dans le cinquième chapitre, nous présenterons les résultats expérimentaux obtenus discutés et interprétés.

Enfin on termine par une conclusion générale, résumant l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus au cours de ce travail.



***PARTIE THEORIQUE***

# *Chapitre I*

**Généralités sur la pollution  
des eaux et les méthodes de  
traitements.**

# Généralités sur la pollution des eaux et les méthodes de traitements

## **Introduction :**

Les êtres vivants puisent dans leurs milieux, des substrats (des produits qui leurs servent de nourriture et /ou de source d'énergie...), ils s'en servent pour se nourrir, se développer, se multiplier, se déplacer. Ces êtres vivants sont des micro-organismes, des plantes, des animaux, des insectes, des hommes.

Les conditions physico-chimiques qui sont générées dans ce milieu vont permettre à chaque espèce de se trouver une place pour se reproduire, développé. Tout cet ensemble, va vivre dans un équilibre ou l'un, génère de la nourriture pour l'autre, ou sert de nourriture à l'autre.

Cet équilibre peut être perturbé par l'introduction d'un produit exogène (c'est à dire issu de l'extérieur) que l'on nommera la «matière polluante» car elle va modifier cet équilibre du milieu récepteur en modifiant les caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques du milieu [1].

Au cours du siècle dernier, le développement rapide de l'industrie a conduit à la production de milliers de substances chimiques. En raison de leurs nombreux avantages dans le domaine agricole, la santé publique, le développement technologique, leur utilisation devienne intensive et leurs conséquences sur l'environnement ont commencées à être observées [2].

Dans ce chapitre, nous allons présenter une synthèse bibliographique, regroupant des généralités sur la pollution des eaux et leurs origines ; un intérêt a été donné ensuite pour les effluents textiles et la nécessité de traiter les eaux contaminées en colorants.

## **I.1. Pollution des eaux résiduaires :**

### **I.1.1. Définition :**

La pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui apparait en totalité ou en partie comme un sous-produit de l'action humaine, au travers d'effets directs ou indirects altérant les critères de répartition des flux d'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou à travers les ressources agricoles, en eau et autres

## Généralités sur la pollution des eaux et les méthodes de traitements

produits biologiques. Elles peuvent aussi l'affecter en altérant les objets physiques qu'il possède, les possibilités récréatives du milieu ou encore en enlaidissant la nature [3].

Les charges polluantes contenues dans les eaux résiduaires ont des origines diverses. Le rejet de ces eaux dans le milieu naturel est la principale pollution qui affecte nos cours d'eaux et plus généralement tout le milieu naturel. Ces substances polluantes peuvent avoir différentes origines :

### *1.1.1.1. Origine domestique :*

Ce sont les eaux qui proviennent généralement des habitations «eaux ménagères et eaux vannes» qui sont présentées comme un mélange de matières non dissoutes dans une solution aqueuse de matières organiques et minérales [4].

### *1.1.1.2. Origine agricole :*

L'agriculture constitue la première cause de pollutions diffuses. Lorsque l'on considère les pollutions d'origine agricole, il faut englober à la fois celles qui ont trait aux cultures et à l'élevage [5]. Les causes des différentes formes de pollution agricole sont multiples [6] :

- ▶ De fortes teneurs en sels minéraux « azote, phosphore, potassium » provenant des engrais, des purins et lisiers (élevage) ;
- ▶ La présence de produits chimiques de traitement (pesticides, herbicides...etc.) ;
- ▶ Les déjections animales qui accompagnent les élevages intensifs et les résidus d'antibiotiques utilisés contre les infections animales ou pour favoriser leur croissance.

### *1.1.1.3 Origine industrielle :*

Les rejets industriels sont caractérisés par leur très grande diversité, suivant l'utilisation de l'eau au cours du process industriel. Parmi les industries considérées traditionnellement comme rejetant des matières particulièrement polluantes pour l'eau tels que les industries agro-alimentaires, papetières, la chimie, les traitements de surface, l'industrie du cuir et de textile, etc. [7].

La pollution est directement liée aux activités industrielles et agricoles. Nous nous intéressons aux rejets liquides transportés par l'eau, appelés couramment les eaux résiduaires industrielles transportant en général divers produits hautement toxiques avec des taux très élevés.

## I.1.2. Définition des eaux résiduaires industrielles :

Les eaux résiduaires industrielles sont celles en provenance des diverses usines, qui sont des déchets liquides obtenues lors de l'extraction et de la transformation de matières premières en produits industriels. Elles contiennent les substances plus diverses, pouvant être acides ou alcalines, corrosives ou entartrantes, à températures très élevées, souvent odorantes et colorées [8][9].

### I.1.2.1. Différents types de pollution industrielle :

Les eaux résiduaires industrielles sont spécifiques par leur volume et leur composition. On distingue trois types de pollution :

#### A. *Pollution physique* :

C'est une pollution due à la présence de matières en suspension, parfois de colloïdes : elle se traduit par un trouble ou une coloration plus ou moins prononcée [10]. On peut la répartir en trois classes : mécanique, thermique et radioactive.

- *Pollution mécanique* :

Elle provient essentiellement du lessivage des sols lors de pluies abondantes et des travaux réalisés par l'homme qui rendent le sol imperméable, provoquant des flux polluants importants entraînant avec eux des boues.

- *Pollution thermique* :

Les eaux rejetées par les usines utilisant un circuit de refroidissement de certaines installations (centrales thermiques, nucléaires, etc.) ont une température très élevée de l'ordre de (70 à 80°C). Elle diminue jusqu'à (40 à 45°C) lorsqu'elle est en contact avec les eaux des milieux aquatiques entraînant un réchauffement de l'eau, qui influe sur la solubilité de l'oxygène [11].

- *Pollution radioactive* :

C'est celle qui est occasionnée par une éventuelle radioactivité artificielle des rejets, qui trouve sa source dans l'utilisation de l'énergie nucléaire sous toutes ses formes (installations et centrales nucléaires, exploitation de mines d'uranium, traitement des déchets radioactifs...) [12].

# Généralités sur la pollution des eaux et les méthodes de traitements

## ***B. Pollution chimique :***

Elle résulte des rejets chimiques, essentiellement d'origine industrielle. Elle génère des nuisances souvent dramatiques pour les écosystèmes à cause de leur concentration dans le milieu naturel [13]. La pollution chimique des eaux résiduaires est répartie en deux catégories :

- ***Pollution organique :***

C'est la matière qui est principalement issue de la matière vivante (végétaux, animaux...etc.) et de l'industrie chimique parfois. Sa composition est structurée autour du carbone «Hydrocarbures, pesticides, détergents, phénols...etc.».

- ***Pollution minérale :***

C'est la matière qui n'est pas organique c'est à dire qu'elle ne contient généralement pas de carbone. Cette matière minérale sont les sels, toutes les matières structurées autour du silicium, «métaux lourds, cyanure, azote, phosphore...etc.».

## ***C. Pollution microbiologique :***

La pollution microbiologique est la présence en quantité excessive de germes, bactéries et virus, parmi lesquels certains sont pathogènes pour l'homme et les animaux. Elle est notamment la conséquence de mauvais raccordements d'habitations aux réseaux d'assainissement, de débordements des réseaux d'eaux usées, de rejets des stations d'épurations d'eaux résiduaires et du ruissellement sur les sols lors des pluies importantes. Elle provient également de sources diffuses générées par des rejets mal maîtrisés en zones d'élevage en particulier par temps de pluie [14].

## **I.2. Les rejets de l'industrie textile :**

Les eaux usées industrielles issues de la fabrication des textiles sont généralement alcalines et ont des charges en DBO et DCO très élevées. Les polluants présents dans les effluents de l'industrie textile englobent des solides en suspension, des huiles minérales (des agents anti-moussants, de la graisse, des huiles d'ensimage) et des composés organiques. Ainsi les flots d'effluents produits par les processus de teinture sont généralement chauds, colorés et peuvent renfermer des concentrations importantes de métaux lourds et des produits toxiques [15].

## Généralités sur la pollution des eaux et les méthodes de traitements

Les différentes étapes d'une entreprise textile et les effluents associés sont résumés dans le tableau ci-dessous [16]

**Tableau (I.1) :** Présentation des différentes activités d'une entreprise textile et les effluents associés [16].

Activités	Rejets associés
Préparation de la laine.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rejets liquides fortement chargés en matières en suspension et matières organiques.</li> </ul>
Filature.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aucun rejet liquide (exception pour la filature du lin dite mouillée qui permet d'obtenir des fils fins : rejets équivalents à ceux provenant de la préparation de la laine).</li> <li>▪ Rejets gazeux constitués essentiellement de poussières.</li> </ul>
Tissage/Tricotage.	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Présence de poussières ;</li> <li>▪ Présence d'agents d'encollage.</li> </ul> <p>Mais faible consommation en eau, activité considérée comme peu polluante.</p>
Ennoblement : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Prétraitement (désencollage, désensimage, débouillissage, mercerisage)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rejets contenant des huiles, des cires, de la soude, des détergents et des produits auxiliaires.</li> <li>▪ Les prétraitements représentent 50% de la pollution organique liée à l'ennoblement (surtout au niveau du désencollage).</li> <li>▪ 7% du volume des effluents liés à l'ennoblement.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Le blanchiment</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eaux de blanchiment (présence d'organochlorés).</li> <li>▪ 69% du volume des effluents liés à l'ennoblement.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Teinture</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Essentiellement constitués d'eau, de colorants non fixés (colorants utilisés souvent insolubles dans l'eau).</li> <li>▪ 12% du volume des effluents liés à l'ennoblement.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Impression</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eaux d'impression : colorants (même type qu'en teinture mais en concentrations plus importantes), liants, adjuvants (fixation des colorants), épaississant (pour éviter le coulage de la couleur).</li> <li>▪ 10% du volume des effluents liés à l'ennoblement.</li> </ul>



## Généralités sur la pollution des eaux et les méthodes de traitements

▪ Apprêts chimiques	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Eaux de vidange et de nettoyage des machines (produits chimique).</li><li>▪ 2% du volume des effluents liés à l'ennoblissement.</li><li>▪ Rejets gazeux.</li></ul>
---------------------	--

### I.2.1. Les colorants textiles :

Les colorants sont apparus, il y a plus de 4000 ans, afin de teindre des pièces d'art confectionnées à cette époque. Jusqu'à 1850, les colorants sont obtenus à partir d'éléments naturels tels que les extraits de plantes, de fruits, de mûres, de fleurs, de racines ou d'animaux. Ils sont des composés chimiques colorés, naturels ou synthétiques, en général organiques, qui ont la propriété de colorer durablement le support sur lequel ils sont appliqués dans certaines conditions. L'industrie des colorants est utilisée dans plusieurs domaines industriels tel que :

- L'industrie textile, fourrure, cuir (textiles à usage vestimentaire...) [17][18][19] ;
- L'industrie des plastiques (pigments) [20] ;
- L'industrie du bâtiment : peintures, matériaux de construction, céramiques...etc.;
- L'industrie pharmaceutique (colorants) ;
- L'industrie cosmétique (dont les colorations capillaires) ;
- L'industrie agroalimentaire (colorants et additifs alimentaires...) [21].

Il existe seulement une dizaine de colorants naturels, mais plusieurs milliers de colorants synthétiques.

Les matières colorantes sont un assemblage de groupes chromophores, auxochromes et de structures aromatiques conjuguées (cycles benzéniques, anthracène, perylène, etc.). Ces groupements sont capables de transformer la lumière blanche dans le spectre visible (de 380 à 750 nm), en lumière colorée par réflexion sur un corps, ou par transmission ou diffusion.

#### I.2.1.1. Nature des colorants :

Il existe deux grandes classes de colorants, en l'occurrence les colorants naturels et les colorants synthétiques :

# Généralités sur la pollution des eaux et les méthodes de traitements

## A. Colorants naturels :

Dés 1500 avant notre ère, les Egyptiens réalisèrent des teintures qui sont d'origine végétale ou bien d'origine animale. La célèbre grotte de Lascaux et ses peintures vieilles de 17000 ans témoignent d'un usage très ancien des colorants naturels. Les premiers utilisés sont le noir de charbonne et l'oxyde de fer rouge. Cependant, le nombre de colorants naturels n'a jamais excédé quelques dizaines [22]. Dans le tableau (I.2) on résume les couleurs qui sont extraites à partir de différentes plantes ou insectes.

**Tableau (I.2) :** Les plantes et /ou insecte qu'on peut extraire des couleurs [22].

Type de la plante et/ou insecte	Couleur
Le safran (plante bulbeuse)	Jaune-orangé
Le pastel (plante des familles crucifères)	Bleu
La garance (plante des familles rubiacées)	Rouge
Cochenilles (insectes)	Rouge carmin
Feuilles de l'indigotier	Bleu violacé

Actuellement, l'importance économique des colorants naturels a beaucoup diminué, on ne les utilise plus dans l'industrie textile, du cuir et du papier, que pour des traitements spéciaux. Ils restent en revanche, très utilisés dans les produits alimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques.

## B. Les colorants synthétiques :

Les colorants synthétiques dominent aujourd'hui le marché surtout que leurs propriétés peuvent être précisément adaptées à leur utilisation. Tous ces colorants sont synthétisés principalement à partir des produits pétroliers, notamment du benzène et de ses dérivés (toluène, naphthalène, xylène et anthracène) [23]. C'est grâce à une série de procédés chimiques, qui correspondent en général à la substitution d'un ou plusieurs atomes d'hydrogène du produit de départ par des éléments ou des radicaux particuliers, que sont fabriqués les intermédiaires. Ces derniers serviront à la fabrication du colorant final [24]. Ils sont de plus en plus utilisés dans les industries de coloration et des textiles grâce à leur

## Généralités sur la pollution des eaux et les méthodes de traitements

synthèse assez facile, à leur production rapide et à la variété de leurs couleurs comparées aux colorants naturels.

### I.2.1.2. Structure chimique des colorants :

Les propriétés colorantes des composés organiques dépendent de leur structure chimique. En général, les produits utilisés comme colorants sont des composés organiques insaturés et aromatiques. Une molécule type de colorant est constituée de trois parties, c'est-à-dire un chromophore, un auxochrome et un groupe solubilisant [24].

#### A. Un groupe chromophore :

Il permet une absorption importante de lumière dans le domaine du visible ou de l'ultraviolet. Il représente la portion responsable de la couleur du composé (tableau I.3).

#### B. Un groupe auxochrome :

Le déplacement de l'absorption vers les plus grandes longueurs d'onde dans le domaine du visible est dû dans la molécule du colorant à la présence de groupements auxochromes couplés aux groupements chromophores. L'auxochrome est donc la partie influençant l'intensité de la coloration et il fixe le colorant avec efficacité sur le support (tableau I.3).

**Tableau (I.3): Principaux groupes chromophores et auxochromes [24].**

Groupes chromophores	Groupes auxochromes
Azo (-N=N-)	Amino (-NH <sub>2</sub> )
Nitroso (-NO ou -N-OH)	Méthylamino (-NHCH <sub>3</sub> )
Carbonyl (=C=O)	Diméthylamino (-N(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )
Vinyl (-C=C-)	Hydroxyl (-HO)
Nitro (-NO <sub>2</sub> ou =NO-OH)	Alkoxy (-OR)
Sulfure (>C=S)	Groupes donneurs d'électrons

# Généralités sur la pollution des eaux et les méthodes de traitements

## C. Un groupe solubilisant :

Il améliore la solubilité du colorant et ainsi, il peut être appliqué en milieu aqueux.

### I.2.1.3. Classification des colorants :

Tous les composés aromatiques absorbent l'énergie électromagnétique mais seulement ceux qui ont la capacité d'absorber les rayonnements lumineux dans le spectre visible (de 380 à 750 nm) sont colorés [25].

La classification des colorants peut être divisée en deux groupes : selon leur constitution chimique et selon la classification par domaine d'application (tableau I.4).

#### A. La classification selon la constitution chimique :

Le classement des colorants selon leur structure chimique repose sur la nature du groupe chromophore (tableau I.3). Cette classification présente un intérêt pour le fabricant des matières colorantes, selon laquelle on distingue plusieurs classes [26].

#### B. La classification selon le domaine d'application «tinctoriale» :

Les méthodes de teinture varient avec la structure chimique de la fibre à colorer. Un colorant approprié à la laine ou à la soie peut être entièrement insuffisant pour le coton. En général, c'est la structure chimique du matériau qui détermine le processus et le colorant à utiliser pour le teindre [27].

**Tableau (I.4) : Classification des colorants [27].**

Classification chimique	classification tinctoriale
Les colorants azoïques ; Les colorants anthraquinoniques ; Les colorants indigoïdes ; Les colorants xanthène ; Les phtalocyanines ; Les colorants nitrés et nitrosés.	Les colorants acides (anioniques) ; Les colorants basiques (cationiques) ; Les colorants de cuve ; Les colorants directs ; Les colorants à mordants ; Les colorants réactifs ; Les colorants dispersés.

## **I.2.1.4. Colorants azoïques :**

Notre travail sera dédié à l'étude de l'élimination d'un colorant azoïque. La suite de cette bibliographie sera alors focalisée sur cette famille de colorants.

### ***I.2.1.4.1. Définition des colorants azoïques :***

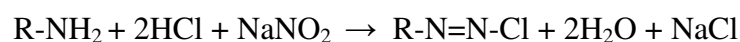
Les colorants azoïques sont des composés caractérisés par le groupe fonctionnel azo (-N=N-), unissant deux groupements alkyle ou aryles identiques ou non (azoïque symétrique et dissymétrique).

Suivant le nombre de groupement azo rencontré dans la structure du colorant, on distingue les monoazoïques, les bisazoïques et les polyazoïques.

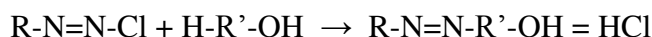
### ***I.2.1.4.2. Synthèse des colorants azoïques :***

Les colorants azoïques constituent la famille la plus utilisée dans l'industrie (60-70%). Ils sont produits en générale par deux réactions, une réaction de diazotation et une réaction de condensation.

La réaction de diazotation consiste en une transformation des amines aromatique primaires par l'acide nitreux en composés diazoïque peu stables appelés communément « diazo », qui se décomposent sous l'action de la lumière, de la chaleur et de l'alcalinité ; La réaction chimique étant :



La réaction de condensation consiste en la réaction d'un composé diazotique avec un phénol ou une amine aromatique selon la réaction suivant :



On obtient ainsi un colorant azoïque stable [28][29].

### ***I.2.1.4.3. Réactivité des colorants azoïques :***

L'introduction de groupes azo ou de groupes amine ou phénol entre deux noyaux aromatiques, conduit au déplacement du spectre d'absorption du benzène vers les grandes longueurs d'onde. Ainsi la présence de substituant sulfonés, nitrés ou halogénés, augmente le phénomène de résonance et a une influence directe sur l'attaque par les radicaux hydroxyles [30][31].

## I.2.2. Problèmes environnementaux issus de l'industrie textile :

La présence de couleur et d'anneaux aromatiques sous forme d'amine aromatique dans les rejets de l'industrie textile, pose un problème pour l'environnement, car ces colorants sont dans la plupart du temps toxiques, non biodégradable et résistants à la destruction par les méthodes de traitement physico-chimiques classiques [32][33][34][35].

Plusieurs phénomènes induits par les rejets teinturiers représentent des dangers pour l'environnement qui sont réparties en deux types les rejets évidents et les rejets à long terme.

### I.2.2.1. Les dangers évidents :

- **Eutrophisation :**

Différents ions peuvent être évacués dans le milieu naturel tel que le phosphate, utilisé comme détergent lors du processus d'ennoblissement ou le nitrate libéré sous l'action des microorganismes sur les colorants. Ces ions minéraux introduits en quantité trop importante peuvent devenir toxiques pour la vie piscicole et altérer la production d'eau potable. Leur consommation par les plantes aquatiques accélère la prolifération anarchique de celles-ci et conduit à l'appauvrissement en oxygène par inhibition de la photosynthèse dans les strates les plus profondes des cours d'eau et des eaux stagnantes [36].

- **Sous-oxygénation :**

Lorsque des charges importantes de matière organique sont apportées au milieu via des rejets ponctuels, les processus naturels de régulation ne peuvent plus compenser la consommation bactérienne d'oxygène. **Manahan [37]**, estime que la dégradation de 7 à 8 mg de matière organique par des micro-organismes suffit pour consommer l'oxygène contenu dans un litre d'eau.

- **Couleur, turbidité et odeur :**

L'accumulation des matières organiques dans les cours d'eau induit l'apparition de mauvais goûts, de prolifération bactérienne, d'odeurs pestilentielles et de colorations anormales. **Willmott et al [38]**, ont évalué qu'une coloration pouvait être perçue par l'œil humain à partir de  $5 \cdot 10^{-6} \text{ g.l}^{-1}$ . En dehors de l'aspect inesthétique, les agents colorants ont la capacité d'interférer avec la transmission de la lumière dans l'eau, bloquant ainsi la photosynthèse des plantes aquatiques.

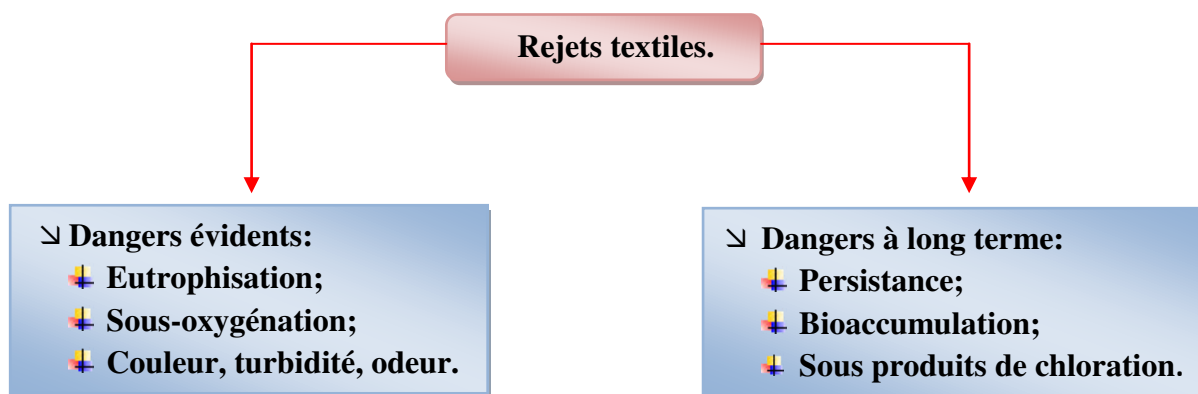
# Généralités sur la pollution des eaux et les méthodes de traitements

## I.2.2.2. Les dangers à long terme :

- **La persistance :**

Les colorants organiques synthétiques sont des composés très résistants à la dégradation biologique naturelle [39]. Cette persistance est due principalement à leur réactivité chimique :

- La persistance des aromatiques augmente avec le nombre de substituant ;
- Les substituant halogènes augmentent la persistance des colorants tels que les groupements alkyles.



*Figure (I) : Dangers des rejets textiles.*

- **Bioaccumulation :**

Si un organisme ne dispose pas de mécanismes spécifiques, soit pour empêcher la résorption d'une substance telle qu'un colorant, soit pour l'éliminer une fois qu'elle est absorbée, alors cette substance s'accumule. Les espèces qui se trouvent à l'extrémité supérieure de la chaîne alimentaire, y compris l'homme, se retrouvent exposées à des teneurs en substances toxiques pouvant être jusqu'à mille fois plus élevées que les concentrations initiales dans l'eau [40].

- **Sous produits de chloration (SPD) :**

Le chlore utilisé pour éliminer les microorganismes pathogènes réagit avec la matière organique pour former des trihalométhanes dont les concentrations peuvent atteindre plusieurs centaines de  $\text{g.l}^{-1}$  [41]. Les SPD sont responsables du développement de cancer du foie, des poumons, des reins et de la peau chez l'homme [42][43].

## I.3. Procédés de traitement des effluents textiles :

Le secteur textile fait partie de plusieurs branches d'activités générant la moitié des flux industriels de pollution. Les effluents issus de ce secteur peuvent être très colorés et difficiles à traiter. La coloration de ces eaux usées est de plus en plus perçue comme une nuisance importante. La plus grande part des effluents est représentée par l'ennoblissement qui englobe les prétraitements (désencollage, blanchissement,...), la teinture ou l'impression et les opérations qui confèrent aux fibres textiles des propriétés particulières.

Le traitement des rejets textiles, compte tenu de leur hétérogénéité de composition, conduira toujours à la conception d'une chaîne de traitement assurant l'élimination des différents polluants par deux étapes successives.

La première étape consiste à éliminer la pollution insoluble par l'intermédiaire de prétraitements (dégrillage, dessablage, déshuilage...etc.) et/ou de traitements physiques ou physico-chimiques assurant une séparation solide - liquide. Les techniques de dépollution intervenant le plus couramment en deuxième étape dans les industries textiles d'après **Barclay & Buckley [44], et Kurbus & al [45]**, se divisent en trois types :

### ➤ *Physique* :

- Méthodes de précipitation (coagulation, floculation, sédimentation) ;
- Adsorption (sur charbon actif) ;
- Osmose inverse, filtration.

### ➤ *Chimique* :

- Oxydation (oxygène, ozone, oxydants tels que NaOCl, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ;
- Réduction (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) ;
- Résine échangeuse d'ions.

### ➤ *Biologique* :

- Traitement aérobie ;
- Traitement anaérobie.



## Généralités sur la pollution des eaux et les méthodes de traitements

**Tableau (I.5) : Comparaison des technologies de dépollution des effluents textiles en fonction des avantages et des inconvénients [46].**

Technologie	Exemples	Avantages	Inconvénients
Coagulation - Flocculation	Alun, Chaux, FeCl <sub>3</sub> ,	Equipement simple ; Décoloration relativement rapide ; Réduction significative de la DCO.	Formation de boues ; Adjonction de produits chimiques nécessaire ; Fonctionnement onéreux ; Coagulants non réutilisables ; Réduction spécifique de la couleur.
Filtration sur membranes	Osiose inverse. Nanofiltration. Microfiltration Ultrafiltration.	Utilisation simple et rapide ; Pas d'addition de produits chimiques ; Faible consommation énergétique ; Réduction de la couleur ; Grands volumes traités.	Investissement important sélectif ; Encrassement rapide de membranes ; Pré et post traitements nécessaires.
Adsorption	Charbon actif. Silice.	Réduction efficace de la couleur ; Technologie simple ; Faible coût d'utilisation pour certains adsorbants.	Investissement et coûts de fonctionnement élevés ; Lent et limité en volume ; Régénération des adsorbants onéreuse ; Formation de boue.

## Généralités sur la pollution des eaux et les méthodes de traitements

Oxydation chimique	Ozone.  Chloration.	Traitement de gros volumes ;  Diminution nette de la coloration.	Investissement et coûts de fonctionnement très élevés ;  Efficacité limitée pour certains colorants ;  Formation de sous produits de chloration (trihalométhanes cancérigènes).
Réduction chimique	Chlorure d'étain  Hydrosulphite	Décoloration efficace des azoïques.	Formation d'amines aromatiques ;  Dégradation incomplète.
procédés biologiques	Aérobie.          Anaérobie.	Approprié aux colorants insolubles ;     Décolore la plupart des colorants par un mécanisme de réduction ;  Réutilisation du méthane produit comme source d'énergie sur site.	Spécifique à certains colorants ;  Décoloration variable ;  Grandes quantités de boue générées ;  Besoins énergétiques importants ; Produits de dégradation inconnus;  Beaucoup de produits toxiques non dégradés ;  Nécessite des grands réservoirs d'aération.

### I.4. Conclusion :

Les rejets de l'industrie textile posent un grand problème pour l'environnement car ces rejets sont très toxiques et ont des charges polluantes très élevées. Les procédés classiques utilisés dans les stations de traitement des eaux usées ne sont pas efficaces et pour cela, il faut chercher d'autres procédés moins coûteux et qui permettent une dépollution complète de ces rejets.

## Généralités sur la pollution des eaux et les méthodes de traitements

Dans les chapitres qui suivent, un intérêt sera donné aux deux méthodes de traitement appliquées dans la présente étude. A savoir la coagulation-floculation chimique et l'électrocoagulation-électrofolttation.



***Chapitre II***  
**Coagulation-floculation**

## Chapitre II : Coagulation-floculation

### **Introduction :**

La turbidité et la couleur d'une eau sont principalement causées par des particules très petites, dites particules colloïdales. Ces particules, qui peuvent rester en suspension dans l'eau durant de très longues périodes, peuvent même traverser un filtre très fin. Par ailleurs, du fait de leur grande stabilité, elles n'ont pas tendance à s'accrocher les unes aux autres. En général, la turbidité est causée par des particules de matière inorganique, alors que la couleur est imputable aux particules de matière organique et aux hydroxydes de métaux.

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 cohésion 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 [47][48].

Dans le cas du traitement des eaux, application principale des coagulants et floculants, de gros efforts de recherche et développement sont nécessaires pour répondre à des exigences de qualités très réglementées imposées par le renforcement permanent des contraintes environnementales. Les études menées dans les laboratoires de recherche permettent d'acquérir une connaissance précise des phénomènes physico-chimiques qui gèrent la mise en œuvre des produits et d'adapter leurs caractéristiques aux évolutions de l'application [48]

### **II.1. coagulation-floculation :**

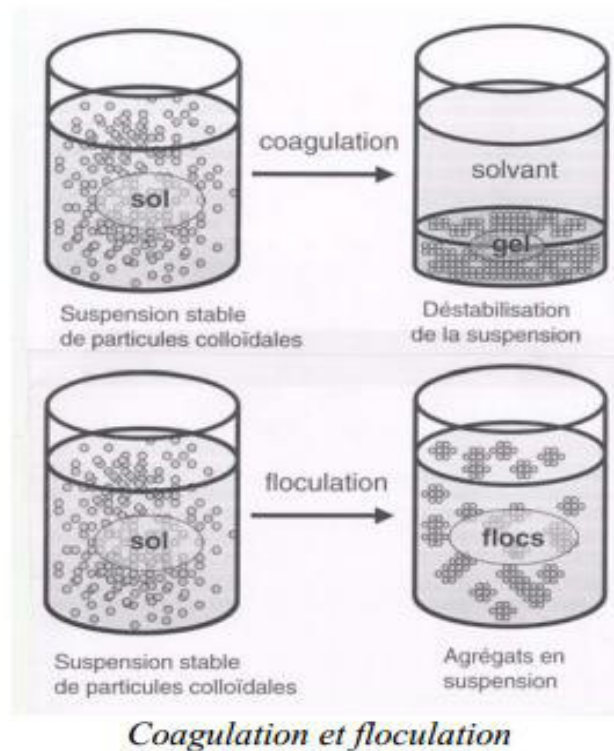
La coagulation est l'ensemble des phénomènes physico-chimiques amenant une suspension stable de particules de très petite taille en solution - les colloïdes - à se séparer en deux phases distinctes [48].

La floculation est l'ensemble des phénomènes physico-chimiques menant à l'agrégation de particules déstabilisées pour former des flocons ou «flocs ». Ce phénomène est réversible, c'est à dire que l'on peut casser ces agrégats, par exemple en agitant fortement le liquide, pour retrouver la solution de colloïdes initiale [48].

## Chapitre II : Coagulation-floculation

La coagulation-floculation facilite l'élimination des MES (Matières En Suspension) et des colloïdes en les rassemblant sous forme de floccs dont la séparation s'effectue par décantation, flottation et/ou filtration. C'est donc un traitement physique qui permet d'éliminer tous ou une partie des polluants des effluents notamment les fractions particulaires inertes ou vivantes, les fractions floculables des matières organiques et de certains métaux lourds, les micropolluants associés aux MES et les macromolécules colloïdales [49].

La Coagulation et la floculation sont des processus souvent indissociables. En effet, la coagulation, en diminuant les forces de répulsion entre les particules, favorise les collisions et la formation d'agrégats ; et la floculation, en permettant la croissance des agrégats accélère la séparation des phases [48].



**Figure (I.1) : phénomène de coagulation-floculation chimique [48]**

## Chapitre II : Coagulation-floculation

### II.2. Matières en suspension et colloïdes :

L'eau contient de nombreux composés qui peuvent se regrouper en trois catégories :

- ▶ **Matières en suspension** : Ces produits peuvent être d'origine minérale (sables, limons, argiles...) ou organique (produits de la décomposition des matières végétales ou animales, acides humiques ou fulviques par exemple). A ces composés s'ajoutent les micro-organismes tels que bactéries, plancton, algues et virus. Ces substances sont responsables, en particulier, de la turbidité et de la couleur.
- ▶ **Matières colloïdales** : (moins de 1micron) : Ce sont des MES de même origine que les précédentes mais de plus petite taille, dont la décantation est excessivement lente. Elles sont également génératrices de turbidité et de couleur.
- ▶ **Matières dissoutes** : (moins de quelques nanomètres) : Ce sont généralement des cations ou des anions. Une partie de la matière organique est également sous forme dissoute. On trouve aussi des gaz ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$ , ...) [50].

#### II.2.1. Les suspensions colloïdales :

Pour leur étude, les colloïdes sont classés, arbitrairement, en deux groupes principaux :

- ▶ **les colloïdes hydrophiles** : ils proviennent de substances solubles présentant une affinité pour l'eau, et qui adsorbent une couche d'eau liée, protectrice. Dans ce groupe se trouvent les protéines, les carbohydrates et, d'une façon générale, les produits organiques.
- ▶ **les colloïdes hydrophobes** : généralement plus gros et n'ont pas de couche protectrice. Ils proviennent de substances peu ou pas soluble tels que les métaux, leurs oxydes et/ou leurs hydroxydes. Plus généralement, ce sont des produits minéraux.

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

- ▶ Une force de répulsion électrostatique qui tend à écarter les particules les unes des autres. Cette force dépend de la charge des particules qui sont de même signe.
- ▶ Une force d'attraction (type de Van der Waals) liée à la structure et à la forme des colloïdes ainsi qu'à la nature du milieu [50].

## Chapitre II : Coagulation-floculation

### II.2.2. Décantation des suspensions colloïdales :

Le temps de décantation des particules coagulées dépend du type de particules, du diamètre des particules et de leur surface spécifique. Ce temps va d'une seconde pour du gravier coagulé ayant un diamètre de 10 mm et une surface spécifique de  $6.10^2 \text{ m}^2.\text{m}^{-3}$  à 20 ans pour du colloïde de  $10^{-2} \mu\text{m}$  ayant une surface spécifique de  $6.10^8 \text{ m}^2.\text{m}^{-3}$  [51]. Il est donc impossible que certaines particules notamment les colloïdes et les particules à surface spécifique très élevée décantent naturellement. Pour obtenir la décantation de ces particules, il faudrait 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. La déstabilisation des entités en suspension passe par des phénomènes d'adsorption, expliqués par la théorie de la double couche. Elle explique comment les colloïdes sont traités par coagulation [52].

**Tableau (I.1) : temps de décantation de différentes particules d'après la loi de Stokes [50].**

Diamètre de particule		Types de particules	Temps de décantation pour 1 m d'eau	Surface spécifiques $\text{m}^2.\text{m}^{-3}$	
Mm	$\mu\text{m}$				
10	$10^4$	Gravier	1 seconde	$6.10^2$	<b>MES décantations</b>
1	$10^3$	Sable	10 secondes	$6.10^3$	
$10^{-1}$	$10^2$	Sable fin	2 minutes	$6.10^4$	
$10^{-2}$	10	Limon	2 heures	$6.10^5$	
$10^{-2}$	10	Kyste de protozoaire	20 heures	$6.10^5$	<b>Colloïdes</b>
$10^{-3}$	1	Argile	2 jours	$6.10^6$	
$10^{-3}$	1	Bactérie	8 jours	$6.10^6$	
$10^{-4}$	$10^{-1}$	Colloïde	2 ans	$6.10^7$	
$10^{-5}$	$10^{-2}$	Colloïde	20 ans	$6.10^8$	



## Chapitre II : Coagulation-floculation

### II.3. Théorie de la double couche :

Les colloïdes présents dans l'eau brute sont très généralement chargés négativement (imperfections du réseau cristallin, ionisation des groupements chimiques périphériques, ...). Afin de neutraliser cette charge négative de surface, des ions positifs, présents dans l'eau brute ou ajoutés, viennent former une couche autour du colloïde [50].

### II.4. Phénomène de coagulation :

La charge électrique et la couche d'eau qui entourent les particules hydrophiles tendent à éloigner les particules les une des autres et, par conséquence, à les stabiliser dans la solution. Le but principale de la coagulation est de déstabiliser ces particules pour favoriser leur agglomération [47]. On peut obtenir cette déstabilisation par:

- a) compression de la double couche ;
- b) adsorption et neutralisation des charges ;
- c) emprisonnement des particules dans un précipité ;
- d) adsorption et pontage [47].

#### II.4.1. Compression de la double couche :

Lorsqu'on rapproche deux particules colloïdales semblables, leurs couches diffuses interagissent et génèrent une force de répulsion. Pour vaincre cette force on ajoute un électrolyte qui va créer au sein de l'eau une couche ionique plus élevée, qui va contribuer à faire diminuer l'épaisseur de la double couche électrique.

Il existe par ailleurs un potentiel d'attraction, ou force d'attraction,  $E_a$ , entre les particules. Ces force, appelées force de Van der Waals, dépend des atomes qui constituent les particules et de la densité de ces dernières. Contrairement aux forces de répulsion, les forces de van der Waals ne sont pas affectées par les caractéristiques de la solution.

Lorsque l'épaisseur diminue, les particules peuvent se rapprocher d'avantage (elles se repoussent plus autant qu'avant) et les forces d'attraction de Van der Waals vont être supérieures aux forces électrostatiques ce qui favorise l'agrégation des particules [47].

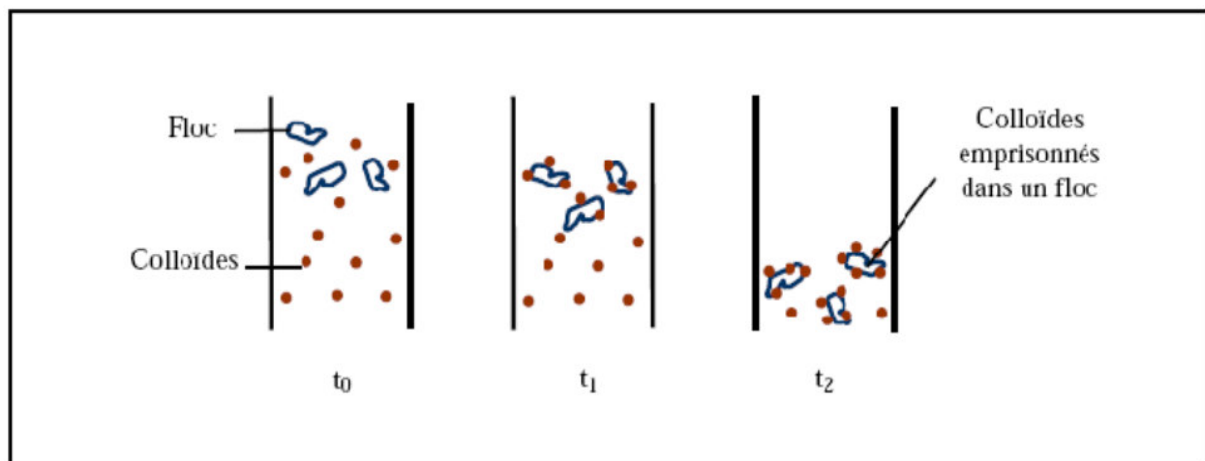
## Chapitre II : Coagulation-floculation

### II.4.2. Adsorption et neutralisation des charges :

On peut tout fois expliquer la réstabilisation des particules colloïdales en posant l'hypothèse que des charge issues d'un surplus de coagulant sont adsorbées à la surface des particules. Les particules colloïdales ainsi rentabilisées possèdent alors une charge inversée, ce qui est contraire au but recherché [47].

### II.4.3. Emprisonnement des particules dans un précipité :

Pour la déstabilisation des particules colloïdales, on peut en outre les emprisonner, lorsqu'on ajoute en quantité suffisante des coagulants, habituellement des sels de métaux trivalents,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  ou  $\text{FeCl}_3$ , on obtient un précipité appelé floc. Lorsque le pH de l'eau est situé dans une plage acide ou neutre, le floc, constitué de molécules de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ou de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , possède habituellement une charge positive. La présence de certains anions et de particules colloïdales accélère la formation du précipité. Les particules colloïdales jouent le rôle de noyaux lors de la formation du floc; ce phénomène peut entraîner une relation inverse entre la turbidité et la quantité de coagulant requise. En d'autre mots, une concentration importante de particules en suspension peut entraîner une diminution de la quantité de coagulant nécessaire [47].

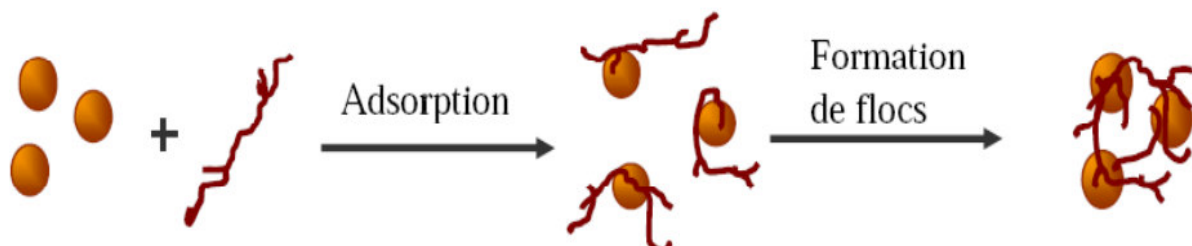


**Figure (II.2) :** Emprisonnement des particules dans les floes pendant la décantation [53].

## Chapitre II : Coagulation-floculation

### II.4.4. Adsorption et pontage :

Dans quelques cas, on a obtenu le traitement le plus économique en utilisant un polymère anionique lorsque les particules étaient chargées négativement. Ce phénomène, inexplicable à l'aide de la théorie électrique, peut toutefois être expliqué par le "pontage". Les molécules de polymère, très longue contiennent des groupes chimique qui peuvent adsorber des particules colloïdale à une de ses extrémité, alors que d'autre sites sont libre pour adsorber d'autre particules. On dit alors que les molécules polymères forment des "ponts" entre les particules colloïdales. Il peut y avoir restabilisation de la suspension, imputable à une concentration excessive de polymères. Dans ces conditions, les sites libres de plusieurs molécules de polymères s'accrochent à une même particule colloïdale. Cet ensemble particule-molécule de polymères ne peut plus par la suite absorber d'autres particules colloïdales [47].



*Figure (II.3) : Adsorption et pontage a l'aide d'un polymère [47].*

### II.5. Phénomène de floculation :

Après avoir été déstabilisées, les particules colloïdales ont tendance à s'agglomérer lorsqu'elles entrent en contact les unes avec les autres, c'est la floculation. Le taux d'agglomération des particules dépend de la probabilité des contacts et de l'efficacité de ces derniers. La floculation a justement pour but d'augmenter la probabilité de contact des particules, lesquelles sont provoquées par la différence de vitesse entre ces particules. Deux phénomènes de transport régissent la floculation [47] :

- ▶ **Floculation péricinétique** : due à l'agitation désordonnée des particules. En cas de floculation péricinétique,  $F_p$ , les contacts entre les particules sont causés par le mouvement aléatoire de celles-ci, dit mouvement brownien.

## Chapitre II : Coagulation-floculation

- **Floculation orthocinétique** : On appelle floculation orthocinétique, FO, la floculation provoquée par l'agitation de l'eau. L'agitation facilite l'agrégation en augmentant la probabilité des collisions entre les particules [47].

### ► II.6. Les étapes de l'agrégation :

Diverses phases successives ou simultanées interviennent dans l'agrégation des particules qui sont l'hydrolyse (formation des radicaux hydroxydes métalliques), la coagulation et la floculation [50].

*Tableau (II.2) : Les étapes de l'agrégation [50].*

Stade	Phénomènes	Terminologie
AJOUT DU COAGULANT	Réaction avec l'eau, ionisation, hydrolyse, polymérisation	HYDROLYSE
DESTABILISATION	Compression de la double couche	COAGULATION
	Absorption spécifique d'ions du coagulant à la surface de la particule	
	Inclusion du colloïde dans un précipité d'hydroxyde	
TRANSPORT	Liaison interparticulaire par des espèces polymériques du coagulant	FLOCCULATION PERICINETIQUE
	Mouvement brownien	
	Energie dissipée (gradient de vitesse)	FLOCCULATION ORTHOCINETIQUE

## Chapitre II : Coagulation-floculation

### II.7. Coagulants utilisés :

Les principaux coagulants utilisés pour déstabiliser les particules et pour produire un floc sont : le sulfate d'alumine,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$ , l'aluminate de sodium,  $\text{NaAlO}_2$ , le chlorure d'aluminium,  $\text{AlCl}_3$ , le chlorure ferrique,  $\text{FeCl}_3$ , le sulfate ferrique,  $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ , le sulfate ferreux,  $\text{FeSO}_4$ , le sulfate de cuivre,  $\text{CuSO}_4$ , et les polyélectrolytes [47].

Les produits les plus utilisés pour la purification des eaux sont les sels d'aluminium et de fer. On a longtemps pensé que ces sels libéraient des ions  $\text{Al}^{+3}$  et  $\text{Fe}^{+3}$  qui neutralisaient la force de répulsion entre les particules colloïdales et favorisaient ainsi la coagulation. On sait maintenant que les mécanismes qui entrent en jeu sont plus complexes et que les produits d'hydrolyse des sels d'aluminium et de fer sont des coagulants plus efficaces que les ions eux-mêmes [47].

Lorsqu'on additionne à l'eau les sels d'aluminium ou de fer, ces derniers réagissent avec l'alcalinité de l'eau et produisent des hydroxydes,  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ou  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , insolubles et formant un précipité [47].

### II.9. Choix du coagulant :

Les critères de choix d'un coagulant sont nombreux. Son efficacité à réduire la couleur, la turbidité et les matières organiques d'une eau est essentielle. On ne peut, néanmoins, négliger les effets secondaires comme les fuites en  $\text{Fe}^{3+}$  et  $\text{Al}^{3+}$ . Il faut savoir que le sulfate ferrique contient du manganèse sous forme de  $\text{Mn}^{2+}$  à raison de 0,057 g pour 100 g de coagulant. Le traitement d'eau chargée en matières organiques exige du sulfate ferrique. Les coagulants à base de sels d'aluminium permettent d'obtenir une eau traitée très faible en turbidité. La vérification de la dose de coagulant à mettre en œuvre passe par le JAR-TEST.

Les sels d'aluminium sont très largement utilisés dans le domaine de l'eau potable. Les sels de fer sont plutôt destinés aux eaux résiduaires et en particulier pour l'élimination physico-chimique du phosphore. Le chlorure ferrique a sa place dans les filières de traitement des boues hydroxydes ou organiques [54].

## Chapitre II : Coagulation-floculation

*Tableau (II.3) : Caractéristiques de quelques coagulants [54].*

Nom commercial	Masse molaire	Densité	Forme	Formule	Apport en $M_2O_3$	Remarque
Sulfate d'alumine	666	-	Solide	$Al_2(SO_4)_3, 18H_2O$	17 à 18	Poudre irritante
Sulfate d'alumine	654	1,45	Liquide		8,2	Liquide corrosif
Chlorure ferrique	162,5	1,45	Liquide	$FeCl_3$	41% Fe	Réactif acide
Sulfate Ferrique	278	-	Poudre	$FeSO_4, 7H_2O$	20% Fe	
Chlorosulfate Ferrique	187	1,5	Liquide	$FeClSO_4$	14% Fe	Réactif acide

### II.10. Facteurs influençant la coagulation :

Afin d'optimiser la coagulation, il faut tenir compte de plusieurs variables en interrelations, comme le pH, les sels dissous, la température de l'eau, le coagulant utilisé, les conditions de mélange, la turbidité, la couleur, grosseurs et concentration des particules colloïdales, et l'hydratation. Ces interrelations complexes interdisent actuellement toute approche théorique permettant de prédire quelle sont les concentrations optimales de coagulants [47].

#### II.10.1. Influence du pH :

Le pH est la variable la plus importante à prendre en considération au moment de la coagulation. Pour chaque eau, il existe une plage de pH pour laquelle la coagulation a

## Chapitre II : Coagulation-floculation

lieu rapidement, plage qui est fonction du coagulant utilisé, de sa concentration et de la composition de l'eau à traiter. Lorsque la coagulation se produit hors de cette plage optimale, il faut soit augmenter la quantité de coagulant, soit se contenter d'une eau de moins bonne qualité. [47].

Pour les sels de fer et d'aluminium, les plages de pH optimales s'étendent respectivement de 4 à 6 et de 5 à 7. Pour certaines eaux, il faut parfois corriger le pH à l'aide de divers produits (acides, chaux ou soude). [47].

Pour abaisser le pH, il est plus avantageux, dans certains cas, d'augmenter la quantité de coagulant. Lorsque le pH est optimal, les produits solubles d'aluminium ou de fer sont pratiquement inexistantes [47].

### II.10.2. Influence des sels dissous :

Les sels contenus dans une eau exercent les influences suivantes sur la coagulation et la floculation [47] :

- a) modification de la plage de pH optimale ;
- b) modification du temps requis pour la floculation ;
- c) modification de la quantité de coagulant requis ;
- d) modification de la quantité résiduelle de coagulant dans l'effluent.

### II.10.3. Influence de la température de l'eau :

On dispose de peu d'informations en ce qui concerne l'influence de la température de l'eau sur la coagulation. Toutefois, l'expérience révèle que durant l'hiver, lorsque la température de l'eau avoisine 0°C, le floc se décante plus difficilement et a tendance à pénétrer plus profondément dans les filtres.

Une diminution de la température de l'eau entraîne une augmentation de sa viscosité ; c'est ce qui explique les difficultés de décantation du floc. De plus, pour une même vitesse de filtration, les forces de cisaillement qui s'exercent sur le floc sont plus importantes, ce qui en favorise le bris et l'entraînement dans le filtre. On peut surmonter de diverses manières les difficultés dues à une diminution de la température de l'eau [47]:

## Chapitre II : Coagulation-floculation

a) On effectue la coagulation dans la plage de pH optimale pour cette eau à cette température.

b) On augmente la quantité de coagulant, ce qui a pour effet d'accroître la probabilité de collisions entre les particules et d'élargir la plage de pH optimale.

c) On augmente la turbidité de l'eau (par addition de glaise), afin d'alourdir le floc, ou on ajoute un aide-coagulant (silice activée ou polyélectrolyte) pour alourdir et renforcer le floc.

### II.10.4. Influence du coagulant :

Le choix du coagulant peut influencer les caractéristiques de la coagulation. Ainsi, même si le sulfate d'aluminium est le coagulant le plus fréquemment utilisé, il peut être avantageux de le remplacer par du sulfate ferrique. Ce dernier procure en effet à plusieurs eaux une plage de pH optimale plus large que celle due au premier. De plus, pour un même pH élevé, le sulfate ferrique est moins soluble que sulfate d'aluminium [47].

On ne peut choisir un coagulant et en déterminer la concentration optimale, pour une eau donnée, qu'après avoir effectué des essais en laboratoire. La théorie qui explique les différents mécanismes de déstabilisation des particules colloïdales n'est pas suffisamment développée pour qu'on puisse résoudre un problème aussi complexe. Cette théorie est cependant très utile aux moments de la planification des essais de laboratoire et de l'interprétation des résultats obtenus [47].

### II.10.5. Influence du mélange :

Au cours de la coagulation et de la floculation, on procède au mélange des produits chimiques en deux étapes :

A la première étape, le mélange est énergique et de courte durée (180 s au maximum) : c'est le mélange rapide. Ce mélange a pour but principal de disperser les produits dans la totalité du volume d'eau à traiter. On effectue le mélange rapide en injectant les produits chimiques dans une zone de forte turbulence ou en utilisant des équipements de mélange mécanique. Un mélange rapide inadéquat entraîne en général un accroissement de la quantité de produits chimiques nécessaires.



## Chapitre II : Coagulation-floculation

A la deuxième étape, le mélange est lent et il a pour but de favoriser les contacts entre les particules de floc. Cependant, le mélange doit être suffisamment énergique pour engendrer des différences de vitesse de l'eau dans les bassins, mais pas trop. En effet, on risque de briser ce dernier, même si la durée du mélange dans un bassin de floculation peut n'être que de 10 min (elle varie en général de 30 à 60 min) [47].

### II.10.6. Influence De la turbidité :

La turbidité des eaux de surface est en grande partie due à la présence de particules de glaise dont le diamètre varie de 0,2 à 0,5  $\mu\text{m}$ . Il s'agit donc là de grosses particules colloïdales qui peuvent se déposer naturellement. La coagulation de ces particules est assez facile à réaliser lorsqu'on maintient le pH dans sa plage optimale. On peut faire par ailleurs les constatations générales suivantes [47] :

a) Il faut ajouter une concentration minimale de coagulant pour obtenir une certaine quantité de floc.

b) Lorsque la turbidité augmente, il faut augmenter la concentration de coagulant. L'augmentation de la quantité de coagulant ne varie toutefois pas de façon linéaire en fonction de l'augmentation de la turbidité.

c) Lorsque la turbidité est très élevée, la quantité de coagulant nécessaire est relativement faible, car la probabilité de collision entre les particules est très élevée. Par contre, lorsque la turbidité est faible, la coagulation est difficile.

d) La matière organique adsorbée sur les particules de glaise n'exerce aucune influence sur la quantité de coagulant nécessaire.

e) Lorsque la turbidité est due à des particules de diamètres variées, il est plus facile d'effectuer la coagulation que lorsqu'elle est imputable à des particules de diamètre sensiblement égal.

f) La coagulation d'une faible concentration de particules de glaise dépend principalement du coagulant et de la composition chimique de l'eau.

## Chapitre II : Coagulation-floculation

g) Il est toujours plus difficile de coaguler les eaux contaminées par des eaux d'égout domestiques et industrielles, car elles exigent des concentrations de coagulant plus importantes que les eaux non contaminées.

### II.10.7. Coagulation de la couleur :

En général, la couleur d'une eau est due à la décomposition de matières organiques contenues dans l'humus des sols. Elle dépend donc d'une grande variété de composés organique, dont les substances humiques, lesquelles sont des polymères dont la masse moléculaire varie de 800 à 50000[47].

Des études ont révèlent que 90% des particules responsables de la couleur avaient un diamètre supérieur à 3.5 nm ; ces particules sont donc des particules colloïdales beaucoup plus petites que les particules de glaise responsable de la turbidité (rappelons que le diamètre des particules de glaise est de l'ordre 1µm). La plus part des particules responsable de la couleur possèdent des charge négatives à leur surface, dont l'intensité dépend du degré d'ionisation et du pH de l'eau [47].

On peut dire que les particules responsables de la couleur sont de natures organiques, hydrophiles, petites et chargées négativement. Les mécanismes qui permettent l'élimination de la couleur ne sont pas les mêmes que ceux utilisés pour celle de la turbidité. La quantité de coagulant requise est fonction de la couleur initiale : pour un pH optimal, la couleur résiduelle décroît proportionnellement avec l'augmentation de la quantité de coagulant utilisée. Le pH optimale pour l'élimination de la couleur varie entre 4 et 6, alors que le pH optimal pour celle de la turbidité varie entre 6,5 et 7,5. Le pH optimal pour l'élimination de la couleur étant faible, on doit, dans certains cas, le relever avant la filtration, afin de faire précipiter les composés de fer et d'aluminium, qui sont solubles à des pH faibles [47].

### II.10.8. Grosseurs et concentration des particules colloïdales :

Il existe un seuil propice, pour la coagulation, du point de vue dimensionnel. Pour les particules dont les dimensions sont inférieures au micron, les forces de surface deviennent prépondérantes vis-à-vis des forces de masse. Dans ces conditions, on constate un état de dispersion stable due aux effets conjugués du mouvement brownien. De même, il s'avère que la concentration des particules ; c'est-à-dire le nombre de charges électriques à

## Chapitre II : Coagulation-floculation

mettre en jeu pour rompre le potentiel zêta, a une grande influence sur la coagulation. Cette coagulation est très difficile quand la concentration colloïdale est basse, sachant que le taux de contact interarticulaire se trouve probablement baissé [55].

### II.10.9. Etat d'hydratation :

L'hydratation est un phénomène complexe dont les effets se répercutent sur le taux d'agrégation des colloïdes. Dans une solution aqueuse, les particules microscopiques s'hydratent et s'enveloppent de liquide inter micellaire. Cette monocouche d'eau absorbée chimiquement sur les surfaces des particules (ex: les oxydes métalliques, les argiles et le quartz) produit l'effet d'une gaine isolante protectrice, s'opposant à l'agrégation des particules, par réduction de la tension superficielle à l'interface particule liquide, par conséquent, la stabilité des colloïdes se trouve renforcée. Aussi, les interactions colloïdes-eau peuvent retarder l'agrégation des systèmes colloïdaux. Ce phénomène peut être contrarié par l'augmentation de la quantité de coagulant et le prolongement de l'opération [55].

### II.11. Avantages et inconvénients :

#### II.11.1. Les avantages :

Le traitement des eaux implique des opérations de très grande échelle. Aucun autre procédé de technique séparative ne met en jeu d'aussi grands volumes. Il est donc nécessaire, compte tenu de la qualité et de la constance du résultat attendu, de disposer d'un procédé performant. Les techniques membranaires se développent dans ce domaine, mais la coagulation floculation reste actuellement le procédé physico-chimique le moins cher par rapport à la quantité de particules éliminées. La sédimentation est en effet le procédé de séparation le plus économique en termes de consommation d'énergie. Les technologies les plus récentes exigent une vitesse de sédimentation minimum de un mètre par heure. Ce qui correspond - selon la loi de Stokes, qui énonce qu'une particule sphérique isolée, tombant en régime laminaire dans un fluide atteint une vitesse  $V_0$  proportionnelle au carré de son diamètre- à la vitesse de sédimentation d'une particule de silice de 1.7 micron dans une eau à 20°C. Il ne serait donc pas possible par exemple de séparer correctement avec les équipements disponibles dans les stations d'épuration des bactéries isolées (vitesse de sédimentation de cinquante centimètres par heure) et encore moins un virus qui mettrait deux années pour parcourir un mètre. La coagulation-floculation permet d'agréger ces particules colloïdales en

## Chapitre II : Coagulation-floculation

flocs d'une taille comprise entre 100 microns et quelques millimètres, suffisamment denses pour sédimenter facilement [47].

### II.11.2. Les inconvénients :

L'un des désavantages de cette méthode est la nécessité d'ajouter des produits chimiques qu'il faut transporter et entreposer, ce qui augmente les coûts d'opération. De plus, le produit chimique ajouté induit également l'ajout d'anions indésirables (ex : sulfates) et la production de boues métalliques n'est pas non plus désirable. D'autre part si le coagulant est sous-dosé, la clarification est défectueuse ; s'il est surdosé, la clarification est tout aussi défectueuse et ceci de façon quasiment irréversible. On perd ainsi à la fois de l'eau et du réactif qui coûte cher [56].

### II.12. Domaines d'application :

Les applications industrielles de la coagulation et de la floculation sont nombreuses. On cite la séparation de la caséine du lait qui est l'une des premières étapes de la fabrication de nombreuses spécialités fromagères. Toujours dans l'industrie agroalimentaire, on trouve également des étapes de coagulation ou floculation dans la clarification de boissons. Dans un autre secteur industriel, la fabrication du papier, des coagulants et floculants sont utilisés pour retenir les pigments minéraux opacifiants au sein des fibres de cellulose lors de la formation des feuilles. Mais la principale application des coagulants et floculants est le traitement des eaux [48].

# *Chapitre III*

**Electrocoagulation-  
électroflottation**

# Chapitre III : Electrocoagulation-électroflottation

## Introduction :

L'aspect non polluant et les facilités d'automatisation que l'électricité apporte, devraient permettre un développement significatif des techniques électrochimique de traitement dans les prochaines années.

De nombreuses techniques utilisant directement ou indirectement, l'énergie électrique se sont déjà développées. D'autres méthodes à l'échelle laboratoire sont en cours d'études, et apportent des résultats pertinents dans le domaine de l'environnement en général, et plus particulièrement dans le traitement des effluents. Les effets directs de l'électricité ne sont, en général, sensibles, que sur les impuretés de faibles dimensions : ions ou petites molécules, les produits chimiques et colloïdaux en solution, les pollutions biologiques... Par effet indirect, c'est-à-dire par génération électrolytique d'un produit traitant, il est possible d'agir sur d'autres particules telles que les grosses molécules, les matières en suspension et les bactéries.

## III.1. Electrocoagulation :

### III.1.1. Définition :

L'électrocoagulation est une technique dérivée de la coagulation chimique standard. Dans l'électrocoagulation, aucun ajout de produit chimique n'est effectué puisque les ions métalliques actifs proviennent directement de la dissolution des anodes. Cette situation permet donc de diminuer le coût d'utilisation de produits chimiques et diminue par le fait même la production finale de boues dont il faut disposer. De plus, les hydroxydes métalliques qui sont formés lors de l'électrocoagulation ont une très grande habilité pour l'adsorption des polluants [57].

### III.1.2. Principe :

Le procédé d'électrocoagulation est basé sur le principe des anodes solubles. Il s'agit, d'imposer un courant (ou potentiel) entre deux électrodes (fer ou aluminium) immergées dans un électrolyte contenu dans un réacteur pour générer, in situ, des ions ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ) susceptibles de produire un coagulant en solution et de provoquer une coagulation-floculation des polluants que l'on souhaite éliminer.

## Chapitre III : Electrocoagulation-électroflottation

L'électrolyse peut également coaguler les composés solubles oxydables ou réductibles contenus dans l'effluent. Le champ électrique crée un mouvement d'ions et de particules chargées. Cette action permet de rassembler les matières en suspension sous forme de floccs qu'on élimine ensuite par un procédé physique classique (décantation, flottation, filtration). La figure suivante présente le principe du procédé avec des électrodes d'aluminium.

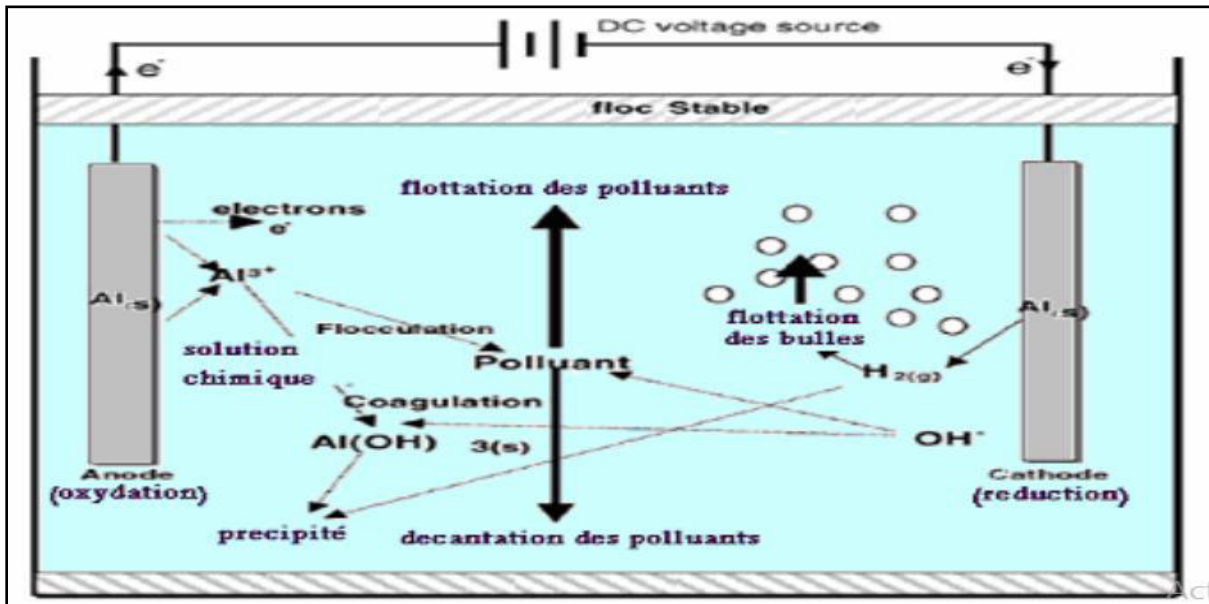


Figure (III.1) : schéma de principe de l'électrocoagulation [58].

Les anodes et les cathodes utilisées peuvent avoir différentes configurations. Elles peuvent se présenter sous forme de plaques, de boules, de sphères à lit fluidisé, de fil, de tige ou de tube. Ces électrodes peuvent être constituées de divers métaux qui sont choisis de manière à optimiser le procédé de traitement.

### III.1.3. Les principaux paramètres liés au fonctionnement de l'électrocoagulation :

#### III.1.3.1. Types d'électrodes :

Les deux métaux communément utilisés dans le traitement des eaux par électrocoagulation sont le fer (acier doux). Dans les deux cas, les matériaux utilisés peuvent être de qualité secondaire, ce qui diminue les coûts d'achat d'équipement. Ces matériaux sont choisis parce qu'ils permettent la production importante d'hydroxydes lors de l'imposition du courant, ce qui favorise la coagulation. L'anode soluble est donc composée d'un métal qui se dissout facilement sous le passage du courant, comme c'est le cas de fer ou de l'aluminium. De son côté, la cathode peut être également constituée de fer ou d'aluminium ou encore d'un autre métal.

## Chapitre III : Electrocoagulation-électroflottation

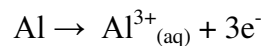
Lors de l'électrolyse, il n'y a pas de décomposition de la cathode induite par le courant électrique puisque le potentiel appliqué n'est pas excessif.

Cependant, il y a un dégagement gazeux ( $H_2$ ) provenant de l'électrolyse de l'eau. D'ailleurs, cette production de gaz contribue à la flottation des floes d'hydroxydes métalliques (phénomène d'électroflottation), ce qui en facilite leur récupération à la surface du liquide. Les mécanismes de formation des hydroxydes métalliques lors de l'électrocoagulation sont présentés à la section suivante.

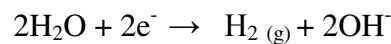
### III.1.3.2. Mécanisme de formation des hydroxydes :

La dissolution électrolytique des anodes d'aluminium produit des espèces cationiques comme  $Al^{3+}$  et  $Al(OH)_2^+$  à un pH relativement bas. Lorsque le pH augmente, ces espèces sont transformées en  $Al_2(OH)_3$ , lesquels composés peuvent se condenser pour former des dimères tels que  $Al_2(O)(OH)_4$  et  $Al_2(OH)_2^{4+}$  ou encore former d'autres composés polymériques plus complexes. Les réactions chimiques rencontrées lors de production d'hydroxydes sont les suivantes [59].

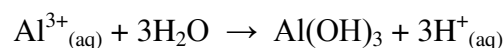
Réaction anodique :



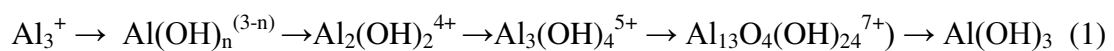
Réaction cathodique :



Réaction au sein de la solution :



Il est important de souligner que la formation de l'hydroxyde d'aluminium sous forme solide résulte d'une succession de réaction (germination ou condensation) en solution qui entraîne l'apparition de monomères ( $Al(OH)^{2+}$ ,  $Al(OH)_3$ , et  $Al(OH)_4^-$ ) et de polymères ( $Al_2(OH)_2^{4+}$ ,  $Al_3(OH)_4^{5+}$  et  $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$ ) suivant l'équation Eq(1) (Ami et mill 1982).



Dans cette équation, « n » représente le nombre d'ions d'hydroxydes entourant le métal Al dans la sphère de coordination. Les complexes polymériques sont d'autant plus important en solution que la concentration d' $Al^{3+}$  augmente. Ainsi, les polluants solubles et insolubles peuvent coaguler avec les hydrates d'aluminium ou les hydroxydes d'aluminium et être ensuite éliminés de l'effluent. Ces complexes solides formés sont gélatineux et de couleur blanchâtre et



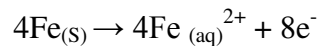
## Chapitre III : Electrocoagulation-électroflottation

les polluants peuvent être adsorbés à la surface de ceux-ci. Selon la littérature, les électrodes d'aluminium sont surtout utilisées lors du traitement de l'eau potable [60]. Il est important de noter que l'hydrate d'alumine n'est efficace (pour la coagulation) que lorsque le pH de la solution se situe entre 5,8 et 7,4[61][62]. Lorsque le pH ne se trouve pas dans cette marge, il ya un danger de persistance de l'ion  $Al^{3+}$  dans la solution sous forme soluble. Un tel surplus d-ions n'est pas désirable dans l'eau traitée et ne contribue pas à la réaction de coagulation-floculation.

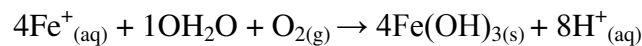
Dans le cas d'utilisation des électrodes de fer, les ions  $Fe^{2+}$  et/ou  $Fe^{3+}$  sont produit à l'anode lors de l'imposition du courant, suivi de la formation d'hydroxydes de fer en solution. Deux mécanismes sont retenus pour expliquer la formation de ces deux formes d'hydroxydes [59]:

### *Mécanisme 1 :*

Réaction anodique :

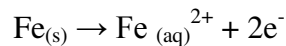


Réaction au sein de la solution :

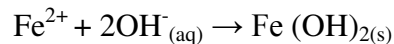


### *Mécanisme 2 :*

Réaction anodique :



Réaction au sein de la solution :



A l'instar des électrodes d'aluminium, il y a également formation d'ions  $OH^{-}$  et dégagement de  $H_2$  à la cathode dans les deux cas (mécanismes 1 et 2). Dans le cas de l'utilisation des électrodes de fer, les hydroxydes forment une suspension gélatineuse verte foncée qui retire les polluants de l'eau par complexation ou par attraction électrostatique [63][64]. Contrairement aux électrodes d'aluminium, les électrodes de fer ne sont que peu utilisées dans le traitement des eaux potables. On les retrouve surtout dans les usines de traitement des eaux usées [65]. Les hydrates de fer sont efficaces pour la coagulation pour des pH supérieurs à 5,5 [61]. Les ions métalliques libérés anodiquement dans l'effluent réagissent selon deux mécanismes distincts lors de leur contact avec les polluants. En premier lieu, ils réagissent directement avec ceux-ci pour former des précipités insolubles qui seront récupérables par sédimentation. En deuxième lieu, ils réagissent avec les ions  $OH^{-}$  qui sont produits à la cathode lors de la décomposition de l'eau (production simultanée de  $H_2$ ), pour former des hydroxydes insolubles. Ces hydroxydes

## Chapitre III : Electrocoagulation-électroflottation

( $\text{Al}(\text{OH})_3$  et  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  ou  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) peuvent par la suite adsorber des polluants à leur surface (floculation) et les entrainer par flottation ou par sédimentation, selon leurs propriétés de surface [66].

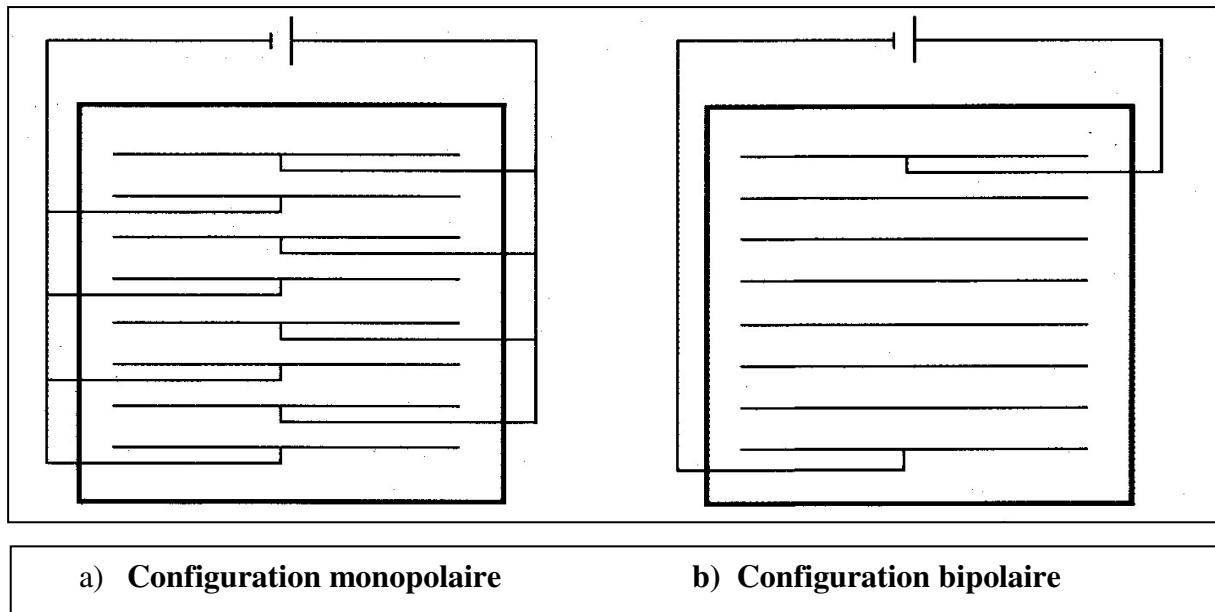
### III.1.3.3. Configuration des électrodes :

Les électrodes utilisées dans le traitement par électrocoagulation peuvent être de formes variées, tout dépendant de l'effluent à traiter. Il est possible de rencontrer des électrodes cylindriques, des lits fluidisés, des électrodes de métal déployé et des électrodes planes. Dans certains cas, les anodes sont même placées dans un réacteur qui set directement de cathode [67]. Par contre, les électrodes planes sont les plus utilisées, dans la majorité des cas, soit dans la recherche ou même dans les applications industrielles. Il est également important de noter que le nombre d'électrodes utilisées est très variable. Certains auteurs utilisent seulement une paire d'électrodes [68][69][70], tandis que d'autres utilisent jusqu'à huit électrodes [71][72]. En fait tout dépendant du nombre d'électrodes utilisées, la configuration des électrodes planes peut être de deux types : monopolaire ou bipolaire. Dans les deux cas, les électrodes sont placées sur un support de façon à avoir un espacement constant. La configuration choisie dépend seulement de la façon dont elles sont branchées au générateur de courant. Dans le cas de la configuration monopolaire, chacune des électrodes est branchée au générateur en alternant les anodes et les cathodes (Figure(III.2)).

Dans les cas de la configuration bipolaire, seules les deux électrodes placées aux extrémités du réacteur sont branchées au générateur de courant (une connectée à la borne positive et l'autre à la borne négative (Figure(III.2))). Toutes les électrodes intermédiaires servent à la fois d'anode et de cathode, sans être toutefois directement branchées. En fait, le passage du courant se fait par déplacement ionique au sein de la solution.

Le choix de l'une ou de l'autre des configurations doit être fait en fonction de l'eau à traiter, de ses caractéristiques propres et du nombre d'électrodes disponibles.

## Chapitre III : Electrocoagulation-électroflottation



*Figure III.2 : Configuration des électrodes.*

### III.1.3.4. Source de courant :

Habituellement, le générateur de courant utilisé est une source de courant continu, mais il est également possible d'utiliser le courant alternatif pour alimenter le système [59][73]. En effet, l'utilisation du courant continu peut provoquer la formation d'un film passif (imperméable) sur les électrodes si le système fonctionne sur une longue période ce qui diminue l'efficacité du réacteur en diminuant le passage du courant. Certaines études tendent donc à démontrer que l'utilisation du courant alternatif retarde ce phénomène et permet d'allonger la vie des électrodes [74].

### III.1.3.5. Intensité de courant imposée :

L'intensité de courant imposée au système est un paramètre important puisqu'il permet, d'une part, de contrôler la cinétique électrochimique de dissolution des électrodes anodiques et, d'autre part, de contrôler le dégagement de bulles d'hydrogène sur les électrodes cathodiques. En effet, si le courant est trop faible, une faible quantité d'hydroxydes sera produite, une faible quantité d'hydrogène sera dégagée à la cathode et le temps de résidence de l'effluent dans le réacteur devra être plus long afin d'obtenir une bonne qualité de l'eau traitée. Dans le cas contraire, un courant plus élevé provoquera une augmentation de la vitesse de la réaction, mais dans ce cas, les électrodes seront attaquées plus rapidement, entraînant une consommation plus rapide des électrodes et une dépense énergétique plus importante. De plus, quand le courant utilisé est trop élevé, il y a des risques

## Chapitre III : Electrocoagulation-électroflottation

de perdre une grande partie de l'énergie en chaleur dans le système [65]. Il est donc primordial de faire un compromis entre la dépense énergétique la plus efficace et les coûts d'opération les plus bas. De plus, une trop grande densité de courant provoque habituellement la coalescence des bulles de gaz, ce qui réduit l'efficacité de l'électrocoagulation [75]. En effet, en diminuant le pouvoir de la flottation, la récupération des floccs formés est plus difficile et moins efficace.

### III.1.3.6. Conductivité de l'eau brute :

C'est la conductivité du milieu qui permet un bon transfert ionique dans l'effluent, ce qui signifie qu'elle doit être assez élevée selon le courant qui est imposé. En effet, dans le cas où la conductivité est trop faible, la résistance du milieu est très forte, ce qui oblige l'application d'une tension très élevée pour faire passer le courant. Une tension très élevée implique une grande dépense énergétique, ce qui n'est pas désirable sur le plan économique.

Dans le cas où un effluent n'est pas suffisamment conducteur, l'utilisation d'un électrolyte indifférent peut améliorer la conductivité électrique. En effet, un tel électrolyte (ex. :  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) ne réagit pas avec les ions en solution mais aide au passage du courant entre les électrodes. Ainsi, la réaction peut se produire malgré la résistance initiale de l'effluent. Un autre sel est aussi souvent utilisé conjointement avec l'électrocoagulation : le chlorure de sodium. Ce sel ( $\text{NaCl}$ ) est utilisé parce qu'il est non toxique et que son coût est modéré [76].

### III.1.3.7. pH de l'eau brute :

Le pH de l'eau brute peut avoir un impact sur la formation des bulles de gaz et sur la solubilité des différents hydroxydes générés lors de l'électrolyse [65]. De plus, dans le cas où la solution à traiter possède une conductivité importante, l'effet du pH n'a pas autant d'impact sur la qualité du traitement. Par contre, à des pH neutres, la conductivité est souvent plus variable ce qui entraîne une plus grande demande énergétique. D'après Chen (2004) [65], l'enlèvement des polluants est justement plus efficace lorsque le pH est près de la neutralité. Pendant l'électrocoagulation, une hausse de pH est souvent remarquée lorsque l'effluent est acide, tandis que l'inverse est également observé lorsque l'effluent est basique [65]. La hausse du pH des solutions initialement acides est due à la formation d'ions hydroxydes ( $\text{OH}^-$ ) lors de la réduction de l'eau à la cathode [77]. Cette hausse de pH permet la précipitation des hydroxydes métalliques [64]. En revanche, la production de protons  $\text{H}^+$  obtenus, d'une part, lors de la formation des hydroxydes métalliques ( $\text{Al}(\text{OH})_3$  ou  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ),

## Chapitre III : Electrocoagulation-électroflottation

et d'autre part, lors de l'oxydation de l'eau en l'oxygène, peut contribuer à diminuer le pH de l'eau traitée [65]. Ainsi, l'augmentation ou la diminution du pH de l'effluent électrolysé dépend de la cinétique de production des ions hydroxydes ( $\text{OH}^-$ ) et de celle des protons ( $\text{H}^+$ ). Par exemple, lors de l'électrocoagulation utilisant des électrode d'aluminium, Chen (2004) [65] indique que la baisse du pH des solutions initialement basiques résulterait de la réaction entre  $\text{Al}(\text{OH})_3$  et des ion  $\text{OH}^-$  entraînant la formation de  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  selon la réaction :



Ainsi, pour obtenir un bon rendement épuratoire, il est préférable de travailler à un pH qui permet la formation optimale d'hydroxydes métalliques d'aluminium solides, c'est-à-dire, à des pH variant entre 5.8 et 7.4. Dans le cas des hydroxydes de fer, il est souhaitable de travailler à des pH supérieurs à 5.5.

### III.1.3.8. Température initiale de l'eau brute

L'effet de la température sur le traitement de l'eau usée par électrocoagulation n'a pas été réellement étudié de façon précise depuis sa découverte. Par contre, selon Chen (2004) [65], le traitement par électrocoagulation s'améliore en haussant la température jusqu'à environ  $65^\circ\text{C}$ . Selon Koren et Syversen (1995) [78], la température ne doit pas être trop élevée puisque dans ce cas, il y a un changement dans l'interface gaz-liquide qui n'est pas souhaitable pour l'enlèvement des polluants. De plus, une température plus élevée implique une production de bulles d'hydrogène de taille plus importante (expansion du gaz à haute température), ce qui augmente la vitesse de remontée et une diminution de l'accrochage des particules en suspension. Ainsi, le traitement s'effectue habituellement à la température ambiante.

### III.1.3.9. Autres facteurs influençant l'électrocoagulation

Plusieurs autres facteurs peuvent influencer la qualité du traitement des eaux par électrocoagulation. Le premier est naturellement la composition chimique de l'effluent à traiter. En effet, les différents composés organiques ne réagissent pas tous de la même façon au passage du courant et peuvent entraîner de grandes variations dans les résultats obtenus. Le meilleur exemple est celui des composés chimiques de type phénolique dont l'élimination dépend de l'emplacement des groupements phénoliques sur la molécule de base [79]. Cette même observation peut se faire concernant d'autres composés, huiles ou pigments et ce phénomène doit être pris en compte dans l'analyse des résultats obtenus.

## Chapitre III : Electrocoagulation-électroflottation

La distance inter-électrode peut également influencer la qualité du traitement. Cette distance peut varier selon le type d'eau à traiter et surtout selon sa conductivité. De plus, la distance entre les électrodes doit également tenir compte de l'encrassement possible et de la facilité à nettoyer le système. Ce facteur est important lors de la mise à l'échelle industrielle d'une unité de traitement par électrocoagulation. La chute ohmique (liée à la résistance électrique) dans la solution électrolytique est directement liée à la distance qui sépare les électrodes et à la conductivité de la solution. Elle est en grande partie responsable de la baisse de rendement énergétique des procédés électrolytiques. Il est possible de la diminuer en augmentant la concentration en électrolyte ou en rapprochant les électrodes.

Il en est de même pour d'autres facteurs tels que l'état de surface des électrodes (lisse ou rugueuse) et le degré du mélange dans le réacteur d'électrolyse (agitation suffisante ou non) qui peuvent influencer la surtension de transfert ou d'activation. La surtension de transfert est un facteur déterminant dans l'appréciation des performances d'une électrode. Elle correspond en fait au travail nécessaire pour extraire (ou fixer) les électrons de la surface des électrodes.

### III.1.4. Quelques applications de l'électrocoagulation et différents matériaux utilisés pour les électrodes

- ▶ Camilleri (1980) [80] avait utilisé le procédé d'électrocoagulation/flottation, pour le traitement des rejets urbains. Ce procédé a permis d'avoir une élimination de 90% de MES, 80% de DBO<sub>5</sub>, 80% de DCO, 25% d'azote, 90% de phosphates, 80% de détergents.
- ▶ Debillemont (1996) [81] a obtenu une efficacité d'enlèvement de DCO, DBO<sub>5</sub>, MES et couleur allant de 60-99%, 61-91%, 71-99% et 95-100% respectivement pour différents effluents comme les effluents urbains, les effluents de teinturerie, de fabrique de papiers peints, des eaux colorées de cartonnerie, de lavage de laine, de conserverie de légumes, de papeterie pour un temps de séjour de 2.5 minutes dans l'électrocoagulateur. En plus du traitement efficace de ces polluants, il a aussi noté que l'électrolyse peut avoir un effet direct sur certains composés dissous. On cite en exemple l'oxydation des nitrites, des sulfures, des cyanures, des sulfites, la réduction du Cr (VI). On peut avoir aussi un effet bactéricide par la formation d'oxydants tels que l'eau oxygénée ou les acides hypochloreux obtenus lors de l'oxydation des chlorures.
- ▶ Can & al. (2006) [82], en comparant l'électrocoagulation, la coagulation chimique et la combinaison des deux sur un effluent textile ont trouvé une efficacité d'élimination de la

## Chapitre III : Electrocoagulation-électroflottation

DCO de 78% pour la coagulation chimique, de 50% pour l'électrocoagulation seulement à 100 A/m<sup>2</sup> pendant 10 minutes et de 79.5% dans le cas du procédé combiné pendant 10 minutes.

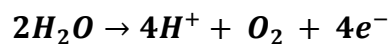
### III.2. Electroflottation

#### III.2.1. Définition et mécanisme :

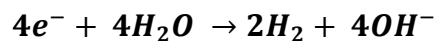
L'électroflottation est une technique de séparation solide/liquide basée sur la suspension des particules par les bulles générées lors de l'électrolyse de l'eau. Dans un milieu liquide le courant permet l'électrolyse de l'eau et donc la génération de microbulles de gaz : hydrogène et oxygène. Ces derniers formés aux électrodes progressent vers la surface du liquide sous forme de bulles qui se fixent aux particules solides, entraînant celles ci vers le haut. Ces particules peuvent ainsi former une nappe à la surface (floc), soutenue par les bulles de gaz, sous laquelle le liquide reste clair [83][84][85][65]. Araya-Farias (1999) [86] estime que plus de 90% des combinaisons entre les microbulles et les particules en suspension se produisent pendant les premières minutes dans la cellule d'électroflottation.

Les réactions chimiques qui sont produites à la surface des électrodes pour générer les bulles de gaz sont les suivantes :

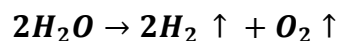
#### Réaction à l'anode (Oxydation)



#### Réaction à la cathode (Réduction)



#### Réaction totale



D'après Khosla & al. (1991) [87] le processus physique d'évolution des gaz peut être divisé en trois étapes:

- **La nucléation** : durant laquelle les bulles se forment à la surface des électrodes à partir des solutions hautement sursaturées en gaz.

## Chapitre III : Electrocoagulation-électroflottation

- ▶ **La croissance** : où les bulles croissent par diffusion des gaz dissous vers la surface des bulles ou par coalescence à l'électrode avec d'autres bulles.
- ▶ **Le détachement** : les bulles se détachent de l'électrode lorsque les forces de flottation dépassent celles qui les lient à l'électrode.

Brandon & al. (1985) [88] suggèrent que l'interaction électrostatique entre les bulles et les doubles couches de l'électrode contrôle le diamètre de détachement des bulles.

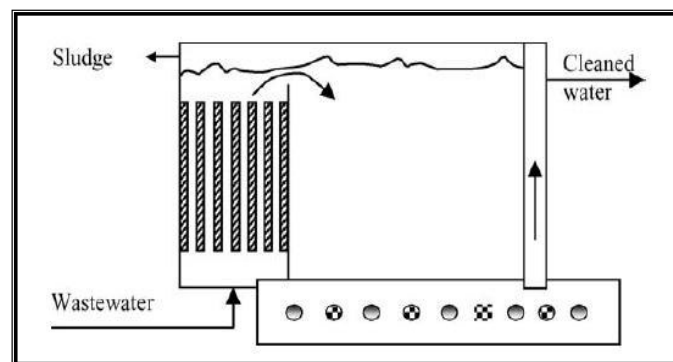
L'efficacité de la technique d'électroflottation dépend du flux et de la dimension des microbulles qui sont générées pendant l'électrolyse de l'eau [86].

### III.2.2. Exemples des désigns typiques des cellules d'électroflottation

Le système d'électroflottation se compose de deux électrodes et d'une alimentation d'énergie. Les électrodes sont habituellement placées au fond ou près du fond de la cellule. Selon la géométrie de celle-ci, les électrodes peuvent être placées verticalement ou horizontalement. Le placement horizontal est le choix le plus populaire [89][90][91].

#### III.2.2.1. Cellule combinant l'électroflottation et l'électrocoagulation

L'électroflottation est habituellement combinée avec l'électrocoagulation/floculation ou avec des produits chimiques (figure III.3) [65].



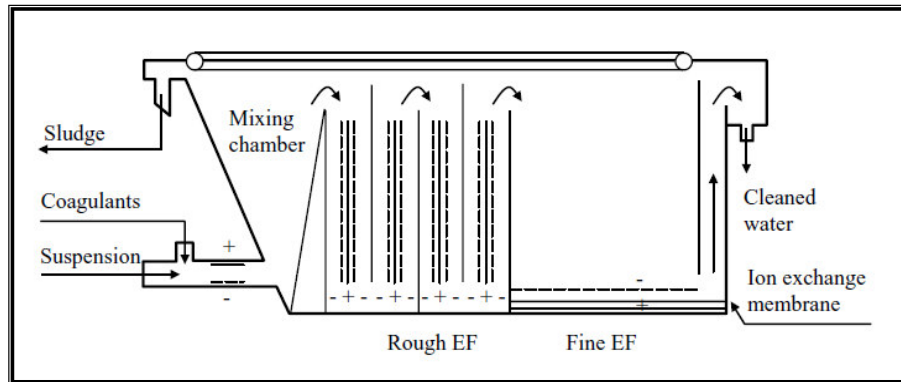
**Figure (III.3) : Combinaison d'électrocoagulation et d'électroflottation [65]**



# Chapitre III : Electrocoagulation-électroflottation

## III.2.2.2. Cellule d'électroflottation combinée à des médias fluidisés

Pour que les réactifs chimiques se mélangent bien aux polluants avant flottaison, des médias fluidisés ont été employés (figure III.4) [92].

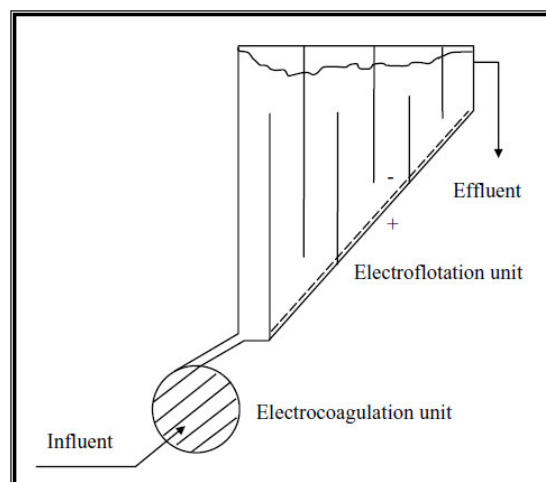


*Figure (III.4) : Electroflottation avec des médias fluidisés [65].*

Cette conception permet un contact intensif de la phase solide dans la chambre de mélange avec des coagulants pour agglomérer les particules en suspension, et en même temps pour ne pas déstabiliser le floc formé. Les deux étapes de l'électroflottation assurent l'élimination des particules finement dispersées [65]

## III.2.2.3. Cellule d'électroflottation menée de cloisons

L'installation d'une membrane d'échange ionique entre les électrodes dans l'unité d'électroflottation assure le contrôle du pH de l'eau traitée. L'addition des cloisons dans une unité d'électroflottation aide à utiliser mieux le gaz produit (figure III.5) [93].

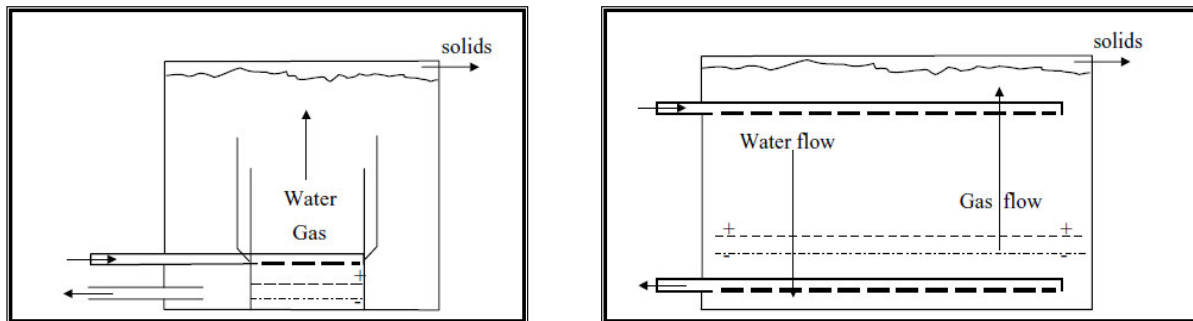


*Figure (III.5) : Electroflottation avec de cloisons intégrées [65].*

## Chapitre III : Electrocoagulation-électroflottation

### III.2.2.4. Cellule d'électroflottation à co-courant et à contre-courant

L'électroflottation avec systèmes à co-courants (figure III.6) et à contre-courant (figure III.7) ont été également étudiés à l'échelle industrielle [94]. Généralement, il est peut être nécessaire de séparer les chambres de la cathode et d'anode afin d'éviter que l'hydrogène ou l'oxygène actifs réagissent avec les particules solides dans le système, le pH doit être ajusté automatiquement dans chaque chambre [95].



**Figure III.6 :** Electroflottation à co-courant [65]. **Figure III.7 :** Electroflottation à contre courant [65]

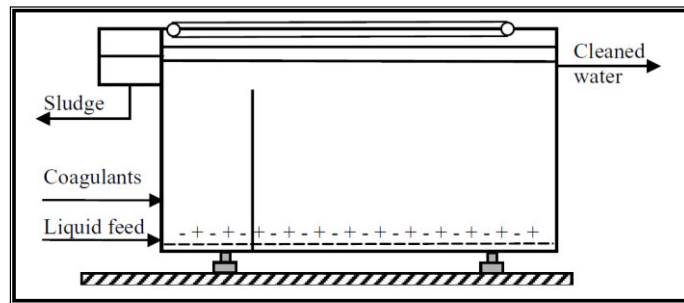
### III.2.2.5. Cellule d'électroflottation menée de deux sections séparées par une cloison

Cette conception a été testée et examinée pour les eaux usées industrielles fortement concentrées en porcelaine [91].

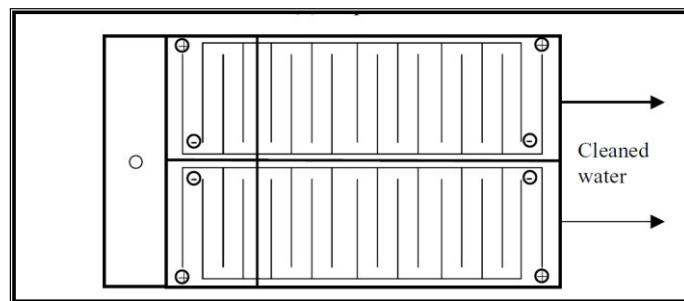
Le système se compose d'une caisse, d'un collecteur de boues, et d'une pile d'électrode (figure III.8). L'unité est divisée par une cloison pour avoir deux sections. Chaque section est encore divisée en deux chambres. Les piles d'électrode sont placées verticalement dans chaque chambre [65].

## Chapitre III : Electrocoagulation-électroflottation

(a)



(b)



*Figure (III.8) : Electroflottation à deux sections, (a) vue de côté et (b) vue de haut [65]*

### III.2.3. Facteurs influençant l'électroflottation

L'exécution d'un système d'électroflottation est reflétée par l'efficacité d'enlèvement de polluant et les consommations de puissance et/ou de produits chimiques. L'efficacité d'enlèvement de polluant dépend en grande partie de la taille des bulles formées [65]. Plusieurs facteurs peuvent influencer la taille des bulles générées par l'électroflottation, tels que la densité de courant, la température, le degré de rugosité de la surface de l'électrode, le matériau de l'électrode et le pH du milieu [96]. Okun & Matov (1984)] ont constaté que l'efficacité du procédé d'électroflottation dépend des paramètres de la cathode, à savoir : le diamètre du fil de la cathode, le pas de la grille et le degré de rugosité de la surface de l'électrode. D'après Chen (2004) [65] les principaux facteurs sont les suivants:

# Chapitre III : Electrocoagulation-électroflottation

## III.2.3.1. Effet du pH

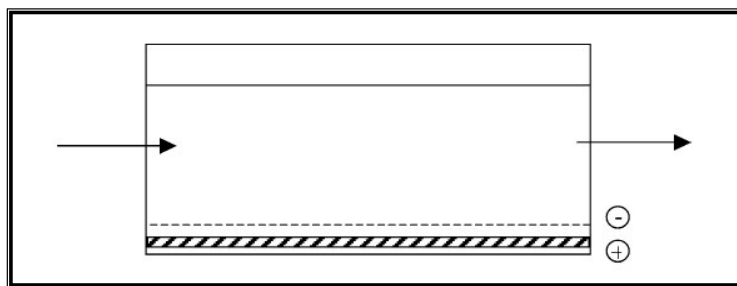
La variation de taille des bulles dépend du pH de l'eau aussi bien que le matériel d'électrode. Les bulles d'hydrogène sont plus petites au pH neutre. Pour les bulles d'oxygène, leurs tailles augmentent avec le pH. Il devrait noter, cependant, que les matériaux de la cathode, affectent la taille des bulles d'hydrogène, ce qui font ainsi les matériaux d'anode [98]. Les tailles de bulle suivent une distribution log-normale [99].

## III.2.3.2. Effet de la densité du courant

Les bulles de gaz dépendent également de la densité de courant [100] [101]. Une diminution des tailles de bulle de gaz a été constatée avec l'augmentation de l'intensité du courant, Burns & al. (1997) [102] ont constaté, également, qu'une telle diminution de taille de bulle était vraie seulement aux basses gammes des densités de courant. Quand la densité de courant est plus haute que 200 A/m<sup>2</sup>, on ne peut observer aucune tendance claire avec des bulles de gaz s'étendant de 20 à 38 µm.

## III.2.3.3. Effet d'arrangement des électrodes

Habituellement, une anode est installée au fond, alors qu'une cathode d'acier inoxydable est fixée à 10-50 mm au dessus de l'anode (figure III.9) [103][104].

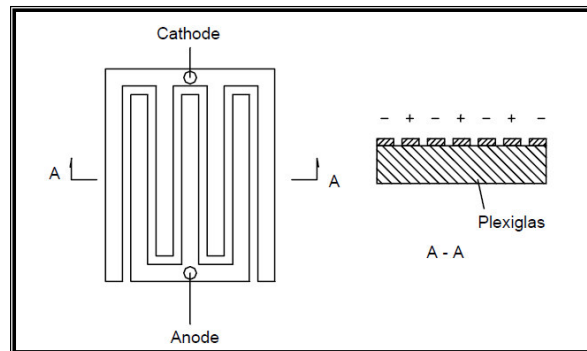


**Figure (III.9) :** Arrangement conventionnel des électrodes pour l'électroflottation [103][104]

D'après Chen (2004) [65], un tel arrangement d'électrode ne peut pas assurer la dispersion rapide des bulles de l'oxygène produites à l'anode inférieure dans l'effluent d'eau usée, affectant ainsi l'efficacité de flottaison.

Chen & al. (2002) [105] ont proposé et ont examiné l'arrangement original des électrodes avec l'anode et la cathode placées sur le même plan tel indiqué dans la (figure III.10).

## Chapitre III : Electrocoagulation-électroflottation



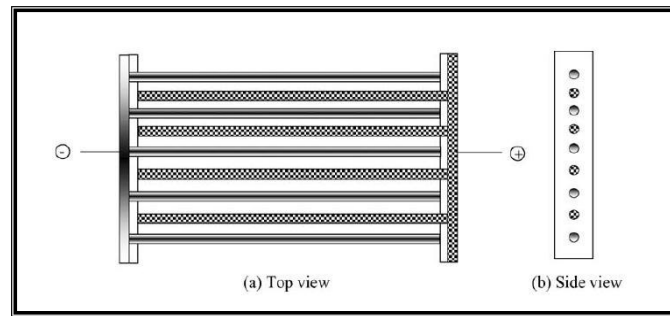
*Figure (III.10) : Arrangement original des anodes pour l'électroflottation [105].*

Il a été constaté par ces auteurs, une flottaison efficace en raison de la dispersion rapide des petites bulles produites dans l'effluent d'eau usée. Cette dispersion était essentiellement aussi importante que la génération des bulles minuscules.

Dans les systèmes conventionnels, seule l'électrode supérieure (cathode) fait face à l'écoulement d'eau usée, alors que l'électrode inférieure (anode) n'entre pas en interaction directe avec l'écoulement. Par conséquent, les bulles de l'oxygène produites à l'anode inférieure ne peuvent pas être dispersées immédiatement dans l'eau traitée. Ce qui donne l'occasion au fusionnement de quelques bulles d'oxygène pour former de grandes bulles inutiles. Ceci diminue, non seulement la disponibilité des petites bulles efficaces, mais augmente également la possibilité de déstabiliser les floes formés précédemment, affectant ainsi l'efficacité de flottaison.

Quand l'anode et la cathode sont ajustées, comme une configuration ouverte, permet à la cathode et à l'anode d'entrer en contact avec l'effluent d'eau usée directement. Par conséquent, les bulles produites aux deux électrodes peuvent être dispersées dans l'eau usée rapidement et s'attachent efficacement sur les floes, assurant une efficacité élevée de flottaison.

Shen & al. (2003) [106] ont proposé un autre arrangement des électrodes (figure III.11). Selon ces auteurs, cet arrangement est avantageux et efficace vue l'uniformité de la surface d'électrode.



**Figure (III.11) :** Arrangement alternatif des électrodes pour l'électroflottation [106].

### III.2.4. Quelques applications de l'électroflottation et différents matériaux utilisés pour les électrodes

- ▶ Araya-Farias (1999) [86] avait évalué le procédé d'électroflottation pour améliorer la clarification et la stabilité du jus de pomme. Cette technique a été étudiée à l'échelle du laboratoire avec une cellule en Plexiglas contenant une anode en graphite et une cathode en acier inoxydable. Il a été constaté une flottation rapide des particules présentes dans le jus. L'application sans gélatine a réduit les tanins résiduels du jus de 47% comparativement à 60% pour le procédé avec gélatine et 41% pour la gélatine seule. Néanmoins, l'électroflottation n'a pas eu d'effet significatif sur la réduction des protéines du jus. Alors que, la turbidité était en moyenne plus faible que 10 NTU.
- ▶ Hernlem & Tsai (2000) [107] ont utilisé une cellule d'électroflottation en bêche pour le traitement des eaux issues du processus alimentaire. Le dispositif a démontré que l'efficacité de désinfection est fonction de la concentration des chlorures présents et du courant appliqué. Il était efficace dans la désinfection d'*Escherichia coli* quand le chlorure était de 5.6 mg/L à une densité de courant de 0.8 A.



***PARTIE  
EXPERIMENTALE***



***I. MATERIEL ET  
METHODES***



# Chapitre IV : Matériels et Méthodes

## Introduction :

Dans le présent travail nous avons effectué deux types d'essais, les premiers concernant la coagulation-floculation chimique, sont effectués au Jar Test dans le but de choisir le coagulant adéquat ainsi que la concentration optimale de ce dernier qui nous permet d'éliminer la turbidité (couleur) , les seconds (électrocoagulation-électroflottation) dans un réacteur discontinu à deux électrodes (d'aluminium ou de Fer) et ceci dans le but d'étudier l'effet du temps de traitements et de la nature des électrodes, pour le choix du temps de séjours ainsi que le matériau adéquat pour l'élimination de ce polluant. Par la suite l'effet de l'intensité du courant sur la capacité de traitement a été mis en évidence en faisant varier cette dernière entre 0,5 et 2A. Les paramètres physico-chimiques tels que le pH, la conductivité, la salinité, les solides dissous totaux ainsi que la turbidité sont mesurés afin d'évaluer le rendement d'épuration...etc

## IV.1. Produits chimiques :

Les différents réactifs employés au cours de cette étude, ont été utilisés sans purification préalable:

### IV.1.1. Le substrat :

Le colorant textile utilisé est un colorant diazoïque réactif appelé Reactive Brown 18, il est aussi appelé Brown GR ; Benactivebraun N-GR, Remazolbraun GR ; Remazol. Son numéro (CAS 12225-73-9).

### IV.1.2. Les matériaux d'électrodes :

Les électrodes utilisées en électrocoagulation-électroflottation sont en Aluminium et en Acier Inoxydable.

### IV.1.3. Les réactifs :

- Aluminum sulfate hexadecahydrate (sulfate d'aluminium) 95%  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$  masse molaire 630.40.
- Iron (II) Sulfate (sulfate ferrique)  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  masse molaire 278,02.

## Chapitre IV : Matériels et Méthodes

La solution de coagulant est à préparer le jour même de l'essai, à une concentration de 10 g/l (sulfate d'alumine) ou 10 g/l (sulfate ferrique).

### IV.2. Dispositifs expérimentaux :

#### IV.2.1. Jar Test :

Le Jar-test est un appareil qui permet de déterminer la concentration optimale du coagulant pour le processus de coagulation floculation. Toutes les doses sont exprimées en poids de produits commerciaux (solution ou poudre).

- **Déroulement de l'expérience :**

Le mode de travail de cet appareil se fait selon le protocole suivant :

- 1) On lave bien les béciers et s'assurer qu'il ne reste aucune trace de détergent, on remplit les béciers avec l'eau à tester (500ml), on place chaque bécier sous l'agitateur et on submerge les palettes ;
- 2) On met le moteur en route et à la vitesse de 150 tr/min, on injecte le coagulant le plus rapidement possible. Les doses sont croissantes (5ml, 7.5ml, 10ml, 12.5ml)
- 3) Après un temps total de 3 mn d'agitation rapide ; on réduit la vitesse à une vitesse lente de 40 tr/mn pendant 15 mn ;
- 4) On cesse toute agitation ; et on retire les palettes ;
- 5) Après 30 min de décantation on mesure les paramètres suivants : la turbidité, la conductivité, la salinité, le TDS, et le pH.



*Figure (IV.1) : Jar test (floculateur)*

## Chapitre IV : Matériels et Méthodes

### IV.2.2. Réacteur électrochimique :

Le traitement électrochimique a été effectué dans un réacteur en verre de 1000 ml de volume (Figure (IV.2)). Les électrodes (anodes et cathodes) sont des plaques métalliques de 2,8 cm (largeur) x 9,7 cm (longueur) x 0,1cm (épaisseur). Les électrodes, au nombre de deux, ont une surface active de  $54,32 \text{ cm}^2$  et l'espace entre elle est de 1cm. Elles ont été maintenues en place dans le réacteur par un support en téflon situé à 1cm du fond du réacteur et elles ont été entièrement submergées par l'eau à traiter.

L'intensité de courant a été imposée par un générateur de courant continu capable d'imposer une tension maximale de 40V et une intensité maximale de 5A. L'intensité est contrôlée par un multimètre.



*Figure (IV.2) : Réacteur électrochimique.*

#### IV.2.2.1 Déroulement de l'expérience :

En vue d'optimiser les conditions relatives à cette technique, certains choix ont été étudiés à savoir :

- matériaux de l'électrode. Deux types de matériaux ont été testés :
  - Fer
  - Aluminium
- Temps d'électrolyse : 5 – 20 minutes.
- Intensité de courant : l'effet de l'intensité de courant sur l'efficacité de traitement a été mis en évidence à travers l'essai de quatre intensités de courant à savoir 0.5, 1, 1.5, et 2A.

## Chapitre IV : Matériels et Méthodes

Dans cette expérience, une prise d'essai de 500 ml de l'eau à traiter est disposée dans la cellule d'électrolyse ou se trouve immergé deux électrodes (en fer ou en aluminium), branchées à un générateur de courant réglé à une intensité de courant de 1 A pendant un temps d'électrolyse variant entre 5 et 20 min. Après chaque opération :

- Prélever 25 ml de l'eau traitée ;
- Après 15 minutes de décantation, mesurer les paramètres suivants : La turbidité, le pH, les TDS, la conductivité et la salinité.

Une fois le matériau de l'électrode et le temps d'électrolyse sont choisis, les expériences sont reprises avec les intensités de courant variant de 0,5 à 2A.

### IV.3. Procédure expérimentale :

#### IV.3.1. Préparation des solutions

Une solution aqueuse du colorant Brown RG (colorant azoïque réactif) est préparée en fonction du volume et de la concentration souhaités (100mg/l), en utilisant de l'eau de robinet. La solution préparée est mise sous agitation mécaendant 10 mn à une vitesse constante (300tr/mn) pour la dissolution du colorant et l'homogénéisation de la solution.

Le mélange est ensuite placé dans les réacteurs utilisés, suivant le protocole de chaque type d'essai.

#### IV.3.2. Echantillonnage :

L'échantillonnage est primordial car il conditionne la pertinence de l'analyse. Il doit être de qualité mais également représentatif de ce que l'on veut analyser. Les échantillons d'eau doivent être prélevés dans des récipients propres, rincés plusieurs fois avec de l'eau distillée et/ou déminéralisée, puis fermés hermétiquement sans laisser de bulles d'air dans les flacons.

L'échantillonnage d'eau a pour but d'estimer un ou plusieurs paramètres qui caractérisent la concentration en polluant ou ses variations, ou les deux à la fois au cours d'une période donnée. Les résultats sont nécessaires à la caractérisation de l'eau auquel un contrôle continu est nécessaire. Le prélèvement d'échantillons d'eau doit être fait de façon à ce que les résultats de l'analyse des échantillons prélevés permettent de tirer des conclusions valables quant aux

## Chapitre IV : Matériels et Méthodes

propriétés de l'eau à analyser. Il faut éviter toute pollution secondaire de l'échantillon provoquée par le mode de prélèvement, ou par les récipients contenant les échantillons.

### IV.4. Méthodes d'analyse :

Les analyses physico-chimiques sont toutes effectuées au laboratoire en utilisant des appareils appropriés. Les échantillons d'eau sont prélevés dans des flacons de 50 mL afin de mesurer cinq (05) paramètres à savoir la turbidité (FTU), la conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), les TDS (mg/L), la salinité (mg/L) et le pH.

#### IV.4.1. Mesure de la turbidité :

La turbidité est un indice de la présence de particules en suspension dans l'eau. Elle est déterminée à l'aide d'un néphélémètre. Cet appareil mesure la lumière dispersée par les particules en suspension avec un angle de  $90^\circ$  par rapport au faisceau de lumière incident.

Les interférences connues sont la présence de bulles d'air, de graisse, d'huile ou une coloration intense. La présence de bulles d'air peut être corrigée en ajoutant une goutte d'agent mouillant dans la cellule avant d'y introduire l'échantillon. L'interférence causée par la couleur peut être minimisée par une dilution appropriée. L'huile ou les graisses sont écumées avant d'effectuer la détermination. La turbidité est mesurée à l'aide d'un turbidimètre (figure(IV.3)).



*Figure (IV.3) : Turbidimètre type HANNA.*

## Chapitre IV : Matériels et Méthodes

### IV.4.2. Mesure de la conductivité et de la salinité:

La conductivité électrique traduit la capacité d'une solution aqueuse à conduire le courant électrique. Cette notion est inversement proportionnelle à celle de résistivité électrique. L'unité de mesure communément utilisée est le Siemens (S/cm) exprimé souvent en micro siemens/cm ( $\mu\text{S/cm}$ ) ou milli siemens (mS/cm). La conductivité est directement proportionnelle à la quantité de solides (les sels minéraux) dissous dans l'eau. Ainsi, plus la concentration en solide dissout sera importante, plus la conductivité sera élevée. Généralement, le rapport entre conductivité et concentration ionique s'exprime par approximation de la façon suivante:

$$2 \mu\text{S/cm} = 1 \text{ ppm (partie par million),}$$

Ou 1 ppm = 1 mg/l correspond à la concentration en solide dissous.

La conductivité électrique donne une indication sur la minéralisation globale de cette eau. Les molécules de sels se dissocient en paires d'ions lorsqu'elles entrent en solution dans l'eau. Ces paires d'ions sont porteuses de charges électriques et, de ce fait, autorisent le passage du courant dans l'eau. Plus l'eau est minéralisée, plus y a d'ions et, par conséquent, plus la conductivité sera élevée. La mesure ne permet toutefois pas de déterminer quels sont les ions qui produisent cette conductivité ni dans quelle mesure ils y contribuent. Il ne s'agit donc, en l'occurrence, que d'une mesure globale de tous les constituants dissous dans l'eau. L'activité ionique d'une solution varie en fonction de la température. Il convient donc, pour effectuer des mesures précises, de tenir compte de la température dans les mesures de conductivité. Les températures standards sont généralement prises à 25 °C.

## Chapitre IV : Matériels et Méthodes

**Tableau (IV.1) : Valeur de conductivité pour l'eau [108].**

Eau	Conductivité
Eau pure	0,055 $\mu\text{S/cm}$
Eau distillée	0,5 $\mu\text{S/cm}$
Eau de montagne	1,0 $\mu\text{S/cm}$
Eau courante	500 à 800 $\mu\text{S/cm}$
Max pour l'eau potable	1055 $\mu\text{S/cm}$
Eau de mer	56 mS/cm
Eau saumure	100 mS/cm

Le tableau (IV.2) donne quelques indications sur la relation existante entre la minéralisation et la conductivité :

**Tableau (IV.2) : La relation entre la minéralisation et la conductivité [109].**

Conductivité ( $\mu\text{S/cm}$ )	Minéralisation
Cond < 100	Très faible
100 <cond< 200	Faible
200 <cond< 333	Moyenne
333 <cond< 666	Moyenne accélérée
666 <cond< 1000	Importante
Cond > 1000	Elevée

La mesure de la conductivité est effectuée au laboratoire à l'aide d'un appareil multi-paramètres de référence (CONSORT C831) qui compense automatiquement la variation de la conductivité avec température (figure(IV.4)).



*Figure (IV.4) : conductimètre de référence (CONSORT C831).*

### **IV.4.3. Mesure du TDS (Total Dissolved Solids) :**

Le TDS correspond à la mesure de la concentration totale des espèces ioniques présentes dans un échantillon. La grandeur est relative à la solution étalon utilisée lors de l'étalonnage de l'instrument. L'unité de mesure utilisée est le (mg/L).

La lecture des mesures TDS se font par un multi-paramètre de référence (CONSORT 381) qui, en premier lieu, mesure la conductivité puis la convertit automatiquement en mesure de TDS par multiplication avec un facteur mathématique connu. Ce facteur dépend du matériau de référence utilisé pour préparer l'étalon.

### **IV.4.4. Mesure du pH :**

Le pH (potentiel Hydrogène, pouvoir Hydrogène) mesure la concentration en ions  $H^+$  de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14, 7 étant le pH de neutralité. Ce paramètre conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques, et dépend de facteurs multiples, dont la température, il représente une indication importante en ce qui concerne l'agressivité de l'eau.



## Chapitre IV : Matériels et Méthodes

Le pH est l'un des paramètres physico-chimiques du milieu réactionnel ayant le plus d'impact sur le procédé photocatalytique. Il affecte à la fois la charge de surface des particules du photocatalyseur, la taille de ses agrégats, l'énergie des bandes de conduction et de valence, les équilibres des réactions radicalaires et éventuellement la nature des espèces à dégrader.

La mesure du pH est effectuée à l'aide d'un appareil de type HANNA.



*Figure (IV.5) : pH mètre de type HANNA.*



## ***II. RESULTATS ET DISCUSSION***

# Chapitre V: Résultats et discussions

## Introduction

Dans l'essai de coagulation-floculation chimique, l'intérêt été donné au choix du coagulant ainsi que la dose optimale de ce dernier, permettant d'avoir un taux maximum d'élimination de la turbidité. Pour l'électrocoagulation-électroflottation, l'objectif principale été de choisir le matériau d'électrode et le temps d'électrolyse, permettant d'avoir un rendement d'épuration le plus élevé. Une fois le matériau d'électrode et le temps d'électrolyse sont choisis, un autre intérêt est donné à l'étude de l'effet de l'intensité du courant, qui est jugé comme paramètre important dans les traitements électrochimiques.

Pour suivre la cinétique d'élimination de la couleur par les deux procédés appliqués dans notre étude, des prélèvements, ont été effectués. Les échantillons prélevés sont ensuite analyser pour déterminer la turbidité ; la conductivité, la salinité ; les TDS et le pH. Les résultats obtenus sont illustrés sur les tableaux et figures ci dessous.

### V.1. Traitement par coagulation-floculation chimique :

#### V.1.1. Choix du coagulant :

##### V.1.1.1. Coagulant C<sub>1</sub> (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>):

Les résultats relatifs à l'étude de l'effet de la dose du coagulant C1 sur procédé traitement sont présentés dans le tableau suivant :

*Tableau (V.1) : Effet de la dose du coagulant C<sub>1</sub> sur l'élimination du colorant.*

Solution	V C <sub>1</sub> (ml)	Conductivité ( $\mu$ S/cm)	Salinité (g/l)	TDS (mg/l)	pH	Trbidité (NTU)
1	0	1241	0.4	1243	7.77	83
2	5	1240	0.4	1242	7.75	109
3	7.5	1224	0.4	1226	7.78	127
4	10	1225	0.4	1228	7.66	139
5	12.5	1220	0.4	1223	7.58	30.35

#### Interprétation :

D'après les résultats obtenus on remarque que l'enlèvement de la turbidité augmente en fonction de l'augmentation des doses des coagulants d'une façon aléatoire. A dose de coagulant très faible, il peut exister une disproportion entre les charges négatives de particules colloïdales et les charges positives des coagulants. Cela se traduit par une forte adsorption de charges

## Chapitre V: Résultats et discussions

négatives qui empêche l'apparition des floes. La formation des floes a été observée dans la dose de (12.5ml).

Les autres paramètres restent stables avec une légère variation à savoir :

- La conductivité entre 1220  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 1241  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , salinité 0.4, TDS entre 1223 mg/l et 1243 mg/l. Cela est dû au fait que le procédé de coagulation-floculation chimique est un procédé de séparation solide-liquide, et le polluant ne subit pas une minéralisation.
- Le pH entre 7.25 et 7.78.

### V.1.1.2. Coagulant $\text{C}_2$ ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) :

Les résultats relatifs à l'étude de l'effet de la dose du coagulant  $\text{C}_1$  sur le procédé traitement sont présentés dans le tableau suivant :

*Tableau (V.2) : Effet de la dose du coagulant  $\text{C}_2$  sur l'élimination du colorant.*

Solution	$\text{VC}_2$ (ml)	Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Salinité (g/l)	TDS (mg/l)	pH	Turbidité (NTU)
1	0	1241	0.4	1243	7.4	83
2	5	1216	0.4	1220	7.43	80
3	7.5	1218	0.4	1222	7.45	19.89
4	10	1244	0.4	1246	7.33	28.02
5	12.5	1250	0.4	1252	7.03	39.48

### Interprétation :

D'après les résultats obtenus on remarque une diminution de la turbidité avec l'augmentation de la dose du coagulant  $\text{C}_2$  jusqu'à une dose de (7.5ml). Au-delà de cette dernière on observe une augmentation de la turbidité. Cela peut être expliqué par la restabilisation des particules colloïdales, provoquée par le surdosage du coagulant, ce dernier se trouvant en excès, joue un rôle inverse, en neutralisant toutes les particules, ces dernières se retrouvent chargées positivement et des forces de répulsion sont une autre fois exercées entre elles. On aura donc une eau très chargée en coagulant avec une mauvaise clarification.

L'inconvénient principal du sulfate ferrique est la couleur résiduelle assez élevée causée par la présence du fer dans l'eau qui lui confère un aspect rouge jaunâtre.

Les autres paramètres restent stables avec une légère variation à savoir :

## Chapitre V: Résultats et discussions

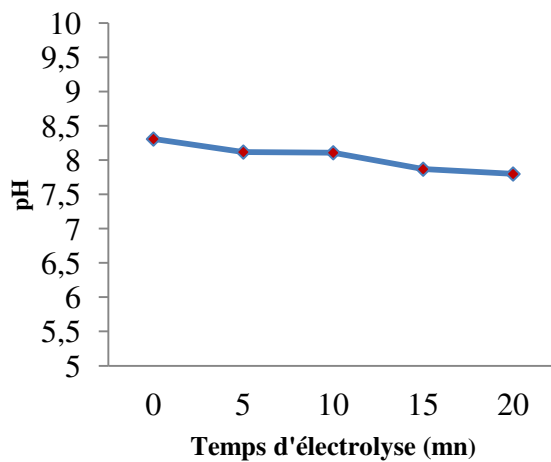
- la conductivité entre 1216  $\mu\text{s}/\text{cm}$  et 1250  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , la salinité 0.4, TDS entre 1220 mg/l et 1252 mg/l. Cela est dû au fait que le procédé de coagulation-floculation chimique est un procédé de séparation solide-liquide, et le polluant ne subit pas une minéralisation.
- pH entre 7.03 et 7.45.

A travers cette analyse relative à chaque coagulant, on déduit que le coagulant  $C_2$  (sulfate ferrique) a montré une efficacité meilleure de traitement, avec un rendement de 76% pour la dose optimale (7.5ml) par rapport à  $C_1$  (sulfate d'alumine) avec un rendement de 63% pour la dose optimale (12.5ml).

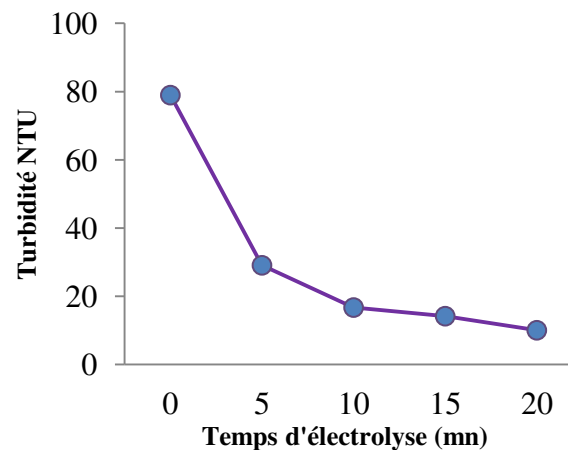
### V.2. Traitement par électrocoagulation-électroflottation :

#### V.2.1. Choix de matériaux des électrodes et du temps d'électrolyse

Pour une intensité du courant de 1A, une concentration du colorant de 100mg/l, l'évolution du pH, de la turbidité, de la conductivité, de la salinité et des solides dissous totaux en fonction du temps d'électrolyse et du type d'électrode sont illustrées dans les figures ((V.1),(V.2)) ci-après.

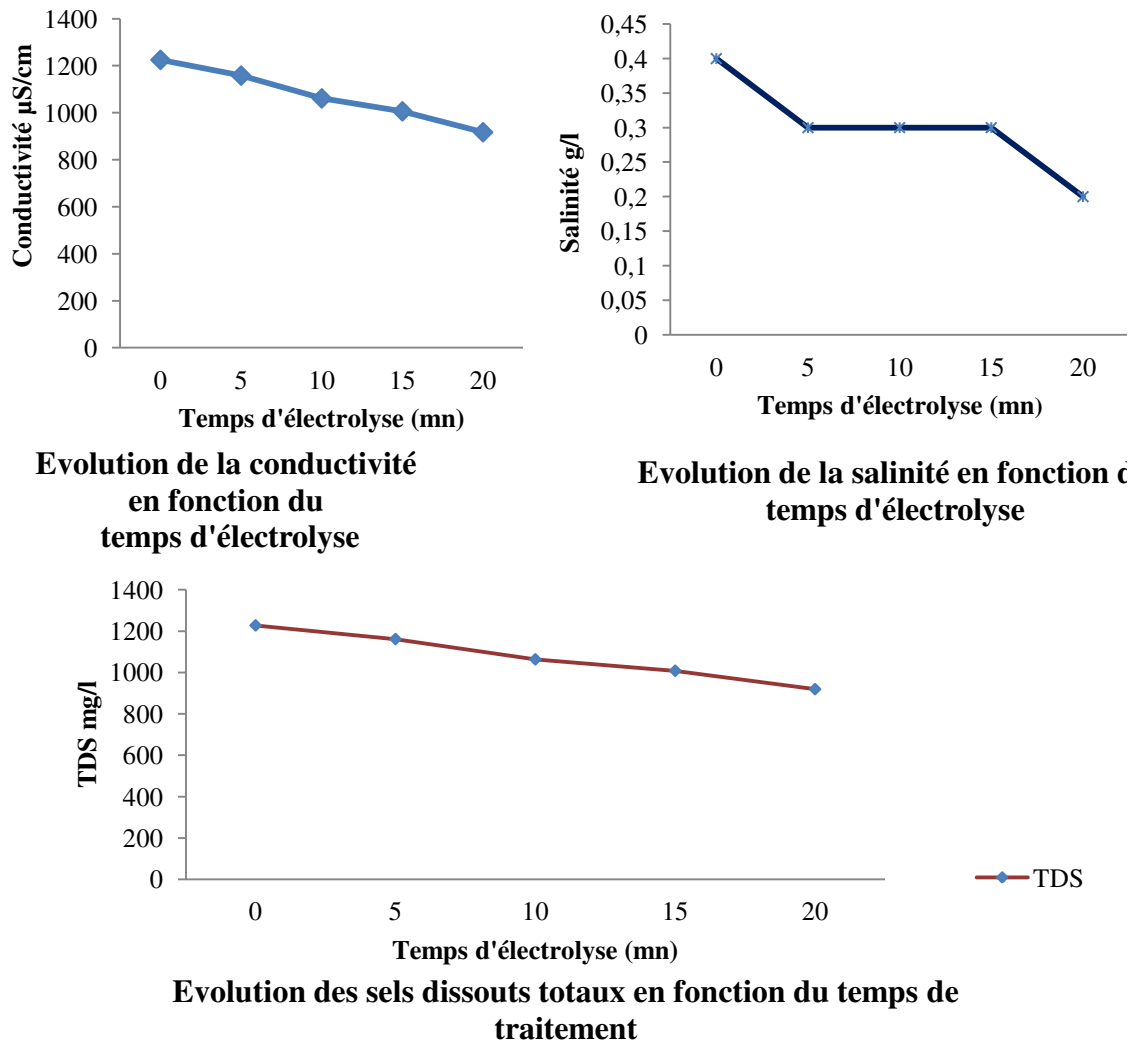


Evolution du pH en fonction du temps d'électrolyse



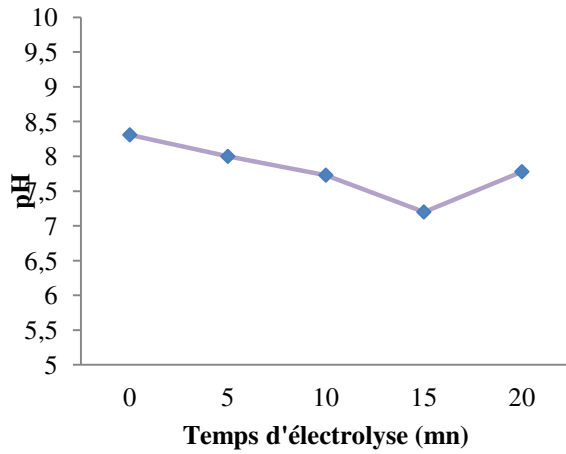
Effet du temps de traitement sur la réduction de la turbidité.  
 $C_{\text{colorant}}=100\text{mg/l}$ ;  $I=1\text{A}$ ;  
Electrodes en Aluminium

## Chapitre V: Résultats et discussions

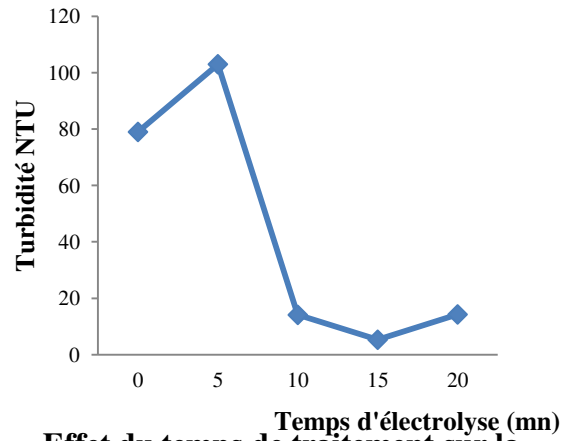


*Figure (V.1) : Evolution du pH ; la turbidité ; la conductivité, la salinité et des TDS en fonction du temps d'électrolyse (électrodes en aluminium)*

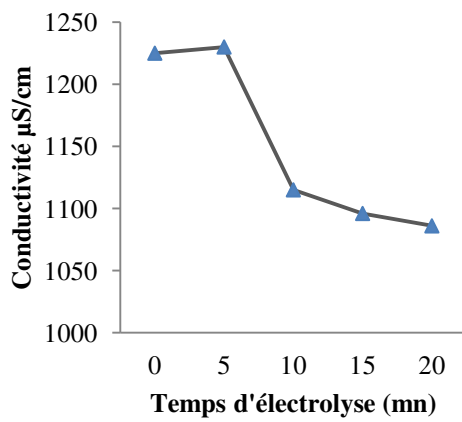
## Chapitre V: Résultats et discussions



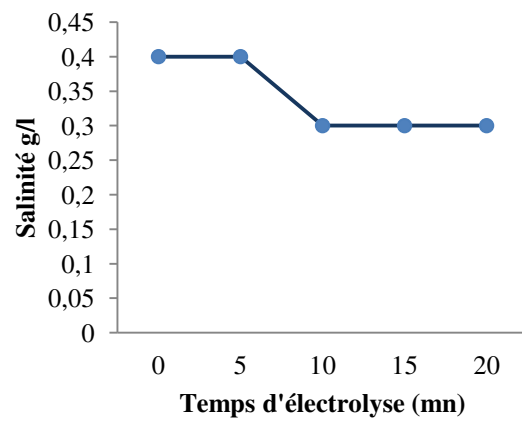
**Evolution du pH en fonction du temps d'électrolyse**



**Effet du temps de traitement sur la réduction de la turbidité.  
Ccolorant=100mg/l; I=1A;  
Electrodes en Fer**

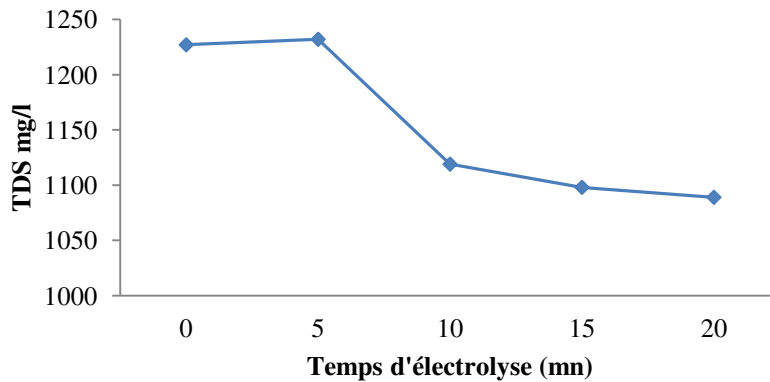


**Evolution de la conductivité en fonction du temps d'électrolyse**



**Evolution de la salinité en fonction du temps d'électrolyse**

## Chapitre V: Résultats et discussions



**Evolution des TDS en fonction du temps d'électrolyse**

*Figure (V.2) : Evolution du pH ; la turbidité ; la conductivité, la salinité et des TDS en fonction du temps d'électrolyse (électrodes en Fer)*

### Interprétation :

Les résultats représentés sur les deux figures montrent que :

- **Le pH** se stabilise à 7.8 dans le cas de l'emploi d'une électrode en Aluminium et au voisinage de 7,7 lors de l'utilisation d'une électrode en Fer.

La stabilisation de pH observée dans le cas des électrodes en Aluminium peut être expliquée par la flottation de l'Aluminium sous forme d'hydroxydes [110].

La légère augmentation de pH constatée dans le cas des électrodes en Fer après 15 mn d'électrolyse confirme l'existence de ce métal sous forme ionique.

- **La turbidité** diminue jusqu'à 10,09 NTU dans le cas de l'emploi d'une électrode en aluminium alors que l'utilisation d'une électrode en Fer réduit ce paramètre jusqu'à 5,28 NTU.
- **La conductivité** diminue dans le cas d'utilisation des électrodes en Aluminium et se stabilise lors de l'emploi des électrodes en Fer.

La légère diminution de la conductivité enregistrée dans le cas des électrodes en aluminium est due à la précipitation de l'Aluminium sous formes d'hydroxydes. Par contre la stabilité de ce paramètre dans le cas du fer est due à la participation de ce dernier à l'enrichissement du milieu réactionnel en ions  $Fe^{2+}$  qui participent au maintien d'une conductivité équilibrée.

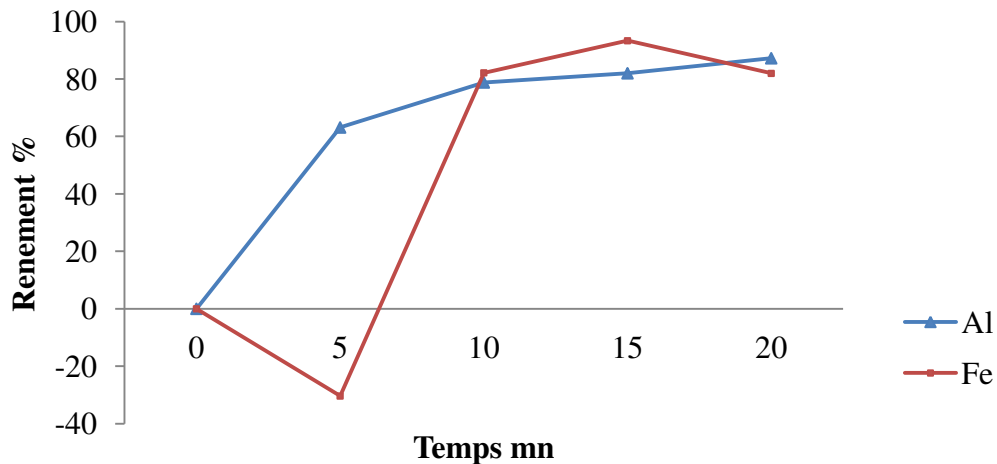
La conductivité ne marque pratiquement aucune augmentation remarquable dans les deux cas. Cela est dû à la non minéralisation du polluant, du fait que ce dernier est éliminé par un procédé de séparation liquide-solide.



## Chapitre V: Résultats et discussions

- **La salinité et les TDS** suivent la même évolution que celle enregistrée pour la conductivité.

Afin de pouvoir choisir le matériau des électrodes ainsi que le temps d'électrolyse, qui permettent une meilleure réduction de la turbidité, les rendements obtenus pour chaque matériau en fonction du temps d'électrolyse sont illustrés sur la figure (V.3) suivante.



### Comparaison des rendements en fonction des matériaux d'électrodes

*Figure (V.3) : Les rendements d'élimination du colorant en fonction du matériau d'électrodes et du temps d'électrolyse.*

Les résultats illustrés sur cette figure montrent que :

Le rendement obtenu après 15 minutes de traitement est d'environ 82% dans le cas d'utilisation des électrodes en Aluminium. La cinétique observée passe par une phase d'accélération, suivie d'un palier.

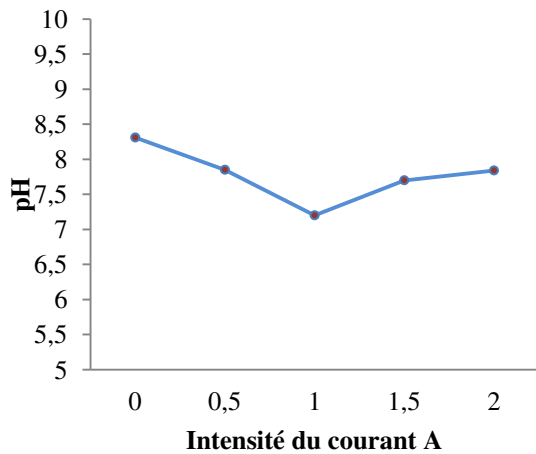
Lors de l'emploi des électrodes en Fer, le rendement enregistré à 15mn d'électrolyse est de 93,31%. La cinétique d'élimination de la turbidité passe par une phase négative, suivie d'une accélération et d'un palier. La phase négative enregistrée dans ce cas est due au phénomène convectif additionnel qui se produit en appliquant le courant électrique [111].

A travers les résultats obtenus, il apparaît clairement que l'utilisation des électrodes en fer pendant 15 mn d'électrolyse est plus efficace que l'utilisation des électrodes en Aluminium. Ainsi, des électrodes en Fer et un temps d'électrolyse de 15 mn seront retenues pour le reste du travail.

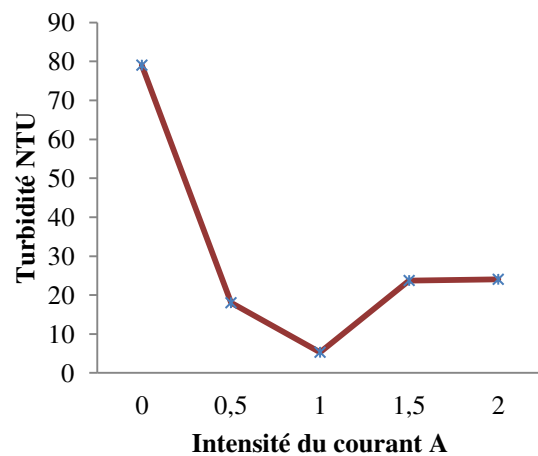
# Chapitre V: Résultats et discussions

## V.3. Choix de l'intensité du courant :

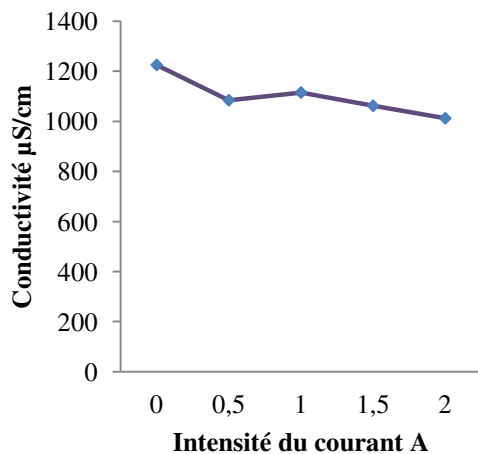
Dans le but d'étudier l'effet de l'intensité du courant sur l'efficacité d'élimination de la turbidité, nous avons choisis de varier ce paramètre de 0,5 à 2A avec un pas de 0,5A, pour une distance inter-électrodes de 1cm, une concentration du colorant de 100mg/l, un temps d'électrolyse de 15mn en utilisons des électrodes en Fer. Les résultats obtenus sont illustrés sur les figures (V.4) suivantes.



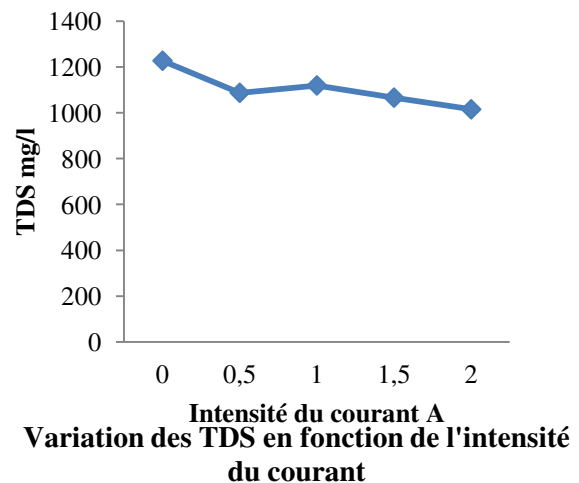
Variation du pH en fonction de l'intensité du courant



Variation de la turbidité en fonction de l'intensité du courant

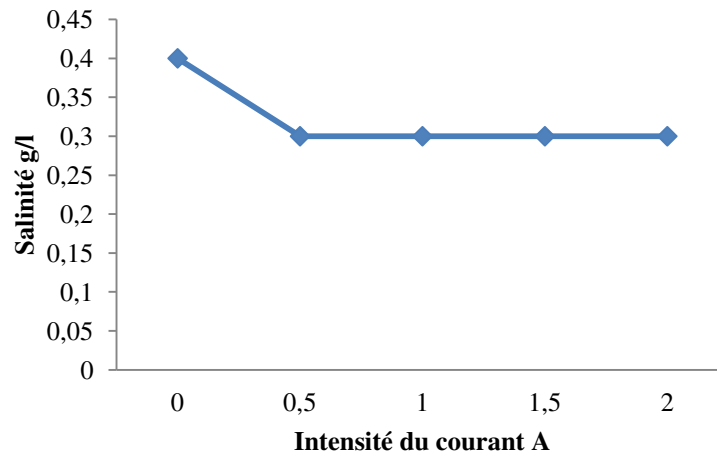


Variation de la conductivité en fonction de l'intensité du courant



Variation des TDS en fonction de l'intensité du courant

## Chapitre V: Résultats et discussions



Variation de la salinité en fonction de l'intensité du courant

*Figure (V.4) : Effet de l'intensité du courant sur l'abatement de la turbidité et l'évolution du pH, de la conductivité, les TDS et la salinité.*

Les résultats représentés sur cette figure montrent que :

- **Le pH** se stabilise à 7,7 pour les différentes intensités appliquées, néanmoins une légère diminution est enregistrée en appliquant une intensité de 1A.
- **La turbidité** diminue en augmentant l'intensité de 0,5 à 1A, puis une augmentation de ce paramètre est enregistrée en augmentant l'intensité du courant au-delà de 1A.
- **La conductivité, les TDS et la salinité** ne subissent pas de variations remarquables en fonction de l'intensité du courant appliquée.

La densité de courant est un paramètre critique en électrocoagulation, étant donné qu'il est le seul pouvant être contrôlé directement [112].

La densité de courant est considérée comme un paramètre essentiel en électrocoagulation-électroflottation [113][114]. Lorsque la densité du courant augmente, le temps de traitement diminue en raison de la forte dissolution des électrodes. Ce qui explique la diminution du pH lors de l'application de 1A comme intensité (par l'apparition d'une forte concentration d'ions de Fer). Il en résulte donc d'avantage de la 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 l'élimination efficace du polluant par électroflottation [115]. Néanmoins une augmentation du taux de production des bulles

## Chapitre V: Résultats et discussions

d'hydrogène, augmente la probabilité de coalescence de ces dernières en grosses bulles [116], ce qui entraîne une explosion de ces dernières, déstabilisant ainsi l'écume formée à la surface du réacteur électrochimique et remettant les particules du colorant en suspension. Cela explique l'augmentation de la turbidité en appliquant une intensité du courant supérieure à 1A, réduisant ainsi l'efficacité de l'électrocoagulation [117]. Cela explique l'augmentation de la turbidité en appliquant une intensité du courant supérieure à un 1A.

Les résultats obtenus montrent que l'application d'une intensité du courant de 1A, nous permet d'éliminer 93,31% de la turbidité, et cette intensité est choisit comme intensité optimale à appliquer.

### V.4. Choix de la technique de traitement :

Le choix d'une technique par rapport à une autre est dicté par les rendements de traitement. Les histogrammes suivant regroupent les meilleurs résultats obtenus pour chaque technique.

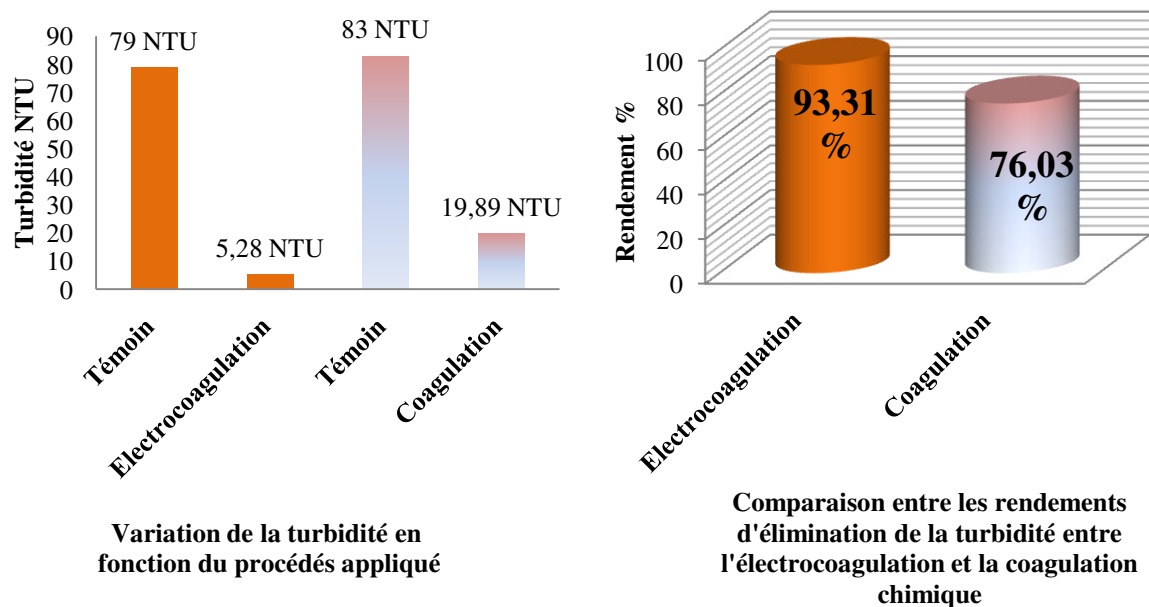


Figure (V.5) : Comparaison entre la coagulation chimique et l'électrocoagulation.

## Chapitre V: Résultats et discussions

Ces histogrammes montrent que les résultats obtenus par électrocoagulation atteignant 93,31% d'abattement de la turbidité, sont nettement meilleur que ceux obtenues par la coagulation chimique. La figure (V.5) ci-après confirme les résultats obtenue.



**Traitement par  
électrocoagulation**

**Traitement par  
coagulation chimique**

**Témoin**

*Figure (V.6) : comparaison entre la coagulation chimique et l'électrocoagulation.*



***CONCLUSION***

## Conclusion

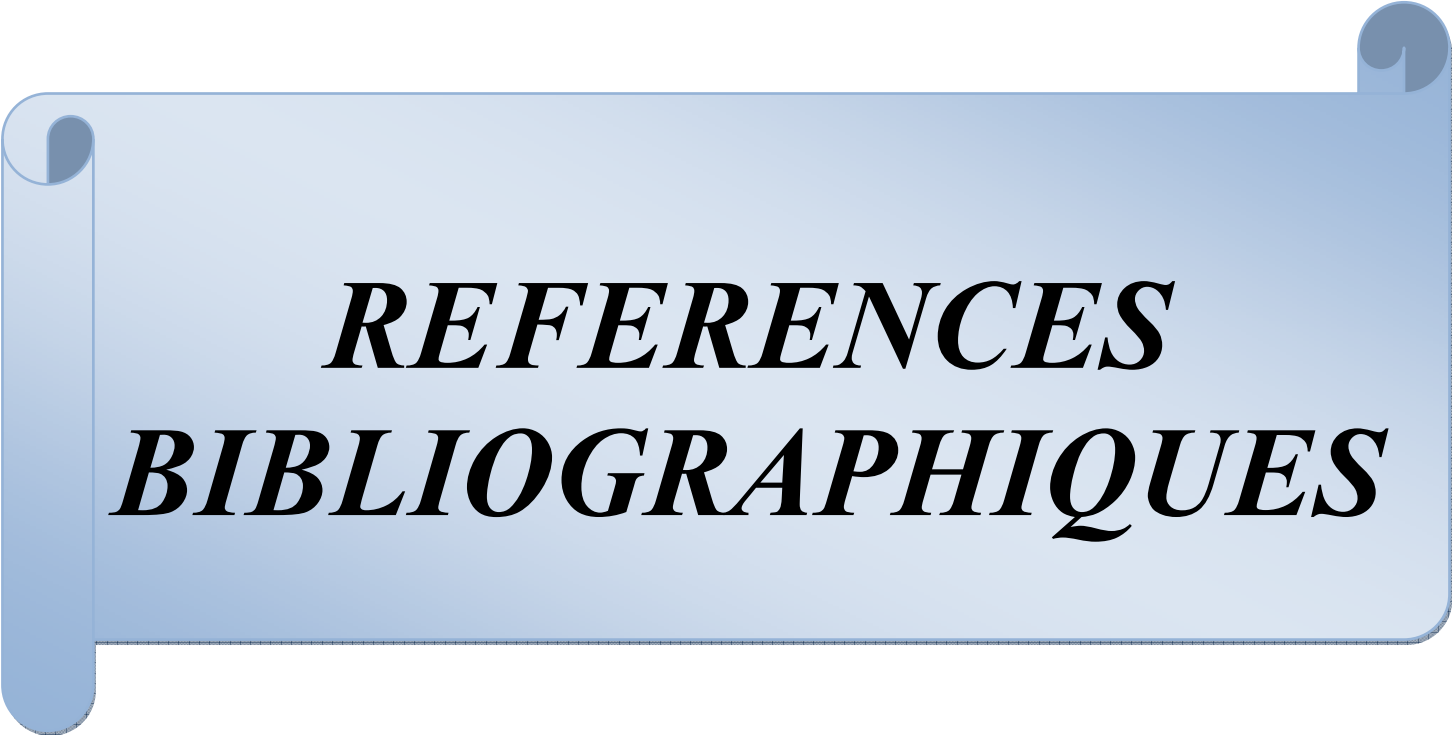
Parmi les procédés de traitement traditionnel connus, la coagulation–floculation chimique qui s’effectue par l’ajout des réactifs chimiques appelés : coagulants (sulfate d’alumine, sulfate ferrique ...). pour des raisons : économiques et autres, de nouveaux procédés sont à entreprendre tel que : l’électrocoagulation–électroflottation, qui s’effectue dans un réacteur en verre en utilisant des électrodes en fer ou aluminium.

L’étude expérimentale que nous avons menée, été consacrée à l’élimination du colorant textile (Réactive Brown 18) par les deux procédés précédemment cités.

A partir des résultats et discussions présentés, nous avons pu conclure que :

- Dans les essais de la coagulation-floculation chimique:
  - L’ajout du sulfate ferrique comme coagulant a donné des résultats plus efficaces que le sulfate d’aluminium.
- Dans les essais de l’électrocoagulation–électroflottation:
  - L’utilisation des électrodes en fer pendant 15mn d’électrolyse est plus efficace que l’utilisation des électrodes en aluminium.
  - L’application d’une intensité du courant de 1A nous permet d’avoir une eau clarifiée mieux que les autres intensités appliqués aux essais.

D’après les résultats obtenus par les deux procédés, il est clair que l’électrocoagulation est plus efficace que la coagulation chimique.



***REFERENCES***  
***BIBLIOGRAPHIQUES***



## Références bibliographiques :

- [1] **Moletta Méthanisation**. L'eau, sa pollution, et son traitement. Chapitre 4 : La pollution de l'eau. Disponible sur : [http://molettamethanisation.fr/documents/Chap4\\_la\\_pollution\\_de\\_leau.pdf](http://molettamethanisation.fr/documents/Chap4_la_pollution_de_leau.pdf).
- [2] FEPS : Fondation de l'eau potable, disponible sur : [www.safewater.org](http://www.safewater.org).
- [3] **LAURENT J-L.**, 1994, L'assainissement des agglomérations : techniques d'épuration actuelles et évolutions. 170p.
- [4] **GOMELLA C & GUERRÉE H.**, 1986, Guide de l'assainissement dans les agglomérations urbaines et rurales. Tome I, La collecte. Edition Eyrolles, Paris, France.
- [5] **MARTEL O.**, 2007, Eau, fleuves et patrimoine. Livret ressource Communauté urbaine de Lyon Direction Prospective et Stratégie d'Agglomération.
- [6] **GAUJOUS D.**, 1995, La pollution des milieux aquatiques : aide-mémoire. Technique et documentation, 2<sup>ème</sup> édition Lavoisier, Paris.
- [7] **MARTEL O.**, 2007, Eau, fleuves et patrimoine. Livret ressource Communauté urbaine de Lyon Direction Prospective et Stratégie d'Agglomération.
- [8][9] (**MARTEL O.**, 2007, Eau, fleuves et patrimoine. Livret ressource Communauté urbaine de Lyon Direction Prospective et Stratégie d'Agglomération.), (**GOMELLA C & GUERRÉE H.**, 1986, Guide de l'assainissement dans les agglomérations urbaines et rurales. Tome I, La collecte. Edition Eyrolles, Paris, France.).
- [10] **GOMELLA C & GUERRÉE H.**, 1986, Guide de l'assainissement dans les agglomérations urbaines et rurales. Tome I, La collecte. Edition Eyrolles, Paris, France.
- [11] **MEKHALIF F.**, 2009, Réutilisation des eaux résiduaires industrielles épurées comme eau d'appoint dans un circuit de refroidissement. Mémoire de magister, Université de Skikda, Algérie.
- [12] **ELSKENS M.**, 2010, Analyse des eaux résiduaires-Mesure de la pollution. Technique de l'ingénieur 200V2, P.1-4.
- [13] **GARCIA A-R.**, 2004, Étude de la congélation comme technique de traitement des eaux: applications spécifiques. Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse.
- [14] **ELSKENS M.**, 2010, *Analyse des eaux résiduaires-Mesure de la pollution*. Technique de l'ingénieur 200V2, P.1-4.
- [15] DIRECTIVES ENVIRONNEMENTALES, SANITAIRES ET SECURITAIRES POUR LA FABRICATION DES TEXTILES, 2007, 23p.

- [16] **BOUAFIA S.**, 2010, Dégradation des colorants textiles par procédés d'oxydation avancée basée sur la réaction de fenton. Application à la dépollution des rejets industriels. Thèse de doctorat, Université Paris-Est et Saad Dahlab de Blida.
- [17][18][19] (**SOKOLOWSKA-GAJDA J., FREEMAN H S., REIFE A.**, 1996, Synthetic dyes based on environmental considerations: 2. Iron complexed formazan dyes, *Dyes Pigm.*, Vol 30, 1-20.), (**IVANOV K., GRUBER E., SHEMAW W., KIROV D.**, 1996, Possibilities of using zeolite as filler and carrier for dyestuffs in paper, *das paper*, Vol 50, 456-60.), (**TUNAY O., KABDASLI I., OHRON D., CANSEVER G.**, 1999, Use and mineralization of water in leather tanning processes, *Water Sci. Technol.*, Vol 40/1, 237-44.)
- [20] **GUPTA G-S., SHUKLA S-P., PRASAD G., SINGH V-N.**, 1992, China clay as an adsorbent for dye house wastewaters, *Environ. Technol.*, Vol13, 925-36.
- [21] (**BHAT R-V., MATHUR P.**, 1998, Changing scenario of food colours in india, *Curr.Sci.* Vol 74, 198-202.), (**SLAMPOVA A., SMELA D., VONDRACKOVA A., JANCAROVA I. & KUBAN V.**, 2001, Determination of synthetic colorants in foodstuffs, *Chem. Listy.*, Vol 95, 163-8.)
- [22] **ALOUI A.**, 2010, Etude de la photo-décomposition de colorants industriels par le TiO<sub>2</sub> en solution aqueuse. Mémoire de magister. Université de Constantine, Algérie.
- [23] **OUBAGHA N.**, 2011, Décontamination des eaux contenant les colorants textiles et les adjuvants par des matériaux naturels et synthétique. Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.
- [24] **BENAISSA A.**, 2011, Etude de la dégradation photocatalytique d'un colorant synthétique et d'un tensioactif. Thèse de doctorat. Université de Constantine, Algérie.
- [25] **HAMMAMI S.**, 2008, Étude de dégradation des colorants de textile par les procédés d'oxydation avancée. Application à la dépollution des rejets industriels. Thèse de doctorat, Université Paris-Est et Tunis El Manar.
- [26] **Swamy J.**, 1998, The biodecoloration of textile dyes by the white rot fungus *trametes versicolor*. Thèse de doctorat ; Université Kingston, Ontario, Canada.
- [27][28] (**DIB GH.**, 2012, Étude de la dégradation d'un colorant synthétique par photocatalyse en présence de dioxyde de titane en suspension. Mémoire de magister, Université de Bejaïa, Algérie.), (**DONZÉ J-J.**, 1988, Colorants textiles. Technique de l'ingénieur K350, P.1-6.)
- [28][29] (**Perrin R, pierre S.J.**, 1999, Chimie industrielle. 2eme édition.) ; (**Zille A.**, 2005, Laccase Reactions for Textile Applications. Thèse de Doctorat, Université du Minho Portugal.)

[30][31] ((**Bizani E., Fytianos K., Poullos I, Tsiridis V.**, 2006, Photocatalytic decolorization and degradation of dye solutions and wastewaters in the presence of titanium dioxide. *J.Hazardous Materials* 136, 85–94.) ; (**Mahmoodi N.M, Arami Mokhtar; Nargess Y.L , Nooshin S.T**, 2005, Decolorization and aromatic ring degradation kinetics of Direct Red 80 by UV oxidation in the presence of hydrogen peroxide utilizing TiO<sub>2</sub> as a photocatalyst. *Chemical Engineering Journal* **112**, 191–196)).

[32][33][34][35] ((**Zawlotzki guivarch E.**, 2004, Traitement des polluants organiques en milieux aqueux par procédé électrochimique d'oxydation avancée "Electro- Fenton". Application à la minéralisation des colorants synthétiques. Thèse de doctorat, Université de Marne-La-Vallée.) ; (**Bizani E., Fytianos K., Poullos I, Tsiridis V.**, 2006, Photocatalytic decolorization and degradation of dye solutions and wastewaters in the presence of titanium dioxide. *J.Hazardous Materials* 136, 85–94.) ; (**Mahmoodi N.M, Arami Mokhtar; Nargess Y.L , Nooshin S.T**, 2005, Decolorization and aromatic ring degradation kinetics of Direct Red 80 by UV oxidation in the presence of hydrogen peroxide utilizing TiO<sub>2</sub> as a photocatalyst. *Chemical Engineering Journal* 112, 191–196.) ; (**Crepy M.N.**, 2004, Dermatoses professionnelles aux colorants, Fiche d'allergologie- dermatologie professionnelle hôpital Cochin.)).

[36] **BEN MANSOUR H., BOUGHZALA O., DRIDI D., BARILLIER D., CHEKIR-GHEDIRA L & MOSRATI R.**, 2011, Les colorants textiles sources de contamination de l'eau : criblage de la toxicité et des méthodes de traitement. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 24, n° 3, p.209-238.

[37] **MANAHAN S-E.**, 1994, Environmental chemistry, 6<sup>ème</sup> Ed.USA: Lewis publisher.

[38] **WILLMOTT N.J., GUTHRIE J.T., NELSON G.**, 1998, The biotechnology approach to colors removal from textile effluent, *JSDC*, 114, 38-41.

[39] **PAGGA U., BROWN D.**, 1986, The degradation of dyestuffs part II: behaviour of dyestuffs in aerobic biodegradation tests, *Chemosphere*, **15**, 4, 479-49.

[40] **SERVAIS P.**, 1999, La matière organique dans les milieux naturels, Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, 49.

[41] **SANTE CANADA.**, 1999a, Chloration de l'eau, votre santé et vous.

[42][43] (**SANTE CANADA.**, 1999b, Sous produits de désinfection (SPCD), texte préparé par le groupe de travail sur les SPCD.), (**MILLS C., BULL R.J., CANTOR K.P.**, 1998, Risques pour la santé liés à la consommation de sous produits de la chloration de l'eau potable : rapport d'un groupe d'experts. *Maladie chronique au canada.*)

[44] **BARCLAY S., BUCKLEY C.**, 2000, Waste minimization guide for the textile industry, a step towards cleaner production. The pollution research group. University of Natal Durban, South Africa, For the south African. Water Research commission, Volume 1.

- [45] **KURBUS T., SLOKAR Y.M., LE MARECHAL A.M.**, 2002, The study of the effect of the variables on H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV decoloration of vinylsulphone dye: part II, *Dyes Pigments*, 54, 67-78.
- [46] **GUIVARCH Z-E.**, 2004, Traitement des polluants organiques en milieux aqueux par procédé électrochimique d'oxydation avancée "Electro-Fenton". Application à la minéralisation des colorants synthétiques. Ph.D. Thesis, Université de Marne-La-Vallée.
- [47] **Raymond Desjardins**, Le traitement des eaux, Édition de l'École Polytechnique de Montréal, 317 pages, 1997.
- [48] **Yves Mottot**, Coagulants et floculants, Texte de la 279<sup>e</sup> conférence de l'Université de tous les savoirs, 5 octobre 2000.
- [49] **Adamczyk Z.**, Particle adsorption and deposition, role of electrostatic interactions, *Advances in Colloid and Interface Science*, 2003.
- [50] **Dégriment**, mémento technique de l'eau, huitième édition, 1978.
- [51] **Dégriment SUEZ**, mémento technique de l'eau, Dixième édition. 2005.
- [52] **Besra L., Sengupta K., Roy, S. K., and Ay, P.** Polymer adsorption: its correlation with flocculation and dewatering of kaolin suspension in the presence and absence of surfactants, *International Journal of Mineral Processing*. 66 (2002) 183-202.
- [53] **J.I. Carrot, M. Bao, P. Castro and M.J. Bao**, traitement of tannery effluent by a two step coagulation/flocculation process, *water research* 29 (1995) 2605-2608.
- [54] **Claude Cardot**, Les traitement de l'eau, Procèdes physico-chimiques et biologique - cours et problèmes résolus – Edition Marketing. S.A, 1999.
- [55] **LAKHDARI Bouazza**, Effet de la coagulation-flocculation sur la qualité des eaux épurées de la STEP de Ain El Houtz, Mémoire de Magister, Département de chimie, Université ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEM, 2011.
- [56] **Moise Desire Dihang**, Mécanismes de coagulation et de flocculation de suspensions d'argiles diluées rencontrées en traitement des eaux, Doctorat de l'université Paul Sabatier, Génie des procédés et de l'environnement, 2007.
- [57] **Inan H., Dimoglo A., Simisek H & Karpuzcu M.**, 2004, Olive oil mill wastewater treatment by means of electrocoagulation. *Sep. Purif. Technol.*, 36, 23-31.
- [58] **Holt P.K., Barton G.W., Wark M. and Mitchell C.A.**, 2002. A quantitative comparaison between chemical dosing and electrocoagulation, *Colloids and Surfaces. Physicochemical Engineering Aspects*, 211; 233-248.
- [59] **Mollah M.Y.A., Schennach R., Parga J.R & Cocke D.L.**, 2001, Electrocoagulation (EC)-science and applications. *Journal of Hazardous Materials B84*, 29-41.

- [60] **Chen G.**, 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment. Separation and Purification technology, 38; 11-41.
- [61][62] (**Degrémont (1972)** Mémento technique de l'eau. Degrémont, Paris, France.) ; (**Edeline F., 1996**, L'épuration physico-chimique des eaux, théorie et technologie. 3<sup>ème</sup> Édition, Édition CEBEDOC, Liège, France.).
- [63] [64] (**Ibanez J.G., Singh M.M & Szafran Z.**, 1998, Laboratory experiments on electrochemical remediation of the environment. Part 4: Color removal of simulated wastewater by electrocoagulation-electroflotation. Journal of Chemical Education 75(8), 1040-1041.); (**Rajeshwar K., Ibanez J.**, 1977, Environmental electrochemistry-Fundamentals and application in pollution abatement. Academic Press, San Diego, CA, États-Unis, 776p.)
- [65] **Chen G.**, 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment. Separation and Purification technology, 38; 11-41.
- [66] **Blais J.F.**, 2004, Cours Eau 454 Assainissement des eaux. Notes de cours, INRS-ETE, Université du Québec, Québec, QC, Canada.
- [67] **Beck E.C., Giannini A.P & Ramirez E.R.**, 1974, Electrocoagulation clarifies food wastewater. Food technology., 28, 2-4.
- [68][69][70] (**El-Marsy M.H., Sadek O.M & Mekhemer W.K.**, 2004, Purification of raw surface water using electrocoagulation method. Water Air Soil Pollution., 158, 373-385.) ; (**Kumar P.R., Chaudhari S., Khilar K.C & Mahajan S.P**, 2004, Removal of arsenic from water by electrocoagulation. Chemosphere, 55, 1245-1252.) ; (**Phutdhawong W., Chowwanapoonpohn S & Buddhasukh**, 2000, Electrocoagulation and subsequent recovery of phenolic compounds. Analytical. Sciences., 16, 1083-1084.)
- [71][72] (**Beauchesne I., Meunier N., Drogui P., Hausler R., Mercier G & Blais J.F**, 2005, electrolytic recovery of lead in use lime leachate from municipal waste incinerator. Journal of Hazardous Materials., 120 (1-3), 201-211.) ; (**Meunier N., Drogui P., Gourvenec C., Hausler R & Blais J.F**, 2004, Removal of metals in leachate from sewage sludge using electrochemical technology. Environemental. Technology., 25, 235-245.)
- [73] **Ryan P.E., Stanczyk T.F & Parekh B.K**, 1989, Solid/liquid separation using alternating current electrocoagulation. Proceedings of the 1989 International Symposium on solid/liquid separation: waste management and productivity enhancement, H.S Muralidhara, p. 469-478.
- [74] **Parekh B.K.**, 1979, Dissertation, Université de Pennsylvania, State College, PA, États-Unis.
- [75] **Anon F.** 1996, Electroflocculation : removal of oil, heavy metals and organic compounds from oil-in-water emulsions. Filtration. Separation., 33(4), 295-303.

- [76] **Calvo L.S., Leclerc J.P., Tanguay G., Cames M.C., Paternotte G., Valentin G., Rostan A & Lopicque.** 2003, An electrocoagulation unit for the purification of soluble oil wastes of high COD. *Environmental. Progress.*, 22(1), 57-65.
- [77] **Vik E.A., Carlson D.A., Eikum A.S & Gjessing E.T.,** 1984, Electrocoagulation of potable water. *Water ressours.*, 18, 1355-1360.
- [78] **Koren J.P.F. & Syversen U.,** 1995, State-of-the-art electroflocculation. *Filtration. Separation.*, 32(2), 153-156.
- [79] **Chairungsi N., Jumpaton K., Suebsakwong P., Sengpracha W., Phutdawong W. & Buddhasukh D.,** 2006, Electrocoagulation of quinone pigments. *Molecules*, 11, 514-522.
- [80] **Camilleri C.,** 1980. Les techniques de flottation- Application à l'épuration des eaux usées industrielles et urbaines et à la préparation des eaux potables. *Tribune Cebedeau*, 33 ; 497-505.
- [81] **Debillemont P.,** 1996. Eaux résiduaires: Traitements biologiques et physicochimiques, Récents. *Progrès en Génie des Procédés*, 10 ; 129-136.
- [82] **Can O.T., Kobya M., Demirbas E. and Bayramoglu M.,** 2006. Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. *Chemosphere*, 62; 181-187.
- [83][84][85] **Krofla M. and Wang L.K.,** 1985. Development of innovative flotation-filtration systems for water treatment. Part C: An electroflotation plant for single families and institutions. In: *Forum of Water & Sewerage: Proceedings of the Water Reuse Symposium II*. San Diego, California, USA, AWWA Research Foundation; 1251 – 1264.) ; (**Beaujean H.S.,** 1999. Invention pour une installation d'épuration des eaux usées. *Fascicule des Brevets Européens*, 8 ; 6p.) ; (**Bureau M.A.,** 2004. Stabilisation et traitement électrochimique des boues d'épuration municipales et industrielles. *Mémoire M. Sc., Université du Québec* ; 107p.)
- [86] **Araya-Farias M.,** 1999. La clarification du jus de pomme par électroflottation. *Mémoire M-Sc, Université Laval, Canada* ; 133p.
- [87] **Khosla N.K., Venkatachalam S. and Somasundaraq P.,** 1991. Pulsed electrogeneration of bubbles for electroflotation. *J. Appl. Electrochem.*, 21; 986-990.
- [88] **Brandon N.P., Kelsaii G.H., Levine S. and Smith A.L.;** 1985. Interfacial electrical properties of electrogenerated bubbles. *J. Appl. Electrochem.*, 18 ; 485-493.
- [89][90][91] (**Makarenko V.K. and Klimov A.Yu., 1982.** An electroflotation device for extracting suspended particles from liquids. *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, 4; 89–90.) ; (**Poon C.P.C.,** 1997. Electroflotation for groundwater decontamination. *J. Hazard.Mater.*, 55; 159–170.) et (**Il'in V.I., Kolesnikov V.A. and Parshina Yu.I.,** 2002. Purification of highly concentrated industrial sewage from the porcelain and faience industry by the electric flotation method. *Glass Ceram.*, 59 : 242–244.

- [92] **Gvozdez V.D. and Ksenofontov B.S.**, 1986. Waste water treatment in an electroflotation apparatus with a fluidized media. *Khimiya Tekhnologiya Vody*, 8: 70-72.
- [93] **Zolotukhin I.A.**, 1988. Effect of built-in partitions and electrode systems on the operating efficiency of an electroflotation unit. *Khimiya Tekhnologiya Vody*, 10: 342-344.
- [94] **Camilleri C.**, 1985. Electroflottation et flotation al'air disous, *Industrie Mineral. Les Techniques*, 67 : 25-30.
- [95] **Kolesnikov V.A., Il'in V.I., Varaksin S.O. and Shaturov V.T.**, 1996. Electroflotation method and equipment for removing metals and organic contaminants from waste waters. *Russ. J. Heavy Mach.*, 1 : 37-38
- [96] **Hosny A.Y.**, 1996. Separating oil from oil-water emulsions by electroflotation technique. *Sep. Technol.*, 6; 9-17.
- [97] **Okun E.P. and Matov B.M.**, 1984. Investigation of the influence of wire cathode parameters on the purification efficiency of liquids by electroflotation. In: *Food. Hzhstrzes And The Environment- Wollo, J. Ed. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands*; 69-74.
- [98] **Glembotskii V.A., Mamakov A.A., Ramanov A.M. and Nenno V.E.**, 1975. In: *Proceedings of the 11th International Mineral Processing Congress. Caglairi.*; 562-581.
- [99] **Fukui Y. and Yuu S.**, 1985. Removal of colloidal particles in electroflotation. *AIChE J.*, 31; 201-208.
- [100] [101] **Ketkar D.R., Mallikarjunan R. and Venkatachalam S.**, 1988. Size determination of electrogenerated gas bubbles. *J. Electrochem. Soc. India*, 37; 313.); (**Ketkar D.R., Mallikarjunan R. and Venkatachalam S.**, 1991. Electroflotation of quartz fines. *Int. J. Miner. Proc.*, 31; 127-138.)
- [102] **Burns S.E., Yiacomini S. and Tsouris C.**, 1997. Microbubble generation for environmental and industrial separations. *Sep. Purif. Technol.*, 11; 221-232.
- [103] **Hosny A.Y.**, 1996. Separating oil from oil-water emulsions by electroflotation technique. *Sep. Technol.*, 6; 9-17.
- [104] **Llerena C., Ho J.C.K. and Piron D.L.**, 1996. Effect of pH on electroflotation of sphalerite. *Chem. Eng. Commun.*, 155; 217-228.
- [105] **Chen X., Chen G. and Yue P.L.**, 2002. A novel electrode system for electro-flotation of wastewaters. *Environ. Sci. Technol.*, 36; 778-783.
- [106] **Shen F., Gao P., Chen X. and Chen G.**, 2003. Electrochemical removal of fluoride ions from industrial wastewater. *Chem. Eng. Sci.*, 58 ; 987-993..

[107] **Hernlem B.J. and Tsai L.-S.**, 2000. Chlorine Generation and Disinfection by Electroflotation. *Journal of Food Science*, 65: 834-837

[108] [http://aquatechnique.pagesperso-orange.fr/Techniques/page\\_%20conduc.htm](http://aquatechnique.pagesperso-orange.fr/Techniques/page_%20conduc.htm)

[109] GAID A., (1984). *Épuration biologique des eaux usées urbaines*. Tom 1, édition OPU, Alger, 261p.

[110] **I.Zongo**, Etude expérimental et théorique du procédé d'électrocoagulation, application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie. Thèse de Doctorat en Génie des procédés et des produits. Institut National polytechnique de Lorraine, 2009, 33p.

[111] **Merzouk B., Madani Kh. and Sekki A.** Treatment characteristics of textile wastewater and removal of heavy metals using the electroflotation technique. *Desalination*, 228 ; 245-254, 2008.

[112] **Holt P.K., Barton G.W., Mitchell C.A.** The future of electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*, 355-367,2005.

[113][114] (**Mollah M.Y.A., Schennach R., Parga J.R., Cocke D.L.** Electrocoagulation (EC)-science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 2001, 29-41.), (**M. Bayramoglu, M. Eyvaz, M. Kobya**, Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation : economical evaluation, *Chem. Eng. J.*, 128, 155–161(2007).).

[115]**Mollah MY.A., Pathak S.R., Patil P.K., Vayuvegula M., Agrawal T.S., Gomes J.A., Kesmez M., Cocke D.L.** Treatment of orange II azo-dye by electrocoagulation (EC) technique in a continuous flow cell using sacrificial iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 165-171, 2004.

[116] **BOISSONNEAU P.,BYRNE P.** An experimental investigation of bubble-induced free convection in a small electrochemical cell. *Journal of Applied Electrochemistry*, 767-775,2000.

[117] **Anon. (1996)** Electroflocculation : removal of oil, heavy metals and organic compounds from oil-in-water emulsions. *Filtr. Sep.*, 33(4), 295-303.



## Résumé :

Dans le cadre de traitement des eaux, des techniques conventionnelles et nouvelles ont été appliquées à savoir : la coagulation-floculation et l'électrocoagulation-électroflottation ; la première est basée sur l'ajout de coagulants (sulfate ferrique, sulfate d'aluminium) cette technique est la plus utilisée dans les stations de traitement, la deuxième est basée sur l'utilisation des électrodes (en aluminium, en fer) alimentés par un courant électrique ,ce procédé a démontré une efficacité meilleure par rapport aux autres procédés.

## Les mots clés :

Traitement ,Coagulation-floculation, électrocoagulation-électroflottation, coagulants, électrodes.

## Abstract :

In the water treatment part, conventional and new techniques were applied namely: coagulation-floculation and electrocoagulation-electroflotation; the first is based on the addition of coagulants (ferric sulfate, aluminum sulfate), this technique is most commonly used in the processing stations, the second is based on the use of the electrodes (aluminum, iron) fed by an electric current, this method has demonstrated better efficacy compared with other processes.

## Keywords :

Treatment, coagulation-floculation, electrocoagulation-electroflotation, coagulants, electrodes.

## ملخص:

في اطار معالجة المياه استعملت تقنيات تقليدية وحديثة و هي : تقنية التثخير الكيميائي و تقنية التثخير الكهربائي .  
الاولى تستند على اضافة مخثرات (سولفات الحديد .سولفات الالومنيوم) و هي التقنية الاكثر شيوعا في محطات المعالجة .  
اما الثانية فتستعمل (الحديد . الالومنيوم) يغذيها تيار كهربائي .هذا الاسلوب يبين فعالية افضل مقارنة بالتقنيات القديمة .

## الكلمات الرئيسية:

المعالجة التثخير الكيميائي. التثخير الكهربائي . مخثرات . الكترودات .