

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

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

**Université Saad Dahleb - Blida  
Faculté de Technologie**

**Département des Sciences de l'Eau et de l'Environnement**

**Mémoire de fin d'études Master**

**Spécialité : Hydraulique**

**Option : Sciences de l'eau**

**Titre :**

**Traitement d'une eau chargée en colorant de  
l'industrie**

**textile par le procédé d'électrocoagulation en  
comparaison avec la coagulation - floculation**

**Présenté par: Mlle .KORICHI Assia**

**Devant le jury :**

**Président : Mr. GUENDOUSA**

**Promoteur : M<sup>me</sup>. ANSER. M**

**Examinateur : Mr. BESSENASSE.M**

**Examinatrice : Mr. BOUDJADJA**

**Année universitaire : 2012-2013**

## REMERCIEMENTS

*Dieu merci pour m'avoir donné la santé, la volonté et le courage sans lesquels ce travail n'aurait pas été réalisé.*

*Le présent travail a été effectué au niveau de laboratoire "épuration de l'eau" du département science de l'eau et de l'environnement sous la direction de Mme. ANSER MALIKA.*

*Je tiens également à exprimer tous mes sincères remerciements à ma promotrice Mme ANSERMALIKA, pour avoir dirigé ce mémoire. Ses compétences scientifiques, ses encouragements dans mes moments de doute et la confiance qu'il m'a accordés m'ont permis de mener à bien ce travail. Je tiens encore à lui exprimer ma profonde gratitude pour son aide et tous ses précieux conseils.*

*Mon respect aux membres de jury qui me feront l'honneur d'apprécier mon travail.*

*Mes vifs remerciements vont aussi à Monsieur BENSALIA le chef de département de science de l'eau et de l'environnement.*

*Mes remerciements s'adressent également à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.*

*Je tiens enfin à exprimer toute ma gratitude à ma famille dont le soutien a été essentiel tout au long de mes études, et tout particulièrement au cours de ce travail. A mes parents, à mes frères et ma sœur, pour leur aide et leurs encouragements de tous les jours. A tous ceux qui me sont chers.*

*J'adresse également mes sincères remerciements à tous les étudiants du Département de Chimie Industrielle ainsi que les techniciens pour leur gentillesse et leur aides.*

*Je remercie Khadija et tous mes collègues qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

*Je remercie vivement toutes les personnes qui ont permis d'enrichir mon travail et mes connaissances.*

« L'art de la réussite consiste à savoir s'entourer des meilleurs »

(John Fitzgerald KENNEDY)

## *DEDICASES*

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

- **A** *ma mère et à mon père* qui ont une très grande place dans mon cœur
- **A** *ma sœur: Oum keltoum.*
- **A** *mes frères: Salah, Mahdi.*
- **A** *toute l'ensemble la famille : KORICHI, DJEFAL, BOUFERACHE , BENCHENA, SAID, ZAIDI .*
- **A** *mes très chères amies de département de science de l'eau et de l'environnement ;*  
*Khadidja, Djouher, Tinhinane , Narimane , Mohammed , hamza, youcef, Ali, Hichem , Talal* qui vont toujours me manquer.
- **A** *tous mes chers amis surtout ; Amina, Sara, soumia, F.zohra , messa , nessrine , nina , imane,* qui m'ont encouragé et conseillé.
- **A** *tous ceux que j'aime et tous ceux qui me sont très chers.*

***Sans vous tous, ma vie serait sans couleurs***

-

*KORICHI Assia*

## **Résumé**

Cette étude porte sur l'application du procédé d'Électrocoagulation (EC) pour le traitement d'une solution synthétique colorée par un colorant utilisé dans l'industrie du textile : bleu cibacette (BC). Une méthodologie expérimentale a été appliquée afin d'étudier l'influence de certains paramètres comme : l'intensité de courant, l'effet de l'agitation, l'effet du pH, le temps d'électrolyse  $t$ , la concentration en NaCl et en CaCl<sub>2</sub> sur l'efficacité de l'EC en utilisant des électrodes en aluminium. En présence de CaCl<sub>2</sub> à 1 g/l, un temps d'électrolyse de 10 min, un pH 7, une densité de courant de 50 A/m<sup>2</sup> et une agitation moyenne, un rendement d'élimination de 76,64 % d'absorbance a été atteint pour une énergie consommée de 0,703 kWh/m<sup>3</sup>.

Une comparaison entre le procédé de coagulation floculation et d'électrocoagulation pour les différentes densités de courant (50, 150, 250 A/m<sup>2</sup>) à permis de mettre en évidence l'avantage du procédé d'électrocoagulation.

**Mots clés** : Absorbance ; Aluminium ; Bleu Cibacette (BC) ; Coagulation – floculation ; Electrocoagulation (EC).

## **Abstract**

This study focuses on applying the Electrocoagulation (EC) method for the treatment of synthetic solutions of dye used in textile industry: cibacette blue (BC). The methodology of experimental research has been applied to study the influence of certain parameters such as: the current, the effect of agitation, the effect of pH, the electrolyse time  $t$ , the concentration of NaCl and CaCl<sub>2</sub>. , on the effectiveness of EC using aluminum electrodes. In the presence of CaCl<sub>2</sub> at 1 g/l with time d'électrolyse  $t$  for 10 min, pH 7, current density for 50 A/m<sup>2</sup> with medium agitation, a removal efficiency of 76.64% of absorbance was reached for an consumed energy of 0.703 kWh/m<sup>3</sup>.

A comparison between the coagulation – flocculation process and electrocoagulation for the different current densities (50, 150, 250 A/m<sup>2</sup>) enables to show the advantage process of electrocoagulation.

**Keywords:** Absorbance; Aluminum; Blue cibacette (BC); Electrocoagulation (EC); Coagulation-flocculation.

ملخص :

هذه الدراسة تركز على تطبيق طريقة التبخير الكهربائي لمعالجة محلول اصطناعي ملون بملون مستخدم في صناعة الغزل والنسيج (ازرق سيباسات) وقدم تطبيق منهجية البحوث التجريبية لدراسة تأثير معايير معينة مثل شدة التيار الكهربائي، تأثير الخلط ، ، تركيز كلوريد الصوديوم و الكالسيوم ووقت المعالجة باستخدام أقطاب من الألمنيوم . بوجود كلوريد الكالسيوم بتركيز 1 غرام / لتر. نسبة إزالة الامتصاص **72.76** % . قد تحصلنا عليها في درجة حموضة 7 بشدة تيار تساوي 50 امبير/متر مربع مع خلط متوسط مدة 10دقائق . بطاقة مستهلكة قدرها 0.703 كيلواط ساعي/ مترمكعب

كما قمنا بمقارنة بين الطريقتين التخثيرية و الكهروتخثيرية و هذا بشدة تيار تساوي 50 -150 - 250 امبير/متر مربع ووصلنا بان نتائج الطريقة الكهروتخثيرية افضل من الطريقة التخثيرية.

**كلمات مفاتيح:** الامتصاص، المنيوم، ازرق سيباسات ، التخثير الكهربائي ، المنيوم ،التخثر و التكتل.

## LISTE DES ABREVIATIONS

<i>Abs</i> :	Absorbance.
<i>Al</i> :	Aluminium.
<i>A</i> :	Ampère.
<i>BC</i> :	Bleu cibacette BF.
<i>CC</i> :	Coagulation chimique.
<i>Cd</i> :	Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).
<i>C<sub>BC</sub></i> :	Concentration de bleu cibacette (mg/L).
<i>Ce</i> :	Current efficiency
<i>C<sub>NaCl</sub></i> :	Concentration de chlorure de sodium.
<i>EC</i> :	Electrocoagulation.
<i>F</i> :	Constante de faraday.
<i>h</i> :	Heure.
<i>I</i> :	Intensité de courant (A).
<i>i</i> :	Densité de courant (intensité par unité de surface).
<i>l</i> :	Litre
<i>ml</i> :	Millilitre.
<i>mS</i> :	Milli Siemens.
<i>pH</i> :	Potentiel hydrogène.
<i>R(%)</i> :	Rendement d'élimination de colorant.
<i>T</i> :	Température (°C).
<i>t</i> :	Temps d'électrocoagulation (min).
<i><math>\lambda_{max}</math></i> :	Longueur d'onde au maximum d'absorption du colorant.

## Liste des tableaux

**Tableau 1.1** : taux de fixation sur textile pour les différentes classes de colorant.....12

**Tableau 1.2** : Valeur limites des paramètres de rejets d'effluents textiles ..... 13.

**Tableau 2.1** : Matériaux d'électrodes utilisés en EC.....25.

**Tableau 2.2** : Résultat obtenus lors de l'utilisation de la cellule de Kaselco..... .35.

**Tableau 2.3** : Comparaison entre l'EC et l'PC pour l'élimination des métaux lourds à partir d'eau usée industrielle..... 36.

**Tableau 3.1** : Efficacité des différents coagulants chimiques étudiée par différentes chercheurs pour l'enlèvement de la couleur dans les rejets de l'industrie textiles..... .48.

**Tableau 4.1** : réactifs utilisés avec leurs emplois ..... 50.

**Tableau 4.2** : Efficacité de courant CE : (t=10 min, pH initial)..... 71.

**Tableau 4.3** : Masse en al (m) et masse équivalente ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 16 H_2O$ )..... 75.

## INTRODUCTION GENERALE

De nombreuses industries (textile, papeterie, plastique, agroalimentaire...) sont de gros consommateurs d'eau et utilisent des colorants organiques (solubles ou pigmentaires) pour colorer leurs produits. Il est connu que certains colorants se fixent plus ou moins efficacement malgré l'emploi d'agents fixants. Il en résulte alors des eaux de rejets colorées qu'il est nécessaire de traiter avant leur rejet **(Banaet al 2004)** . En outre, la majorité des colorants synthétiques ne sont pas biodégradables et peuvent constituer des facteurs de risques pour notre santé et de nuisances pour notre environnement.

De nos jours, après la qualité et la productivité. L'environnement constitue le troisième défi industriel à relever par les entreprises Algériennes. Face à une réglementation environnementale des plus sévères et une limitation des performances des procédés physico-chimiques classiques de traitement des rejets, la prise en compte par les industriels des nouvelles technologies d'épuration des effluents apparait comme une nécessité **(Chatterjee et Ddasgupta 2004)**.

En effet, la technologie électrochimique peut intervenir au niveau de la modification des procédés existants et du développement de nouveaux procédés ou produits ayant des effets moins nocifs sur l'environnement. Par ailleurs, l'électrochimie peut également intervenir comme étape de purification de différents effluents industriels (gaz, liquide et solide) afin d'en diminuer les concentrations en composés toxiques tel que les colorants.

C'est dans cette optique, que s'inscrivent ces travaux de recherche et plus spécifiquement pour la décoloration d'un effluent textile synthétique par l'application de l'EC. Cette technique électrochimique présente les avantages de la coagulation chimique par la formation in situ d'un agent coagulant qui permet d'éviter l'ajout de produit chimique tout en agissant directement sur l'effluent, même si celui-ci est fortement chargé. Cette méthode de traitement présente des propriétés de désinfection et permet une diminution des odeurs liées aux effluents industriels.

L'objectif de cette étude est de montrer l'intérêt des procédés électrochimiques sur la dégradation des colorants de l'industrie textile. Dans ce contexte, l'étude a porté sur l'optimisation d'un système d'EC permettant la décoloration des effluents textiles synthétiques, en vue de sa possible intégration dans la station de traitement des rejets liquides.

En effet, l'optimisation a été effectuée pour un seul colorant anthraquinonique (Bleu Cibacette (BC)) en solution synthétique.

La première partie consiste en une synthèse bibliographique des thèmes abordés. Le contexte général concerne les colorants et leur traitement.

La deuxième partie est consacrée à l'optimisation des paramètres d'EC et une comparaison technique avec le procédé coagulation- floculation.

# **Chapitre I**

## **Généralité sur la pollution par les colorants textiles**

### **1.1. Introduction :**

Nous vivons dans un monde où tout est coloré, nos vêtements, nos aliments nos produits cosmétiques, pharmaceutiques, etc.

Les vêtements que nous portons sont fabriqués à partir des fibres textiles colorées à l'aide de différentes teintures leur donnant leur couleur définitive. Nous sommes loin d'imaginer que la fabrication de ces mêmes vêtements engendre une pollution de plus en plus importante et dangereuse pour l'environnement et pour la santé humaine.

Ce chapitre a pour objectif de définir les colorants textiles, de présenter leurs impacts, et voir les méthodes biologiques, physiques – chimique et électrochimique nécessaire à leur traitement.

### **1.2. Classification de la pollution selon le type de polluants :**

Il existe plusieurs manières de classer la pollution. Selon le type de polluant, on peut classer la pollution en trois catégories : pollution physique, pollution chimique et pollution biologique.

#### **↳ Pollution physique :**

On parle de ce type de pollution quand le milieu pollué est modifié dans sa structure physique par divers facteurs. Elle regroupe la pollution mécanique (effluents solides), la pollution thermique (réchauffement de l'eau par des usines) et la pollution nucléaire (retombées de radioéléments issus des explosions d'armes nucléaires, résidus des usines atomiques et accidents nucléaires).

#### **↳ Pollution chimique :**

Elle est due au déversement des rejets industriels apportant de grandes quantités de substances chimiques dont certaines sont non dégradables.

#### **↳ Pollution biologique :**

Il s'agit de la pollution par les micro-organismes (bactéries, virus, parasites, champignons, etc.). **(Roques, 1979)** .

# **Chapitre I**

## **Généralité sur la pollution par les colorants textiles**

### **1.3. Classification selon l'origine de la pollution :**

Selon l'origine de la pollution, on distingue quatre catégories : pollution domestique, urbaine, agricole et pollution industrielle.

- ***Pollution urbaine :***

Ce sont les eaux des habitations et des commerces qui entraînent la pollution urbaine de l'eau. Les polluants urbains sont représentés par les rejets domestiques, les eaux de lavage collectif et de tous les produits dont se débarrassent les habitants d'une agglomération notamment des rejets industriels rejetés par les entreprises en quantités variables selon l'importance de l'agglomération et son activité.

Le « tout –à- l'égout » est une expression significative ; elle exprime cette diversité. On trouve les excréments, les restes d'aliments, les déversements d'abattoirs, les déversements hospitaliers, les lessives, les détergents, les insecticides, les hydrocarbures, les déchets de la petite industrie et divers produits toxiques.

- ***Pollution agricole :***

L'agriculture, l'élevage, l'aquaculture et l'aviculture sont responsables du rejet de nombreux polluants organiques et inorganiques dans les eaux de surface et souterraines. Ces contaminants comprennent à la fois des sédiments provenant de l'érosion des terres agricoles, des composés phosphorés ou azotés issus des déchets animaux et des engrais commerciaux, notamment des nitrates. L'utilisation des engrais en agriculture ; La modernisation de l'agriculture et son intensification ont été généralement accompagnées d'une utilisation abusive et non rationnelle des engrais azotés, notamment.

Le lessivage de ces produits phytosanitaires utilisés en agriculture entraîne la contamination des eaux par des substances toxiques (pesticides) **(Roques, 1979)** . Par ailleurs, les pesticides ne sont pas biodégradables.

- ***Pollution industrielle :***

Le développement accéléré des techniques industrielles modernes a engendré une pollution très importante. En effet, celle-ci est devenue plus massive, plus variée et plus insidieuse.

## **Chapitre I**

### **Généralité sur la pollution par les colorants textiles**

Devant l'extrême diversité de ces rejets, une investigation propre à chaque type d'industrie est nécessaire : il est donc primordial d'être parfaitement informé sur les procédés de fabrication et le circuit des réactifs et des produits **(Dégremont, 1984)** . Il est évident que les effluents déversés sans traitement approprié entraînent des changements indésirables dans le milieu récepteur et des pollutions très néfastes.

A ce propos, parmi les grandes industries polluantes, l'industrie textile occupe une place suffisamment importante pour être prise en compte.

#### **1.4. Description succincte de l'industrie textile :**

L'industrie textile rassemble de très nombreux métiers tout au long d'une chaîne de transformation partant de matières fibreuses jusqu'à des produits semi-ouvrés ou entièrement manufacturés **(a)**. Elle présente l'avantage de représenter une filière complète qui va de la matière brute au produit fini livrable au consommateur **(Flandrin, 1976)** .

L'industrie textile comprend essentiellement deux types d'activité: activité mécanique et activité d'ennoblissement.

##### **1.4.1. L'activité mécanique:**

Elle regroupe les opérations de filature et de tissage. Ces opérations peuvent être définies comme suit :

- **La préparation de la laine :** (délainage, lavage, séchage, cardage, peignage) avant la filature,
- **La Filature :** on désigne sous le nom de filature, l'ensemble des opérations industrielles qui transforment la matière textile (du coton, du lin, de la laine ou de fibres synthétique) en fil. **(Brossard, 1997)**.
- **Tissage :** c'est l'opération qui consiste à entrecroiser les fibres perpendiculairement les unes aux autres pour en former des tissus.

##### **1.4.2. La finition textile (ou ennoblissement):**

Elle regroupe les opérations de blanchiment, de teinture, d'impression et d'apprêts :

## **Chapitre I**

### **Généralité sur la pollution par les colorants textiles**

- **Le Blanchiment** : c'est une opération ou un ensemble d'opérations industrielles qui ont pour but de décolorer les fibres textiles.
- **La Teinture** : elle est destinée à donner à une fibre, un fil ou un tissu dans toute sa longueur et dans toute son épaisseur, une teinte uniforme, différente de sa teinte habituelle. Elle s'obtient en fixant un colorant sur la fibre d'une manière durable.
- **L'impression** : a pour but d'obtenir des dessins blancs ou colorés à la surface des tissus.
- **Les apprêts** : on donne le nom d'apprêts aux divers traitements mécaniques ou chimiques que l'on fait subir aux fils et aux tissus avant ou après les opérations de blanchiment, teinture et impression **(Brossard, 1997)**.

#### **1.5 . Les effluentstextiles :**

Selon un rapport publié en 2000 par la Fédération des industries de textile, la consommation en pigment et colorants de ce secteur en Algérie dépasse les 40.12 tonnes annuellement, la consommation de produits chimiques auxiliaires atteint 16356 tonnes/an.

L'alimentation en eau des unités de textile ayant des activités de teintures et d'impression, se fait à partir des réseaux de distribution publics, avec un total de 4 808 700 m<sup>3</sup>/an et à partir de puits ou de forages privés, avec un total de 763 000 m<sup>3</sup>/an **(CAR/PP2002)**.

Les eaux résiduaires de l'industrie de textile présentent généralement des problèmes de couleur, de température relativement élevée et de concentration élevées de DBO<sub>5</sub>, de DCO, des sels, de solides en suspension, ainsi que de toxicité et de conductivité élevées. Leurs caractéristiques peuvent être extrêmement variables en raison du large spectre de colorants de pigments, de produits auxiliaires et de procédés utilisés **(CAR/PP2002)** , métaux lourds tels que : le cuivre et le chrome, Des acides organiques et minéraux, des alcalis (soude, carbonate), Des oxydants, provenant du blanchiment qui se fait à l'eau oxygénée, à l'eau de javel, au chlorite ou au perborate, ou constitués par les bichromates, etc. **(a)**

#### **1.6. Les colorantstextiles :**

# **Chapitre I**

## **Généralité sur la pollution par les colorants textiles**

### **1.6.1. Généralités :**

Les colorants constituent un groupe très diversifié de composés ayant en commun la propriété de colorer d'une manière permanente les tissus, cuirs ou papiers. Tous ces colorants sont des composés aromatiques dont les électrons très délocalisés peuvent absorber la lumière pour certaines longueurs d'ondes (**Moore, 1975**) . Les propriétés colorantes des composés organiques dépendent de leur structure et de leur composition chimique. En général, les produits utilisés comme colorants sont des composés organiques insaturés et aromatiques (**Belminoumiet Mehdjoubi, 2010**).

Les colorants rejetés par les industries textiles et les officines de nettoyage des vêtements, sont peu ou pas biodégradables et résistent aux traitements classiques d'épuration. Ils créent surtout une nuisance visuelle dans les eaux contaminées bien qu'un certain nombre d'entre eux est mutagène et cancérigène (**Ramade, 2000**).

### **1.6.2. Définition d'un colorant :**

Un colorant est une matière colorée par elle-même, capable de se fixer sur un support. La coloration plus ou moins intense des différentes substances est liée à leur constitution chimique (**Majault, 1997**) . En fait, un colorant est un corps susceptible d'absorber certaines radiations lumineuses et de réfléchir alors les couleurs complémentaires (**Flandrin, 1976**) . Ce sont des composés organiques comportant dans leurs molécules trois groupes essentiels : le chromophore, l'auxochrome et la matrice. Le site actif du colorant est le chromophore, il peut se résumer à la localisation spatiale des atomes absorbant l'énergie lumineuse. Le chromophore est constitué de groupes d'atomes dont les plus classiques sont le nitro ( $-\text{NO}_2$ ), le diazo ( $-\text{N}=\text{N}-$ ), le nitroso ( $-\text{N}=\text{O}$ ), le thiocarbonyl ( $-\text{C}=\text{S}$ ), le carbonyle ( $-\text{C}=\text{O}$ ), ainsi que les alcènes ( $-\text{C}=\text{C}-$ ). L'absorption des ondes électromagnétiques par le chromophore est due à l'excitation des électrons d'une molécule (**Laurent et Whathelet, 2010**) . La molécule qui les contient devient chromogène (**Flandrin, 1976**) . La molécule chromogène n'a des possibilités tinctoriales que par l'adjonction d'autres groupements d'atomes appelés «auxochrome», ces groupes auxochrome permettent la fixation des colorants et peuvent modifier la couleur du colorant. Ils peuvent être acides ( $\text{COOH}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{OH}$ ) ou basiques ( $\text{NH}_2$ ,  $\text{NHR}$ ,  $\text{NR}_2$ ). Le

## **Chapitre 1**

### **Généralité sur la pollution par les colorants textiles**

reste des atomes de la molécule correspond à la matrice, la troisième partie du colorant **(Laurent et al, 2010)** .

#### **1.6.3. Historique des colorants :**

Depuis le début de l'humanité, les colorants ont été appliqués dans pratiquement toutes les sphères de notre vie quotidienne pour la peinture et la teinture du papier, de la peau et des vêtements, etc.....

Jusqu'à la moitié du 19ème siècle, les colorants appliqués étaient d'origine naturelle. Des pigments inorganiques tels que l'oxyde de manganèse, l'hématite et l'ancre étaient utilisés. Par ailleurs, des colorants naturels organiques ont été appliqués, surtout dans l'industrie de textile. Ces colorants sont tous des composés aromatiques qui proviennent essentiellement des plantes, tel que l'alizarine et l'indigo.

L'industrie des colorants synthétiques est née en 1856 quand le chimiste anglais W. H. Perkin, dans une tentative de synthèse de la quinine artificielle pour soigner la malaria, a obtenu la première matière colorante synthétique qu'il appela "mauve" (aniline, colorant basique). Perkin a breveté son invention et il a installé une chaîne de production, qui serait bientôt suivie par d'autres. De nouveaux colorants synthétiques commencent à paraître sur le marché. Ce processus a été stimulé par la découverte de la structure moléculaire du benzène en 1865 par Kékulé. En conséquence, au début du 20ème siècle, les colorants synthétiques ont presque complètement supplantés les colorants naturels **(Encyclopédie, 2003)**.

#### **1.6.4. Classification des colorants :**

Les colorants sont classés en fonction de leurs origines **(Lemonnier et Viguier , 2002 )**

- *Origine naturelle :*

**a) végétale** : indigo, garance, roucon, safran, orseille, cachou, curcuma, naprum, pastel, noix de galle, gaude,...

**b) animale**: cochenille, kernès, pourpre,...

**c) minérale** : oxyde de fer, bleu de prusse, graphite, .....

## **Chapitre I**

### **Généralité sur la pollution par les colorants textiles**

- *Origine synthétique :*

La classification chimique des colorants se base sur la structure de leurs molécules et en particulier sur la nature des groupes actifs qu'elles comportent (**Majault, 1997**). Le composé coloré doit en outre pouvoir se fixer sur la fibre et, une fois fixé, y rester en résistant au lavage (**Levisalles et al, 1974**); ce sont alors les propriétés tinctoriales des différents textiles qui conduisent à choisir telle ou telle classe de colorants. Ainsi, on distingue trois types de colorants :

- ❖ **Les colorants solubles dans l'eau :** Dans cette classe de colorants, nous avons plusieurs sous classes :
  - A. Les colorants acides ;**
  - B. Les colorants directs ou substantifs ;**
  - C. Les colorants mordantables ;**
  - D. Les colorants basiques ;**
  - E. Les colorants métallifères.**

- ❖ **Les colorants insolubles dans l'eau :**

Dans le but d'effectuer la teinture sur les fibres d'acétates de cellulose, il a donc fallu essayer des colorants solubles dans des milieux autres que l'eau, car la molécule d'acétate est assez hydrophobe.

- A. Les colorants de cuve ;**
  - B. Les colorants azoïques insolubles ;**
  - C. Les colorants formés par oxydation ;**
  - D. Les colorants platsolubles ;**
  - E. Les colorants réactifs.**
- ❖ **Les colorants pigmentaires.**

#### **1.6.5. Application des colorants :**

L'industrie des colorants constitue un marché économique considérable car de nombreux produits industriels peuvent être colorés, principalement :

- pigments (industrie des matières plastiques) ;

## **Chapitre I**

### **Généralité sur la pollution par les colorants textiles**

- encre, papier (imprimerie) ;
- colorants alimentaires (industrie agro-alimentaire) ;
- pigments des peintures, matériaux de construction, céramiques (industrie du bâtiment) ;
- colorants capillaires (industrie des cosmétiques) ;
- colorants et conservateurs (industrie pharmaceutique)
- carburants et huiles (industrie automobile etc.,...) ;
- colorants textiles à usage vestimentaire, de décoration, du bâtiment, du transport, colorants textiles à usage médical etc. **(Belegald, 1987)** .

#### **1.7. Aspect toxicologique :**

Les colorants sont des composés difficilement biodégradables par les microorganismes, ils sont toxiques ou nocifs pour l'homme et les animaux.

##### **1.7.1. Toxicité sur la santé humaine:**

Plusieurs travaux de recherche sur les effets toxiques des colorants sur la santé humaine ont été développés. En effet, des chercheurs ont montré que les colorants aminés sont souvent aptes à provoquer des irritations de la peau et des dermites. Des effets similaires avec production d'eczéma et d'ulcération ont été observés chez les ouvriers d'usine de fabrication des colorants de la série du triphénylméthane. **(Abouzaid, 2001)**.

Des réactions allergiques, asthme quelquefois et surtout des dermites eczémateuses ont été observés avec divers colorants aminés azoïques, anthraquinoniques, ainsi qu'avec certains colorants du groupe des naphtalènes (chélite de rouge).

Les colorants de synthèse à base d'amines entraînent des risques cancérigènes, des tumeurs urinaires et plus spécialement les tumeurs bénignes et malignes de la vessie **(Desoille et al, 1987)**.

En 1913, pour la première fois, on se rendit compte qu'il y avait une relation entre la production d'aniline et l'apparition de cancers de la vessie : ces maladies ont particulièrement touché les ouvriers allemands

D'autres recherches **(Hansser, 1984)** ont signalé que la tartrazine développe un certain nombre de réactions adverses chez certains individus comme le prurit, l'œdème, l'urticaire,

## **Chapitre 1**

### **Généralité sur la pollution par les colorants textiles**

l'asthme et la rhinite. Les colorants azoïques sont aussi responsables d'apparition de Lépatomes chez l'homme.

Les colorants métallifères sont parmi les substances qui représentent de grands risques pour la santé de l'homme. Ils peuvent également causer des dégâts sur les réseaux d'assainissement et des perturbations des traitements biologiques dans les stations d'épuration à cause de leur toxicité élevée **(Norseth, 1981)** . L'utilisation des colorants à base d'arsenic tels que le vert de Scheele (arsénite de cuivre), vert de Schweinfurt (acétoarsénite de cuivre) provoquent des troubles digestifs : digestion pénible, nausées, diarrhée et peuvent être à l'origine des irritations de peau, des muqueuses oculaires et pulmonaires et surtout de cancer.

La granulomatose pulmonaire est signalée chez les femmes utilisant des laques colorées et parfumées plusieurs fois par jour pendant des années **(Desoille et al, 1987)**.

#### **1.7.2. Toxicité sur les milieux aquatiques :**

Un certain nombre de colorants présente un caractère toxique sur le milieu aquatique provoquant la destruction directe des communautés aquatiques. **(Asfour et al, 1985)**

- La fuchsine, en concentration supérieure à 1mg/l, exerce un effet de ralentissement sur l'activité vitale des algues **(Bringmann et Kuhn , 1959)**.
- Les rejets des usines de teinturerie et de textile sont à l'origine de diverses pollutions telles que : l'augmentation de la DBO<sub>5</sub> et de la DCO, diminuant la capacité de réaération des cours d'eau et retardant l'activité de photosynthèse **(Poot et al, 1978)** .
- *Bioaccumulation* : Si un organisme ne dispose pas de mécanismes spécifiques, soit pour empêcher la résorption d'une substance, soit pour l'éliminer une fois qu'elle est absorbée, alors cette substance s'accumule **(Figure 1.1)**. 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 aller jusqu'à cent mille fois plus élevées que les concentrations initiales dans l'eau. **(Hammani 2008)**.

## **Chapitre I**

### **Généralité sur la pollution par les colorants textiles**

**Figure 1.1.** Conséquences de la bioaccumulation après déversement des colorants dans un cours d'eau. **(Hammami, 2008).**

#### **1.7.3. Toxicité sur les poissons :**

Le poisson est un très bon modèle de l'essai de toxicité, non seulement parce qu'il est un bon indicateur des conditions générales des eaux, mais aussi parce qu'il est une source d'alimentation importante de l'homme.

Ainsi, l'analyse des données disponibles de la toxicité, par rapport au poisson, sur plus de 3000 produits commercialisés par des firmes membres de l'Association des colorants indique qu'environ 98% ont des valeurs de concentration létale CL50 supérieures à 1 mg/l, concentration à laquelle la pollution colorée d'une rivière peut être observable. Les 2% restants se décomposent sur 27 structures chimiques différentes y compris 16 colorants basiques parmi lesquels 10 sont de type triphénylméthane **(Tooby et al, 1957)** . Le colorant "noir de luxanthol G" utilisé pour la teinture de la viscose, est déjà toxique pour de jeune Guppies à la concentration de 5 mg/l, mais ne le devient, pour le Hotu, qu'à partir de 75mg/l **(Bringmann et Kuhn , 1959)** . Par contre, l'éosine, la fluorescine et l'auramine, très utilisées en hydrologie pour les essais de coloration, se sont montrées inoffensives pour la Truite et le Gardon en concentration jusqu'à 100 mg/l **(Bandt, 1957).**

#### **1.8. Aspect écologiques :**

##### **1.8.1. Les dangers des rejets textiles :**

L'industrie du textile et de l'habillement est caractérisée par sa diversité, tant sur le plan des matières premières utilisées que sur celui des procédés employés. Il faut en moyenne 6 étapes pour réaliser un vêtement. Dans ce contexte ,les atteintes à l'environnement sont aussi diverses que nombreuses : Filature, tissage et confection industriels posent des problèmes de qualité de l'air et aussi sur la qualité des rejets qui sont très dangereux .Si on prend l' exemple de la fixation des colorants sur le coton, la commission d'évaluation de l'écotoxicité des substances chimiques s'interroge sur le faible pourcentage de fixation

## **Chapitre 1**

### **Généralité sur la pollution par les colorants textiles**

pour un colorant réactif et sur la composition des 25% de substance non fixée sur le coton (**Chulhwan,2007**).

Le tableau 1.1 résume l'estimation des degrés de fixation des différents colorants aux fibres de textile.

**Tableau 1.1** : taux de fixation sur textile pour les différentes classes de colorants (**Easton, 1995**).

<b>Classe de Colorant</b>	<b>Fibre utilisée</b>	<b>Degré de fixation (%)</b>	<b>Pertes dans l'effluent (%)</b>
Acide	Polyamide	80 – 95	5 – 20
Basique	Acrylique	95 - 100	0 – 5
De cuve	Cellulose	80 - 95	5 – 20
Direct	Cellulose	70 - 95	5 – 30
Dispersé	Synthétique	90 - 100	0 - 10
Réactif	Cellulose	50 - 90	10 - 50
Soufré	Cellulose	60 - 90	10 - 40
Métallifère	Laine	90 - 98	2 - 10

#### **1.3.2 . Eutrophisation :**

Différents ions peuvent être évacués dans le milieu naturel tels que le phosphate, utilisé comme détergent lors du processus d'ennoblissement (**Sonibare et Yusuff, 2004**) ou le nitrate libéré sous l'action des microorganismes sur les colorants (**Kaushi et al, 2010**) 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.

La couleur est souvent le premier contaminant à être reconnu dans un effluent, et une faible quantité de colorants dans l'eau (10-20 mg.L<sup>-1</sup>) est hautement visible et affecte la transparence de l'eau (**Sanromán et al, 2004**) .Ainsi, les effluents textiles typiquement chargés en colorants avec des concentrations allant de 10 à 200 mg.L<sup>-1</sup> sont en général, hautement colorés et leur déversement dans l'eau présente un problème esthétique (**Zee, 2002**).

## **Chapitre 1**

### **Généralité sur la pollution par les colorants textiles**

L'accumulation des matières organiques dans les cours d'eau induit l'apparition de mauvais goûts, prolifération bactérienne, odeurs pestilentielles et colorations anormales **(Zawlotzki, 2004)**. De plus, les colorants absorbent la lumière du soleil, les plantes dans les courants d'évacuation peuvent périr ; ainsi l'écosystème des courants pourrait être sérieusement affecté **(Barrera et al., 2003)**.

#### **1.8.3. Législation Sur L'environnement :**

La législation sur les rejets d'eaux résiduaires devient de plus en plus stricte. L'Algérie est dotée d'une réglementation **06-141** sur les rejets d'effluents textiles dans le milieu hydrique. Le tableau 1.2 précise les limites réglementaires de ces rejets.

**Tableau 1.2:** Valeurs limites des paramètres de rejets d'effluents textiles. (Décret n 26).

<b>PARAMETRES</b>	<b>UNITE</b>	<b>VALEURS LIMITES</b>	<b>TOLERANCE AUX VALEURS LIMITES ANCIENNES INSTALLATIONS</b>
<b>Température</b>	C	30	35
<b>PH</b>	-	6,5-8,5	6-9
<b>DB05</b>	mg/l	150	200
<b>DCO</b>	"	250	300
<b>Matière décantable</b>	"	0,4	0,5
<b>Matière non dissoute</b>	"	30	40
<b>Oxydabilité</b>	"	100	120
<b>Permanganate</b>	"	20	25

#### **1.9. Procédés de traitement des colorants :**

les systèmes technologiques pour l'élimination des polluants organiques tels que les colorants sont actuellement bien maîtrisés à l'échelle du laboratoire et appliqués à grande échelle incluant les traitements biologiques (traitement aérobie et anaérobie), physiques et physico-chimiques (adsorption, les technologies membranaires et les procédés de

## **Chapitre I**

### **Généralité sur la pollution par les colorants textiles**

séparation solide-liquide: précipitation, coagulation- floculation et décantation), chimiques (résine échangeuse d'ions, oxydation par: 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>), ...) et Les techniques de dépollution des eaux usées chargées des colorants les plus importants, sont brièvement discutées dans les sections qui suivent.

#### **1.9.1 Méthodes biologiques :**

La présence dans les eaux ou dans le sol, de polluants organiques a toujours existée. Leur élimination par des microorganismes constitue le moyen biologique que la nature a utilisé pour l'épuration des milieux naturels. Ces procédés biologiques se produisent selon deux modes: traitements en aérobie; ils sont effectués en présence de l'oxygène et traitement en anaérobie; dans ce cas les microorganismes dégradent la matière organique en absence de l'oxygène.

- **Traitement aérobie :**

Des réacteurs à boue activée où les polluants sont décomposés par des bactéries aérobies et autres microorganismes. Après épuration, la boue est séparée des eaux usées par sédimentation dans un décanteur, une partie est recyclée et le surplus est évacué après pressage ou centrifugation.

Ce procédé est resté longtemps un moyen pour dégrader un grand nombre de polluants organiques, Il s'est avéré efficace pour une certaine catégorie de rejets textiles (**Banerjee et Sani, 1999**) . Notons cependant que des colorants tels que les azoïques, les colorants acides et les colorants réactifs se sont révélés persistants à ce mode de traitement (**Pagga et Taeger, 1994**). La décoloration observée dans ces cas est attribuée à l'adsorption de ces polluants sur la boue activée et non à leur dégradation.

- **Traitement anaérobie**

À l'inverse de la biodégradation aérobie, la digestion anaérobie des composés organiques s'effectue en l'absence d'oxygène et forme du dioxyde de carbone, du méthane et de l'eau. C'est un procédé efficace pour le traitement de déchets très chargés en matières organiques et le méthane formé peut être utilisé comme énergie de chauffage. Les conditions de réduction dans la digestion anaérobie sont adaptées à la décoloration des colorants

## **Chapitre I**

### **Généralité sur la pollution par les colorants textiles**

azoïques par clivage de la liaison azo entraînant une destruction subséquente du groupe chromophore, mais une minéralisation complète est impossible dans ce type de procédé. La dégradation des molécules initiales entraîne souvent la formation d'amines plus toxiques que la molécule initiale, qui finissent dans les sédiments aquifères peu profonds et les eaux souterraines.

Les méthodes de bio-traitement conventionnelles sont sans effet sur la plupart des colorants synthétiques à cause de leur structure polyaromatique complexe et leur nature réfractaire. **(Venceslau et al. 1994)** ont estimé à seulement 10-20 % la réduction de la coloration par les procédés biologiques.

Cette constatation laisse à présager d'autres techniques qui permettraient d'abaisser le degré de rétractabilité de la charge polluante en association avec les méthodes biologiques.

#### **1.9.2.Méthodes chimiques :**

Les techniques d'oxydation chimiques sont généralement appliquées pour :

- le traitement des polluants organiques dangereux présents en faibles concentrations, en prétraitement avant les procédés biologiques pour diminuer la charge polluante.
- le traitement d'eaux usées chargées de constituants résistants aux méthodes de biodégradation.
- en post-traitement pour réduire la toxicité aquatique **(Spikes et Straight, 1967)**.

L'oxydation chimique se révèle un procédé efficace de traitement des eaux usées. On distingue:

- les procédés classiques d'oxydation chimique.
- les procédés d'oxydation avancée.

Les procédés classiques d'oxydation chimique sont basés sur l'ajout d'un agent oxydant dans la solution à traiter. Les principaux agents oxydants sont:

- le chlore : représente un oxydant moyennement fort et est utilisé pour le traitement des eaux usées ou plutôt pour la désinfection comme l'ozone. En revanche, ils présentent l'inconvénient de produire des sous-produits halogénés cancérigènes pour l'homme;
- O<sub>2</sub>: il est considéré comme un oxydant modéré, le coût tolérable de ce procédé le rend fréquemment choisi;

## **Chapitre I**

### **Généralité sur la pollution par les colorants textiles**

- H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: il est considéré parmi les oxydants les plus appropriés et les plus recommandés pour une grande variété de procédés, utilisé avec ou sans catalyseur. Toutefois, l'utilisation de cet oxydant seul n'est pas efficace pour la plupart des produits organiques;

- O<sub>3</sub>: c'est un oxydant très fort qui a presque le même avantage que l'oxygène ou le peroxyde d'hydrogène. Le problème majeur lié à l'utilisation de cet oxydant est son instabilité, d'où la nécessité de production sur le site.

Il a été observé que l'oxydation chimique avec l'un de ces oxydants n'est pas toujours efficace pour le traitement des polluants organiques persistants. Dans ce cas, on fait appel aux procédés d'oxydation avancée.

L'ozone peut dégrader des polluants organiques et détruire des microbes (**Hsing et al, 2007**). Dans le procédé d'ozonation, les radicaux hydroxydes sont formés lors de la décomposition d'O<sub>3</sub> dans l'eau (**Dos Santos, 2005**).

L'ozone décolore rapidement les colorants solubles dans l'eau mais les colorants insolubles tels que : colorants de cuve et dispersés, réagissent plus lentement. De plus, les eaux résiduaires textiles contiennent plusieurs produits réfractaires en plus des colorants (exemple : surfactants) qui réagissent avec l'ozone, ce qui augmentera la demande en ozone. Il est donc conseillé de prétraiter l'effluent avant d'appliquer l'ozonation.

#### **1.9.3. Méthodes physiques et physico-chimiques :**

##### **➤ Filtration sur membrane:**

La filtration sur membrane pilotée par pression hydraulique se décline en microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration et osmose inverse. L'effluent passe à travers une membrane semi-perméable qui retient en amont les contaminants de taille supérieure au diamètre des pores, pour produire un perméat purifié et un concentré qui reçoit les impuretés organiques. (**Jacob et Taylor, 1996**).

Parmi les quatre types de procédés, la nanofiltration et l'osmose inverse sont les plus adaptés à la réduction partielle de la couleur et des petites molécules organiques, mais l'osmose inverse reste la plus répandue (**Kobyan et al, 2006**).

La nanofiltration permet de retenir les colorants solubles et ioniques tels que : les colorants acides, basiques, directs et réactifs (**Akbari et al, 2007**). La filtration avec de plus

## **Chapitre I**

### **Généralité sur la pollution par les colorants textiles**

grandes membranes telle que : l'ultrafiltration et la microfiltration est plutôt souhaitable pour l'élimination des colorants colloïdaux et de cuve, car le diamètre des pores est large.

La filtration sur membrane est une méthode rapide ne nécessitant pas de grands espaces. Cependant, les techniques membranaires présentent plusieurs inconvénients tels que : la diminution du flux et l'infection des membranes, nécessitant un nettoyage fréquent et un remplacement régulier des modules **(Zee, 2002)** par exemple, la plupart des membranes de nanofiltration sont à base de polyamides, ces derniers étant des polymères de fibres textiles, ils peuvent se colorer par la majorité des colorants lors du procédé de filtration, entraînant l'infection des membranes et la diminution du flux **(Akbari et al, 2007)**.

Un autre inconvénient important est la production de concentras d'effluents textiles qui nécessitent un traitement plus important ; par conséquent, les coûts capitaux de filtration sur membranes sont plutôt élevés **(Dos Santos, 2005)**.

#### ➤ **Adsorption:**

L'adsorption est un phénomène de surface consistant en la fixation de certains ions ou molécules du corps adsorbé sur les molécules du corps adsorbant **(Degrémont, 1978)**.

En fait, l'adsorption n'est pas uniforme sur toute la surface des particules. Elle se fait de façon préférentielle dans des endroits appelés « sites actifs », caractérisés par la présence de groupements fonctionnels susceptibles de réagir de façon plus ou moins réversible avec les molécules ou ions des corps adsorbés **(Degrémont, 1978)**.

Le charbon activé est l'adsorbant le plus communément utilisé pour la réduction de la couleur **(Gerçel et al, 2007)**, en raison de sa haute capacité d'adsorption (grande surface et structure poreuse des grains) mais son application n'est efficace que sur certaines catégories de colorants (cationiques, à mordants, colorants dispersés et de cuve) **(Hao et al., 2000)** et pour un type donne de carbone, dans une certaine gamme de pH et pour une concentration en impuretés relativement constante afin de prévenir un relargage dans l'effluent. Le charbon actif est cher, et sa réutilisation est parfois limitée par les pertes lors du procédé de régénération **(Oliveira et al, 2007)**, ceci a engendré la recherche d'autres adsorbants plus économiques utilisés alternativement pour le traitement des eaux colorées **(Ong et al, 2007)**.

## **Chapitre I**

### **Généralité sur la pollution par les colorants textiles**

Parmi les matériaux utilisés comme adsorbants nous pouvons citer: argiles (**Oliveira et al., 2002**), épiluchures d'orange (**Sivaraj et al., 2001**), sciure (**Özacar et Sengil, 2005**), coton (**Bouzaida et Rammah, 2002**), déchets de cuir (**Oliveira et al., 2007**), coque du riz (**Ong et al., 2007**), cendres (**Dinçeret et al., 2007**) etc. ...

Certains de ces adsorbants ont montré de grandes capacités d'élimination des colorants (en particulier les colorants dispersés) comparés au charbon actif. Cependant, l'application de l'adsorption pour traiter les effluents textiles est limitée, car la capacité des adsorbants à retenir les colorants dépend de la classe des colorants (**Zee, 2002**), de même que cette technique requiert des opérations postérieures onéreuses de régénération et de post traitement des déchets solides (**Zawlotzki, 2004**).

#### ➤ **Coagulation-floculation :**

Sous le terme de coagulation - floculation, on entend tous les processus physico-chimiques par lesquels des particules colloïdales ou des solides en suspension fines sont transformés par des flocculants chimiques en espèces plus visibles et séparables (les floccs). Les floccs formés sont séparés par décantation et filtration puis évacués. Les coagulants inorganiques tels que l'alun sont les plus satisfaisants pour la décoloration des effluents textiles contenant des colorants de cuve et au soufre, mais sont totalement inefficaces pour les colorants réactifs, azoïques, acides et basiques (**Barclayet Buckley, 2000**). Par ailleurs, la coagulation - floculation ne peut pas être utilisée pour les colorants fortement solubles dans l'eau. Enfin, d'importantes quantités de boue sont formées avec ce procédé : leur réutilisation reste la seule issue mais demande des investissements supplémentaires pour les régénérer.

#### ➤ **Electrocoagulation:**

C'est un procédé électrochimique d'oxydation indirect dans lequel un réactif rédox dissous existe ou est généré à partir de l'électrolyte ou à partir de la phase de l'électrode dans le but de participer à la réaction de coagulation. Durant le phénomène de la coagulation, le coagulant est en général ajouté sous forme de substances chimiques adéquates. Lors du procédé d'électrocoagulation, le coagulant est généré in situ par oxydation électrolytique d'une anode solide appropriée (**Mollah, 2001**)

## **Chapitre 1**

### **Généralité sur la pollution par les colorants textiles**

L'EC été développée pour minimiser les inconvénients des technologies conventionnelles de traitement des eaux usées textiles. (Picard et al 2000).

La déstabilisation des colloïdes se fait sous l'action du champ électrique induit entre les électrodes et par l'action des composés coagulants produits par oxydation de l'anode. Ces composés sont chargés électriquement ; ils déstabilisent le système colloïdal dans lequel des particules solides sont initialement présentes et forment des floccs de particules qui peuvent être facilement séparables par flottation. La flottation est améliorée par la formation des bulles de gaz durant l'électrolyse du solvant (eau) (Szpyrkowicz 2005).

#### **1.10. Conclusion:**

En effet, et d'après Cette étude bibliographique les rejets colorés posent un problème esthétique et sanitaire. Comme tous les composés organiques dangereux pour l'homme, les colorants synthétiques requièrent des traitements spécifiques. Mais les procédés classiques utilisés par les usines de traitements des eaux usées sont mal et parfois même pas adaptés à la dépollution de ces polluants. La majorité de ces procédés sont trop sélectifs sur les catégories de colorants à traiter et ne font que déplacer la pollution plutôt que la supprimer.

Cependant lorsqu'une approche semble prometteuse, les investissements ou les coûts de fonctionnement deviennent prohibitifs pour une application à grande échelle.

Les procédés classiques présentés dans ce chapitre ne répondent pas à cette attente car ils sont pour la plus part non destructifs. Mais des autres types de procédé: les procédés physico-chimiques et électrochimiques capables de décolorer la solution par destruction des groupes chromophores et réduire le taux de matière organique non biodégradable seront abordés dans le cadre de notre travail.

## **Chapitre 2**

### **Électrocoagulation**

#### **2.1 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 **(Persin et Rumeau, 1989)**.

#### **2.2. Origine et évolution du procédé d'électrocoagulation :**

Le traitement d'eau usée par EC a été pratiqué depuis le début du XX<sup>ième</sup> siècle, avec un succès et une popularité limités, dans une usine d'épuration à Londres construite en 1889 (pour l'épuration d'eau d'égout par mélange avec eau de mer et électrolyse) **(Mollah et al 2001)**.

En 1909, aux Etats-Unis, J.T. Harries, recevra un brevet pour l'épuration d'eau usée par électrolyse avec anodes sacrificatoires en aluminium et en fer **(Mattson et al 1995)**, décrivent un appareil des années 1940, le *coagulateur électronique*, qui dissout électrochimiquement l'aluminium (à partir de l'anode) en solution, réagissant celui-ci avec l'ion hydroxyle (à partir de la cathode) pour former l'hydroxyde d'aluminium. L'hydroxyde coagule et floccule les solides en suspension purifiant ainsi l'eau. Un processus similaire était utilisé en Grande Bretagne en 1956 **(Holt et al, 2005)** pour lequel des électrodes en fer étaient utilisées pour traiter l'eau de rivière.

## **Chapitre 2**

### **Électrocoagulation**

Dans la dernière décennie, cette technologie a été de plus en plus utilisée en Amérique du Sud et en Europe pour l'épuration d'eau usée industrielle contenant des métaux. Il a été également noté, en Amérique du Nord, que l'EC a été principalement utilisée pour l'épuration d'eau usée d'industrie de pulpe et papier, industrie minière, et de traitement des métaux. En plus, l'EC a été appliquée pour épurer une eau contenant des déchets de denrées alimentaires, déchets de pétrole, colorants, particules en suspension, déchets de polissage chimique et mécanique, matière organique à partir de lixiviation de terre de remplissage, effluents de détergents synthétiques, déchets de mine et solutions contenant des métaux lourds **(Holt et al, 2005)**.

#### **2.3. Définition de l'électrocoagulation :**

L'EC est une technique électrochimique au cours de laquelle les matières dissoutes et en suspension peuvent être efficacement éliminées d'une solution par électrolyse **(Phutdhawong et al, 2000)**. Ces dernières années, le procédé d'EC à échelle réduite a trouvé une place dans l'industrie du traitement de l'eau et épuration des eaux usées urbaines et industrielles, s'avérant être une technologie fiable et efficace **(Holt et al, 2002)**.

L'EC est une technologie qui résulte de l'interaction de trois technologies fondamentales qui sont : l'électrochimie, la coagulation et la floculation **(Holt et al, 2005)**. Elle permet de générer au cours du traitement d'épuration des cations  $Al^{3+}$  et/ou  $Fe^{2+}$  nécessaires à la formation d'ions complexes avec lesquels des polluants organiques sont adsorbés. Le passage du courant électrique dans l'eau permet la dissolution partielle et contrôlée des anodes consommables de fer ou d'aluminium **(Szpykowiec, 2005)**.

#### **2.4. Théorie de l'électrocoagulation :**

L'EC est un procédé complexe impliquant plusieurs phénomènes physiques et chimiques qui utilisent des électrodes consommables pour fournir des ions dans l'effluent. Trois étapes successives principales sont impliquées durant l'EC :

## **Chapitre 2**

### **Électrocoagulation**

- Formation des coagulants par oxydation électrolytique de l'électrode sacrificielle.
- Déstabilisation des contaminants, suspension particulaire et rupture des émulsions.
- Agrégation des phases déstabilisées pour former les floccs.

Le mécanisme de déstabilisation des contaminants, de la suspension particulaire et la rupture des émulsions peut être résumé comme suit :

- Compression de la couche diffuse autour des espèces chargées par les interactions avec les ions générés par l'oxydation de l'anode sacrificielle.
- Neutralisation de la charge des espèces ioniques présentes dans le rejet aqueux à l'encontre des ions produits par dissolution électrochimique de l'anode sacrificielle.

Ces ions réduisent la répulsion électrostatique entre les particules jusqu'à ce que les forces d'attraction de Van der Waals prédominent, causant ainsi la coagulation.

- Formation du flocc : le flocc formé suite à la coagulation crée les boues qui piègent et relient les particules colloïdales restant dans le milieu aqueux **(Mollah, et al 2001)**.

#### **2.5. Principe de l'électrocoagulation:**

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

## **Chapitre 2**

### **Électrocoagulation**

par un procédé physique classique (décantation, flottation, filtration). **La figure 2.1** présente le principe du procédé.

***Figure 2.1:** Schéma du principe de l'électrocoagulation*

L'EC consomme de l'énergie électrique essentiellement pour dissoudre l'anode sacrificielle. Les anodes et les cathodes utilisées peuvent avoir différentes configurations. Elles peuvent se présenter sous forme de plaques, de boules, 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. Les deux métaux communément utilisés sont le fer et l'aluminium **(Koby et al 2003)**.

#### **2.6. Réactions électrochimiques aux électrodes :**

Les électrodes les plus couramment utilisées en électrocoagulation, sont en aluminium ou en fer ; ces métaux possèdent des formes ioniques trivalentes. Il est nécessaire de bien connaître le comportement et les caractéristiques chimiques et électrochimiques de l'aluminium que nous avons utilisés dans notre travail.

Un courant passe à travers une électrode métallique générant les deux processus **(Holt et al 1999)**:

- Oxydant le métal (M) en son cation ( $M^{n+}$ ) selon :



- Simultanément, l'eau est réduite en gaz d'hydrogène et l'ion hydroxyle selon :



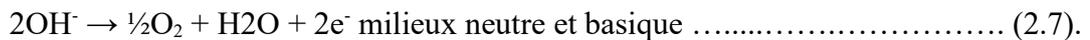
La dissolution électrolytique de l'anode d'aluminium produit l'espèce monomérique cationique telle que  $Al^{3+}$  et  $Al(OH)^{2+}$  à faible pH **(figure. 2.2)**, qui a des valeurs de pH convenables sont transformées au début en  $Al(OH)_{3(s)}$  et finalement polymérisées en  $Al_n(OH)_{3n}$  **(Mollah et al, 2001)**.

## Chapitre 2 Électrocoagulation

➤ **Anode:**

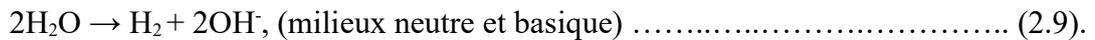


De plus, si la densité de courant est suffisante et si les conditions du milieu s'y prêtent, l'anode peut être également le siège d'une oxydation de l'eau **(Mollah et al 2001)**.



➤ **Cathode:**

Les dégagements de bulles d'hydrogène au niveau de la cathode sont dus aux réactions suivantes



Total:



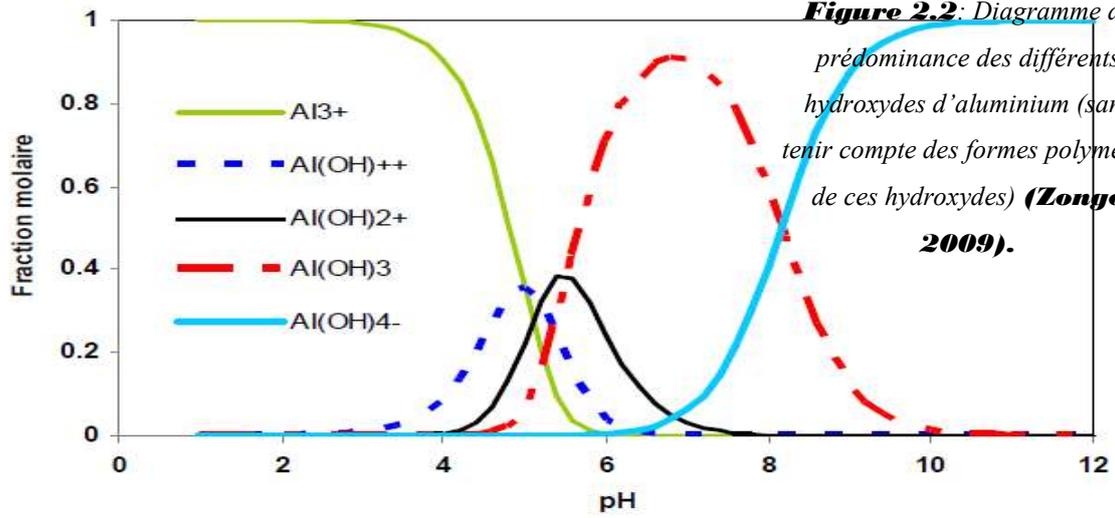
Cependant, une multitude de complexes anioniques et cationiques ont été trouvés **Ghribi, (2011)** :

Les monocomplexes:  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$

Les polycomplexes:  $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$ ,  $\text{Al}_2(\text{OH})_5^+$ ,  $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$ ,  $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$  **(Figure 2.2)**.

Les espèces amorphes et très peu solubles telles que  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$

## Chapitre 2 Électrocoagulation



## **Chapitre 2**

### **Électrocoagulation**

#### **2.7. Matériaux utilisés comme électrodes :**

Les électrodes les plus utilisées sont celles en fer et en aluminium. Cependant des essais ont été conduits sur d'autres types d'électrode. **Le Tableau 2.1**, illustre quelques couples d'anode/cathode qui sont utilisés en électrocoagulation.

**Tableau.2.1:** Matériaux d'électrodes utilisés en EC (Zongo ,2009).

<b>Electrodes utilisées</b>	<b>Références</b>
<b>Anode en plomb et cathode en acier inox</b>	<b>Vik et al. (1984)</b>
<b>Titane/ Platine et Ti/Pt/Ir</b>	<b>Garrote et al. (1995)</b>
<b>Fe/Fe</b>	<b>Hansen et al. (2006)</b>
<b>Fe/Al ou Al/Fe</b>	<b>Kobaya et al. (2006)</b>
<b>Ti/Acier</b>	<b>Acier Jordao et al. (1997)</b>
<b>Al/Al</b>	<b>(Holt, et al. 2005).</b>
<b>Al /Cu et Fe/Cu</b>	<b>Tsai et al. (1997)</b>
<b>Zn/Ni</b>	<b>Kliskic et al (1998)</b>

#### **2.8. Mode de connexion des électrodes :**

Les configurations monopolaires, bipolaires, ou combinées peuvent être sélectionnées, telles que schématisées à la Figure II-3. Dans un réacteur monopolaire, les cellules sont connectées en parallèle et ont ainsi la même chute de tension à travers chaque paire d'électrodes. A l'opposé, dans un réacteur bipolaire les cellules extérieures sont les seules à être connectées de telle sorte que les autres électrodes acquièrent une double polarité, chaque face étant opposée électriquement à l'électrode adjacente. Cette configuration offre l'avantage de nécessiter moins de puissance électrique et moins de connexions physiques. Finalement, des configurations combinées peuvent également être utilisées.

## **Chapitre 2**

### **Électrocoagulation**

**Figure 2.3 :** Configurations monopolaires, bipolaires et combinées dans des réacteurs électrochimiques. (a) monopolaire simple, (b) mixte : électrodes internes en série mais non reliées aux électrodes externes, (c) monopolaires à plusieurs électrodes, (d) bipolaire. **(Mollah et al, 2004).**

#### **2.9. Paramètres influençant l'électrocoagulation :**

Certains paramètres opérationnels tels que la densité de courant, conductivité, pH, temps d'électrolyse, agitation, température et le type (nature) d'électrode influencent le processus d'EC.

##### **2.9.1. Conductivité :**

Ce paramètre indique la capacité de l'eau à transporter le courant électrique ; sa valeur étant d'autant plus élevée que la teneur en ions de l'eau est forte **(Phutdhawong et al, 2000)**. Si elle est trop faible, la résistance au passage du courant est forte, la consommation énergétique est très importante et sa température peut alors fortement augmenter. Pour ces différentes raisons, par analogie avec les exploitations d'installation d'EC d'effluents industriels, le chlorure de sodium est souvent ajouté. Le problème de la conductivité constitue un inconvénient majeur au fonctionnement d'un procédé d'EC **(Holt ,2002)**.

Le choix du chlorure de sodium découle du fait que les ions chlorures réduisent de manière significative les effets indésirables d'autres anions, tels que  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  par exemple, en évitant la précipitation du carbonate de calcium contenu dans une eau calcaire, qui pourrait former une couche d'isolant sur la surface des électrodes et augmenter ainsi la résistance de la cellule électrochimique **(Holt et al ,2005)**.

##### **2.9.2. pH :**

Le pH est un facteur important influençant la performance du processus d'EC. Il détermine la spéciation d'ions métalliques et influence l'état d'autres espèces en solution et la solubilité de produits formes. Ainsi, il affecte le rendement global et l'efficacité de l'EC **(Holt, 1999)**.

## **Chapitre 2**

### **Électrocoagulation**

Le pH du milieu change pendant le processus, comme il était observé également par d'autres chercheurs, ce changement dépend du type du matériel d'électrode et du pH initial **(Koby et al, 2003)**.

#### **2.9.3. Température :**

L'efficacité du traitement par oxydation électrochimique des eaux contaminées dépend aussi de la température du milieu **(Trong, 1999)**. En général, la vitesse de la réaction chimique et ou, électrochimique augmente avec l'accroissement de la température du milieu. Cependant, le traitement à des températures élevées diminuera la vie des électrodes. En effet la plupart des anodes en métaux ne peuvent pas résister aux attaques des oxydants abondamment générés **(Demim, 2007)**.

#### **2.9.4. Agitation :**

L'agitation de la solution à traiter en «électrocoagulation »se fait par :

- Migration des ions sous l'effet du champ électrique.
- Diffusion sous l'effet des gradients de concentration localisés principalement au voisinage des électrodes.
- Convection sous l'effet de la circulation de l'électrolyse

#### **2.9.3. Densité de courant :**

La densité de courant  $i$  est le courant délivré à l'électrode divisé par l'aire active de l'électrode. Elle est considérée comme un paramètre critique dans l'EC. Elle détermine à la fois la vitesse de la dissolution métallique électrochimique dans l'eau et la densité de production électrolytique des bulles.

Les densités de courant élevées sont désirables pour le processus de séparation impliquant des cellules de flottation ou de larges bacs de lavage, alors que les densités de courant faibles sont convenables pour les électrocoagulateurs qui sont intégrés avec des filtres de charbon et de sable conventionnels **(Holt ,1999)**.

## **Chapitre 2**

### **Électrocoagulation**

#### **2.9.4. Nature des électrodes :**

Les électrodes constituent la partie la plus importante, et sont considérées comme le cœur de l'unité d'EC. La nature des électrodes, et en particulier celle des anodes, joue un rôle primordial sur l'efficacité et le rendement du procédé. Le matériau d'électrode détermine le cation introduit en solution. En effet, les plaques d'aluminium ou de fer sont les électrodes les plus utilisées en raison de leur bas coût, disponibilité et efficacité prouvée **(Holt, 1999)**.

#### **2.9.5. 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'effluents à traiter. En effet, les différents composés organiques ne réagissent pas tous de la même façon au passage du courant et peuvent entraîner des grandes variations dans les résultats obtenus.

La distance inter- électrodes 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. Il en est de même pour d'autres facteurs tels que l'état de surface des électrodes (lisse ou rugueuse).

#### **2.10. Avantages et inconvénients de l'EC :**

##### **2.10.1. Avantages de l'EC :**

L'EC nécessite un équipement simple avec un mode opératoire facile laissant suffisamment de latitude pour régler beaucoup de problèmes.

## **Chapitre 2**

### **Électrocoagulation**

Parmi les arguments en faveur de l'électrocoagulation on peut citer les suivants :

- l'EC permet une réduction remarquable de métaux, de MES et de plusieurs composés dissous tel que les nitrites, les sulfures, les cyanures, les sulfites, les chromates et les ions fluorures. et une réduction notable de DCO (**Laforest, 1999**).
- Concernant l'efficacité épuratoire du traitement, il est à noter qu'il est possible d'éliminer 60 à 80% de la charge polluante (**Rumeau, 1989**). Les odeurs et la couleur de l'effluent peuvent également être éliminées ce qui diminue énormément les besoins de traitements biologiques subséquents qui sont plus lents et coûteux (**Blaix, 2004**).
- Pas d'ajout de substances chimiques : même s'il semble nécessaire d'augmenter légèrement la salinité de l'effluent à traiter pour accroître la conductivité électrique de l'effluent, plusieurs études ont montré l'efficacité de l'EC sans aucune variation de conductivité initiale du rejet à traiter, ce qui évite d'autres formes de traitement en aval. Les travaux (**coll et d'Essadki, 2007**) et (**Damien, 1992**) ont confirmé cet avantage.
- coût de fonctionnement souvent plus faible que les stations classiques qui nécessitent l'ajout périodique de réactif (**Tsouris et al, 2001**).
- l'utilisation de l'EC permet de réduire le temps de traitement: ce procédé permet un grand gain en compacité des installations et une possibilité d'automatisation
- **Larue et Vorobiev (2003)** ont obtenu des boues plus denses et moins hydrophiles. Cela rend la décantation et la flottation plus aisée et diminue le volume des boues. Ces travaux ont montré une réduction du temps et des coûts de traitement des boues.
- **Kannan et coll. (2006)** et **Persin et Rumeau, (1989)** ont prouvé l'efficacité du procédé d'électrocoagulation pour des polluants colloïdaux très fins. Avec d'autres procédés tel que la coagulation chimique, ces polluants imposent des étapes de traitement plus lentes et des quantités de coagulant plus élevées.

## **Chapitre 2**

### **Électrocoagulation**

- **Persin et Rumeau (1989)** mentionnent l'importance du champ électrique entre les électrodes, qui conduit à la destruction de certaines souches de bactéries. En utilisant des électrodes en titane, **Patermarakis et coll. (1990)** ont confirmé cet effet bactéricide sans la formation de dérivés hypochloreux ou d'autres dérivés du chlore.
  
- La technique d'EC peut être utilisée facilement en milieu rural où l'électricité pourrait ne pas être disponible, puisqu'un panneau solaire relié à l'unité peut suffire pour mener à bien le procédé d'EC (**Mollah et al, 2001**).

## **Chapitre 2**

### **Électrocoagulation**

#### **2.10.2. Inconvénients de l'électrocoagulation**

- l'effluent doit avoir une conductivité élevée (**Laforest, 1999**).
- un film imperméable d'oxyde sur la cathode peut être formé, ce qui conduit à une perte d'efficacité de l'unité d'EC (**Mollah, 2001**).
- lorsque des électrodes sacrificielles sont utilisées, celles-ci sont dissoutes par suite d'oxydation, ce qui nécessite le remplacement régulier de ces électrodes (**Mollah, 2001**).
- L'usage d'électricité peut être coûteux dans certains endroits. L'utilisation de l'énergie électrique, assez coûteuse, et le coût des électrodes consommables constituent un désavantage pour le procédé d'EC (**Zongo, 2009**).

#### **2.11. Utilisation de l'électrocoagulation :**

L'EC a largement été appliquée avec succès par différents auteurs chercheurs pour le traitement d'effluents de natures diverses, et notamment en Algérie. Ainsi, Mameri N. et al. ont étudié l'élimination des ions fluorures dans les eaux du Sud Algérien par électrocoagulation bipolaire en utilisant des électrodes en aluminium (**Mameri et al, 1998**). Ils sont arrivés à diminuer la concentration en fluorures de 6,0 mg.l<sup>-1</sup> à moins de 0,8 mg.l<sup>-1</sup> enregistrant ainsi un taux d'abattement de l'ordre de 90 %.

De même, l'EC a été appliquée avec succès sur une suite large gamme de polluants allant de couleurs : couleurs à partir de solution contenant des colorants industriels (**Aoudj et al, 2010**) ; solides en suspension (**Ghernaout et al, 2008**) ; émulsion d'huile de coupe Algérienne (**Aoudjehane et al, 2010**).

L'EC a été utilisée pour l'élimination des nitrates (**Savaş Koparal, 2002**) et des phosphates (**Irdemez ,2006**) retrouvés dans les eaux de surface et le sol, surtout dans

## **Chapitre 2**

### **Électrocoagulation**

les zones où l'agriculture est la principale industrie, sachant qu'ils sont responsables d'un problème majeur qui est l'eutrophisation des eaux de surface.

Le traitement de l'eau polluée par les rejets d'une industrie de raffinage mécanique et chimique, caractérisée par une teneur élevée en matières en suspensions, une DCO supérieure à 500 mg.L<sup>-1</sup>, une concentration en cuivre de l'ordre de 100 mg/l, a permis d'atteindre 99 % d'élimination du cuivre et 75 % de DCO par électrocoagulation en utilisant des électrodes en fer et en aluminium **(Chen et Shengn 2003)**.

Le procédé d'EC a été utilisé pour le traitement de solutions colorées par différentes substances telles que le bleu de méthylène et le jaune éosine **(Golder et al, 2005)**.

Kobya M. et al. ont traité par EC des rejets d'usine de traitement de pommes de terre très chargés en composés organiques incluant des carbohydrates, de l'amidon, des protéines, des vitamines, des pectines et des sucres qui sont responsables d'une grande DCO, DBO et de matières en suspension **(Kobya, 2006)**.

Les résultats obtenus suite à l'élimination de la lignine et du phénol des effluents de papeteries par EC ont prouvé que celle-ci pouvait être une alternative efficace pour le traitement de ce genre d'effluents **(Ugurlu, 2007)**. Bennajah M. Essadki A.H., et al ont appliqué également l'électrocoagulation/flottation dans un réacteur en boucle externe à lit fluidisé pour décolorer les eaux usées de l'industrie textile. **(Essadki, 2008)**.

#### **2.12. Décoloration des solutions synthétiques par l'électrocoagulation :**

L'application de l'EC pour le traitement des effluents textiles est fortement recommandée pour deux raisons: Premièrement, ce procédé est efficace pour le traitement des différents rejets liquides contenant des niveaux élevés de divers types de polluants (organique,

## **Chapitre 2**

### **Électrocoagulation**

minéral, des métaux lourds, et des colorants...). Deuxièmement, l'EC est connue pour son efficacité à la décoloration et la désinfection.

En effet, plusieurs chercheurs ont lancé des projets de recherches sur la décoloration des effluents synthétiques où les solutions ont été préparées avec un colorant spécifique, selon **(Martinez-Huitle et Brillas 2009)**. Dans la plupart des cas, chaque étude est concentrée sur l'étude de la décoloration d'un seul type de colorant dans la solution ; où les différents paramètres d'EC ont été optimisés, à savoir, le pH, la densité de courant, la distance inter-électrodes. Des résultats très satisfaisants sont habituellement rapportés, un taux d'élimination de couleur s'étendant entre 98 et 100% dans la plupart des cas.

Ainsi, **(Ayhan et al 2009)** ont étudié la décoloration d'un effluent synthétique contenant le C.I. réactif noir 5 dans un réacteur en batch avec une distance inter électrode de 2,5 cm. Ils ont obtenu un taux de décoloration de 98,8% dans les conditions opératoires suivantes: une concentration initiale de 100 mg/L, température ambiante, électrode en fer, pH initial 5, avec une densité de courant de 4,575 mA cm<sup>-2</sup> et en présence de 3 g/L de NaCl.

Plusieurs autre études de décoloration par l'EC ont été effectués sur différents colorants à savoir ; la violette en cristal **(Durango-Usuga 2010)** de l'orange II **(Daneshvar 2003)** et C.I. rouge acides 14 **(Aleboyeh, et al 2008)**.

Les auteurs ont rapporté que souvent le pH initial optimal est près de 7, tandis que la période du traitement et l'intensité du courant sont liées ensemble. La quantité de coagulant électro généré, varie réellement avec l'intégrale du courant avec le temps. **Daneshvar et al** , ont obtenu l'élimination de couleur de 99% de la solution acide du jaune 23 de C.I., mais une élimination de la DCO de 69% seulement. Ce résultat prouve

## **Chapitre 2**

### **Électrocoagulation**

que l'absorbance des colorants n'est pas suffisante pour estimer l'efficacité du traitement **(Bellakhal et Zaied, 2009)**.

Une étude très intéressante sur l'effet des auxiliaires de colorant a été effectuée par **(Kabdasi et al 2009)** en traitant par l'EC un effluent synthétique composé de trois colorants (Réactif rouge CI, réactif jaune 145 et le réactif bleu 221) avec l'ajout de NaCl, de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ou d'acide polycarboxylique. Les résultats montrent des taux acceptables de l'élimination des colorants et de la DCO particulièrement avec NaCl et des électrodes en aluminium.

#### **2.12 Application de l'électrocoagulation à l'échelle industrielle :**

Il y a tout de même quelques compagnies qui vantent les résultats obtenus à l'aide de cette technologie. C'est le cas entre autre de la compagnie Eco-Via®LLC ( compagnie issue de la fusion QI Quantum Ionis Inc .et Vantage Technologie, LLC et utilisant les cellules de Powell Water Systèmes Inc..) qui a développé une série d'appareils d'électrocoagulation pouvant traiter de 1.5 à 2500 gallons par minute (gpm) (de 0.34 à 568 m<sup>3</sup>/h) et pouvant ainsi s'adapter aux besoins précis des compagnies (Eco-Via® LLC, 2006 ; N.E.A.T. Environnement <sup>TM</sup> Inc .2006 ;powell Water Systems Inc..2006). **La Figure 2.4** montre d'ailleurs un exemple de cellule d'une capacité de traitement d'eau usée de 30 gpm (6.8 m<sup>3</sup>/h).

**Figure 2.4:** Cellule Powell Water Systems Inc. (Powell Water Systems Ins.2006)

Les électrodes utilisées dans ces cellules peuvent être composées d'aluminium ou de fer et selon le manuel technique en ligne (N.E.A.T. Environnement <sup>TM</sup> Inc., 2006) celles-ci sont distantes de 1/8 de pouce (0.32 cm) afin d'empêcher le colmatage tout en permettant d'imposer une tension raisonnable. Les valeurs énergétiques indiquées dans la description des appareils sont d'environ 3 V et de 0.375 A par pouce carré (équivalent à 0.47 V/cm<sup>2</sup>et

## **Chapitre 2**

### **Électrocoagulation**

0.06 A/cm<sup>2</sup>) afin de profiter au maximum de l'électrocoagulation qui se produit en même temps que l'électrocoagulation, l'entrée de l'eau brute se fait dans le même sens que le dégagement gazeux afin de ne pas former une couche isolante (gazeuse) sur la paroi active des électrodes. Pour ce qui est la source de courant nécessaire, les cellules sont construites de manière à passer directement du courant AC au courant DC ce qui diminue l'espace nécessaire lors de l'installation (aucun transformateur nécessaire).

Toujours selon le manuel technique, ce type de cellule a déjà été utilisé pour le traitement de plusieurs type d'eaux (ex : eaux issues des usines de textiles, de placage de métaux, d'abattoirs, de buanderies, d'eaux municipales, etc.)

Kaselco est une compagnie qui compte de nombreuses années à son actif dans le traitement des eaux usées. Selon les informations provenant de son site Internet (Kasper Corporation, 2006). kaselco précise que le procédé permet de traiter des eaux chargées en métaux lourds, en émulsion huileuses, en solides dissous, en DBO, en DCO et autres polluants. Les électrodes qui peuvent être utilisées sont en acier ou en aluminium selon les besoins. La Figure 10 présente un exemple de cellule de cette compagnie

**Figure 2.5** : Cellule Kaselco (Kaselco Corporation, 2006)

Kaselco, tout comme la compagnie Eco-Via®LLC, indique que le matériau choisi pour la fabrication des électrodes est spécifique pour un type d'application et que les besoins doivent être bien évalués en laboratoire avant d'installer ce type d'appareil sans une étude approfondie des paramètres opératoires. Par contre, les performances attendues par ce type de traitement sont présentées au **Tableau 2.2**.

## Chapitre 2

### Électrocoagulation

**Tableau 2.2** : Résultat obtenus lors de l'utilisation de la cellule de Kaselco (**Kasper Corporation, 2006**)

Contaminants	Conc.initiale (mg/L)	Conc.finale (mg/L)
Chrome total	105.0	0.022
cuivre	79.0	0.05
Dureté, magnésium	10	0.0
Nickel	37.5	0.05
phosphate	175.5	0.40
DBO	39 900	5 080
DCO	53 300	7 320

Kaselco indique que les performances de l'électrocoagulation sur certaines eaux sont meilleures que dans le cas de traitement par coagulation chimique. De plus, les couts associés au traitement par électrocoagulation semblent également moins élevés que dans le cas du traitement chimique.

Plusieurs compagnies de placage et de bases militaires utilisent des cellules d'électrocoagulation Kaselco aux Etats-Unis de façon permanente comme par exemple : Gull Industries, Houston, Texas (nickel, chrome), Randolph Air Force Base (chrome).

A la lumière des informations présentées précédemment. Il s'avère que les performances énoncées par les vendeurs de systèmes de traitement des eaux par électrocoagulation semblent très intéressantes. (**Mélanie Asselin 2007**).

#### **2.13. Coût de l'électrocoagulation :**

**Rodriguez et al.** Ont fait une étude technique-économique entre l'électrocoagulation et la précipitation chimique ils ont conclu que l'EC est une méthode moins coûteuse que la précipitation chimique (**tableau 2.3**).

## Chapitre 2

### Électrocoagulation

**Tableau 2.3:** Comparaison entre l'EC et l'PC pour l'élimination des métaux lourds à partir d'eau usée industrielle

Paramètres	Précipitation Chimique	Electrocoagulation
Débit introduit	12.5 L/h	12.5 L/h
capacité annuel	110 m <sup>3</sup> /ans	110 m <sup>3</sup> /ans
Matériel utilisé	Hydroxyde de sodium (NaOH)	plaques d'Aluminium (Al)
Coût de matériel	0.25 €/L (NaOH-1M)	4 €/kg (plaques-Al)
Matériel utilisé / m <sup>3</sup>	40 L (NaOH-1M) / m <sup>3</sup>	1 kg (Al) / m <sup>3</sup>
Coût de matériel/ m <sup>3</sup>	10 €/m <sup>3</sup>	4 €/m <sup>3</sup>
Coût de matériel annuel	1,100 €/ans	440 €/ans
Besoin d'énergie	60 Wh (agitateur, pompe)	125 Wh (réacteur-EC)
Besoin d'énergie / m <sup>3</sup>	4.8 kWh/m <sup>3</sup>	10 kWh/m <sup>3</sup>
Coût annuel d'énergie	106 €/ans (0.2 €/kWh)	220 €/ans (0.2 €/kWh)
Coût annuel de traitement	1,206 €/ans	660 €/ans
Coût de traitement / m <sup>3</sup>	11 €/m <sup>3</sup>	6 €/m <sup>3</sup>

### **Conclusion :**

L'EC est une technique électrochimique au cours de laquelle les matières dissoutes et en suspension peuvent être efficacement éliminées d'une solution par électrolyse. Ces dernières années, le procédé d'EC à échelle réduite a trouvé une place dans l'industrie du traitement de l'eau et épuration des eaux usées urbaines et industrielles, s'avérant être une technologie fiable et efficace.

## **Chapitre 2**

### **Électrocoagulation**

La production de boues, est beaucoup moins importante que celles produites par le processus classique de coagulation.

Suite à cette étude bibliographique, il s'avère que l'électrocoagulation a été développée pour minimiser les inconvénients des technologies conventionnelles de traitement des eaux usées textiles.

## **Chapitre03**

### **Coagulation – floculation**

#### **3.1. Introduction :**

La turbidité et la couleur dans les eaux brutes sont principalement causées par des particules très fines, 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. Puisque leur concentration est très stable, ces particules n'ont pas tendance à s'accrocher les unes aux autres.

Pour éliminer ces particules, on a recours aux procédés de coagulation et de floculation .La coagulation a pour but principal de déstabiliser les particules en suspension. En pratique, ce procédé est caractérisé par l'injection et la dispersion rapide des produits chimiques (coagulant).

La floculation a pour objectif de favoriser à l'aide d'un mélange lent, les contacts entre les particules déstabilisées .Ces particules s'agglutinent pour former un floc qui est facilement éliminé par les procédés de décantation et de filtration.

#### **3.2. Les particules mises en jeu : Les colloïdes :**

Les matières existantes dans l'eau peuvent se présenter sous les trois états suivants :

- Etat de suspension qui regroupe les plus grosses particules.
- Etat colloïdal.
- Etat dissous des sels minéraux et des molécules organiques.

Cette classification résulte de la taille des particules. Les colloïdes présentent un diamètre compris entre 1  $\mu\text{m}$  et 1 nm. Ils possèdent deux autres caractéristiques très importantes. Leur rapport surface / volume leur confère des propriétés d'adsorption des ions présentes dans l'eau .Ce phénomène explique en partie l'existence de charges électriques à leur surface. Ces charges, souvent négatives, engendrent des forces de répulsion intercolloïdales. Celles-ci permettent d'expliquer la grande stabilité de ces particules mises en solution. Leur densité, qui peut atteindre 2.5, ne modifie pas la valeur de leur vitesse de décantation.

## **Chapitre03**

### **Coagulation - flocculation**

L'origine des colloïdes est très diverse .On peut citer l'érosion des sols, la dissolution des substances minérales, la décomposition des matières organiques, le déversement des eaux résiduaire urbaines et industrielles ainsi que les déchets agricoles **(Cardot 2002)**.

## **Chapitre03**

### **Coagulation – floculation**

#### **3.3. Affinité de particules colloïdales pour l'eau :**

Les particules colloïdales sont classées en deux catégories suivant leur comportement vis-à-vis de l'eau.

##### **3.3.1. Les Particules hydrophiles :**

Les particules hydrophiles présentent une grande affinité avec l'eau. Ces particules sont entourées par une enveloppe de molécules d'eau fixées par des liaisons physico-chimiques à certains groupements de la matière tels que  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{NH}_2$  ou  $\text{OH}$ .

Les particules hydrophiles sont le plus souvent de nature organique, parmi les substances de cette nature, on peut citer les protéines, les savons, les détergents et la matière organique naturelle qui constitue la principale source des eaux de surface.

Les colloïdes hydrophiles sont plus difficiles à déstabiliser que les solutions hydrophobes, car il faut agir d'abord sur l'eau qui les entoure c'est-à-dire les dissolvater pour permettre leur agglomération.

##### **3.2.2. Les particules hydrophobes :**

Les particules hydrophobes n'ont aucune affinité pour l'eau. Leur stabilité est due à la charge électrique que portent ces particules qui engendre une répulsion mutuelle empêchant toute agglomération.

Ce sont en général des particules minérales telle que la silice, les argiles, qui sont la principale cause de la turbidité des eaux brutes. **(Aouabed 2009)**.

#### **3.4. Structure des colloïdes :**

Les colloïdes sont généralement chargés négativement (**Figure 3.1**). Afin de neutraliser cette charge négative de surface, des ions positifs présents dans l'eau brute ou ajoutés sont attirés et forment une couche autour du colloïde. Diverses théories expliquent le phénomène (**Bensadok, 2007**).

- Helmholtz : Selon cette théorie, la totalité de la surface du colloïde est recouverte par les ions positifs assurant ainsi une électroneutralité.
- Gouy-Chapman : La couche d'ions positifs est inégalement répartie autour du

## Chapitre 03

### Coagulation - floculation

colloïde ; la neutralité s'obtient à plus grande distance.

- Stern combine les deux et arrive à la neutralisation des colloïdes par une double couche.

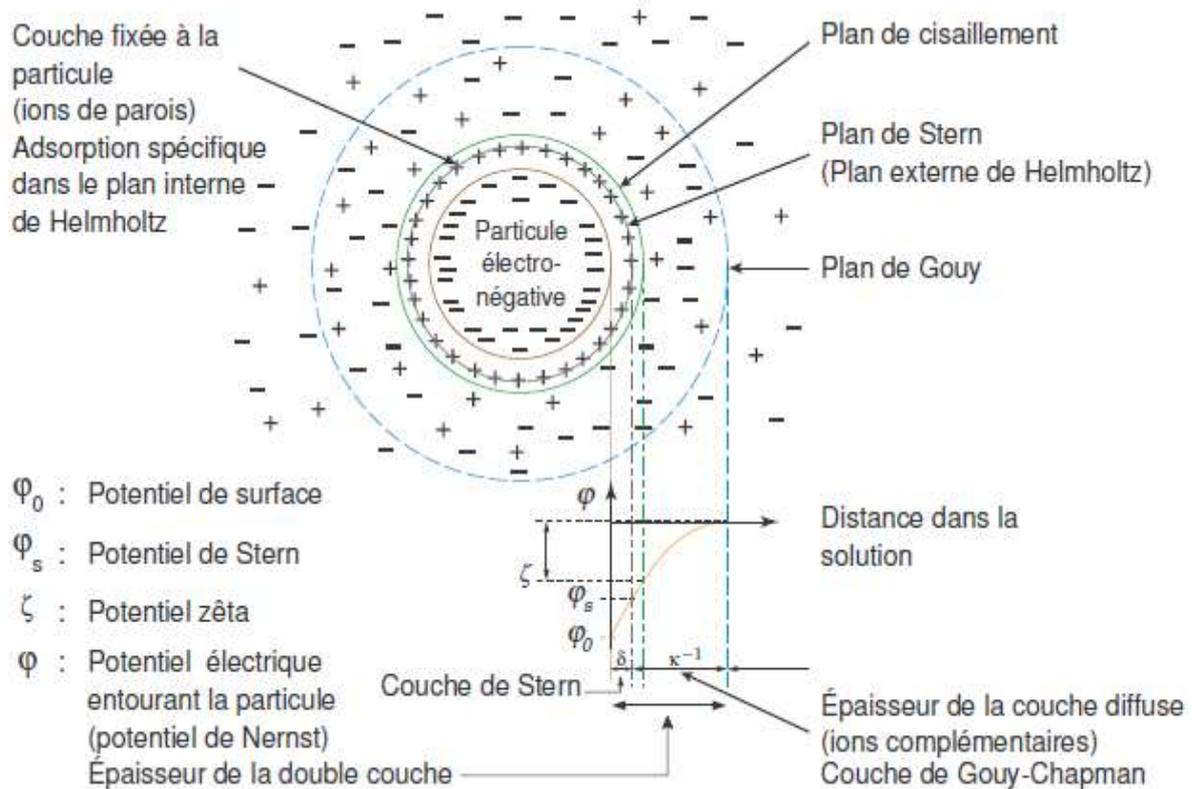


Figure 3.1 : Distribution des charges et du potentiel autour d'une particule chargée (Godart 2000).

Un colloïde se caractérise par deux potentiels:

- ❖ Potentiel thermodynamique ou potentiel de Nernst ; Le potentiel thermodynamique est présente à la surface même du colloïde mais est malheureusement non mesurable par des méthodes simples.
- ❖ Potentiel zêta ou potentiel électrocinétique.

#### 3.5. Potentiel Zêta :

Le potentiel qui existe entre la surface délimitant l'entité mobile et la surface extérieure de la couche diffuse, s'appelle potentiel zêta.

## **Chapitre 03**

### **Coagulation – floculation**

Le potentiel zêta est responsable du comportement électrocinétique de la particule colloïdale dû à la charge effective de l'ensemble particule – double couche. Quand la charge effective diminue le potentiel zêta et la stabilité diminuent (**Edeline 1985**).

Un appareil de mesure directe du potentiel existe est appelé zêtamètre.

#### **3.5. La coagulation- floculation :**

La coagulation - floculation est un procédé physico-chimique visant la déstabilisation et l'agglomération des particules colloïdales présentes dans l'eau.

##### **3.5.1. La coagulation :**

Le mot « coagulation » vient du latin "coagulare" qui signifie "agglomérer". La coagulation résulte de l'addition de réactifs chimiques dans des dispersions aqueuses, afin d'assembler en agrégats plus gros, les fines particules dispersées.

La charge électrique et la couche d'eau qui entourent les particules hydrophiles a tendent à éloigner les particules les unes des autres et, par conséquent, à les stabiliser dans la solution.

Le but principale de la coagulation est de déstabiliser ces particules pour favoriser leur agglomération (**Aouabed 2009**).

##### **3.5.2. Mécanismes de déstabilisation des suspensions colloïdales par la coagulation :**

Les colloïdes sont, comme souligné précédemment, chargés négativement. Etant de même signe, deux particules colloïdales se repoussent. Elles sont soumises à deux types de force de direction opposée :

- Force d'attraction gravitationnelle de Van der Waals (FA), liée à la surface spécifique et à la masse des colloïdes ainsi qu'à la nature du milieu.
- Force de répulsion électrostatique (FR), liée aux charges superficielles des colloïdes et donc à leur potentiel zêta (pZ).

Si  $FA > FR$ , l'agrégation se produit

Si  $FR > FA$ , il y a principalement la répulsion entre les particules colloïdales

## Chapitre 03

### Coagulation – floculation

L'énergie totale d'interaction ( $E$ ) entre les particules colloïdales est la somme de l'énergie répulsive  $E_R$  due au potentiel électrique et l'énergie attractive  $E_A$  (figure 3.2).  $E$  et  $F$  sont des grandeurs proportionnelles.

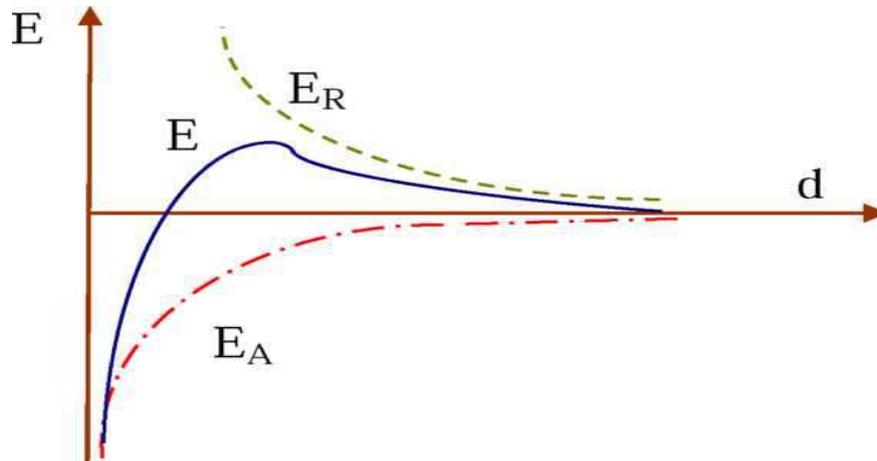


Figure 3.2 : Energie d'interaction entre deux particules en fonction de la distance depuis la surface de la particule (Bensadok, 2007).

#### 3.5.3. Les étapes de l'agrégation :

##### a) Compression de la double couche :

Lorsqu'on rapproche deux particules colloïdales semblables, leurs couches diffuses interagissent et génèrent une force de répulsion (potentiel de répulsion). Les particules dont l'énergie cinétique est suffisante pour surmonter le potentiel de répulsion s'agglomèrent alors que les autres particules demeurent dispersées.

Afin de favoriser l'agglomération de ces particules, on peut soit augmenter leur énergie cinétique, soit réduire le potentiel de répulsion entre elles.

Pour réduire le potentiel des répulsions entre les particules ; on peut augmenter leur force ionique de la solution.

On a observé que l'addition de charges opposées à la charge initiale était d'autant plus efficace que la charge de ces ions était élevée.

Ainsi les particules de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Al}^{3+}$  requises pour déstabiliser une suspension de particules colloïdales négatives variaient approximativement dans des rapports 1, 10, 100. Il existe par ailleurs un potentiel d'attraction, ou forces d'attraction, appelées

## **Chapitre 03**

### **Coagulation – floculation**

forces de Van Der Waals, dépendant des atomes qui constituent les particules et de la densité de ces derniers.

En augmentant la force ionique d'une eau, on comprime la couche diffuse vers la particule. Dans la zone située près de la particule, les forces de Van Der Waals, sont alors ainsi importantes pour neutraliser la force de répulsion (**Haase et Jolicœur; 1989**).

Toutefois, la théorie de la compression de la double couche n'explique pas à elle seuls tous les phénomènes observés lors de la déstabilisation des particules colloïdales.

#### **b) Adsorption et neutralisation des charges :**

Les produits adsorbés sont soit les ions eux-mêmes du coagulant, soit leurs produits de réaction avec l'eau. La partie non absorbées du réactif contribue néanmoins à la floculation par effet électrostatique.

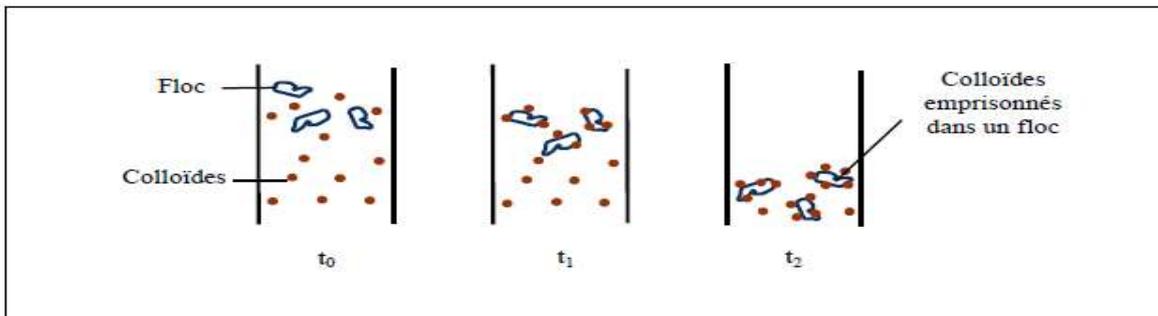
La dose active de coagulant est très étroite et obéit à une relation stoechiométrique. Tout excès de réactif mène à la restabilisation de la suspension. C'est donc la surface développées par les particules qui compte, et la nature même de l'adsorption fait que la dose optimale ne coïncide pas nécessairement avec un potentiel zêta égale à zéro. (**Mohtadi et Rau 1973**).

#### **c) Emprisonnement des particules dans un précipité.**

Pour déstabiliser les particules colloïdales, on peut en outre les emprisonner dans des floes. Lorsqu'on ajoute en quantité suffisante des coagulants, habituellement des sels des métaux trivalents,  $Al_2(SO_4)_3$ , ou  $FeCl_3$ . On obtient un précipité appelé floe. Lorsque le pH de l'eau est situé dans une plage acide ou neutre. Le floe, constituée de molécules de  $Al(OH)_3$  ou de  $Fe(OH)_3$ , possède habituellement une charge positive. La présence de certains anions et de particule colloïdale accélère la formation du précipité.

Les particules colloïdales jouent le rôle de noyaux dans la formation du floe; ce phénomène peut entraîner une relation inverse entre la turbidité et la quantité de coagulant requise. En d'autres mots une concentration importante de particules en suspension peut entraîner une diminution de la quantité de coagulant nécessaire, (**Figure 3.3**).

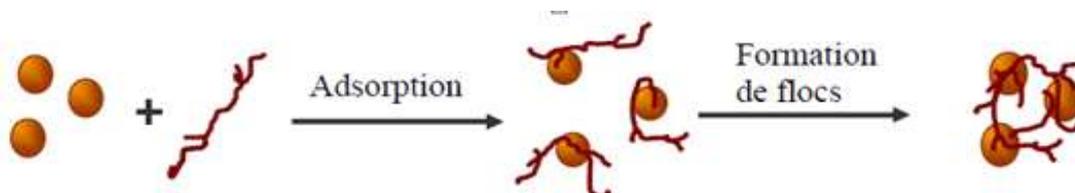
## Chapitre 03 Coagulation - floculation



*Figure 3.3 : Emprisonnement des particules dans les flocs pendant la décantation (Bensadok, 2007)*

### d) Adsorption et pontage.

Les molécules de polymères constituées de longues chaînes, contenant des groupements chimiques qui peuvent adsorber des particules colloïdales. La molécule de polymère peut ainsi adsorber une particule colloïdale à une de ses extrémités alors que d'autres sites sont libres pour adsorber d'autres particules. On dit alors que les molécules de polymères forment des « ponts » entre les particules (figure 3.4). Il peut y avoir réstabilisation de la suspension, réstabilisation 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-molécules de polymère ne peut plus par la suite adsorber d'autres particules colloïdales, ce qui est contraire au but recherché (Edeline 1985).



*Figure 3.4 : Adsorption et pontage à l'aide de polymères (Bensadok, 2007)*

### 3.5.4. Les différents types de coagulant.

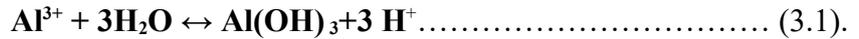
Les coagulants sont des produits qui neutralisent les charges de surface des matières colloïdales. Les coagulants principalement utilisés pour déstabiliser les particules colloïdales sont à base de sels d'Aluminium ou de fer hydrolysable au pH voisin de la neutralité.

#### a) Sels d'aluminium :

## **Chapitre 03**

### **Coagulation – flocculation**

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



#### **a-1)- Le sulfate d'aluminium.**

Le sulfate d'aluminium est actuellement le coagulant le plus utilisée, c'est un sel basique, hydraté, commercialisé sous forme solide  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ . Ce sel se dissocie dans l'eau en ion aluminium et sulfates, conduisent à des réactions chimiques avec les ions hydroxydes de l'eau. En effet, l'ion aluminium réagit sur l'eau pour former l'hydroxyde d'aluminium qui précipite sous forme d'un flocc volumineux **(Rakotonarivo et al, 1989)**.

#### **a-2)- Les polymères d'aluminium :**

Les polymères d'aluminium susceptibles d'être utilisés comme coagulant à la place du sulfate d'aluminium ont été développées depuis des trentaines d'années. Les produits initiaux étaient les polychlorures (basiques) d'aluminium (PCA ou PCBA).

Ils peuvent être obtenues par la neutralisation partielle d'une solution concentrée de  $AlCl_3$  avec une base dans des conditions strictes (la méthode basique), ou par la dissociation du métal Al dans l'acide chlorhydrique ; les réactions de dissociation, d'hydrolyse et de polymérisation sont effectuées simultanément ( la méthode acide) La formule générale de ces produits est :



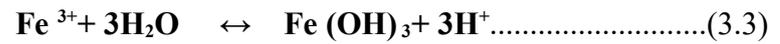
#### **d) Les sels de fer :**

Commercialisés en traitement des eaux principalement le chlorure ferrique, le chlorosulfate ferrique et le sulfate ferreux. Ce sont des produits de commodité et contrairement aux sels d'aluminium, il n'existe pas de sels polymérisés à haut degré de basicité. Les sels ferrique, plus charges, ont un meilleur pouvoir coagulant que les sels ferreux. **(Mottot, 2000)**.

### **Chapitre 03**

## **Coagulation - flocculation**

Le principe de la réaction est le même que pour les sels d'aluminium avec :



L'ion ferrique peut induire une coloration de l'eau traitée.

## Chapitre 03

### Coagulation – floculation

#### 3.5.5. Facteurs influençant la coagulation :

Facteurs liée à la qualité de l'eau	Facteurs liée au traitement de l'eau
<ul style="list-style-type: none"> <li>⌈ · pH.</li> <li>⌋ · Alcalinité.</li> <li>⌌ · Couleur et présence de matière organique.</li> <li>⌍ · Température.</li> <li>⌎ · Composition de l'eau (force ionique).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⌈ · Nature et dosage du coagulant.</li> <li>⌋ · Mode d'injection et donc vitesse.</li> <li>⌌ · D'agitation du mélange.</li> <li>⌍ · Infrastructure existantes.</li> </ul>

#### 3.6. La floculation :

Après avoir été déstabilisées par le coagulant, les particules colloïdales s'agglomèrent lorsqu'elles entrent en contact ; C'est la floculation . Le floc ainsi formé ,peut décanter, flotter ou être filtrer ( coagulation sur filtre), le procédé de rétention le plus adapté sera choisi.

La floculation peut être scindées en deux phases :

-*Floculation péricinétique* : Elle est liée à la diffusion brownienne ( Agitation thermique).

-*Floculation orthocinétique* : Elle est liée à l'énergie dissipée . L'efficacité de cette floculation permet d'obtenir un floc volumineux séparable. La mise en contact des particules ou la diffusion du réactif est effectuée artificiellement par une agitation modérées du milieu quand on procède à la floculation , provoquant des différences de vitesse entre les particules ce qui accroît leur rencontre. ( **Degremont 1989**).

##### 3.6.1. Les différents types de floculants :

On peut distinguer les floculants par leur nature (minérale ou organique), leur origine (synthétique ou naturelle) et le signe de leur charge électrique (anionique, cationique, non ionique). Parmi les floculants, on peut citer : les floculants minéraux et les floculants organiques.

## **Chapitre03**

### **Coagulation – floculation**

- La silice activée : c'est le premier floculant employé ; C'est encore actuellement celui qui peut donner les meilleurs résultats, principalement si on l'utilise conjointement avec du sulfate d'aluminium.

- Les autres floculants minéraux : on peut citer, certaines argiles, le carbonate de calcium précipité, le charbon actif en poudre, le sable fin... etc.

- Les floculants organiques : certains sont fabriqués à partir de produits naturels : ce sont les alginates (extraits d'algues), les amidons (extraits de graines végétales), certains dérivés de la cellulose, certaines gommés etc. D'autres floculants sont entièrement synthétisés. On distingue d'une part, les polyacrylamides à longue chaîne et à haute masse molaire, et d'autre part, les polyamines qui ont en général des chaînes plus courtes et de masses molaires plus basses.

Récemment, des polymères organiques développés à cet effet se sont avérés très efficaces en tant que coagulants des colorants même pour les colorants réactifs, avec une faible production de boues. Cependant, la majorité des polymères utilisés pour l'élimination des colorants sont cationiques (exemple : le colfloc, son effet est de coaguler les composés aromatiques, il est spécifique pour les colorants réactifs) ; et peuvent être très toxiques pour la vie aquatique à de faibles concentrations (moins de  $1 \text{ mg.l}^{-1}$ ) (**Zee,2002**).

#### **3.7. Mise en œuvre :**

Du point de vue de la mise en œuvre de la coagulation-floculation, deux paramètres nécessitent une attention particulière lors du dimensionnement d'un traitement de coagulation-floculation : les quantités de réactifs à ajouter et les vitesses d'agitation du milieu réactionnel.

Ces quatre valeurs (une quantité de réactif et sa vitesse d'agitation associée pour la coagulation puis une quantité de réactif et sa vitesse d'agitation associée pour la floculation) sont à déterminer en fonction de l'eau à traiter. Et dans ce domaine, il n'existe pas de règle ou de formule de dimensionnement : ces valeurs ne peuvent être déterminées que de façon empirique, par tâtonnements et par des essais sur échantillons en laboratoire.

## Chapitre 03

### Coagulation - floculation



*Figure 3.5: Photo du jar test*

#### **3.8. Le jar test:**

La détermination de ces grandeurs en laboratoire est réalisée par ce qu'on appelle le jar test (figure 3.5). Il consiste en une rangée de béchers alignés sous un appareillage permettant de tous les agiter à la même vitesse. Les différents béchers ont reçu une dose différente de réactifs et à la fin de l'expérimentation, on détermine quels sont les couples quantités de réactifs / vitesse et temps d'agitation qui permettent d'obtenir l'eau la plus limpide, les floes les plus gros et les mieux décantés. Concernant les vitesses d'agitation, la seule certitude est que la coagulation nécessite une vitesse d'agitation plutôt rapide (afin de bien mélanger l'eau et que les colloïdes et les cations métalliques se rencontrent et se neutralisent) et que la floculation - quant à elle - nécessite une vitesse relativement lente (afin de favoriser la rencontre et l'agrégation des colloïdes mais sans détruire les floes déjà formés). **(a)**

### Chapitre 03

## Coagulation - floculation

**Tableau 3.1 :** Efficacité des différents coagulants chimiques étudiée par différents chercheurs pour l'enlèvement de la couleur dans les rejets de l'industrie textiles

Nom du coagulant	Dose optimisée (mg / L)	aides coagulant	Type de colorants	pH Optimum	% de l'enlèvement de la Couleur	Références
eaux usées de la Sidérurgie			dispenser	4.25	99	Anouzla et al., 2009
ferrate de potassium	100	Polymère à base de polyamine		6.5e8.5	95	Ciabatti et al., 2010
Polychlorure d'aluminium (PACl)	10			7.2	99.9	Choo et al., 2007
Alum	200	Polyacrylamide based polymer (Cytec)		5.3	78.9	El-Gohary and Tawfik, 2009
Alum	5000	Le sulfate de cuivre comme catalyseur		4	74	Kumar et al., 2008
Alum	20	cationique commercial floculant (Colfloc-RDeCiba)	Réactif et l'acide	Près de neutre	98	Golob et al., 2005
Alum	7.10 <sup>4</sup>			5.7-6.5 <sup>a</sup>	74	Patel and Vashi, 2010
sulfate ferreux	200	Polyelectrolyte	Sulfur	9.4	90	Bidhendi et al., 2007
Le chlorure ferrique	400		Sulfur	8.3	100	Bidhendi et al., 2007
Le chlorure ferrique	293	réactif et dispenser		6	71	Kim et al., 2004
Le chlorure ferrique	56	polymère cationique		4	92	Suksaroj et al., 2005
Le chlorure de magnésium	400	Polyelectrolyte (Koaret PA 3230)	réactif	11	85	Tan et al., 2000
Le chlorure de magnésium	120	Lime		11	100	El-Gohary and Tawfik, 2009
Le chlorure de magnésium	800	La chaux hydratée	réactif et dispenser	12	98	Gao et al., 2007
Polyaluminium chloride (PACl)	0.1	Poly acrylamide-seed gum	Reactive, acid and direct	8.5	80	Sanghi et al., 2006
Le chlorure de polyaluminium (PACl),	800	Exerfloc de polyacrlamide anionique 204		7.5	75	Tun et al., 2007
sulfate ferreux	400		Lime and Cationic polymer Reactive	12.5	90	Georgiou et al., 2003
sulfate ferreux	1000	Anionique sulfate ferreux 1000 anionique				

**Chapitre03**  
**Coagulation - flocculation**

sulfate ferreux	$7 \cdot 10^4$			5.7-6.5 <sup>a</sup>	85	Patel and Vashi, 2010
-----------------	----------------	--	--	----------------------	----	-----------------------

## **Chapitre03**

### **Coagulation - floculation**

#### **Conclusion :**

Le processus de coagulation - floculation permet d'éliminer une grande charge de la matière organique, de la matière en suspension et a un bon rendement en décoloration. Il est adopté, le plus souvent, avant le traitement biologique. Cette technique est moins coûteuse et facile à appliquer et exige peu d'espace. Elle est certes avantageuse, même pour les infrastructures des petites unités industrielles.

Au cours des 20 dernières années, de nouveaux coagulants, inorganiques et organiques, ont été employés afin d'essayer d'améliorer l'élimination de la matière organique et les matières en suspensions. Pour le traitement des eaux usées urbaines et industriels, l'optimisation de la coagulation nécessite le dosage du coagulant et du pH afin d'assurer l'atteinte de meilleurs objectifs. **.(Edzwald, Tobiason, 1999).**

## **Chapitre 04**

### **Etude expérimentale**

#### **4.1. Introduction**

Les méthodes conventionnelles, généralement utilisées pour l'élimination des colorants des eaux polluées industrielles, sont principalement les traitements biologiques et physicochimiques ainsi que leurs diverses combinaisons (**Greaves et coll., 1999, Slokar et Le Marechal, 1998**).

Les méthodes physicochimiques sont généralement basées sur l'adsorption (par exemple, sur charbon actif), oxydation chimique (chloration, ozonation...) et la photo dégradation (UV / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV / TiO<sub>2</sub>...), (**Coll et Zielinska, 2003**).

Cependant, ces méthodes de traitements consomment habituellement une quantité importante de produits chimiques, qui conduisent parfois à une pollution secondaire et à un volume important de solides récupérés (**Coll et Daneshvar, 2003**). Il s'est récemment avéré que les techniques de traitement des eaux polluées, basées sur la technique d'électrocoagulation, économiquement attractive, permettent d'éviter la majorité de ces problèmes.

Le procédé est très proche de celui du procédé de coagulation –floculation classique, qui consiste à ajouter un coagulant, généralement un sel métallique.

Dans le but de mieux évaluer les performances de ces deux procédés ; nous avons appliqué l'électrocoagulation pour l'élimination des colorants, en comparaison avec une coagulation floculation classique.

#### **4.2. Matériels:**

##### **4.1.1. Produits utilisés:**

Le Tableau 4.1 rassemble les réactifs utilisés au cours des essais expérimentaux.

**Tableau 4.1:** réactifs utilisés avec leurs emplois.

<b>Produit</b>	<b>Formule</b>	<b>Utilisation</b>
<b>Hydroxyde de sodium</b>	NaOH	Ajustement du pH et décapage des électrodes
<b>Acide chlorhydrique</b>	HCl	Ajustement du pH et décapage des électrodes
<b>Chlorure de Sodium</b>	NaCl	Support électrolytique

## Chapitre 04

### Etude expérimentale

<b>Chlorure de calcium</b>	CaCl <sub>2</sub>	Support électrolytique
<b>Sels d'aluminium</b>	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> 16 H <sub>2</sub> O	Coagulant

#### **4.1.2. Effluent synthétique:**

Il a été préparé au laboratoire par dissolution dans de l'eau distillée le colorant employé.

Le colorant utilisé, nous a été gracieusement fourni par l'entreprise des textiles SOTRDAL de BOUFARIK; il a les caractéristiques suivantes :

*Nom chimique* : 1-méthylamino-4-ethanolamino anthraquinone.

*Nom commercial* : Bleu cibacète (BC)

*Classe* : colorant anthraquinonique.

*Formule chimique* : C<sub>17</sub>H<sub>16</sub>N<sub>2</sub>O<sub>3</sub> .

*PM* = 296,325 g/mol.

*Ionisation* : basique.

*Point de fusion* : 332°C.

*Solubilité* : soluble dans l'eau, acétone, éthanol, benzène, alcool

*Couleur* : bleu.

*Stabilité* : ce produit est instable dans les conditions suivantes : lorsqu'il est chauffé, le produit émet des fumées toxiques.

*Application* : Le BC est employé comme colorant de tissu pour le nylon, cellulose, acétate et polyester.

#### **4.3. Dispositif expérimental:**

Pour effectuer le traitement électrochimique de l'effluent coloré nous avons procédé au montage électrochimique qui contient (**Figure 4.1. Figure 4.2**):

## **Chapitre 04**

### **Etude expérimentale**

- Un générateur de courant électrique STELLTRAFO /POWER SUPPLY, type PHYWE/07035.00).
- Des fils électriques (connections entre générateur, multimètres et électrodes).
- Un bécher d'un volume de 1000 ml, et de diamètre 10 cm, utilisé comme la cuve du réacteur d'EC.
- Deux électrodes en aluminium (Aluminium commercial d'une pureté d'environ 98%) d'une forme rectangulaire de même dimensions (200 mm × 50 mm) et d'une épaisseur de 5 mm plongées verticalement dans la solution dont la surface immergée est de (140 mm × 50 mm).
- Dispositif de filtration sur papier filtre normal.
  
- Un agitateur magnétique de type **IKAMAG**.
- Digital Multimètre type **DT-830D**
- Turbidimètre modèle **HACH 2100A**.
- voltmètre modèle **PHYWE/07035.00**.
- Centrifugeuse type **HETTICH ZENTRIFUGEREBA 3S**.
- Spectrophotomètre **UV/VISIBLE (SEQUOIA-TURNER) modèle 340**.
- Balance électronique **type YP 402N (Max=400g)**.
- Conductimètre de type **TACUSSEL CVRD62**.
- Thermomètre.

## **Chapitre 04**

### **Etude expérimentale**



**Figure 4.1:**Schéma du dispositif expérimental

**Figure 4.2:**photo du montage expérimentale

- |                     |   |
|---------------------|---|
| 1- <b>Anode</b>     | 4- <b>Multimètre</b>                    |
| 2- <b>Cathode</b>   | 5- <b>Générateur de courant continu</b> |
| 3- <b>Voltmètre</b> | 6- <b>Agitateur</b>                     |

Tandis que les essais de coagulation- floculation ont été réalisés dans un jar-test de type PWT , Supplied by Armfield, composé d'une série d'agitateurs à palettes, au nombre de quatre (4) montés sur un banc lumineux, la vitesse des palettes est réglable et identique d'un agitateur à l'autre. Des béciers de 1000 ml servent de cuves.

#### **4.4. Protocole expérimental :**

## **Chapitre 04**

### **Etude expérimentale**

#### **4.4.1. Nettoyage des électrodes :**

1)-Polissage à l'aide du papier abrasif (pour éliminer la couche de passivation après chaque essai),

2)-Rinçage à l'eau distillée,

3)-Dégraissage à l'aide de NaOH (0.1mole/l) en trempant les électrodes pendant 20 secondes,

4)-Rinçage à l'eau distillée

5)-Décapage dans une solution à (0.2N) de HCl pendant quelque secondes à température ambiante,

6)-Rinçage à l'eau distillée.

#### **4.4.2. Préparation de la solution synthétique:**

La solution synthétique a été préparée en dissolvant 50 mg/l d'un colorant de BC dans l'eau distillée, avec l'ajout de NaCl comme électrolyte support pour augmenter la conductivité de la solution. Le volume introduit dans la cellule est de 900 ml. L'ajustement des solutions pour les milieux acides ou basiques a été réalisé avec le chlorure de sodium (2N) et le chlorure d'hydrogène (2N).

#### **4.4.3. Techniques d'analyses :**

Pour bien montrer l'efficacité de l'EC, nous avons procédé à différentes analyses au sein du laboratoire de traitement des eaux du département de Sciences de l'Eau et de l'Environnement :

- **Mesure du pH et de la conductivité:**

L'EC modifie le pH initial de la solution ainsi que sa conductivité, pour cela, il a été nécessaire de les mesurer avant et après traitement pour voir réellement l'effet de l'EC sur ces deux paramètres. Les mesures sont effectuées immédiatement sur les échantillons prélevés, à l'aide d'un pH - mètre type **HANNA Ph209** et un Conductimètre de type **TACUSSEL CVRD62**

## **Chapitre 04**

### **Etude expérimentale**

- **Mesure de la température:**

La variation de la température est mesurée avant et après chaque traitement à l'aide d'un thermomètre.

- **La turbidité:**

La turbidité est un paramètre organoleptique qui mesure le trouble de l'eau. Elle est due aux particules colloïdales ou en suspension dans l'eau, elle est mesurée avant et après chaque traitement pour vérifier l'efficacité de notre procédé, à l'aide d'un turbidimètre de type HACH. Model 2100 A.

- **Mesure de l'absorbance :**

L'absorbance mesure la capacité d'un milieu à absorber la lumière qui le traverse (densité optique), elle est effectuée par spectromètre visible de type SEQUOIA-TURNER modèle 340. dans le spectre visible 330nm-1000nm.

L'absorbance de la solution colorée est mesurés avant et après chaque traitement pour voir l'efficacité de notre procédé.

- **Mesure de la consommation d'Aluminium :**

.Les mesures des masses (pesées) des électrodes ont été effectuées en utilisant une balance électronique YP 402 N (Max = 400g)

#### **4.5. Expression des résultats:**

##### **4.5.1. Rendement du procédé:**

###### **A)- turbidité:**

Le rendement du procédé d'électrocoagulation a été évalué par la mesure de la turbidité, Le taux de réduction en turbidité de l'eau colorée est exprimé par :

$$\mathbf{R(\%) = (T_0 - T / T_0) 100}$$

(4.1)

## **Chapitre 04**

### **Etude expérimentale**

Avec :

$T_0$  : turbidité initiale de la solution (NTU).

$T$  : turbidité finale de la solution (NTU).

#### **B) Absorbance:**

L'efficacité du procédé est déterminée en calculant les taux de réduction  $R(\%)$  en utilisant la relation suivante

$$\mathbf{R(\%) = (Abs_0 - Abs_t) / Abs_0 \cdot 100}$$

(4.2)

Avec :

$Abs_t$  : est l'absorbance de la solution après traitement.

$Abs_0$  : est l'absorbance de la solution avant traitement.

#### **4.5.2. Le calcul énergétique:**

Le calcul énergétique permet de calculer l'énergie électrique à fournir en fonction du volume d'effluent à traiter.

L'énergie consommée en  $KWh/m^3$  est donné par la relation suivante

$$\mathbf{E = U \cdot I \cdot t / V \cdot 1000}$$

**Avec :**

**U** : tension appliquée (V),

**I** : intensité de courant (A),

**t** : temps d'électrocoagulation (h),

**V** : volume d'eau traitée ( $m^3$ ),

#### **4.5.3. La concentration en Al dissous:**

Si l'on considère que les seules réactions chimiques qui se déroulent dans le réacteur

## **Chapitre 04**

### **Etude expérimentale**

d'électrocoagulation sont :

- A l'anode, l'oxydation du métal,
- A la cathode, la réduction de l'eau,

Il est possible de déterminer la masse de métal dissoute et pendant une durée  $t$  d'électrolyse à un courant  $I$ , en utilisant la loi de Faraday (**Feuillade et al, 2001**):

$$m = \frac{M \cdot I \cdot t}{n \cdot F} \quad (4.3)$$

Avec :

**m** : masse du métal dissous (g).

**I** : intensité du courant imposé (A).

**t** : durée d'électrolyse (s).

**M** : poids moléculaire de l'élément considéré ( $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ).

**F** : constante de Faraday ( $96500 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$ ).

**n** : nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction considérée. (n égal à 3 pour Al).

#### **4.5.4. Rendement faradique:**

L'efficacité de courant (current efficiency (CE)) ou le rendement faradique pour la dissolution de métal (Al dans notre cas) est égale au rapport entre les quantités d'Al dissous réellement (déterminé par pesée) et celles prévues par la loi de Faraday. Cette efficacité de courant (CE) est donc le rapport entre la perte de poids d'électrode consommée ( $Al_{\text{exp}}$ ) et la masse théorique ( $Al_{\text{théo}}$ ), donnée par la loi de Faraday définie par la relation suivante (**Xemingchen et al, 2000**):

$$CE (\%) = \left( \frac{Al_{\text{exp}}}{Al_{\text{théo}}} \right) 100 \quad (4.4)$$

#### **4.6. Résultats expérimentaux et interprétation:**

##### **a). Essais d'électrocoagulation:**

## **Chapitre 04**

### **Etude expérimentale**

Avant d'étudier l'influence des différents paramètres sur l'efficacité du traitement d'EC, nous avons fait quelques expériences préliminaires pour mieux adopter la méthodologie expérimentale.

#### **4.6.1. Détermination de $\lambda_{\max}$ :**

Le balayage dans le domaine de l'ultraviolet de la solution colorée de BC de concentration 50 mg /l donne une absorbance maximale à  $\lambda_{\max}=635$  nm. **(Figure 4.3)**

***Figure 4.3:** Courbe d'absorbance*

#### **4.6.2. L'échantillonnage:**

##### **1- Effet de la décantation:**

***Figure 4.4:** Effet de la décantation sur le rendement d'élimination*

La décantation est un procédé physique de séparation des matières en suspension dans un liquide, faisant appel à l'action de la pesanteur pour les rassembler en totalité ou en partie et pour les collecter au fond d'un réservoir. D'après la **figure 4.4 (Annexe 1,2)** nous constatons que le rendement d'absorbance augmente lors d'une décantation de 30 min. Pour cela nous avons prélevé nos échantillons après un temps précis d'électrocoagulation et après une décantation de 30 min.

##### **2- Effet de la centrifugation:**

Procédé de séparation qui utilise l'action de la force centrifuge pour provoquer la décantation accélérée des particules d'un mélange solide –liquide.

Nous avons vérifié le taux d'absorbance sans centrifugation et avec centrifugation (5000tr/min) de l'échantillon initial **(figure 4.5) (Annexe 2.3)** Nous remarquons une diminution de la couleur dans notre échantillon donc nous utilisons un échantillon initial sans centrifugation.

## **Chapitre 04**

### **Etude expérimentale**

**Figure 4.5** : Effet de la centrifugation

#### **4.6.3. Effet de l'agitation:**

L'un des principaux facteurs qui influencent le traitement d'EC est l'agitation de la solution (ou la suspension) au cours du procédé. L'agitation peut être bénéfique pour augmenter le contact entre le coagulant ( $Al^{3+}$ ) et le polluant (le colorant BC) comme elle ne peut l'être si elle est trop forte car elle entraînera le cassage des floccs. Pour cela des essais d'EC avec et sans agitation ont été effectués.

Les résultats obtenus sont résumés dans **l'annexe 3**:

**Figure 4.6:** Effet de l'agitation sur l'efficacité d'EC.

Comme nous montre la figure 4.6, les meilleurs rendements de décoloration sont obtenus avec une vitesse d'agitation moyenne. (C'est la vitesse optimale pour l'EC)

Tous les essais suivants ont été réalisés avec une agitation moyenne.

#### **4.6.2. Effet de la densité de courant:**

Des essais d'électrocoagulation ont été réalisés sur notre solution synthétique dans les conditions suivantes :

- Le densité de courant :  $i(A/m^2)$  : 20 – 40 – 50 – 100 – 150 – 200 – 250.
- surface immergée de chaque électrode est de  $S= 70\text{ cm}^2$ .
- Intensité de courant (I) en Ampère : 0.14 – 0.28 – 0.35 – 0.7– 1.05 – 1.4 – 1.75.  
( $I = i S$ ).
- Temps d'électrolyse : 10 min.
- Agitation : moyenne
- Distance entre les électrodes  $d=2\text{ cm}$
- pH de l'eau distillée.

## **Chapitre 04**

### **Etude expérimentale**

**La figure 4.7** : Effet de la densité courant sur l'efficacité de l'EC.

La densité de courant est un paramètre fondamental dans notre procédé, **la figure 4.7** montre que le rendement augmente en fonction de l'intensité de courant. Cette croissance du rendement d'élimination est influencée pas seulement par la quantité de coagulant générée in " situ "mais aussi la quantité de gaz produites (**holt et al, 2005**). Ceci peut aussi s'expliquer par le fait que la quantité des ions  $Al^{3+}$  générée par la dissolution de l'anode augmente avec la densité de courant (loi de Faraday), Il a été établi expérimentalement que, pour un temps donné, l'efficacité d'élimination augmente avec l'augmentation de la densité de courant. La quantité d'ions  $Al^{3+}$  est élevée, ce qui entraîne une quantité élevée de précipités d'hydroxydes, qui adsorberont les colloïdes colorée, ce qui favorisera la déstabilisation de la suspension.

**La figure 4.8** représente la quantité d'aluminium dissoute en fonction de la densité de courant. La quantité d'Al libérée est donnée par la perte de masse de l'anode (expérimentalement) (**Tableau 4.6, Annexe 4**).

**La figure 4.8:** Influence de la densité de courant sur la quantité d'Aluminium libérée

Nous constatons qu'une densité de courant de  $50A/m^2$ , donne un rendement de 73% et de 68% respectivement en absorbance et en turbidité .Pour cela nous avons retenu pour la suite des expériences, la densité de courant de  $i=50A/m^2$  qui correspond à l'intensité de courant de 0.35A.

#### **4.6.3. Effet de la densité de courant sur le voltage de l'électrolyse et l'énergie consommée:**

La consommation d'énergie au cours de l'électrocoagulation varie en fonction du produit  $U I t$ .

## **Chapitre 04**

### **Etude expérimentale**

**Figure 4.9** : Effet de la densité de courant sur l'énergie consommée

**Figure 4.10:** Effet de la densité de courant sur le voltage

D'après la **figure 4.9** et la **figure 4.10 (Annexe 4)**, le voltage entre les électrodes et l'énergie consommée augmente avec l'augmentation de la densité de courant.

Dans notre cas une augmentation de 20 A /m<sup>2</sup> à 250 A/m<sup>2</sup> entraîne une augmentation de 2.2 V à 19.7 V et une énergie consommée de 0.055 Kwh/m<sup>3</sup> à 6.129 Kwh/m<sup>3</sup>.

Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par **(XuemingChen et al .2000)** qui montre que l'énergie consommée augmente proportionnellement avec la densité de courant pour des effluents de restaurant.

#### **4.6.3. Influence du pH sur l'électrocoagulation:**

Le pH initial de l'effluent de l'eau usée est un facteur opératoire important qui influence les performances du processus électrochimique. Pour démontrer son effet sur le rendement du traitement, le pH de l'effluent est ajusté entre 2 et 12.

Le temps de traitement électrochimique est fixé à 10 minutes avec un courant imposé de 0.35A.

Les résultats obtenus sont représentés sur la **figure 4.11 (Annexe 5)** où l'on remarque qu'il y a deux parties distinctes :

**Figure 4.11:** Le pH après le traitement électrochimique en fonction du pH initial.

Pour des pH initiaux (pH=2 à pH= 7), le pH final devient plus grand, donc il y a un abaissement d'acidité, ceci est dû essentiellement à la réduction des ions H<sup>+</sup> au niveau de la cathode avec une observation claire de dégagement de l'hydrogène donc production des OH<sup>-</sup> suivant la réaction :

## Chapitre 04 Etude expérimentale



(4.4).



\* Pour des pH basiques (pH>8), il y a une faible diminution de pH ce qui revient à la consommation des ions OH<sup>-</sup> suivant la réaction suivante :



Ce qui concerne la décoloration, **la figure 4.12** présente le rendement d'absorbance après le traitement électrochimique pour des pH qui varient de 2 à 12 :

D'après cette figure, nous remarquons une augmentation du rendement pour des faibles valeurs de pH et cela est dû à l'évolution accélérée du processus de coagulation floculation par la formation de ces complexes Al(OH)<sup>2+</sup>, Al(OH)<sub>2</sub><sup>+</sup>, Al(OH)<sub>3</sub> qui jouent le rôle de coagulant (**figure 4.13**). Par contre à pH basique nous avons une diminution rapide de rendement jusqu'à atteindre la valeur de 22.72 %.

**Figure 4.12:** Rendement d'élimination en fonction du pH

## Chapitre 04

### Etude expérimentale

Cette diminution du rendement est due à la réaction entre  $\text{Al}(\text{OH})_3$  et avec les ions de  $\text{OH}^-$  déjà présents dans la solution suivant l'équation (4,6) :

Donc l'espèce  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  (Figure 4.13) prédomine à pH basique ces derniers sont moins réactifs car l'espèce anionique prédomine donc la floculation est moins efficace.

Ainsi le meilleur rendement (73.3 %) est obtenu pour un pH=7.

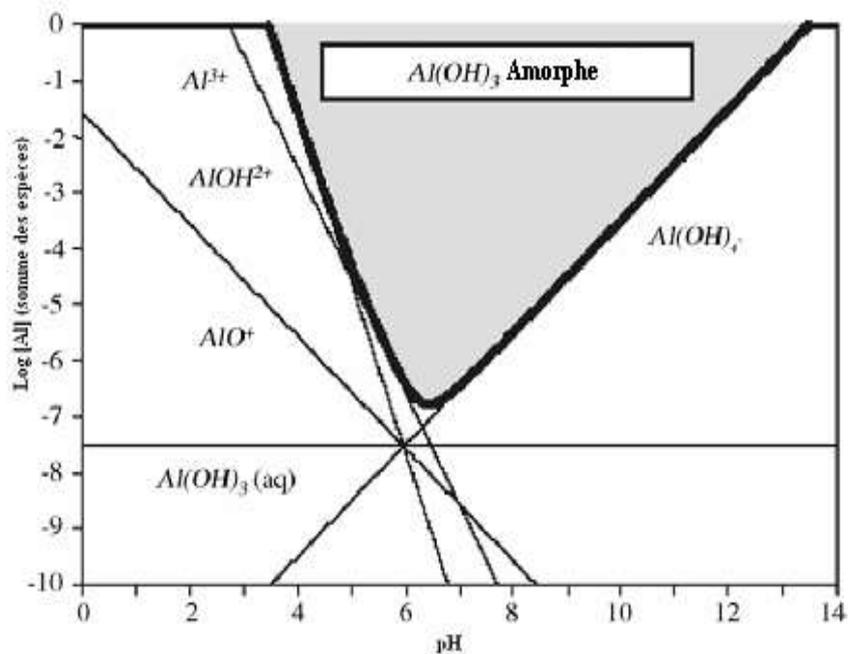


Figure 4.13 : Diagrammes de prédominance des espèces d'aluminium et effet du pH (Coll et Yilmaz, 2007).

Des mécanismes d'interactions sont possibles simultanément entre les molécules de colorants et les produits d'hydrolyse, et les niveaux dépendent du pH du milieu et les types d'ions présents. Deux mécanismes majeurs sont considérés: précipitation et adsorption ; chacun est proposé pour un intervalle de pH différent.

- Précipitation :

Colorant + Al- monomérique [Colorant- Al- monomérique] (s) pH=4,0-5,0

Colorant + Al- polymérique [Colorant – Al- polymérique] (s) pH=5,0-6,0

- Adsorption :

## **Chapitre 04**

### **Etude expérimentale**

Colorant + Al (OH)<sub>3 (s)</sub> [particule]

[Colorant- Al- polymérique] + Al (OH)<sub>3 (s)</sub> [particule] pH>6.5

#### **4.6.4. Effet du temps d'électrolyse :**

Dans le processus d'électrocoagulation, le temps d'électrolyse joue un rôle prépondérant et a un effet remarquable sur l'efficacité du traitement.

Le temps d'électrolyse correspond au temps d'application du champ électrique qui correspond aux principales étapes du processus (coagulation, floculation et flottation).

Nous avons suivi la cinétique de la dissolution de l'électrodes en Al pour une période de 90 min, avec une densité de courant de courant de 50, 100, 150, 200 et 250 A/m<sup>2</sup> pour une concentration de ( 50mg/l ) colorée , sans ajustement du pH et une et une concentration en NaCl = 1 g/l.

Les résultats expérimentaux sont représentés sur les tableaux (4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5) **(Annexe 10)**.

**La Figure 4.13**, montre l'évolution du taux d'élimination du colorant BC de la solution synthétique sous l'influence de la densité de courant au cours du traitement.

Nous constatons que la cinétique du taux d'élimination du colorant BC varie en fonction du temps et de la densité de courant. Plus la densité de courant est élevée et plus le taux de décoloration est important. Au bout de 10 min nous constatons le premier palier ; après, les grandes densités de courant ont donné les meilleurs rendements.

Néanmoins, au bout de 20 minutes de traitement la décoloration se ralentit: pour les différentes densités étudiées (50A/m<sup>2</sup> à 250 A/m<sup>2</sup>) le taux d'élimination atteint est de 74.76% à 90.89 %. Pour une durée de temps de 90 min, soit une différence de 16.13% ce qui indique la grande influence de la densité de courant sur le traitement. Plus la densité de courant est élevée et plus cette réduction est rapide et importante.

## **Chapitre 04**

### **Etude expérimentale**

Nous constatons aussi que pour obtenir la même efficacité d'électrocoagulation, une diminution dans le temps électrolyse, entraînant une augmentation de la densité de courant. Par exemple, nous obtenons un rendement de 84% ; pour une densité de courant de  $150 \text{ A/m}^2$ , un temps d'électrolyte de 90 min ; et de même pour une densité de  $250 \text{ A/m}^2$  et un temps de 30 min (**la Figure 4,14**). Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par **Xueming et al, 2000**).

Des auteurs s'expliquent le fait que si la densité diminue, le temps nécessaire pour obtenir la même efficacité de traitement est principalement affecté par la charge ( $Q= I. t$ ), Comme rapporté par (**Chen et al 2000**).

*La Figure 4.14 : effet du temps d'électrolyse sur le rendement d'élimination*

La figure 4.15 représente l'évolution du pH final de la solution en fonction du temps pour une densité de courant de  $50 \text{ A/m}^2$ .

*La Figure 4.15 : effet du pH sur le rendement d'élimination.*

Nous constatons que le pH augmente régulièrement au cours du processus d'EC jusqu'à un pH basique.

Cette augmentation du pH est due à la formation d'ions hydroxydes à la cathode provenant de la réaction de réduction des molécules d'eau selon l'équation (4.5).

#### **4.6.5. Effet de la conductivité:**

##### **A .Ajout du Nacl**

L'un des principaux facteurs influençant l'EC est la conductivité de la solution à traiter. Pour étudier l'effet de la conductivité, nous avons fait varier la concentration du chlorure de sodium comme support électrolytique le plus utilisé dans les procédés

## **Chapitre 04**

### **Etude expérimentale**

électrochimiques. la variation s'effectue sans ajustement de pH et avec ajustement de pH pour observer la relation entre le pH et la conductivité. le temps d'électrolyse est maintenu égale à 10 min .

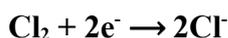
*Figure 4.16: effet de la conductivité sans ajustement du pH sur le rendement d'élimination*

La Figure 4.12 présente les rendements d'absorbance et de turbidité en fonction de la concentration en NaCl de (0.5 g/l à 5g/l).

Le choix du chlorure de sodium découle du fait que les ions chlorures réduisent de manière significative les effets indésirables d'autres anions tels que  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ , par exemple, en évitant la précipitation du carbonate de calcium contenu dans une eau calcaire, qui pourrait former une couche d'isolant sur la surface des électrodes et augmenter ainsi la résistance de la cellule électrochimique (*Chen et coll , 2002*).

Nous observons que quand la concentration de NaCl augmente de 0 à 1.5 g/L, le rendement d'absorbance augmente de 71,53 à 74.64 % cela s'explique comme suit :

Les ions chlorures peuvent également être oxydés pour donner des formes activées de chlore, tels que les anions hypochlorites ( $\text{ClO}^-$ ) qui ont un pouvoir oxydant élevé sur les colorants. Le mécanisme de formation de ces derniers est le suivant :



En revanche au-delà de 1.5 g/l en NaCl, nous observons que l'efficacité d'élimination diminue jusqu'à 69.01 % pour 5 g/l en NaCl. Cette diminution pourrait s'expliquer par :

- le fait que la présence dans le milieu d'ions  $\text{Cl}^-$  en excès réagit avec les cations aluminium ( $\text{Al}^{3+}$ ) produits à l'anode pour produire  $\text{AlCl}_3$  selon cette réaction

## **Chapitre 04**

### **Etude expérimentale**



De ce fait, les ions aluminium produits, ne sont pas utilisés pour la coagulation/floculation de la matière organique, ce qui conduit à la diminution du rendement d'EC

Les rendements de la conductivité sont meilleur lorsque on ajuste le pH a une valeur égale à 7 comme nous indique la **Figure 4.17** car l'espèce  $\text{Al}(\text{OH})_3$  prédomine au  $\text{pH} = 7$  (voir figure 4.13) ; ainsi le processus de coagulation floculation sera meilleur à ce pH.

*Figure 4.17 : effet de la conductivité avec ajustement du pH sur le rendement d'élimination*

#### **B .Ajout du $\text{CaCl}_2$ :**

Pour étudier l'effet de la conductivité sur le rendement d'élimination en absorbance; un autre électrolyte est ajouté c'est le chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ) avec une concentration variant de 0.5 à 5 g/l.

Le meilleure rendement est obtenue quand la concentration de  $\text{CaCl}_2$  est égale a 1 g/l.

La présence de 2 molécule de Cl permettra de générer l'acide hypochloreux rapidement selon la réaction suivante :



Les rendements de l'absorbance lors de l'ajout du  $\text{CaCl}_2$  sont élevé par rapport au NaCl (**Figure 4.18**)(**Annexe 3.9**).

*Figure 4.18* rendement de l'absorbance en fonction de la concentration de l'électrolyte

La **figure 4.19** représente la puissance consommée en fonction de la concentration en NaCl et  $\text{CaCl}_2$  à pH identique.

L'existence d'un film passif sur l'anode est l'un des problèmes de l'EC et ce film augmente le potentiel appliquée (**Vik et al 1984, Mollah et al 2004**).

Fréquemment, les eaux usées industrielles traitées contiennent souvent une quantité d'ions chlorure qui conduit à la dissolution du film passif sur la surface de l'anode. Cet effet de

## **Chapitre 04**

### **Etude expérimentale**

l'électrolyte (NaCl) à faible dose est confirmé par des études récentes (Monedhen et al ,2007).qui montre que l'électrolyte qui contient un minimum de concentrations en ions chlorure de 60 mg/l peut éliminer le film passif en diminuant remarquablement le voltage de la cellule durant l'électrolyse, entraînant ainsi la diminution de la puissance.

De même, d'autres études (Kobya et al, 2006) montrent qu'une augmentation de la conductivité de la solution favorise un transfert entre les électrodes, ce qui permet de réduire la résistance de la solution .Finalement l'ajout d'un électrolyte à faible doses n'influe pas sur le rendement d'élimination, mais diminue considérablement l'énergie consommée.

**La figure 1.19** : La puissance consommée en fonction de la concentration en NaCl et CaCl<sub>2</sub> à pH

#### **4.6.6. Effet de la masse d'Al :**

Le procédé d'électrocoagulation se caractérise par une génération au sein de l'effluent que l'on souhaite traiter, des cations métalliques par oxydation des anodes en aluminium.

L'étape principale de la déstabilisation et de l'agrégation des particules colloïdale c'est la coagulation d'où la masse du coagulant correspond au temps d'application du champ électrique, calculé à partir de la loi de faraday donné par l'équation (4.4)

L'application de la loi de faraday sur la solution coloré, a donné les résultats représentés sur le tableau :

**Tableau 4.2** : Efficacité de courant CE : (t=10 min, pH initial).

<b>I (A/m<sup>2</sup>)</b>	<b>i (A)</b>	<b>Al exp</b>	<b>Al théo</b>	<b>CE (%)</b>
<b>20</b>	0.14	0.02	0,01	200,00
<b>40</b>	0.28	0.02	0,02	100,00
<b>50</b>	0.35	0.05	0,02	250,00
<b>100</b>	0.70	0.07	0,04	175,00

## **Chapitre 04**

### **Etude expérimentale**

<b>150</b>	1.05	0.11	0,06	183,33
<b>200</b>	1.4	0.09	0,08	112,50
<b>250</b>	1.97	0.13	0,11	118,18

D'après les résultats représenté dans le tableau ; nous avons constaté suivant l'efficacité de courant, que la loi de faraday est applicable. L'écart existant entre les valeurs de la masse prévue et celle de la masse expérimentale dans certains cas est dû à la perturbation du processus causée par la variation de l'intensité de courant lors de l'expérimentation.

Des recherches ont montré que la masse du métal anodique dissous dans la solution peut augmenter ou diminuer par rapport à la valeur théorique, et ce, à cause des caractéristique de l'échantillon d'eau brute et des conditions opératoires (pH de l'électrolyse, intensité de courant, durée de l'électrolyse, etc .....).

Cet écart est aussi dû à la réduction et à l'oxydation électrochimique (équation 2.4 et équation 2.9), qui entraîne la dissolution chimique des électrodes d'aluminium respectivement près de la cathode et de l'anode (causée par la vitesse de dissolution chimique élevée, qui se produit pour des pH alcalins et acides) (**Jiang et al ; 2002, picard et al 2000 ; szpyrkowicz ,2005**).

Ce point de vue n'est pas partagé par d'autres auteurs qui suggèrent que l'excès en efficacité de courant (>100%) est expliqué par la corrosion par piquage (putting corrosion) de l'anode en aluminium, causée par la présence d'ions chlorure dans le milieu (**Figure 4.20**) (**khemis et al, 2006 ; Mameri et al, 1998 ; Shen et al, 2003**).

La loi de faraday joue un rôle important dans le processus d'EC, surtout en ce qui concerne la détermination de la masse du métal anodique dissous dans la solution, ce qui permet de connaître la durée de vie des électrodes.

## Chapitre 04

### Etude expérimentale

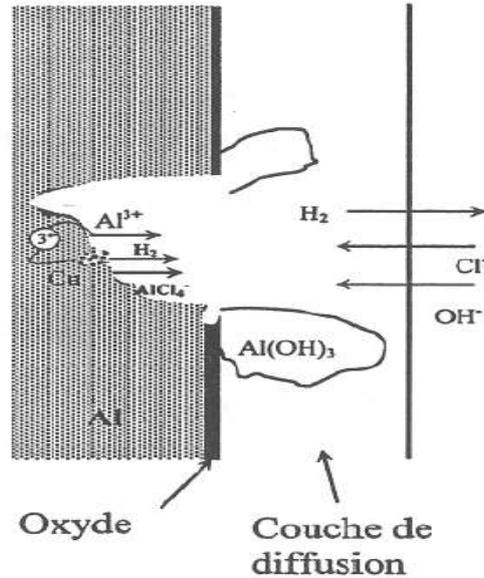


Figure 4.20 : Mécanisme de corrosion par les ions chlorures et hydroxydes par piqûre sur un alliage d'aluminium (Khemis, 2005).

#### 4.6. Traitement d'électrocoagulation :

D'une manière générale, les observations communes aux différentes solutions examinées pendant le traitement sont :

- Dégagement des bulles d'hydrogène au niveau de la cathode.
- Dégagement des bulles de chlore (quand NaCl est ajouté comme support électrolytique) et des bulles d'oxygène au niveau de l'anode.
- Formation des petits flocs qui sont entraînés par les bulles de gaz pour s'accumuler à la surface de la solution sous forme d'une couche de mousse comme le montre la **figure 4.22**
- Diminution de la masse de l'anode (amoindrissement de l'épaisseur, voire même de la largeur de l'anode) et formation d'un dépôt blanchâtre au niveau de la cathode.

## Chapitre 04

### Etude expérimentale

- La solution colorée en bleu auparavant devient plus claire après traitement d'Ec.



**Figure 4.21.** photos de la solution avant et après traitement



**Figure 4.22** Photos de l'écume formé pendant le traitement d'EC.

#### **b) Essais de la coagulation-floculation:**

##### **a)- Modes opératoires:**

Les conditions opératoires (concentration de la solution, volume, temps de traitement, ....etc.) sont celles utilisées dans le cas du traitement d'électrocoagulation. Le nombre d'échantillon ainsi que les espacements sont similaires à ceux réalisés pour l'électrocoagulation.

Le coagulant minéral utilisé dans notre procédé est le sel d'aluminium **(Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·16H<sub>2</sub>O)**.

Lors de l'ajout du sel d'aluminium, la vitesse d'agitation est réglée à 180 t/min pendant 1 minute pour bien homogénéiser le coagulant ajouté à la solution. Cette vitesse est ensuite réglée à 40 t/min pendant 9 minutes, jusqu'à la prise d'échantillon, pour diminuer les forces

**Chapitre 04**  
**Etude expérimentale**

de cisaillement sur les floc formés. La quantité de sel d'aluminium ajouté à chaque étape de la cinétique est calculée sur la base des résultats d'analyses réalisées sur les échantillons d'électrocoagulation. Nous avons gardé la même valeur de la quantité d'Al obtenu après un instant  $t=10\text{min}$  ; que nous avons ajouté toute les 10 min pendant 90 min.

Soit la quantité massique ( $m$ ) d'Al dissous lors du traitement électrochimique (donnée par la loi de Faraday) ; pendant un temps de 10 minute.

La quantité massique ( $m_1$ ) en aluminium hydratée équivalente à la quantité ( $m$ ) d'Al dissous, est donnée par la relation suivante :

$$m_1 = M(\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16 \text{H}_2\text{O}) \cdot m / M_{2\text{Al}}$$

**Avec :**

$M(\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16 \text{H}_2\text{O})$  : masse molaire du sel d'aluminium (g)

$M_{2\text{Al}}$  = masse de l'ion Al

$m_1$  = la masse équivalente en sel d'aluminium pour une masse d'Al ( $m$ ) obtenu lors de l'oxydation de l'anode pendant un traitement de 10 min d'électrocoagulation donnée par **le tableau 4.3.**

**Tableau 4.3** Masse en Al ( $m$ ) et masse équivalente ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16 \text{H}_2\text{O}$ ).

$i$ (A/m <sup>2</sup> )	50	150	250
$m$ (g)	0.05	0.09	0.13
$m_1$ (g)	0.58	1.05	1.51

**b) Résultat expérimentaux :**

La coagulation – floculation a été suivie pendant une durée de 90 minutes. **L'annexes 10 (Figure 4.23 et Figure 4.24) (les tableaux 4.16: 4.17:4.18)** donnent les résultats de coagulation – floculation de notre solution colorée.

## Chapitre 04

### Etude expérimentale

**La figure 4.25** représente l'efficacité du procédé de coagulation –floculation en fonction du temps.

Nous constatons un rendement élevé à partir de 10 min. Au-delà de ce temps, le rendement est plus ou moins stable.



**Figure 4.23:** Aspect de la solution durant la coagulation - floculation



**Figure 4.24** Aspect de la solution avant et après la coagulation – floculation

**Figure 4.25.** rendement du coagulation – floculation pour les différentes masses

- **La mise en solution:**

## Chapitre 04

### Etude expérimentale

La mise en solution d'un coagulant se déroule en deux étapes prenons l'exemple du sulfate d'aluminium.



**Etape(1):** Phase hydrolyse ; des intermédiaires poly chargés positifs se forment, ils sont très efficaces pour neutraliser la charges des colloïdes.

**Etape(2):** Formation du précipité d'Al(OH)<sub>3</sub> cette réaction dépend de l'agitation du milieu, ce précipité est l'élément qui assure la coalescence des colloïdes déstabilisés ; C'est la forme floculant.

La réduction de l'absorbance est due à la formation des floes composés du colorant et d'Al(OH)<sub>3</sub>.

La **figure 4.26** représente le pH final en fonction du temps, d'après cette figure nous constatons que le pH diminue rapidement il passe de 5.80 à 3.79 pour la masse du coagulant m<sub>2</sub> et 5.84 à 3.67 pour la masse m<sub>3</sub>.

De même, nous pouvons affirmer que le pH diminue dès l'introduction du coagulant minéral, par suite de l'hydrolyse de l'Al. L'introduction de **(Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·16 H<sub>2</sub>O)** entraine une acidification du milieu selon la réaction d'hydrolyse suivante :



**Figure 4.26:** Effet du pH final en fonction du temps pour les différentes masses

**Figure 4.27:** conductivité finale en fonction du temps pour les différentes masses

La **figure 4.27** représente la conductivité finale en fonction du temps ; pour la solution colorée et après l'ajout du coagulant minérale. Cette augmentation de la conductivité pourrait être due à la présence des ions sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>).

**Chapitre 04**  
**Etude expérimentale**

**4.6.8. Comparaison entre la coagulation - floculation et l'électrocoagulation :**

Les figures 4.28, 4.29, 4.30 (**Annexe 10**) montrent les résultats obtenus par le procédé d'électrocoagulation et de coagulation – floculation, pour les densités de courant de 50, 150 à 250 A/m<sup>2</sup>).

**Figure 4.28 :** comparaison entre les deux procédés ( $i=50A/m^2$ ).

L'effet de la quantité de l'Al introduite est bien visible pour les deux procédés ; plus la masse d'aluminium est élevée, plus le rendement est élevé.

**Figure 4.29 :** comparaison entre les deux procédés ( $i=150A/m^2$ ).

Nous remarquons pour des densités de courant de 50A/m<sup>2</sup> et 150 A/m<sup>2</sup> ; les rendements de l'EC sont sensiblement similaires à ceux de coagulation – floculation (**Figure 4.28 et figure 4.29**).

**Figure 4.30 :** comparaison entre les deux procédés ( $i=250A/m^2$ ).

Par contre, nous constatons que l'efficacité de décoloration est plus importante pour le procédé d'EC à une densité de courant de 200 A/m<sup>2</sup> que pour le procédé de coagulation - floculation (**figure 4.30**) Cette différence peut être attribuée à la production de microbulles de gaz (**Ketbar et al, 1988; Ketbar et al, 1991**) De même, une augmentation dans l'intensité de courant entraîne une diminution de la taille des bulles de gaz (**Chen et al, 2002, Shen et al 2003**). La vitesse ascensionnelle des petites bulles est plus faible que des bulles plus grosses (**Brandonet al 1985**).

En effet, la vitesse ascensionnelle d'une bulle de gaz ( $V_b$ ) dans l'eau en régime laminaire est proportionnelle au carré du diamètre de la bulle de gaz, et elle est donnée par loi de Stokes :

$$V_b = \dots \quad (4,7).$$

## **Chapitre 04**

### **Etude expérimentale**

Ou

$d_b$  : représente le diamètre de la bulle de gaz, (kg/m.s)

$\rho_g$ : la masse volumique du gaz, (Kg/m<sup>3</sup>).

$\rho_l$ : la masse volumique du liquide, (Kg/m<sup>3</sup>).

$\mu_L$ : la viscosité dynamique.

$g$  : l'accélération due à la pesanteur (m/s<sup>2</sup>).

Ainsi, ces petites bulles de gaz s'élèvent lentement vers la surface, ce qui augmente leur probabilité de collision avec les floes contenant le polluant. De plus, la quantité d'aluminium libérée est plus élevée pour une densité de courant de 250 A/m<sup>2</sup> entraînant une amélioration du procédé d'élimination des polluants.

#### **4.6.9. Conclusion sur la comparaison sur les deux procédés:**

La comparaison directe entre l'EC et la coagulation floculation n'est pas simple à réaliser car les deux procédés opèrent différemment. La quantité d'aluminium est introduite ou générée "in situ" par oxydation électrolytique de l'anode respectivement pour les deux procédés. Le pH des suspensions obtenues après le traitement pour les deux procédés est différent, celui-ci peut influencer le mode opératoire **(Canizaris et al. 2003; Feuillade et al 2001)**.

La procédure d'élimination de la pollution est également différente, alors que la coagulation – floculation conduit généralement à la décantation de la pollution, l'EC entraîne une décantation et également une flottation de la pollution par les microbulles de gaz produites à la cathode et à l'anode.

## **CONCLUSION GENERALE**

Le premier objectif de ce travail est de montrer l'intérêt du procédé d'électrocoagulation pour le traitement d'une solution colorée par un colorant issu d'une industrie de textile algérienne (bleu de cibacète).

L'électrocoagulation est un processus électrolytique impliquant le passage d'un courant électrique au sein de la solution à traiter, et en même temps, diverses réactions chimiques se produisent aux électrodes. Ces réactions peuvent mettre en jeu le dégagement de gaz, la séparation de substances, la dissolution de l'électrode ou l'apparition de nouvelles substances dans la solution (formation de floes).

Des essais d'électrocoagulation ont été réalisés en batch, en utilisant des électrodes de d'aluminium. Ces essais ont permis de montrer l'influence de la densité de courant dans le processus d'électrocoagulation.

L'ajout d'un support électrolytique est important pour l'électrocoagulation car celui-ci diminue considérablement l'énergie consommée.

De même, le suivi de la cinétique de dissolution de l'électrode d'aluminium sur une période de 90 min a montré que, pour la même efficacité d'électrocoagulation, une densité de courant plus élevée entraîne une diminution du temps d'électrolyse.

Nous constatons aussi que, pour un temps d'électrolyse donné, l'efficacité d'élimination augmente significativement avec l'augmentation de la densité de courant. Ces deux constatations montrent clairement que le paramètre clé qui conditionne l'électrocoagulation est la quantité d'électricité  $q = it$ .

Les paramètres optimum de l'électrocoagulation sont : densité de courant =50 A/m<sup>2</sup>, pH initial 7, en présence de CaCl<sub>2</sub> à 1 g/l et avec une agitation de 150 tour /min. Le rendement d'élimination obtenue est de 76,60% en absorbance pour un temps d'électrolyse de 10 min et une énergie consommée de 0.703 Kwh/m<sup>3</sup>

Par contre, pour une densité de courant élevée de  $250 \text{ A/m}^2$ , le taux de décoloration du Bleu Cibacette obtenu est de 90.89 %, au bout de 90 min. Sachant qu'au bout de 10 min, la totalité du colorant est éliminée à 86.71 %, pour une concentration en NaCl de 1g/l.

De même, l'ajout d'un électrolyte influe négativement sur le rendement d'élimination exprimé en termes d'absorbance et de turbidité, mais diminue considérablement l'énergie consommée.

Une étude comparative entre le procédé de coagulation floculation et d'électrocoagulation pour différentes densités de courant a permis de montrer l'avantage du procédé d'électrocoagulation pour une densité de courant de  $250 \text{ A/m}^2$ . Par contre, des rendements d'élimination similaires sont obtenus pour le procédé d'électrocoagulation et de coagulation floculation, pour des densités de courant de 50 et  $150 \text{ A/m}^2$ . Le pH des solutions synthétiques obtenu par les deux procédés après le traitement est différent. Le milieu devient alcalin dans l'EC et il est acide dans la coagulation floculation.

Comme recommandation, et pour les études à venir sur ce thème, nous préconisons d'achever l'étude sur des effluents textiles réels, basé sur d'autres indicateurs de pollution à savoir : la DCO.

Par la suite, une étude économique approfondie concernant le coût total de l'opération qui inclura les coûts directs tels que: électricité, matériel nécessaire (électrodes, réactifs chimiques...etc.), réacteur et son dimensionnement...etc., ou indirects tels que la maintenance.