



**R**épublique **A**lgérienne **D**émocratique et **P**opulaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA  
Faculté De Technologie  
Département d'hydraulique  
Laboratoire de recherche en hydraulique appliquée et environnement

## **Mémoire de Master**

Présenté par :

**Melle : MEROUANE Syla**

Filière : **Hydraulique**

Option : **Ouvrages et Aménagements Hydrauliques**

### **Thème**

---

**Contribution à l'élimination d'un colorant textile par le procédé  
d'électrocoagulation avec un réacteur cylindrique et des électrodes en  
mouvement**

---

Soutenu le **11/07/2019**

Devant les membres de jurys:

**Président : Mr : YAKOUBI Mohamed**

**Examineur: Mr : SAKHRAOUI Fouad**

**Promoteur : Mr : KADJI Belaid**

**Promotion 2018/2019**

## ***Remerciement***

*Je tiens à remercier en premier lieu **Mr B. Kadji** pour toute l'aide et le soutiens qu'il m'a apporté.*

*Je remercier tous les membres de jury qui me ferons l'honneur de juger ce travail.*

*Je tiens à remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de mon travail*

*Tous les mots restent faibles pour exprimer ma profonde reconnaissance à ma famille pour leurs soutiens et l'aide précieuse qu'ils m'ont apporté durant mes longues années d'études.*

## ***Dédicace***

*Je dédie ce modeste travail*

*A ma très chère mère **Rachida***

*A mon très cher père **Saad***

*Pour tous les sacrifices qu'ils ont faits pour m'offrir le climat idéal de travail, et  
Qui m'ont apporté leur soutien depuis toujours, leurs encouragements, et leurs  
conseils dans les soucis de ma réussite*

*A mes chères sœurs **Nawel, Yasmine, Maria, Lisa** et ma petite **Dana***

*A mon binôme **Hichem** qui m'a aidé et soutenue tout au long de mon travail*

*A mes amis d'**Amnesty** et à **Amnesty***

*A mes amis de **Friends***

*A mon meilleur ami **Takfa***

*A ma folle et meilleure amie **Lisa***

*A celui qui m'a toujours encouragé **Youcef***

*A Mon cher **Sadek***

*A toutes les personnes que j'ai connues tout au long de mes années  
universitaires et qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui*

# Sommaire

|                                   |          |
|-----------------------------------|----------|
| <b>Introduction générale.....</b> | <b>1</b> |
|-----------------------------------|----------|

## **CHAPITRE I : Généralités sur les effluents textiles**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>I.1. Pollution des eaux résiduaires.....</b>                       | <b>3</b>  |
| I.1.1. Définition.....  | 3         |
| I.1.2. Origine des eaux usées .....                                   | 3         |
| I.1.2.1. origine agricole.....  | 3         |
| I.1.2.2. Origine domestique .....                                     | 4         |
| I.1.2.3. Origine industrielle .....                                   | 4         |
| I.1.3. Définition des eaux résiduaires industrielles :.....           | 4         |
| I.1.3.1. Différents types de pollution industrielle :.....            | 5         |
| I.1.3.1.1. Pollution physique :.....                                  | 5         |
| I.1.3.1.2. Pollution chimique : .....                                 | 5         |
| I.1.3.1.3. Pollution microbiologique : .....                          | 6         |
| <b>I.2. Les rejets de l'industrie textile.....</b>                    | <b>6</b>  |
| I.2.1. Les colorants.....   | 7         |
| I.2.1.1 Classification des colorants.....                             | 8         |
| <b>I.3. Impact des colorants sur l'environnement et la santé.....</b> | <b>9</b>  |
| I.3.1. Législation sur l'environnement .....                          | 10        |
| <b>I.4. Conclusion.....</b>   | <b>10</b> |

## **CHAPITRE II : Procédés de traitement**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>II.1. Introduction .....</b>  | <b>11</b> |
| <b>II.2. Méthodes conventionnelles.....</b>                                    | <b>11</b> |
| II.2.1. Méthodes physiques de traitements .....                                | 11        |
| II.2.2. Méthodes physico- chimiques de traitement des effluents textiles ..... | 12        |
| II.2.3. Méthodes chimiques de traitement des effluents textiles .....          | 12        |
| II.2.4. Méthodes biologiques de traitement.....                                | 12        |
| <b>II.3. Méthodes avancés .....</b>  | <b>13</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| II.3.1. Electrochimie .....                        | 14        |
| II.3.1.1. Définition.....                          | 14        |
| II.3.1.2. Type de traitement électrochimique ..... | 15        |
| II.3.1.2.1. Electroflottation .....                | 15        |
| II.3.1.2.2. Electro-oxydation .....                | 24        |
| II.3.1.2.3. Electro-désinfection .....             | 25        |
| II.3.1.2.4. Electrocoagulation .....               | 25        |
| <b>II.4. Conclusion.....</b>                       | <b>29</b> |

### **CHAPITRE III : Méthodes et matériels**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>III.1. Introduction.....</b>                             | <b>30</b> |
| <b>III.2. Matériels .....</b>                               | <b>30</b> |
| III.2.1. Unité de traitement .....                          | 30        |
| III.2.2. Les produits utilisés .....                        | 33        |
| III.2.2.1. Bleu d'indanthrène.....                          | 33        |
| III.2.2.2. Matériaux des électrodes utilisées.....          | 33        |
| III.2.2.3. Salinité.....                                    | 33        |
| <b>III.3. Méthodologie .....</b>                            | <b>34</b> |
| <b>III.4. Les techniques analytiques : .....</b>            | <b>34</b> |
| III.4.1. La spectrophotométrie UV-Visible : .....           | 34        |
| III.4.2. La loi de Beer-Lambert .....                       | 35        |
| III.4.3. Principe de la spectrophotométrie UV-Visible ..... | 36        |

### **CHAPITRE IV : Résultats et discussions**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>IV.1. Introduction:.....</b>                                     | <b>37</b> |
| <b>IV.2. Description visuelle du procédé: .....</b>                 | <b>37</b> |
| <b>IV.3. Influence de l'intensité du courant: .....</b>             | <b>37</b> |
| <b>IV.4. Effet de la distance inter électrodes : .....</b>          | <b>40</b> |
| <b>IV.5. Effet de la vitesse de rotation des électrodes : .....</b> | <b>42</b> |
| <b>IV.6. Conclusion .....</b>                                       | <b>44</b> |
| <b>Conclusion et perspectives .....</b>                             | <b>45</b> |

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE II

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure II.1.</b> Différents procédé avancés .....   | 13 |
| <b>Figure II.2.</b> Représentation schématique de a) une pile et b) une cellule électrochimique «Beauchesne, 2008».....  | 15 |
| <b>Figure II.3.</b> Schéma de principe du procédé d'électroflottation « <i>TOURBIN. Mallorie, LACHAIZE Sébastien Pascal, GUIRAUD, 2012</i> » .....                                 | 17 |
| <b>Figure II.4.</b> Electroflottation avec des cloisons intégrées « <i>CHEN G, 2004</i> » .....  | 18 |
| <b>Figure II.5.</b> Electroflottation à co-courant .....   | 18 |
| <b>Figure II.6.</b> Electroflottation à contre-courant « <i>CHEN, 2004</i> ».....  | 19 |
| <b>Figure II.7.</b> Combinaison d'électrocoagulation et d'électroflottation « <i>CHEN, 2004</i> » .....  | 19 |
| <b>Figure II.8.</b> Electroflottation avec des médias fluidisés « <i>CHEN, 2004</i> ». ....  | 20 |
| <b>Figure II.9.</b> Electroflottation à deux sections, (a) vue de côté et (b) vue de haut « <i>Chen, 2004</i> ».....   | 21 |
| <b>Figure II.10.</b> Les différentes interactions qui se produisent dans un réacteur de l'électrocoagulation« <i>Holt&amp;al.,2001</i> ».....                                      | 24 |
| <b>Figure II.11.</b> Les différents modes de connexions électriques pour une cellule d'électrocoagulation et les circuits électriques associés « <i>FAROOQUI.M.S., 2004</i> »..... | 27 |

## CHAPITRE III

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure III.1</b> Schéma d'une cellule d'électroflottation .....                  | 30 |
| <b>Figure III.2.</b> Cellule électrochimique de forme cylindrique .....             | 31 |
| <b>Figure III.3.</b> Paire d'électrodes sous forme d'hélices .....                  | 32 |
| <b>Figure III.4.</b> Dispositif d'agitation. ....                                   | 32 |
| <b>Figure III.5.</b> Trajet optique.....  | 34 |
| <b>Figure III.6.</b> Schéma de principe d'un spectrophotomètre à mono-faisceau..... | 36 |

## CHAPITRE IV

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure IV.1.</b> Évolution du rendement de dégradation du BIRS en fonction de l'intensité du courant pour les différentes vitesses et distances appliqués ..... | 39 |
|--|----|

## **LISTE DES FIGURES**

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure IV.2.</b> Évolution du rendement de dégradation du BIRS en fonction de la distance inter-électrode pour les différentes vitesses et intensité appliqués ..... | 41 |
| <b>Figure IV.3.</b> Évolution du rendement de dégradation du BIRS en fonction de la vitesse d'agitation pour les différentes intensités et distances appliqués.....     | 43 |
| <b>Figure IV.4.</b> Image démontrant la stabilité de l'écume .....  | 44 |

# LISTE DES TABLEAUX

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau I.1</b> : Classification des colorants .....  | 8  |
| <b>Tableau I.2</b> : Valeurs limites de quelques paramètres pour les effluents textiles .....          | 10 |
| <b>Tableau III.1</b> : Caractéristique du Bleu d'indanthrène « <i>RODIER &amp; COLL., 2009</i> » ..... | 33 |
| <b>Tableau IV.1.</b> Variation du taux de dégradation en fonction de l'intensité du courant.....       | 38 |
| <b>Tableau IV.2.</b> Variation du taux de dégradation en fonction de la distance inter-électrode ..... | 40 |
| <b>Tableau IV.3.</b> Variation du taux de dégradation en fonction de la vitesse de rotation.....       | 42 |

# NOMENCLATURE

ERU : Eau Résiduaire Urbaine

T : Température

PH : Potentiel d'Hydrogène

DBO : Demande biologique en oxygène

DCO : Demande chimique en oxygène

EF : Electroflottation

EC : Electrocoagulation

PEHD : Polyéthylène Haute Densité

UV : Rayons Ultraviolets

IR : Infrarouge

A : Absorbance à une longueur d'onde  $\lambda$  ;

$I_0$  : Intensité du faisceau lumineux monochromatique incident ;

I : Intensité du faisceau lumineux émergent ;

l : Longueur du trajet optique qui correspond à l'épaisseur de la cuve de mesure en cm ;

C : Concentration molaire de l'entité absorbante dans la solution en mol.L<sup>-1</sup> ;

$\epsilon_\lambda$  : Coefficient d'absorption molaire de la substance en solution à la longueur d'onde  $\lambda$  considérée en L.mol<sup>-1</sup>.cm<sup>-1</sup>

log : Logarithme

V : vitesse de rotation (tr/min)

D : distance inter électrode (cm)

I : intensité du courant (A)

BIRS : Bleu d'Indanthrène RS

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

## Introduction

Le vingtième siècle est caractérisé par un progrès technique considérable, accompagné d'une augmentation démographique sans précédent, ces deux facteurs ont fait que la consommation mondiale en eau est passée de 400 à 7000 milliards, dont une grande partie constitue les besoins nécessaires pour l'Industrie. Les experts s'accordent que la planète sera confrontée à une hausse drastique des besoins en eau dans un proche avenir.

De par son activité, l'industrie textile qui est une très grande consommatrice d'eau, génère une pollution très importante du milieu aqueux avec des rejets fortement contaminés par des colorants. Ces eaux peuvent contenir divers polluants. Parmi ces polluants, certains peuvent être toxiques et provoquer de nombreuses contaminations des eaux de surface et des eaux souterraines. Le fait que les colorants ne soient pas facilement biodégradables en raison de la complexité de leur structure chimique, implique que les effluents aqueux correspondant nécessitent un traitement spécifique vu l'impact singulier qu'ils causent dans les milieux naturels. Pour faire face à cette problématique, de nombreux procédés ont été mis en place, tels que l'électrochimie, qui permettent d'améliorer l'épuration des rejets d'eaux usées industrielles. En termes de rentabilité, ils permettant le traitement d'une large gamme de polluants ; l'électrocoagulation (EC) comme procédé électrochimique a prouvé son efficacité dans le traitement de particules colloïdales, métaux lourds, orthophosphates, nitrates, fluorures, plomb, etc «*Bennajah, 2007, İrdemez et al., 2006b*».

Cette étude s'inscrit dans la recherche relative à l'élimination d'un colorant textile dans le cadre du traitement par électrocoagulation. Pour ce faire, nous avons procédé à l'élaboration d'une cellule cylindrique afin d'améliorer l'hydrodynamique de la solution en y ajoutant des électrodes en rotation connecté à un moteur doté d'un connecteur rotatif assurant l'alimentation de ces dernières. L'objectif de la rotation est d'assurer la répartition homogène des bulles d'airs et du coagulant ce qui nous permettra d'éviter les zones mortes pour une meilleur élimination du colorant.

Trois des paramètres influençant sur l'efficacité de ce procédé ont été étudié à savoir :

- L'effet de l'intensité.
- L'effet de la distance inter-électrode.
- L'effet de la vitesse.

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

Ce travail traite la dégradation en milieu aqueux du colorant Bleu d'indanthrène, qui est un pigment anthraquinonique. Afin d'effectuer cette étude, le travail a été scindé en quatre chapitres :

- ⇒ Le premier chapitre présente une étude bibliographique générale concernant les eaux usées (historique, définition, classification,...etc.) et l'industrie textile (les rejets de l'industrie textiles, la législation, impact sur l'environnement,...etc.).
  
- ⇒ Le deuxième chapitre détaillera les procédés de traitements en général et l'électrocoagulation-électroflottation en particulier afin de déterminer : le principe, le domaine d'application ainsi que les avantages et les inconvénients.
  
- ⇒ Le troisième chapitre est consacré à la description du matériel et des méthodes expérimentales ayant permis la réalisation de cette étude. Les modes opératoires, les produits utilisés, La spectrophotométrie UV-Visible.
  
- ⇒ Le quatrième chapitre présentera les résultats obtenus sur l'étude la dégradation du bleu d'indanthrène par électrocoagulation avec des électrodes en mouvement. L'effet des différents paramètres expérimentaux sur la dégradation du colorant sera discuté.

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

# CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LA POLLUTION DES EAUX

## I.1. Pollution des eaux résiduaires

### I.1.1. Définition

Selon REJSEK «2002», les eaux résiduaires urbaines (ERU), ou eaux usées, sont des eaux chargées de polluants, solubles ou non, provenant essentiellement de l'activité humaine. Une eau usée est généralement un mélange de matières polluantes répondant à ces catégories, dispersées ou dissoutes dans l'eau qui a servi aux besoins domestiques ou industriels «GROSCLAUDE, 1999». Donc sous la terminologie d'eau résiduaire, on groupe des eaux d'origines très diverses qui ont perdu leurs puretés ; c'est-à-dire leurs propriétés naturelles par l'effet des polluants après avoir été utilisées dans des activités humaines (domestiques, industrielles ou agricoles).

Le rejet de ces eaux dans le milieu naturel peut l'affecter en altérant les objets physiques qu'ils possèdent, les possibilités récréatives du milieu ou encore en enlaidissant la nature «LAURENT J-L, 1994».

### I.1.2. Origine des eaux usées

D'après RODIER et al «2005», On peut classer comme eaux usées, les eaux d'origine urbaines constituées par des eaux ménagères (lavage corporel et du linge, lavage des locaux, eaux de cuisine) et les eaux vannes chargées de fèces et d'urines ; toute cette masse d'effluents est plus ou moins diluée par les eaux de lavage de la voirie et les eaux pluviales. Peuvent s'y ajouter suivant les cas les eaux d'origine industrielle et agricole. Donc les eaux résiduaires urbaines (ERU) sont constituées par :

⇒ Des eaux résiduaires ou eaux usées d'origine domestique, industrielle et/ou agricole.

#### I.1.2.1. origine agricole

L'agriculture constitue la première cause de pollutions diffuses. Lorsque l'on considère les pollutions d'origine agricole, il faut englober à la fois celles qui ont trait aux cultures et à l'élevage «MARTEL O, 2007». Dans le cadre d'une agriculture performante et intensive, l'agriculteur est conduit à utiliser divers produits d'origine industrielle ou agricole dont certains présentent ou peuvent présenter, des risques pour l'environnement et plus particulièrement pour la qualité des eaux. Il s'agit principalement :

- ⇒ Des fertilisants (engrais minéraux du commerce ou déjections animales produites ou non sur l'exploitation);
- ⇒ Des produits phytosanitaires (herbicides, fongicides, insecticides,...) «GROSCLAUDE, 1999».

# CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LA POLLUTION DES EAUX

- ⇒ Les déjections animales qui accompagnent les élevages intensifs et les résidus d'antibiotiques utilisés contre les infections animales ou pour favoriser leur croissance.

## I.1.2.2. Origine domestique

Ce sont les eaux qui proviennent généralement des habitations «eaux ménagères et eaux vannes» qui sont présentées comme un mélange de matières non dissoutes dans une solution aqueuse de matières organiques et minérales «*GOMELLA C & GUERRÉE H, 1986*».

Elles proviennent essentiellement:

- ⇒ Des eaux de cuisine qui contiennent des matières minérales en suspension provenant du lavage des légumes, des substances alimentaires et des produits détergents.
- ⇒ Des eaux de salle de bain chargées en produits utilisés pour l'hygiène corporelle, généralement des matières grasses hydrocarbonées ;
- ⇒ Des eaux de vannes qui proviennent des sanitaires, très chargées en matières organiques, en composés azotés, phosphatés et microorganisme «*REJSEK, 2002* ».

## I.1.2.3. Origine industrielle

Les rejets industriels sont caractérisés par leur très grande diversité, suivant l'utilisation de l'eau au cours du processus industriel. Parmi les industries considérées traditionnellement comme rejetant des matières particulièrement polluantes pour l'eau tels que les industries agro-alimentaires, papetières, la chimie, les traitements de surface, l'industrie du cuir et de textile, etc. «*MARTEL O, 2007*».

Les eaux résiduaires d'origine industrielle ont généralement une composition plus spécifique et directement liée au type d'industrie considérée. Indépendamment de la charge de la pollution organique ou minérale, de leur caractère putrescible ou non, elles peuvent présenter des caractéristiques de toxicité propres liées aux produits chimiques transportés «*RODIER, 2005*».

## I.1.3. Définition des eaux résiduaires industrielles :

Les eaux résiduaires industrielles sont celles en provenance des diverses usines, qui sont des déchets liquides obtenues lors de l'extraction et de la transformation de matières premières en produits industriels. Elles contiennent les substances plus diverses, pouvant être acides ou alcalines, corrosives ou entartrantes, à températures très élevées, souvent odorantes et colorées «*MEINCK F, 1977*»; «*GOMELLA C & GUERRÉE H, 1986*».

# CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LA POLLUTION DES EAUX

---

## I.1.3.1. Différents types de pollution industrielle :

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

### I.1.3.1.1. Pollution physique :

C'est une pollution due à la présence de matières en suspension, parfois de colloïdes : elle se traduit par un trouble ou une coloration plus ou moins prononcée «*LEROY J-B, 1999*». On peut la répartir en trois classes : mécanique, thermique et radioactive.

#### ⇒ Pollution mécanique :

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

#### ⇒ Pollution thermique :

Les eaux rejetées par les usines utilisant un circuit de refroidissement de certaines installations (centrales thermiques, nucléaires, etc.) ont une température très élevée de l'ordre de (70 à 80°C). Elle diminue jusqu'à (40 à 45°C) lorsqu'elle est en contact avec les eaux des milieux aquatiques entraînant un réchauffement de l'eau, qui influe sur la solubilité de l'oxygène «*MEKHALIF F, 2009*».

#### ⇒ Pollution radioactive :

C'est celle qui est occasionnée par une éventuelle radioactivité artificielle des rejets, qui trouve sa source dans l'utilisation de l'énergie nucléaire sous toutes ses formes (installations et centrales nucléaires, exploitation de mines d'uranium, traitement des déchets radioactifs...) «*ELSKENS M, 2010*».

### I.1.3.1.2. Pollution chimique :

Elle résulte des rejets chimiques, essentiellement d'origine industrielle. Elle génère des nuisances souvent dramatiques pour les écosystèmes à cause de leur concentration dans le milieu naturel «*GARCIA A, 2004*». La pollution chimique des eaux résiduaires est répartie en deux catégories :

#### ⇒ Pollution organique :

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

# CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LA POLLUTION DES EAUX

---

## ⇒ **Pollution minérale :**

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

### **I.1.3.1.3. Pollution microbiologique :**

La pollution microbiologique est la présence en quantité excessive de germes, bactéries et virus, parmi lesquels certains sont pathogènes pour l'homme et les animaux. Elle est notamment la conséquence de mauvais raccordements d'habitations aux réseaux d'assainissement, de débordements des réseaux d'eaux usées, de rejets des stations d'épurations d'eaux résiduaires et du ruissellement sur les sols lors des pluies importantes. Elle provient également de sources diffuses générées par des rejets mal maîtrisés en zones d'élevage en particulier par temps de pluie «*ELSKENS M, 2010*».

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

L'eau polluée provenant des chaînes de finition, de teinture et de lavage dans les industries textiles, constitue une source importante de pollution. Ce rejet liquide a généralement une couleur intense, un pH élevé, une quantité importante des particules en suspension et une forte demande chimique en oxygène. L'industrie textile utilise environ 10 000 types de colorants, la majorité est constituée de substances toxiques qui présentent un danger autant pour l'homme que sur la vie aquatique. 15 % de ces colorants utilisés sont retrouvés dans les rejets liquides à destination des ruisseaux, rivières, fleuves et mers. Ces eaux doivent donc être traitées avant leur décharge finale, pour des raisons environnementales et légales.

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 «*Slokar et Le Marechal, 1998, Greaves et coll., 1999*». Néanmoins, les traitements biologiques sont les plus utilisés. La toxicité des colorants pose, habituellement, le problème de la croissance des bactéries, limitant ainsi l'efficacité de la décoloration «*Greaves et coll., 1999*». Les méthodes physicochimiques sont généralement basées sur l'adsorption (par exemple, sur charbon actif, coagulation / floculation (en utilisant des sels ou des polymères inorganiques), oxydation chimique (chloration, ozonation...) et la photo dégradation (UV / H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV / TiO<sub>2</sub>...)), «*Zielinska et coll., 2003, Zaroni et coll., 2003, Pérez et coll., 2002*». Cependant, ces méthodes de traitements consomment

# CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LA POLLUTION DES EAUX

habituellement une quantité importante de produits chimiques, qui conduisent parfois à une pollution secondaire et à un volume important de solides récupérés «*Daneshvar et coll., 2003, Kim et coll., 2002, Bayramoglu et coll., 2004*». 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. Cependant, il est envisageable de rencontrer des complications de réalisation et d'optimisation du procédé d'électrocoagulation. La prise en compte de ces difficultés entre dans nos objectifs d'étude.

## I.2.1. Les colorants

Un colorant est défini comme étant un produit capable de teindre une substance d'une manière durable. Les colorants furent, pendant très longtemps, extraits du milieu naturel : plantes, animaux et minéraux. Le coût d'obtention était souvent très élevé, et les procédés d'application plus ou moins reproductibles et très fastidieux. Les premiers colorants synthétiques datent du milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle. L'évolution de l'industrie des colorants a été étroitement liée au développement de la teinture synthétique et de la chimie en général. Un colorant proprement dit est une substance qui possède deux propriétés spécifiques, indépendantes l'une de l'autre, la couleur et l'aptitude à être fixée sur un support tel qu'un textile «*Khaldi et al., 2006*».

La teinture des textiles a été effectuée depuis les temps les plus reculés. On employait alors uniquement des colorants naturels, mais ces composés ont été presque totalement remplacés par des colorants de synthèse «*LEMLIKCHI.W et al., 2010*». Une teinture consiste à faire absorber, diffuser des colorants dans les fibres textiles, puis ensuite à les fixer à l'intérieur de celles-ci «*LEMLIKCHI et al., 2011*».

Les matières colorantes se caractérisent par leur capacité à absorber les rayonnements lumineux dans le spectre visible (de 380 à 800 nm). La transformation de la lumière blanche en lumière colorée par réflexion sur un corps, ou par transmission ou diffusion, résulte de l'absorption sélective d'énergie par certains groupes d'atomes appelés chromophores. La molécule qui les contient devient chromogène et, celle-ci, n'a des possibilités tinctoriales que par l'adjonction d'autres groupements d'atomes appelés : auxochromes «*LEMLIKCHI et al., 2011*». Plus le groupement chromophore donne facilement un électron, plus la couleur est intense.

### I.2.1.1 Classification des colorants

Tous les composés aromatiques absorbent l'énergie électromagnétique mais seulement ceux qui ont la capacité d'absorber les rayonnements lumineux dans le spectre visible (de 380 à 750 nm) sont colorés «*HAMMAMI S, 2008*».

# CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LA POLLUTION DES EAUX

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

## ⇒ La classification selon la constitution chimique :

Le classement des colorants selon leur structure chimique repose sur la nature du groupe chromophore (tableau I.3) Cette classification présente un intérêt pour le fabricant des matières colorantes, selon laquelle on distingue plusieurs classes «*ROBERT ET COLL., 2000 ; GUILLARD ET COLL., 2003*» (voir l'annexe1).

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

Les méthodes de teinture varient avec la structure chimique de la fibre à colorer. Un colorant approprié à la laine ou à la soie peut être entièrement insuffisant pour le coton. En général, c'est la structure chimique du matériau qui détermine le processus et le colorant à utiliser pour le teindre «*DIB GH, 2012 ; DONZÉ J, 1988*» (voir l'annexe1).

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

Tableau I.1 : Classification des colorants.

### I.3. Impact des colorants sur l'environnement et la santé

L'utilisation des colorants peut entraîner des dangers sur l'environnement ainsi que sur la santé des êtres humains.

#### ⇒ Sur l'environnement

La production et l'utilisation des colorants naturels sont beaucoup moins polluantes que celle de la plupart des colorants et pigments de synthèse qui génèrent, des sous-produits nocifs,

# CHAPITRE I GÉNÉRALITÉS SUR LA POLLUTION DES EAUX

lorsque ces rejets sont déversés directement dans le milieu naturel sans aucun traitement spécifique des constituants toxiques.

Ces colorants sont pour la plupart synthétiques et représentent aujourd'hui un large groupe de composés chimiques. La production mondiale de ces colorants de synthèse est évaluée à 700 000 tonnes/an. Une partie de ces colorants, approximativement 140 000 tonnes/an, sont rejetées lors des étapes de fabrication et coloration des tissus. Les industries textiles, et plus particulièrement les phases de teinture et d'ennoblissement utilisent principalement des produits chimiques, nuisibles pour la santé, comme certains colorants azoïques cancérigènes, et engendrent une pollution des eaux de surface et des nappes phréatiques. L'hétérogénéité de la composition des produits utilisés pour teindre fait qu'il est extrêmement difficile d'atteindre des niveaux de pollution satisfaisants, c'est-à-dire les seuils imposés par les normes environnementales, après traitement par les techniques utilisées.

## ⇒ **Sur la santé**

Sont dus à certaines capacités de ces colorants qui peuvent :

- Etre mutagènes.
- Etre génotoxiques.
- Entraîner des cancers de la thyroïde.
- Entraîner des tumeurs des glandes surrénales.
- Contenir des substances cancérigènes.
- Avoir des actions sur le système nerveux central.
- Inhibition ou déficit de certaines enzymes
- Augmentation de la perméabilité intestinale «*SAIDI Fatima Zahra, 2013*».

### **I.3.1. Législation sur l'environnement**

Vus le grand danger que pose l'industrie textile et l'utilisation des colorants dans notre vie quotidienne sur l'environnement et notre santé, l'Algérie est comme tous les pays européens a mis une réglementation stricte N°06-141 sur les rejets des effluents textiles dans le milieu hydrique (tableau I-2) «*SAIDI Fatima Zahra, 2013*».

| Paramètres | Valeur limite |
|------------|---------------|
| T (°C)     | 30            |
| pH         | 6,5 - 8,5     |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| DBO <sub>5</sub> (mg/l)       | 150 |
| DCO (mg/l)                    | 250 |
| Matières décantables (mg/l)   | 0,4 |
| Matières non dissoutes (mg/l) | 30  |
| Oxydabilité (mg/l)            | 100 |
| Permanganate (mg/l)           | 20  |

**Tableau I.2 :** Valeurs limites de quelques paramètres pour les effluents textile

### I.5. Conclusion

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. Ces colorants peuvent contenir des groupements fonctionnels, naturels ou bien provenant de réactions chimiques ou de synthèse. La présence de ces matières colorantes dans les rejets textiles peut constituer une menace sérieuse pour l'environnement quand ils sont rejetés sans traitement préalable dans la biosphère. Ces rejets industriels engendrent des effets néfastes sur la flore et la faune aquatique, mais aussi sur les populations animales qui consomment les eaux non traitées. Un traitement sera donc indispensable pour éliminer ces matières néfastes à l'environnement.

## II.1. Introduction

Les eaux usées constituent un effluent très chargé en matières polluantes, nuisibles aussi bien au milieu récepteur qu'aux utilisateurs.

Pour remédier à cette pollution, l'eau usée doit subir un traitement avant son rejet ou sa réutilisation. On dispose de deux méthodes de traitement pour une qualité d'eau à traiter assez élevée :

- ⇒ Méthodes conventionnelles.
- ⇒ Méthodes avancées.

## II.2. Méthodes conventionnelles

### II.2.1. Méthodes physiques de traitements

#### ⇒ 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 semiperméable 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. 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.

Ces procédés limités dans leurs applications, nécessitent des investissements importants en capitaux et le retraitement du concentré est jusqu'à six fois plus cher que celui de l'effluent original «*OUBAGHA Noura, 2012*».

#### ⇒ Adsorption sur charbon actif (ou sur un autre adsorbant)

Lors de l'adsorption, le polluant est transféré de la phase liquide vers la phase solide. Le charbon activé est l'adsorbant le plus communément utilisé pour la réduction de la couleur, mais il reste très onéreux et nécessite en plus une régénération. C'est dans ce contexte que l'on s'intéresse à la valorisation d'un rejet de l'industrie alimentaire, qui est le grignon d'olive pour l'utiliser comme adsorbant pour la décoloration des rejets de l'industrie textile. D'autres recherches ont opté pour valoriser ou utiliser d'autres matières naturelles (sciure, écorce et farine de bois...) moins onéreuses pour l'extraction des colorants par adsorption «*OUBAGHA Noura, 2012*».

### II.2.2. Méthodes physico- chimiques de traitement des effluents textiles

#### ⇒ Coagulation – floculation

Sous le terme de coagulation-floculation, on entend tous les processus physicochimiques par lesquels des particules colloïdales ou des solides en fine suspension sont transformés par des flocculants chimiques en espèces plus visibles et séparables (les flocs). Les coagulants inorganiques tels que l'alun donnent les résultats les plus satisfaisants pour la décoloration des effluents textiles contenant des colorants dispersés, de cuve et du soufre, mais sont totalement inefficaces pour les colorants réactifs, azoïques, acides et basiques. Par ailleurs, la coagulation - floculation ne peut être utilisée pour les colorants fortement solubles dans l'eau. D'importantes quantités de boue sont formées avec ce procédé : leur régénération ou réutilisation reste la seule issue mais demande des investissements supplémentaires «*OUBAGHA Noura, 2012*».

### II.2.3. Méthodes chimiques de traitement des effluents textiles

Dans la littérature, les techniques d'oxydation chimique sont généralement appliquées pour le traitement des composés organiques dangereux présents en faibles concentrations, en prétraitement avant des procédés biologiques, le traitement d'eaux usées chargées de constituants, résistant aux méthodes de biodégradation et en post-traitement pour réduire la toxicité aquatique. Les deux réactifs les plus souvent énumérés pour ce type de traitement sont  $H_2O_2$  et le Chlore. Le peroxyde d'hydrogène est un oxydant fort et son application pour le traitement des polluants organiques et inorganiques sont bien établis. Mais l'oxydation seule par  $H_2O_2$  n'est pas suffisamment efficace pour de fortes concentrations en colorant «*OUBAGHA Noura, 2012*».

### II.2.4. Méthodes biologiques de traitement

Par épuration biologique des eaux, on entend la décomposition des polluants organiques dans l'eau par les microorganismes. Les procédés biologiques se partagent en deux catégories: les traitements aérobies en présence d'oxygène et anaérobies sans oxygène.

#### ⇒ Traitement aérobie

Les polluants sont décomposés dans une unité biologique constituée d'un bassin de boue activée par des bactéries aérobies et autres microorganismes en une boue qui sédimente. Dans le cas idéal, les polluants organiques sont oxydés jusqu'au dioxyde de carbone. 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.

### ⇒ Traitement anaérobie

A 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 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 «*OUBAGHA Noura, 2012*».

### II.3. Méthodes avancés

La présence de polluants réfractaires, qui échappent au traitement conventionnel, constituent un sujet de préoccupation pour la plupart des agents environnementales des pays industrialisés «*SERVOS et al., 2005 ; SNYDER et al., 2003 ; VERSTRAETEN et al., 2003*». Dans l'optique de limiter le déversement ces polluants, des stratégies de traitement efficace et écologiques ont été développées. Parmi ces stratégies se trouve l'application des procédés avancés, qui peuvent se regrouper comme tel :

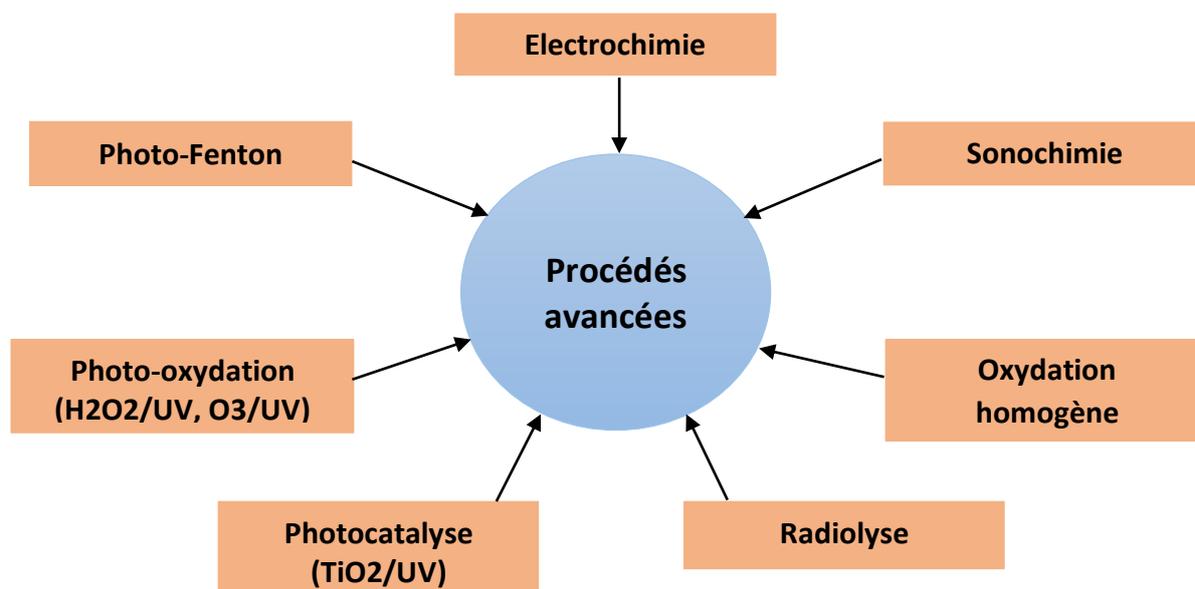


Figure II.1. Différents procédé avancés.

#### II.3.1. Electrochimie

- L'idée d'utilisation d'électricité pour traiter l'eau, a été proposée la première fois au UK en 1889 «*Strokach, 1975*».
- En 1903, l'application d'un procédé de traitement de l'eau de condensation des machines à vapeur «*Koren & Syversen 1995*».
- L'application de l'électrolyse dans la réduction minérale a été brevetée par Elmore en 1904 «*Elmore, 1905*».
- Egalement en 1904, le principe d'électroflottation a été énoncé pour la première fois, mais la consommation énergétique était très élevée «*Koren & Syversen 1995*».
- L'électro coagulation avec l'utilisation des électrodes d'aluminium et de fer a été brevetée aux USA en 1909 et l'électrocoagulation de l'eau potable a été appliquée, pour la première fois à grande échelle, aux USA en 1946 «*Stuart, 1946 et Bonilla, 1947*».
- En 1911, le traitement des eaux d'égouts a été réalisé par voie électrochimique, mais l'efficacité diminuait avec le temps d'opération «*Koren & Syversen 1995*».
- En 1980, le développement du procédé de 1903 pour le traitement des eaux des effluents industriels huileux «*Koren & Syversen 1995*».

En raison de l'investissement de capitaux relativement grand dans l'électricité, le traitement électrochimique de l'eau n'a pas trouvé une large application mondiale «*Koby & al., 2003*».

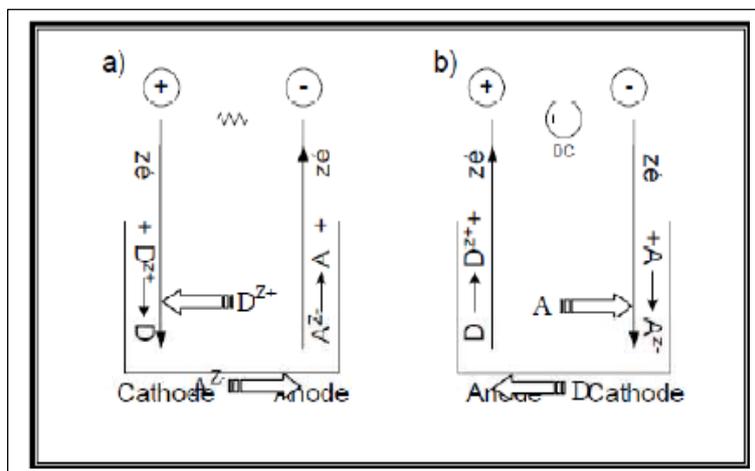
Cependant en raison de la recherche étendue aux USA et en URSS, le processus a acquis un grand nombre de connaissances, par conséquent, les technologies électrochimiques ont regagné dans le monde entier leur importance pendant les dernières deux décennies «*Lin & Wu, 1997 et Chen & al., 2000*».

Aujourd'hui, les technologies électrochimiques sont non seulement comparables à d'autres technologies en termes de coût mais également potentiellement plus efficaces, et pour quelques situations, ces technologies peuvent être l'étape indispensable dans le traitement des eaux usées municipales contenant les polluants réfractaires «*Chen, 2003*».

### II.3.1.1. Définition

Un processus électrochimique typique de traitement se compose de la cellule électrolytique, qui emploie l'énergie électrique pour affecter un changement chimique. Une cellule électrolytique se compose de deux électrodes : anode et cathode, immergées dans une solution conductrice d'électricité (l'électrolyte), et est reliée ensemble, à l'extérieur de la solution, par l'intermédiaire d'un circuit électrique qui inclut une source de courant et un

dispositif de contrôle. Les processus chimiques qui se produisent dans telles cellules sont l'oxydation et la réduction, ayant lieu à l'interface d'électrode/électrolyte (**Figure II.2**). L'électrode à laquelle la réduction se produit est désignée sous le nom de la cathode et réciproquement, l'anode est l'électrode à laquelle les processus d'oxydation se produisent «Brett & Brett, 1994».



**Figure II.2.** Représentation schématique de a) une pile et b) une cellule électrochimique «Beauchesne, 2008».

La circulation du courant dans une cellule électrochimique est maintenue par la circulation des électrons résultant de la force d'entraînement de la source électrique. L'électrolyte facilite la circulation du courant par le mouvement de ses espèces ioniques chargées. Le type d'électrolyte a l'effet significatif sur le processus dans la formation des espèces oxydatives «Farooqui, 2004».

### II.3.1.2. Type de traitement électrochimique

Les technologies électrochimiques offrent de divers processus de traitement tels que l'électroflottation, l'électro-oxydation, l'électro désinfection et l'électrocoagulation.

#### II.3.1.2.1. Electroflottation

L'électroflottation est une technique de séparation basée sur l'électrolyse de l'eau et la suspension des particules. Elle est semblable à la flottation à air dissous, qui se fonde sur la production des bulles pour flotter les particules en suspension, sauf que dans ce cas, les bulles de gaz sont produites par l'électrolyse de l'eau.

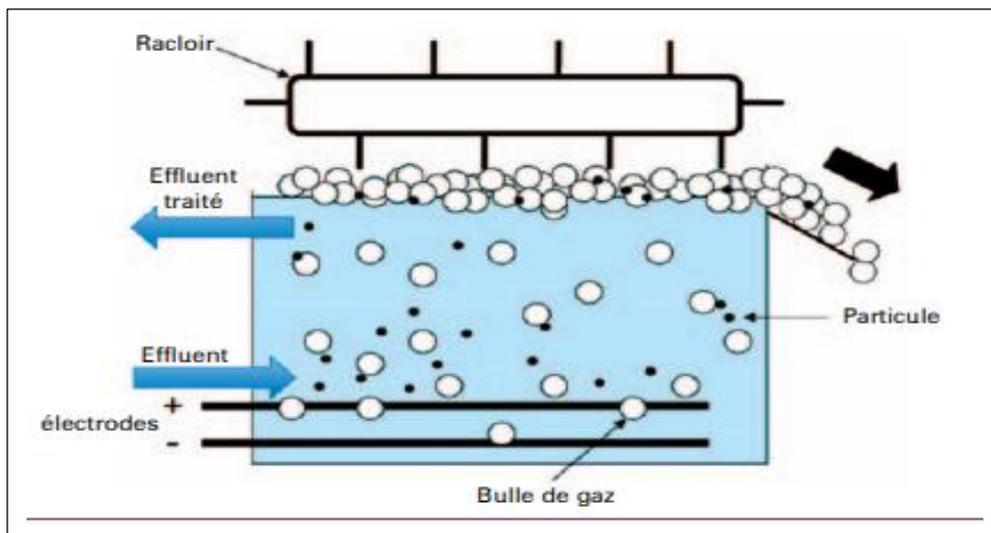
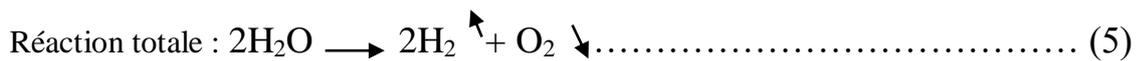
- **Principe de l'électroflottation**

L'électroflottation (EF) est une technique de séparation (solide / liquide) basée sur la suspension des particules par des bulles générées lors de l'électrolyse de l'eau. Elle est basée sur la génération d'hydrogène et d'oxygène pendant l'électrolyse de l'eau par l'application

d'un courant électrique à la solution traitée. Les bulles de gaz se forment à la surface des électrodes, remontent à la surface du liquide en entraînant avec elles les particules en suspension «*BURUS .S. E, YIACOUMI. S and TSOUNS .C., 1997*».

L'EF a l'avantage de générer des bulles plus fines et plus nombreuses que la flottation par air dissous, ce qui améliore l'efficacité du procédé. Plus de 90% combinaisons entre les microbulles et les particules en suspension se produisent pendant les premières minutes dans la cellule d'électroflottation. L'EF est efficace quand la surface totale des bulles de gaz et la surface de contact avec les particules à flotter sont grandes. Les bulles d'hydrogène qui se dégagent au niveau de la cathode jouent le rôle principal dans le phénomène de séparation.

Les réactions chimiques qui sont produites à la surface des électrodes pour générer les bulles de gaz sont les suivantes «*HOSNY.A.Y, 1996*»:



**Figure II.3.** Schéma de principe du procédé d'électroflottation «*TOURBIN. Mallorie, LACHAIZE Sébastien Pascal, GUIRAUD, 2012*»

D'après *Khosla & al. «1991»* le processus physique d'évolution des gaz peut être divisé en trois étapes:

- ⇒ **La nucléation** : durant laquelle les bulles se forment à la surface des électrodes à partir des solutions hautement sursaturées en gaz.
- ⇒ **La croissance** : où les bulles croissent par diffusion des gaz dissous vers la surface des bulles ou par coalescence à l'électrode avec d'autres bulles.
- ⇒ **Le détachement** : les bulles se détachent de l'électrode lorsque les forces de flottation dépassent celles qui les lient à l'électrode.

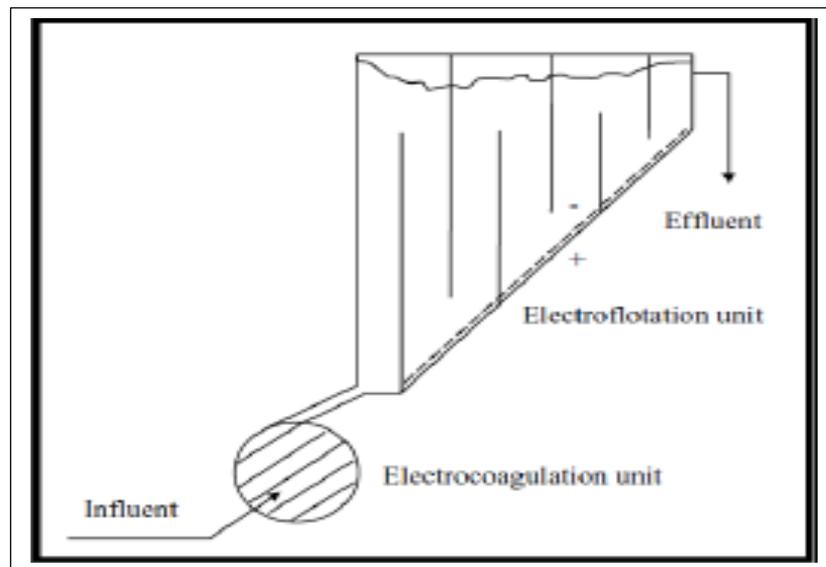
**Brandon & al. «1985»** suggèrent que l'interaction électrostatique entre les bulles et les doubles couches de l'électrode contrôle le diamètre de détachement des bulles.

L'efficacité de la technique d'électroflottation dépend du flux et de la dimension des microbulles qui sont générées pendant l'électrolyse de l'eau «**Araya-Farias, 1999**».

- **Types de cellules d'électroflottation**

### 1. Cellule d'électroflottation menée de cloisons

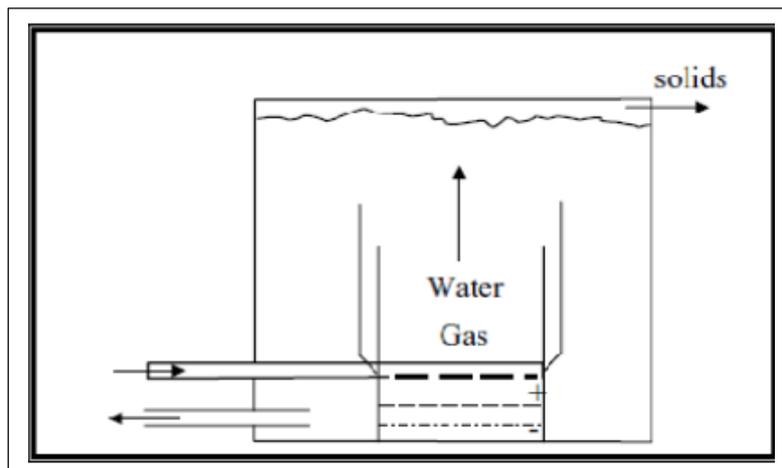
L'installation d'une membrane d'échange ionique entre les électrodes dans l'unité d'électroflottation assure le contrôle du pH de l'eau traitée. L'addition des cloisons dans une unité d'électroflottation aide à utiliser mieux le gaz produit (**Figure II.4**) «**ZOLOTUKHIN I-A., 1988**».



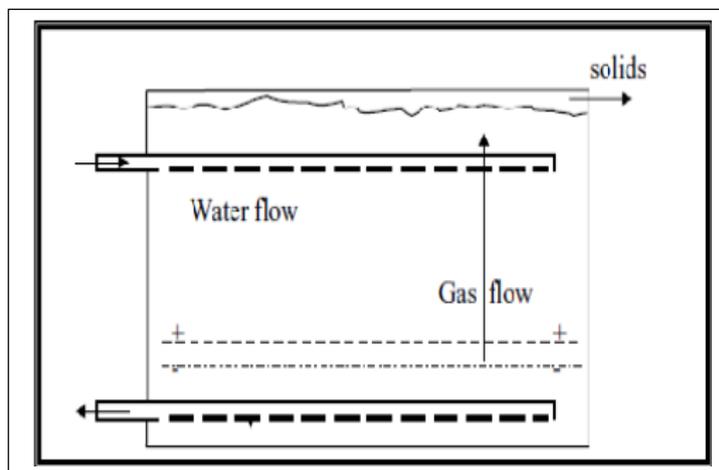
**Figure II.4.** Electroflottation avec des cloisons intégrées «**CHEN G, 2004**».

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

L'électroflottation avec systèmes à co-courants (**Figure II.5**) et à contre-courant (**Figure II.6**) ont été également étudiés à l'échelle industrielle «*CAMILLERI C., (1985)*». Généralement, il est peut être nécessaire de séparer les chambres de la cathode et de l'anode afin d'éviter que l'hydrogène ou l'oxygène actifs réagissent avec les particules solides dans le système, le pH doit être ajusté automatiquement dans chaque chambre «*KOBYA.M, CAN O.T, BAYRAMOGLU M., (2003)*».



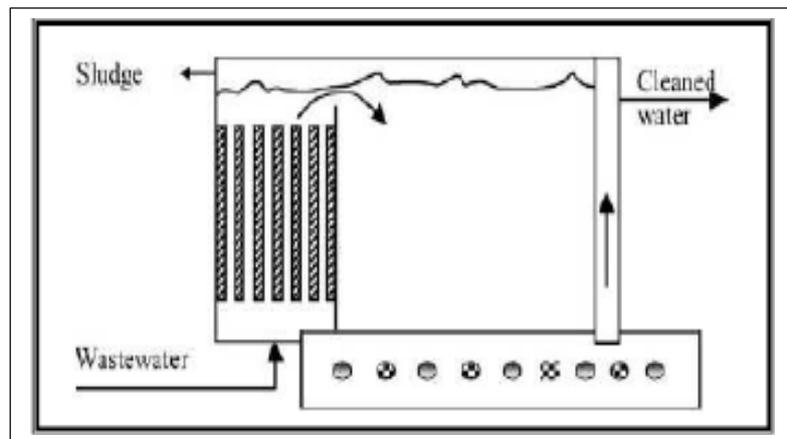
**Figure II.5.** Electroflottation à co-courant.



**Figure II.6.** Electroflottation à contre-courant «*CHEN , 2004*».

### 3. Cellule combinant l'électroflottation et l'électrocoagulation

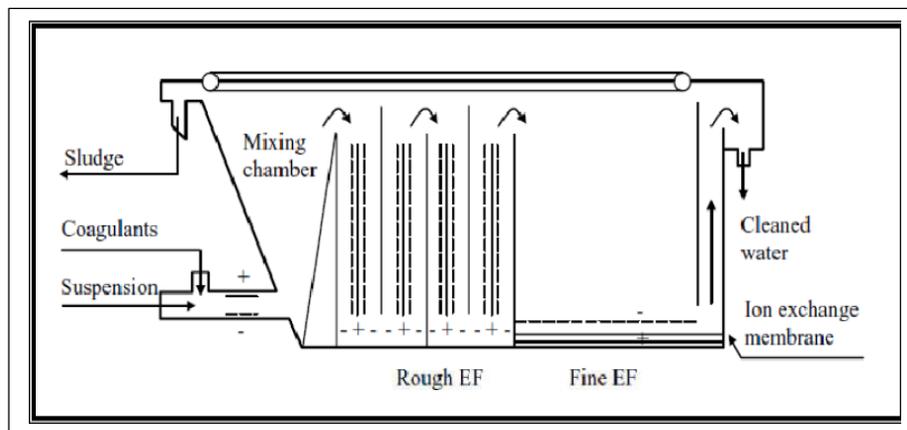
L'électroflottation est habituellement combinée avec l'électrocoagulation/floculation ou avec des produits chimiques (**Figure II.7**) «CHEN, 2004».



**Figure II.7.** Combinaison d'électrocoagulation et d'électroflottation «CHEN, 2004».

#### 4. Cellule d'électroflottation combinée à des médias fluidisés

Pour que les réactifs chimiques se mélangent bien aux polluants avant flottaison, des médias fluidisés ont été employés (**Figure II.8**) «Gvozdez & Ksenofontov, 1986».



**Figure II.8.** Electroflottation avec des médias fluidisés «CHEN, 2004».

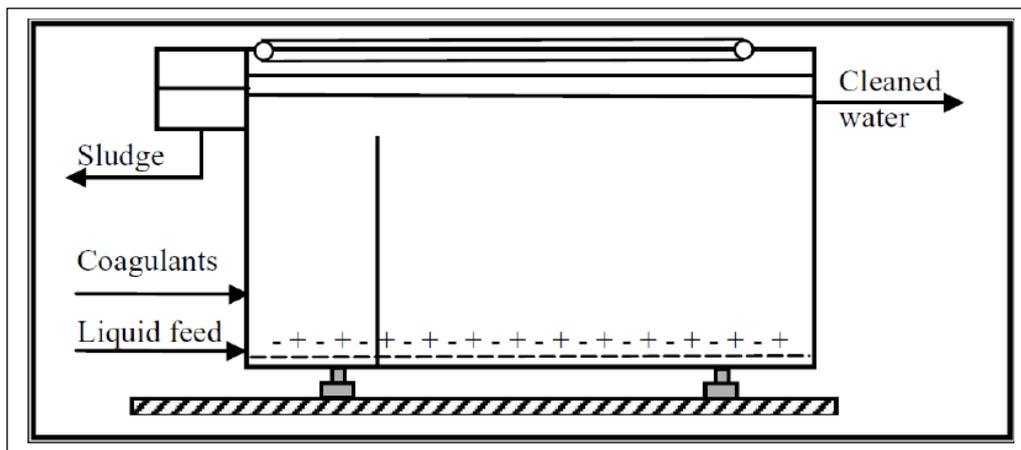
Cette conception permet un contact intensif de la phase solide dans la chambre de mélange avec des coagulants pour agglomérer les particules en suspension, et en même temps pour ne pas déstabiliser le floc formé. Les deux étapes de l'électroflottation assurent l'élimination des particules finement dispersées «Chen, 2004».

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

Cette conception a été testée et examinée pour les eaux usées industrielles fortement concentrées en porcelaine «*Il'in & al., 2002*».

Le système se compose d'une caisse, d'un collecteur de boues, et d'une pile d'électrode (Figure II.9). L'unité est divisée par une cloison pour avoir deux sections.

Chaque section est encore divisée en deux chambres. Les piles d'électrode sont placées verticalement dans chaque chambre «*Chen, 2004*».



(a)

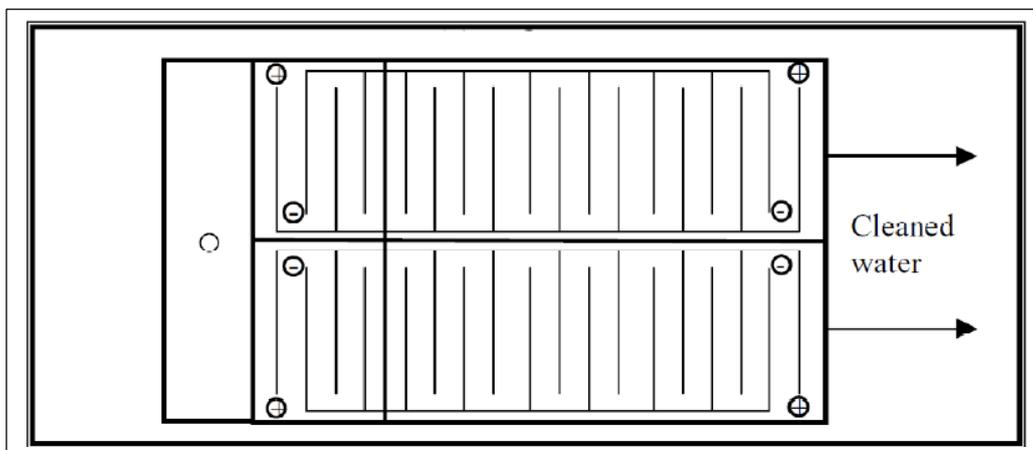


Figure II.9. Electroflottation à deux sections, (a) vue de côté et (b) vue de haut «*Chen, 2004*».

- **Facteurs influençant l'électroflottation**

L'exécution d'un système d'électroflottation est reflétée par l'efficacité d'enlèvement de polluant et les consommations de puissance et/ou de produits chimiques. L'efficacité d'enlèvement de polluant dépend en grande partie de la taille des bulles formées «*CHEN, 2004*».

Plusieurs facteurs peuvent influencer la taille des bulles générées par l'électroflottation, tels que la densité de courant, la température, le degré de rugosité de la surface de l'électrode, le matériau de l'électrode et le pH du milieu «*Hosny, 1996*».

**Okun & Matov «1984»** ont constaté que l'efficacité du procédé d'électroflottation dépend des paramètres de la cathode, à savoir : le diamètre du fil de la cathode, le pas de la grille et le degré de rugosité de la surface de l'électrode.

D'après **Chen «2004»** les principaux facteurs sont les suivants :

### 1. Effet du pH

La variation de taille des bulles dépend du pH de l'eau aussi bien que le matériel d'électrode. Les bulles d'hydrogène sont plus petites au pH neutre. Pour les bulles d'oxygène, leurs tailles augmentent avec le pH. Il devrait noter, cependant, que les matériaux de la cathode, affectent la taille des bulles d'hydrogène, ce qui font ainsi les matériaux d'anode «*Glembotskii & al., 1975*». Les tailles de bulle suivent une distribution log-normale «*Fukui & Yuu, 1985*».

### 2. Effet de la densité du courant

Les bulles de gaz dépendent également de la densité de courant «*Ketkar & al., 1988 et 1991*». Une diminution des tailles de bulle de gaz a été constatée avec l'augmentation de l'intensité du courant, **Burns & al. «1997»** ont constaté, également, qu'une telle diminution de taille de bulle était vraie seulement aux basses gammes des densités de courant. Quand la densité de courant est plus haute que 200 A/m<sup>2</sup>, on ne peut observer aucune tendance claire avec des bulles de gaz s'étendant de 20 à 38 µm.

### 3. Effet de la distance inter-électrode

La distance inter-électrode est un paramètre pouvant influencer la qualité du traitement des eaux usées. En effet, pour un courant électrique constant, l'augmentation de l'écart entre les deux électrodes cause une augmentation de la consommation énergétique et de la température du milieu, ce qui peut modifier l'efficacité du traitement. Ce facteur est en grande partie responsable de la baisse du rendement énergétique dans une cellule électrolytique. D'une façon générale, l'écart entre les deux électrodes obéit à un compromis entre la régulation du débit et une énergie de dissipation acceptable. Yu et al., «2005» ont étudié l'effet de l'espacement entre les deux électrodes sur l'efficacité d'élimination du phosphore. Les résultats de

cette étude ont prouvé que la meilleure efficacité d'élimination de ce polluant a été obtenue pour un espacement entre 1 et 2 cm.

#### 4. Temps de séjour

Au niveau de temps de séjour, l'électroflottation en elle-même peut être courte, le temps de contact doit être compris entre 5 et 40 minutes afin que la séparation soit effective, 5 minutes étant la valeur la plus souvent observée. «*COMMINGELLIS.C.H., 1994*».

#### 5. La nature des électrodes :

Dans le cas d'une électroflottation, l'anode et la cathode seront composées de matériaux inertes. Ainsi, elles pourront être constituées d'acier inoxydable, d'aluminium, oxyde de titane..., afin de favoriser la formation des microbulles. L'aluminium possède comme avantage par rapport au fer de ne pas colorer la solution traitée «*COMMINGELLIS.C.H., 1994*».

| Cathodes   | Anodes   |
|--|--|
| Hg, Pb, Cu, Ni   | Pt, Pt/Ti, Ir/Ti.  |
| Graphite ou autre forme de carbones traités  | Graphite ou autres formes de carbone (traités comme pour les cathodes) |
| Avec des produits organiques pour modifier la porosité, la densité et la résistance à la corrosion | Pb en milieu d'acide sulfurique  |
| Aciers   | Revêtement de PbO <sub>2</sub> sur Ti ou Nb                            |
| Revêtements d'acier par Ni, Ni/Al, Ni/Zn   | Nickel en milieu alcalin   |
|  | Revêtement du RuO <sub>2</sub> sur Ti, IrO <sub>2</sub> sur Ti         |
|  | Magnétite  |

**Tableau II-1** : Principaux matériaux employés pour la fabrication de la cathode et de l'anode.

#### ⇒ Domaines d'applications

L'électroflottation trouve son application dans divers domaines tel que :

- ❖ Traitement des eaux usées surtout avec la combinaison de l'électrocoagulation ;

- ❖ Éliminer les huiles insolubles finement dispersées (huile de coupe, émulsion, peintures, etc.) ;
- ❖ L'épuration des effluents d'industrie textile, alimentaire, papier, métallurgie, lisier des porcs...etc. ;
- ❖ L'élimination des métaux lourds (nickel, cuivre, zinc, plomb et cadmium) ;
- ❖ Élimination des hydrocarbures, des colorants et les pigments ;
- ❖ La séparation des minerais ;
- ❖ La clarification des jus de pomme et de raisins ;
- ❖ Transformation des produits alimentaires. «*CAROLYNE BOURASSA.,2000*»

#### ⇒ Avantages de l'électroflottation

En général, la technique d'électroflottation présente trois avantages principaux qui la différencient des autres techniques de flottation :

- les bulles de gaz dispersées formées de l'électrolyse sont extrêmement fines et uniforme avec le diamètre moyen de bulle autour de 20µm. cela augmente la surface de contact entre les particules en suspension et les bulles de gaz.
- Une densité de courant variable donne la possibilité de varier la concentration des bulles de gaz dans le milieu de flottation, augmentent de ce fait les probabilités de collision entre les bulles de gaz et les particules.
- La sélection de la surface d'électrodes appropriée et le choix des conditions de la solution permet d'obtenir des résultats de séparation optimaux pour un procédé spécifique. «*CHEN G, 2004; BENAÏSSA. Akila., 2010*»

Les autres avantages de l'électroflottation inclus :

- ❖ Simplicité de l'installation et moindre encombrement ;
- ❖ Réduction des installations en amont (coagulation-floculation) ;
- ❖ La technique demande une automatisation poussée, donc économe en personnel ;
- ❖ Fonctionnement silencieux ;
- ❖ Possibilité de traiter les effluents à haute température (jusqu'à 100°C) sans perte sensible d'efficacité ;

- ❖ Un haut taux d'élimination de la DBO (Demande Biochimique d'Oxygène) due à l'oxydation des molécules organiques à l'anode et aussi à l'élimination des graisses et huiles ;
- ❖ La montée des floes à surface donne une écume contenant de 9 à 12% de solides.

Présence des réactions secondaires utiles de l'électrolyse de l'eau, qui contribuent à réduire la charge polluante de l'effluent. «*CHEN L et al., 2003*»

#### ⇒ **Contraintes de l'électroflottation**

L'électroflottation présente certaines contraintes, parmi lesquelles, on peut citer :

- ❖ Corrosion anodique fréquente, surtout en présence de certains polluants comme les acides gras;
- ❖ L'oxydation des boues peut être gênante quand le recyclage des boues est important;
- ❖ Carbonatation des cathodes, impose un détartrage périodique;
- ❖ Corrosion des cuves métalliques par les courants vagabonds dans les petites installations, nécessite de les protéger.

#### **II.3.1.2.2. Electro-oxydation**

Les études sur l'électro- oxydation pour traitement des eaux résiduaires remontent au 19<sup>ème</sup> siècle. La recherche étendue sur cette technologie a débuté depuis la fin 1970. Pendant les deux dernière décennies, des travaux de recherches ont été accentués sur : l'efficacité de l'oxydation de divers polluants sur différentes électrodes «*CHEN G 2004*».

L'électro-oxydation des composés organiques et inorganiques se réalise par l'intermédiaire de deux voies : oxydation directe et oxydation indirecte «*CHEN G 2004*».

##### **1. Oxydation directe**

Appelée aussi oxydation anodique directe. Elle se produit directement sur les anodes en produisant une adsorption physique d'oxygène actif (radicaux hydroxyles absorbés ( )) ou une adsorption chimique d'oxygène actif (oxygène dans l'oxyde de treille) « *COMMINELLIS.C.H., 1994* ».

L'oxygène actif, physiquement adsorbé, cause la combustion complète des composés organiques(R), et oxygène actif, chimiquement absorbé, ( $MO_{x+1}$ ) participe à la formation du produit sélectif d'oxydation, présentées respectivement par les équations suivantes :



## 2. Oxydation indirecte

Elle se produit en raison de la production des oxydants puissants dans la solution telle que le chlore, le peroxyde d'hydrogène et l'ozone. Des radicaux hydroxyles intermédiaires, telles que l' $OH_2$ ,  $O_2$  et  $HO_2$  se forment également pendant l'électro-oxydation et pourraient effectivement détruire les polluants organiques et inorganiques «*FAROOQUI.M.S., 2004*».

### II.3.1.2.3. Electro-désinfection

L'électro-désinfection est une nouvelle technologie dans le domaine de la désinfection des eaux et des eaux usées.

C'est un procédé qui utilise communément la chloration, comme méthode répandue de désinfection, mais en raison des problèmes graves de sûreté liés à l'utilisation du chlore, des méthodes alternatives ont été développées, telles que l'ozonation, rayonnement UV et  $ClO_2$ , mais elles sont toujours plus chères et moins commodes que la chloration «*PATERMARAKIS.G and FOUNTOUKIDIS. E., 1990*».

Plusieurs mécanismes peuvent expliquer l'action de la désinfection électrochimique. Elle inclut la mort des cellules due aux oxydants électrochimiquement produits, perméabilisations des membranes par les champs électriques appliqués, et électro-oxydation chimique des constitutions cellulaires essentiels pendant l'expression aux courants électriques «*FAROOQUI.M.S., 2004*».

### II.3.1.2.4. Electrocoagulation

L'électrocoagulation est une méthode de traitement des eaux, basée sur la formation des cations métalliques in situ par dissolution électrochimique d'une anode métallique sacrificielle suite au passage du courant. Ces cations et complexes d'hydroxydes métalliques formés, vont assurer l'adsorption puis la floculation des particules et des composés pollués dissous chargés négativement en neutralisent leurs charges. Elle est considérée comme un procédé complexe avec multitude de mécanismes synergiques concourant au traitement de la pollution «*ZONGO-I., 2009*».

**Mollah & al.** «2001» résumant ce processus comme suit:

**a.** La formation des coagulants par l'oxydation électrolytique de métaux sacrificiels

b. La déstabilisation des contaminants, des polluants, des matières en suspension et cassure des émulsions

c. L'agrégation des phases déstabilisées pour former les floes.

Le procédé d'électrocoagulation peut être utilisé seul ou en série avec d'autres procédés dans une chaîne de traitement des eaux.

### 1. Exemple d'une cellule d'électrocoagulation

Holt & al. «2002», avaient établis un schéma récapitulatif (Figure II.10) qui illustre la nature complexe et interdépendante du processus d'électrocoagulation.

Le schéma montre clairement que le coagulant et ses produits d'hydrolyse peuvent avoir de nombreuses interactions que ce soit avec le polluant, et d'autres espèces ioniques ou avec les bulles de gaz électrolytiques. Ces auteurs témoignent d'une nécessité d'établissement d'une approche scientifique centrée pour déchiffrer l'électrocoagulation.

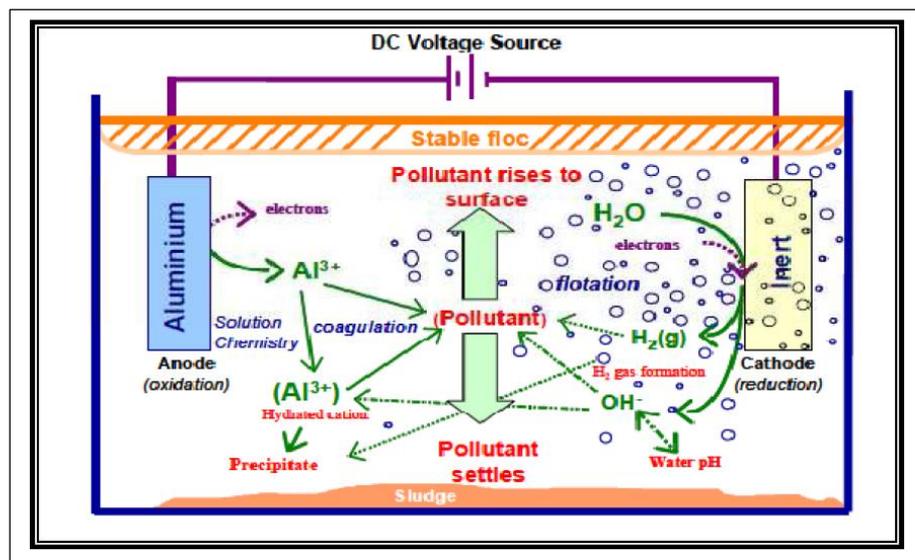


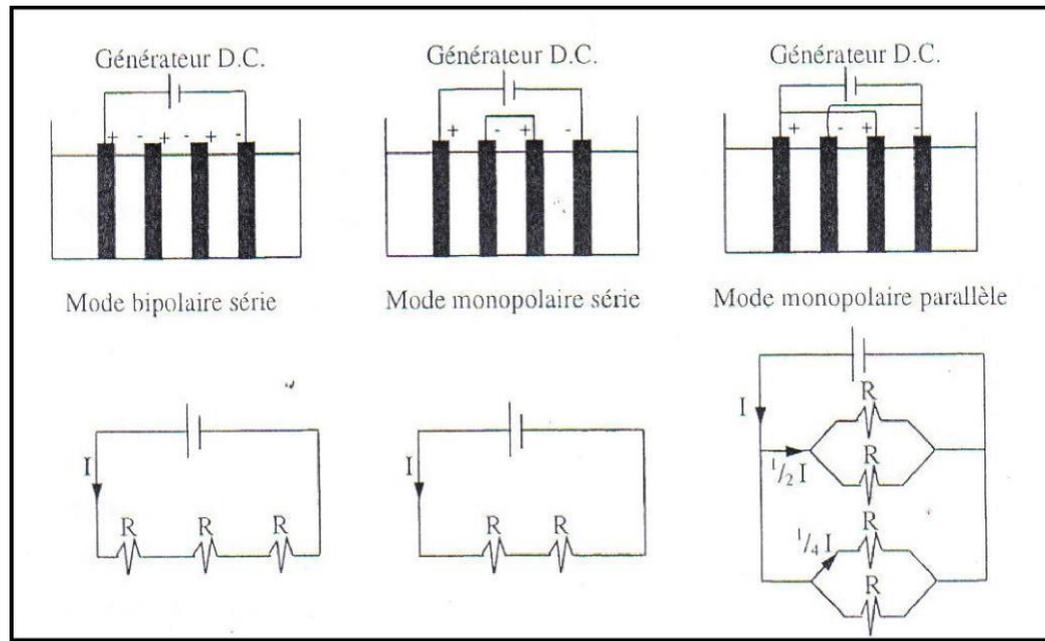
Figure II.10. Les différentes interactions qui se produisent dans un réacteur de l'électrocoagulation «Holt & al., 2001».

### 2. Technologie du procédé d'électrocoagulation :

Plusieurs technologies d'EC ont été mises au point au niveau laboratoire et industriel. Les cellules électrochimiques sont montées seuls ou en séries avec d'autre types de procédé. Dans les petites installations de laboratoire, les géométries des électrodes sont diverses tels que les plaques, cylindrique, des lits fixes de billes sphériques et des électrodes rotatives. Plusieurs modes de connexions électriques peuvent être réalisés.

On distingue généralement trois modes :

- ❖ Mode monopolaire en série,
- ❖ Mode monopolaire en parallèle,
- ❖ Mode bipolaire en série. «*FAROOQUI.M.S., 2004*»



**Figure II.11.** Les différents modes de connexions électriques pour une cellule d'électrocoagulation et les circuits électriques associés «*FAROOQUI.M.S., 2004*».

### 3. Application du procédé d'électrocoagulation

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

L'électrocoagulation a été appliquée avec succès dans le traitement de plusieurs types de pollution : effluents de l'industrie de textile «*GAUJONS D., 1995*».

De plus, dans des dernières décennies l'EC a été proposé comme procédé efficace pour éliminer les espèces ioniques solubles des solutions, en particulier les métaux lourds.

Le processus d'électrocoagulation a été trouvé efficace dans la séparation solide/liquide.

Le procédé l'EC à utiliser pour le traitement de solutions colorées par différentes substances telles que le Bleu méthylène et jaune éosine «*GOLDER. A.K, HRIDAYA. N, SAMANTA A.N, RAY S., 2005*».

Le traitement de l'eau polluée par les rejets d'une industrie de raffinage mécanique et chimique, caractérisée par une teneur élevée en matières suspensions, une DCO supérieur à 500 mg. L<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 en fer et en aluminium. «*Guide colorant indanthrène Tome I*»

#### 4. Avantages et inconvénients du procédé d'électrocoagulation

Comme tous les procédés d'épuration des eaux, l'électrocoagulation possède des avantages et des inconvénients ou limitent ses domaines d'applications.

- ❖ L'EC exige un équipement simple, compact et est facile à utiliser le suffisamment de l'attitude opérationnel pour traiter la plupart des problèmes produits sur le fonctionnement. «*DANESHVAR et al., 2003*»
- ❖ Le procédé d'électrocoagulation ne nécessite pas l'ajout de produit chimique, il nécessite l'ajout de petite quantité d'additif pour améliorer la conductivité électrique de l'effluent.
- ❖ L'eau usagée traitée par l'EC donne de l'eau de gout agréables, claire, sans couleur et inodore...etc. «*HOLT et al., 2005*»
- ❖ Le procédé de l'EC a l'avantage d'éliminer les plus petites particules colloïdales. L'application d'un champ électrique entre les électrodes entraîne les particules dans un mouvement plus rapide, facilitant de ce fait leur agglomération. «*HOSNY.A.Y, 1996*»

**En plus de ces avantages, l'électrocoagulation présente quelques inconvénients parmi lesquels on peut citer :**

- ❖ l'effluent traité par électrocoagulation doit être un électrolyte ce qui impose un ajout de sel pour certains effluents faiblement conducteurs.
- ❖ électrodes sacrificatoires sont dissoutes dans l'effluent à traiter en raison de l'oxydation, et doivent être régulièrement remplacées.
- ❖ La maintenance des installations est parfois coûteuse, le nettoyage et changement des électrodes nécessite l'arrêt du procédé au cours de ces opérations.

**II.4. Conclusion**

Le procédé classique de coagulation floculation est souvent utilisé dans le traitement des eaux textiles avec un succès relatif. En effet, rarement une décoloration complète est obtenue. D'autre part, ce procédé classique génère des masses non négligeables de boues qui posent un problème de gestion de déchets.

Dans notre travail, nous avons choisis d'utiliser l'électrocoagulation « EC » comme système de traitement des eaux polluées par les colorants textiles. Ce procédé nécessite un équipement simple avec un mode opératoire facile, un temps de traitement réduit, produit une faible quantité de boues (flocs), comparé au traitement chimiques : les bulles de gaz produites durant l'électrolyse peuvent transportée le polluant à la surface de la solution ou il est plus facilement concentré, collecté puis éliminé.

### III.1. Introduction

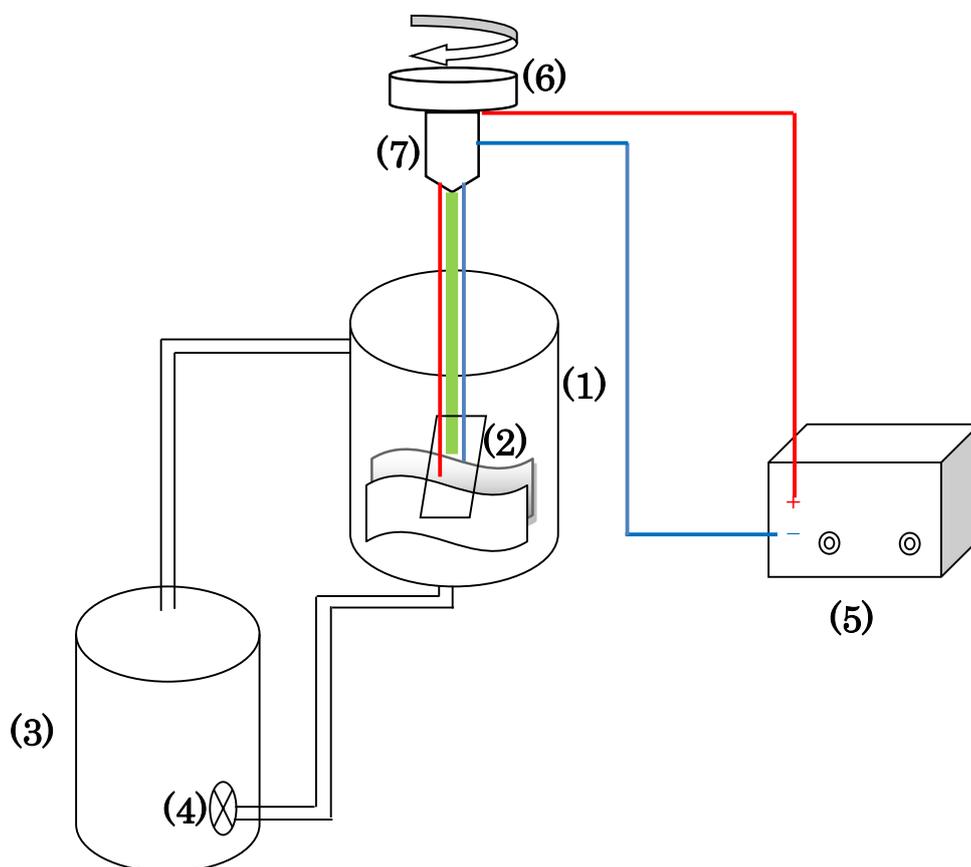
Les essais de traitements faisant l'objectif essentiel de ce travail, se résument en l'application de l'électrocoagulation-électroflottation pour la dégradation d'un colorant textile « Bleu d'Indanthrène RS » dans un réacteur cylindrique à électrodes rotatives. Ce travail se focalise aussi sur l'étude de l'effet de certains paramètres sur le procédé étudié.

La méthodologie suivie et l'ensemble de matériels utilisés sont présentés ci-dessous.

### III.2. Matériels

#### III.2.1. Unité de traitement

Dans ce travail, un nouveau prototype électrochimique a été conçu (**Figure III.1**), ce dernier se compose d'une cellule électrochimique ; un générateur de courant électrique ; un dispositif d'agitation ; des électrodes ; une pompe immergée.



(1) Cellule d'électroflottation, (2) les électrodes, (3) un réservoir, (4) pompe péristaltique, (5) générateur, (6) moteur à vitesse variable, (7) connecteur rotatif.

**Figure III.1** Schéma d'une cellule d'électroflottation.

### A. Géométrie et dimensions du réacteur électrochimique

La forme de la cellule électrochimique est généralement de conception cylindrique ou parallélépipédique rectangulaire.

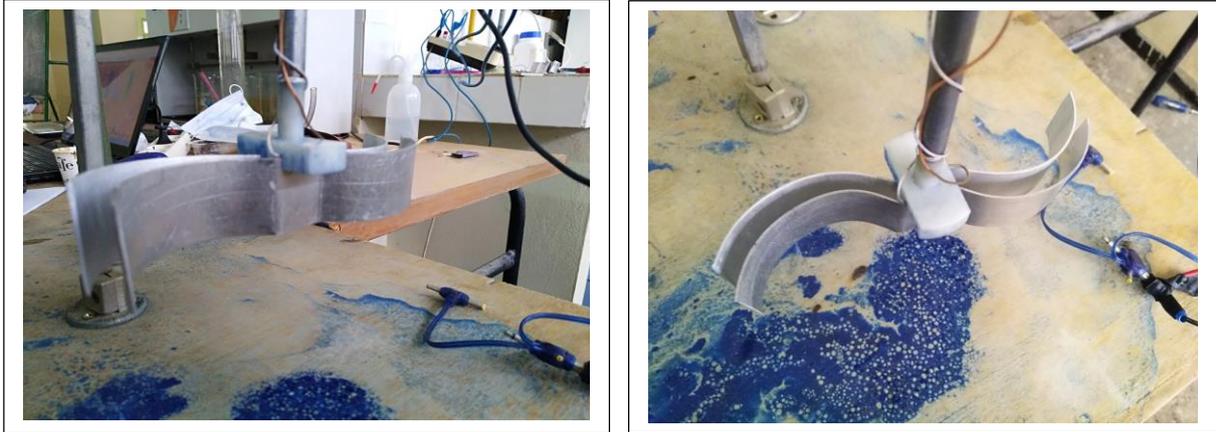
Les essais ont été réalisés dans un prototype comportant une cellule électrochimique de forme cylindrique (**Figure III.2**). Cette unité est constituée d'une colonne en PEHD de dimension 5.48L, elle est alimentée par le fond, assurant ainsi un écoulement ascendant et de ce fait on assiste à un mouvement co-courant entre le liquide et les bulles de gaz générées par électrolyse. Après avoir séjournée dans cette cellule, l'eau est acheminée gravitairement dans un réservoir. La recirculation de l'eau est assurée par une pompe immergée.



**Figure III.2.** Cellule électrochimique de forme cylindrique

### B. Forme et dimensions des électrodes

Cette unité est munis d'une paire d'électrodes sous forme d'hélices (**Figure III.3**), de surface égale à 36 cm<sup>2</sup> chacune, elles sont installées horizontalement au milieu et au fond de la cellule électrochimique sur des supports en téflon, comportant des encoches qui permettent de varier la distance inter-électrodes.



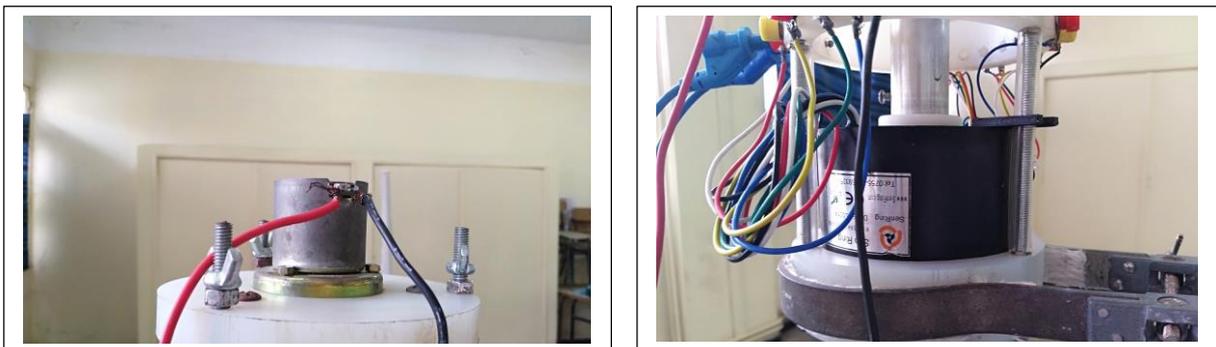
**Figure III.3.** Paire d'électrodes sous forme d'hélices

### C. Alimentation en courant électrique

L'alimentation en courant est assurée par un générateur à courant continu, fournissant une tension variable entre 0 et 30V et une tension de 0 à 3A. Des fils électriques de diamètre 1 mm assurent le transfert du courant de ce dernier vers les électrodes

### D. Dispositif d'agitation

La rotation des électrodes est assurée par un moteur à vitesse variable doté d'un connecteur rotatif assurant l'alimentation des électrodes (**Figure III.4**).



(a)

(b)

(a) Moteur à vitesse variable, (b) Connecteur rotatif

**Figure III.4.** Dispositif d'agitation.

### III.2.2. Les produits utilisés

Différents produits chimiques ont été utilisés, leurs caractéristiques et propriétés sont décrites ci-dessous.

#### III.2.2.1. Bleu d'indanthrène

Le bleu d'indanthrène ou bleu d'indanthrone (PB60) est un pigment anthraquinonique de teinte bleue vive à tendance rougeâtre.

##### ⇒ Caractéristiques

Sa formule est  $C_{28}H_{14}N_2O_4$  et il se caractérise par sa transparence et son fort pouvoir colorant. D'un coût de 10 fois plus cher.

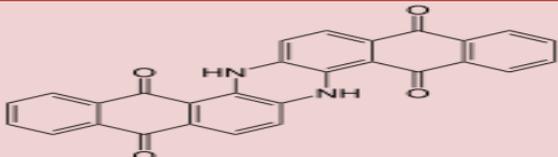
| Nom                       | Bleu d'indanthrène  |
|---------------------------|---|
| Masse molaire             | 442,42 g/mol  |
| Température de fusion     | 470 à 500°C   |
| Solubilité à l'eau à 20°C | 0,01 g.l <sup>-1</sup>  |
| Formule chimique          | $C_{28}H_{14}N_2O_4$  |
| Structure                 |  |

Tableau III.1 : Caractéristique du Bleu d'indanthrène «*PUPO ET AL, 2013*»

##### ⇒ Historique

Il a été découvert en 1901 par R.Bohn de la BASF. Pourtant, ce n'est que dans les années 1950 que le colorant fut transformé en pigment.

Il est apparu sous le nom de bleu indien dans le catalogue de la maison Lefranc (aujourd'hui Lefranc et Bourgeois) de 1934.

#### III.2.2.2. Matériaux des électrodes utilisées

Le choix des électrodes utilisées dans ce présent travail, c'est basé sur la disponibilité et l'efficacité du matériau constituant. Les électrodes en Aluminium qui ont prouvés leur efficacité de traitement «*MERZOUK et al., 2010*» et dont le constituant est récupéré des déchets d'industrie d'Aluminium.

#### III.2.2.3. Salinité

La salinité désigne la quantité de sels dissous dans un liquide, notamment l'eau qui est un puissant solvant pour de nombreux minéraux.

Dans nos expériences cette dernière est maintenue à 2g/l.

### III.3. Méthodologie :

Notre objectif consiste en la dégradation d'un colorant textile : Bleu d'Indanthrène RS par électrocoagulation-électroflottation avec des électrodes en aluminium.

Une étude de l'influence de certains paramètres sur le procédé fût entamée.

- ❖ Influence de la densité du courant ;
- ❖ Influence de la distance inter-électrodes ;
- ❖ Influence de la vitesse de rotation des électrodes.

Pour ce faire nous avons procédé comme suit :

- Les solutions ont été préparées par dissolution du polluant (Bleu d'Indanthrène RS) à une concentration de 100 mg/l et de NaCl à une concentration de 2g/l dans de l'eau déminéralisée;
- Les solutions préparées sont alors agitées magnétiquement pendant 5 mn.
- Une fois le courant est appliquée dans, des prélèvements à intervalles de temps égaux (5mn) sont réalisés à l'aide d'une pipette pour l'analyse de l'absorbance.

### III.4. Les techniques analytiques :

Parmi les nombreuses méthodes instrumentales utilisées pour déterminer la concentration d'une espèce chimique en solution, les méthodes les plus courantes sont celles basées sur la mesure de l'intensité d'absorption ou d'émission d'un rayonnement électromagnétique par les espèces à doser. Les rayonnements les plus souvent utilisés sont l'ultraviolet (UV), la lumière visible et l'infrarouge (IR). Le domaine du visible et de l'UV a été abondamment étudié depuis longtemps.

Au cours de la réalisation de ce travail, une technique analytique utilisée pour le suivi de la concentration du colorant, cette technique est décrite ci-dessous.

#### IV.4.1. La spectrophotométrie UV-Visible :

La spectrophotométrie est une méthode analytique qui repose sur l'absorption de la lumière par les substances à analyser. En effet, la lumière étant une onde correspondant à la vibration d'un champ électromagnétique et émettant des particules d'énergie lumineuses appelées photons. Le principe de cette méthode est basé sur la loi de Beer-Lambert.

**IV.4.2. La loi de Beer-Lambert :**

L'atténuation d'un faisceau lumineux monochromatique s'exprime par sa transmittance  $T$  (ou pourcentage de transmission), définie comme le rapport entre l'intensité lumineuse transmise ( $I$ ) et l'intensité incidente ( $I_0$ ) :

$$T = \frac{I}{I_0}$$

On définit également l'absorbance  $A$  par :

$$A = -\log T = \log \frac{I_0}{I}$$

Pour un rayonnement monochromatique de longueur d'onde  $\lambda$ , la loi de Beer-Lambert établit une proportionnalité entre la concentration  $C$  d'une entité chimique en solution, sa nature chimique (caractérisée par son coefficient d'extinction molaire  $\varepsilon$ ), son absorbance  $A$  et la longueur du trajet parcouru par la lumière dans la solution (trajet optique  $l$ ):

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \varepsilon \lambda C l$$

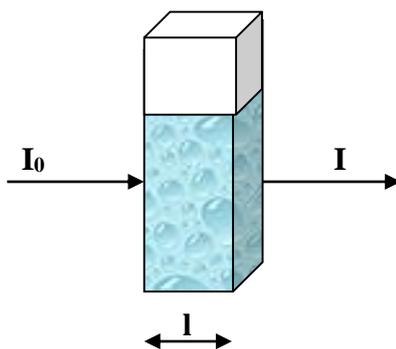


Figure IV.5 : trajet optique.

D'où :

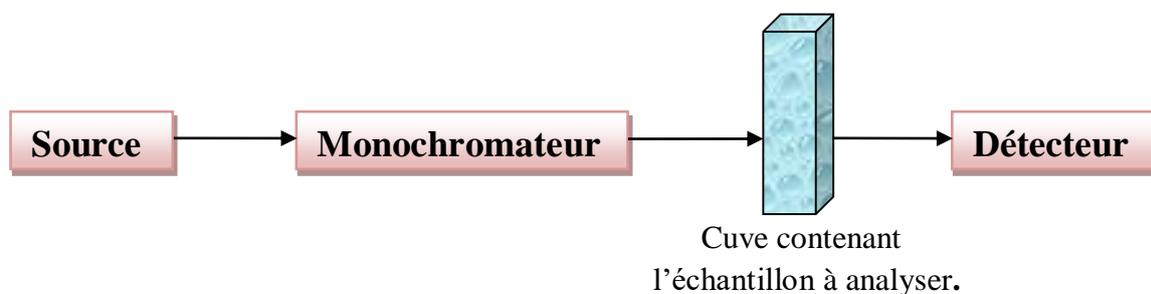
- ✚  $A$  : Absorbance à une longueur d'onde  $\lambda$  ;
- ✚  $I_0$  : Intensité du faisceau lumineux monochromatique incident ;
- ✚  $I$  : Intensité du faisceau lumineux émergent ;
- ✚  $l$  : Longueur du trajet optique qui correspond à l'épaisseur de la cuve de mesure en cm ;
- ✚  $C$  : Concentration molaire de l'entité absorbante dans la solution en  $\text{mol.L}^{-1}$  ;
- ✚  $\varepsilon_\lambda$  : Coefficient d'absorption molaire de la substance en solution à la longueur d'onde  $\lambda$  considérée en  $\text{L.mol}^{-1}.\text{cm}^{-1}$ .

La loi de Beer-Lambert n'est vérifiée que si les conditions suivantes sont respectées :

- ❖ Lumière monochromatique ;
- ❖ Solutions très diluées ;
- ❖ Pas de réflexion, diffusion ou fluorescence du faisceau incident.

#### IV.4.3. Principe de la spectrophotométrie UV-Visible :

Le spectrophotomètre est un appareil permettant de mesurer l'absorbance d'une solution, pour différentes longueurs d'ondes. Pour cela, il fait passer un rayon d'une longueur d'onde choisie à travers une cuve contenant la solution à étudier présenté dans la figure IV.6. Les molécules de la solution absorbent plus ou moins le rayon lumineux, on définit alors l'absorbance pour cette longueur d'onde. Le schéma ci-dessous illustre la configuration d'un spectromètre monocanal à optique mono-faisceau.



**Figure IV.6** : Schéma de principe d'un spectrophotomètre à mono-faisceau.

### IV.1. Introduction:

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus, lors de l'élimination du colorant Bleu d'indanthrène RS par électrocoagulation-électroflottation.

Pour étudier l'effet de la densité du courant ; la distance inter électrodes et la vitesse de rotation de ces dernières sur l'efficacité de traitement ou bien sur la décoloration du Bleu d'indanthrène RS, la cinétique de décoloration est suivie en variant les densités du courant et les distances inter-électrodes sur un intervalle de 25 ; 50 et 75 mA/cm<sup>2</sup> (1 ; 2 et 3 A) respectivement à 1 ; 2 et 3 cm, avec une vitesse de rotation des électrodes variant entre 5 ; 7,5 et 1 à tr/mn à une concentration constante du colorant qui est de 100 mg/l et une salinité de 2gr/l (NaCl).

Pour suivre la cinétique de dégradation du colorant, des prélèvements, ont été effectués à intervalle de temps fixe (5minutes). Les échantillons prélevés sont ensuite analysés par spectrophotomètre. Les résultats obtenus sont illustrés dans les tableaux et figures ci-après, exprimés en rendement de séparation.

### IV.2. Description visuelle du procédé:

Les phénomènes remarquables pour toutes les expériences sont :

- Dégagement des bulles de gaz d'oxygène à l'anode suivant la réaction:  
 $4\text{OH}^{-}\text{aq} \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^{-}$  ;
- Dégagement des bulles de gaz d'hydrogène à la cathode suivant la réaction :  
 $2\text{H}^{+}\text{aq} + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{H}_2$  ;
- Une répartition uniforme des bulles de gaz dans la cellule électrochimique ;
- Une formation d'une quantité de mousse à la surface de la solution qui est très stable ;
- A la fin de l'opération, on observe un faible dépôt de floccs sur l'anode.

### IV.3. Influence de l'intensité du courant:

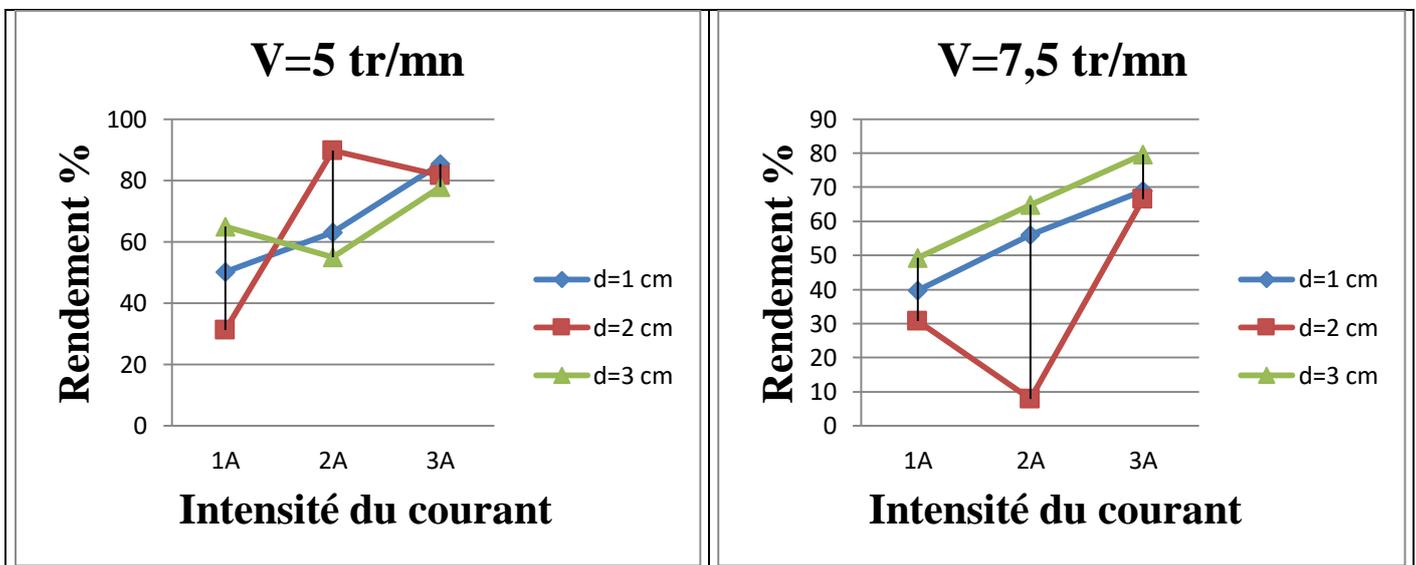
La densité de courant est jugée comme un paramètre essentiel en EC, spécifiquement pour la cinétique de décoloration «*MERZOUK et al., 2009; ZODI et al., 2013; MERZOUK et al., 2008; BAYRAMOGLU et al., 2004*». Lorsque la densité de courant augmente, le temps de traitement diminue en raison de la forte dissolution des électrodes. Il en résulte donc davantage de déstabilisation des particules du polluant ; par ailleurs le taux de production des

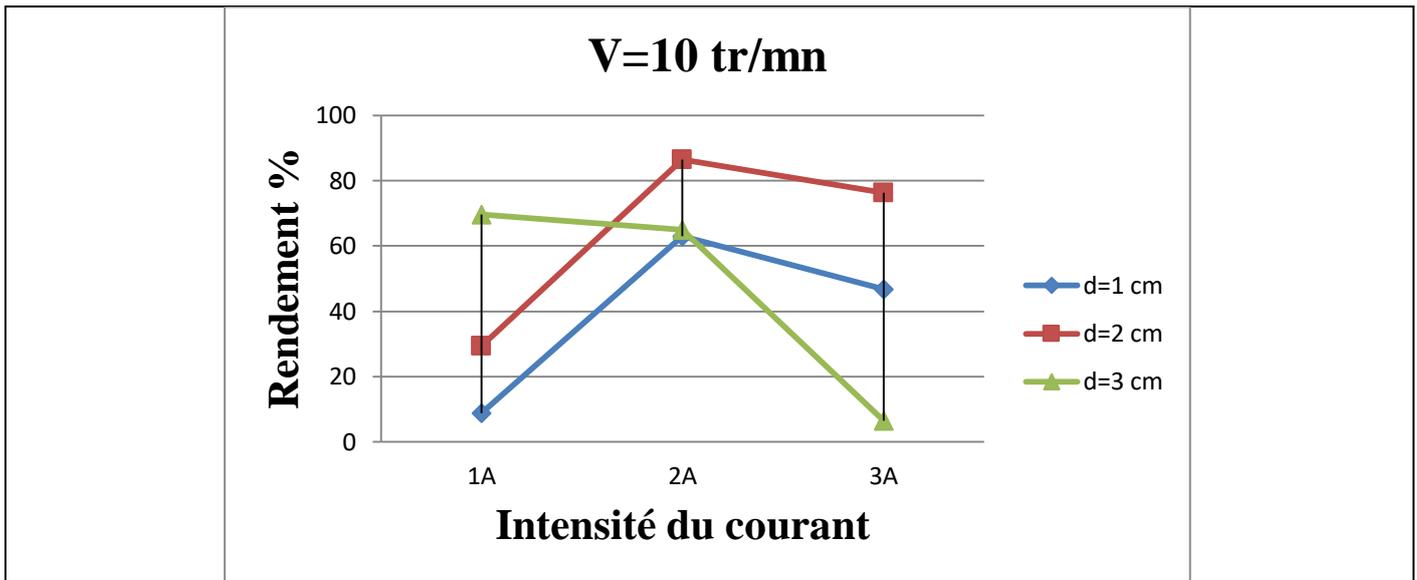
bulles d'hydrogène augmente et leur taille diminue lorsque la densité de courant augmente. Tous ces effets sont bénéfiques pour une élimination efficace du polluant par flottation.

Les résultats obtenus sont portés dans le (Tableau IV.1), Les courbes établies sont représentées par les (Figures IV.1):

| Distance cm | V=5 tr/mn     |             | V=7,5 tr/mn   |             | V=10 tr/mn    |             |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
|             | Intensité (A) | Rendement % | Intensité (A) | Rendement % | Intensité (A) | Rendement % |
| 1 cm        | 1A            | 50,27%      | 1A            | 39,79%      | 1A            | 8,76%       |
|             | 2A            | 63,18%      | 2A            | 56,12%      | 2A            | 63,08%      |
|             | 3A            | 85,27%      | 3A            | 68,95%      | 3A            | 46,76%      |
| 2 cm        | 1A            | 31,17%      | 1A            | 30,70%      | 1A            | 29,42%      |
|             | 2A            | 89,6%       | 2A            | 7,91%       | 2A            | 86,54%      |
|             | 3A            | 81,70%      | 3A            | 66,58%      | 3A            | 76,20%      |
| 3 cm        | 1A            | 64,88%      | 1A            | 49,24%      | 1A            | 69,66%      |
|             | 2A            | 55,06%      | 2A            | 64,82%      | 2A            | 64,88%      |
|             | 3A            | 77,79%      | 3A            | 79,57%      | 3A            | 6,58%       |

Tableau IV.1. Variation du rendement en fonction de l'intensité du courant





**Figure IV.1.** Évolution du rendement de dégradation du BIRS en fonction de l'intensité du courant pour les différentes vitesses et distances appliquées

Les (Figure IV.1) et le (Tableau IV.1) montrent qu'à plus faible intensité du courant 1A, 69,66% de coloration a été dégradée, contrairement, pour une intensité de 2A, où on enregistre une augmentation du rendement de décoloration jusqu'à 89,65%, cet écart peut être expliqué par la loi de **FARADAY** donc une augmentation de l'intensité de courant implique une augmentation de la quantité du coagulant ( $Al_3^+$ ) produite par la dissolution de l'anode.

Donc la présence du coagulant en solution contribue à une augmentation d'efficacité de réduction de coloration. Les résultats obtenus ont prouvé que l'augmentation de l'intensité de courant conduit à améliorer l'efficacité de traitement, ce qui est également énoncée dans la littérature «*TIR Mohamed, 2009*».

On est arrêtée à une intensité de 3 A car il est également recommandé de limiter l'intensité de courant afin d'éviter l'évolution excessive de l'oxygène aussi bien d'éliminer d'autres effets nuisibles, comme la génération de chaleur «*TIR Mohamed, 2009*».

Du point de vue économique, puisque la densité du courant affecte directement sur la consommation d'énergie et le coût de traitement, il est critique de déterminer et appliquer la valeur optimale de la densité du courant pour n'importe quelle application spécifique «*BELEGALD.J., 1987*».

Selon nos résultats, une intensité de courant de 2 A semblé être suffisante pour une meilleure floculation électrolytique et par un maximum d'abattement de la couleur atteignant 89,65%.

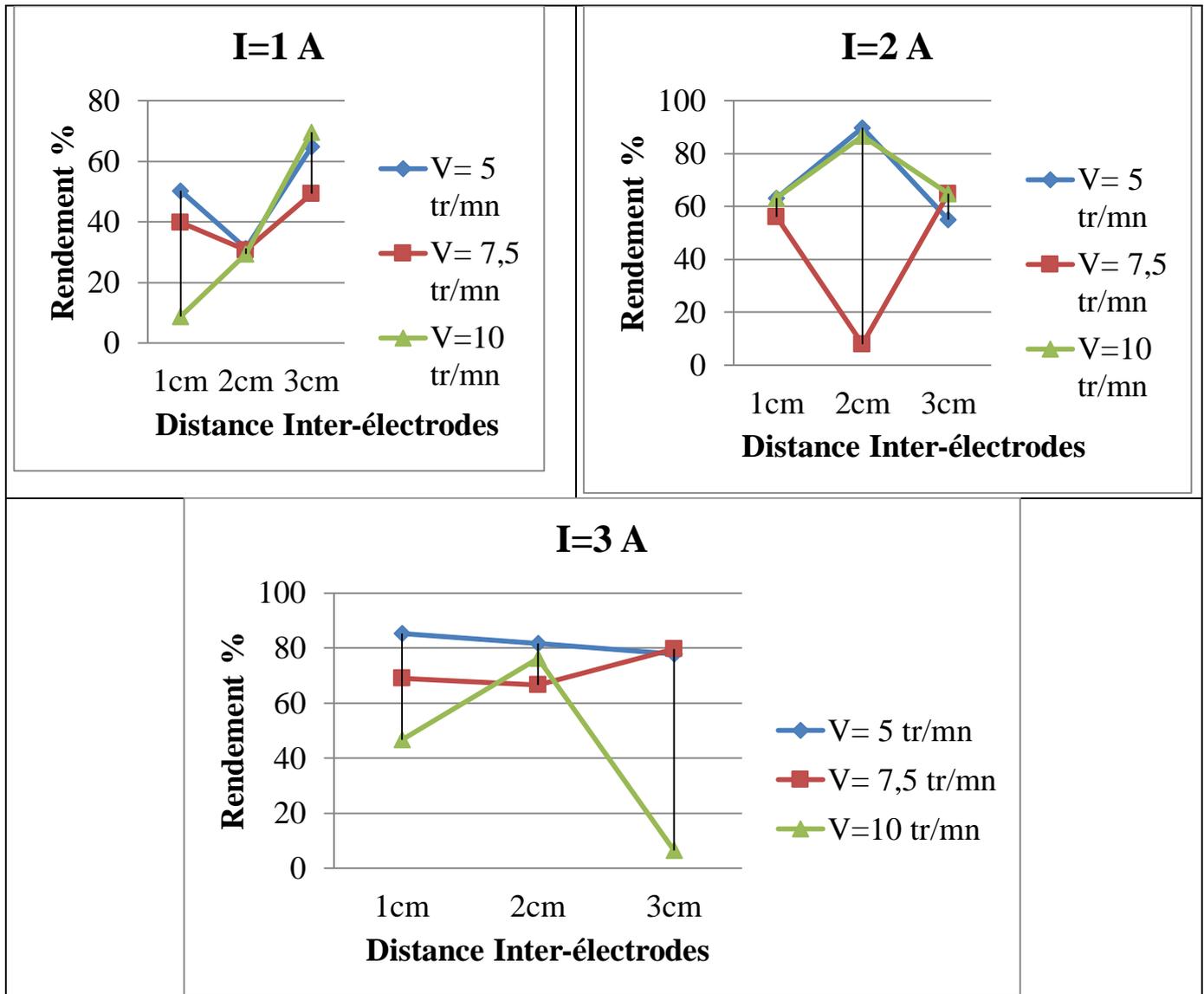
#### IV.4. Effet de la distance inter électrodes :

La distance inter électrode est aussi un paramètre important à déterminer puisqu'il définit le volume relatif d'électrolyte par unité de surface de l'électrode. De plus, ce paramètre influence directement la chute ohmique dans l'électrolyte car celle-ci augmente avec la distance entre électrode. Pour une intensité donnée, cette chute ohmique peut être réduite soit en rapprochant les électrodes, soit en utilisant une surface plus importante, ou en augmentant la conductivité de la solution «*LEMLIKCHI WAHIBA, 2012*».

Les résultats obtenus sont portés dans le (Tableau IV.2). Les courbes établies sont représentées par les (Figures IV.2):

| Vitesse<br>tr/mn | I=1 A          |                | I=2 A          |                | I=3 A          |                |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                  | Distance<br>cm | Rendement<br>% | Distance<br>cm | Rendement<br>% | Distance<br>cm | Rendement<br>% |
| V=5 tr/mn        | 1cm            | 50,273297      | 1cm            | 63,181754      | 1cm            | 85,278276      |
|                  | 2cm            | 31,17705       | 2cm            | 89,657         | 2cm            | 81,706456      |
|                  | 3cm            | 64,889679      | 3cm            | 55,065892      | 3cm            | 77,793277      |
| V=7,5<br>tr/mn   | 1cm            | 39,794143      | 1cm            | 56,126651      | 1cm            | 68,952008      |
|                  | 2cm            | 30,709877      | 2cm            | 7,9140757      | 2cm            | 66,581705      |
|                  | 3cm            | 49,24421       | 3cm            | 64,825175      | 3cm            | 79,578918      |
| V=10 tr/mn       | 1cm            | 8,7648831      | 1cm            | 63,08283       | 1cm            | 46,767363      |
|                  | 2cm            | 29,42829       | 2cm            | 86,540881      | 2cm            | 76,205878      |
|                  | 3cm            | 69,665881      | 3cm            | 64,888579      | 3cm            | 6,5831153      |

Tableau IV.2. Variation du rendement en fonction de la distance inter-électrode



**Figure IV.2.** Évolution du rendement de dégradation du BIRS en fonction de la distance inter-électrode pour les différentes vitesses et intensité appliqués

Pour étudier l'influence de la distance inter-électrodes sur l'efficacité de traitement, nous l'avons fait varier de 1 à 3 cm. L'allure des courbes ne nous montre pas une proportionnalité forcément inverse entre la distance inter-électrodes et le rendement de décoloration et ces fluctuations dans les résultats peuvent être dus au mouvement des électrodes.

Il apparaît que la distance idéale dans notre cas soit de 2cm entre l'anode et la cathode. Cette distance (2cm) est celle qui est généralement recommandée par plusieurs auteurs «*KHaldi et al., 2006*».

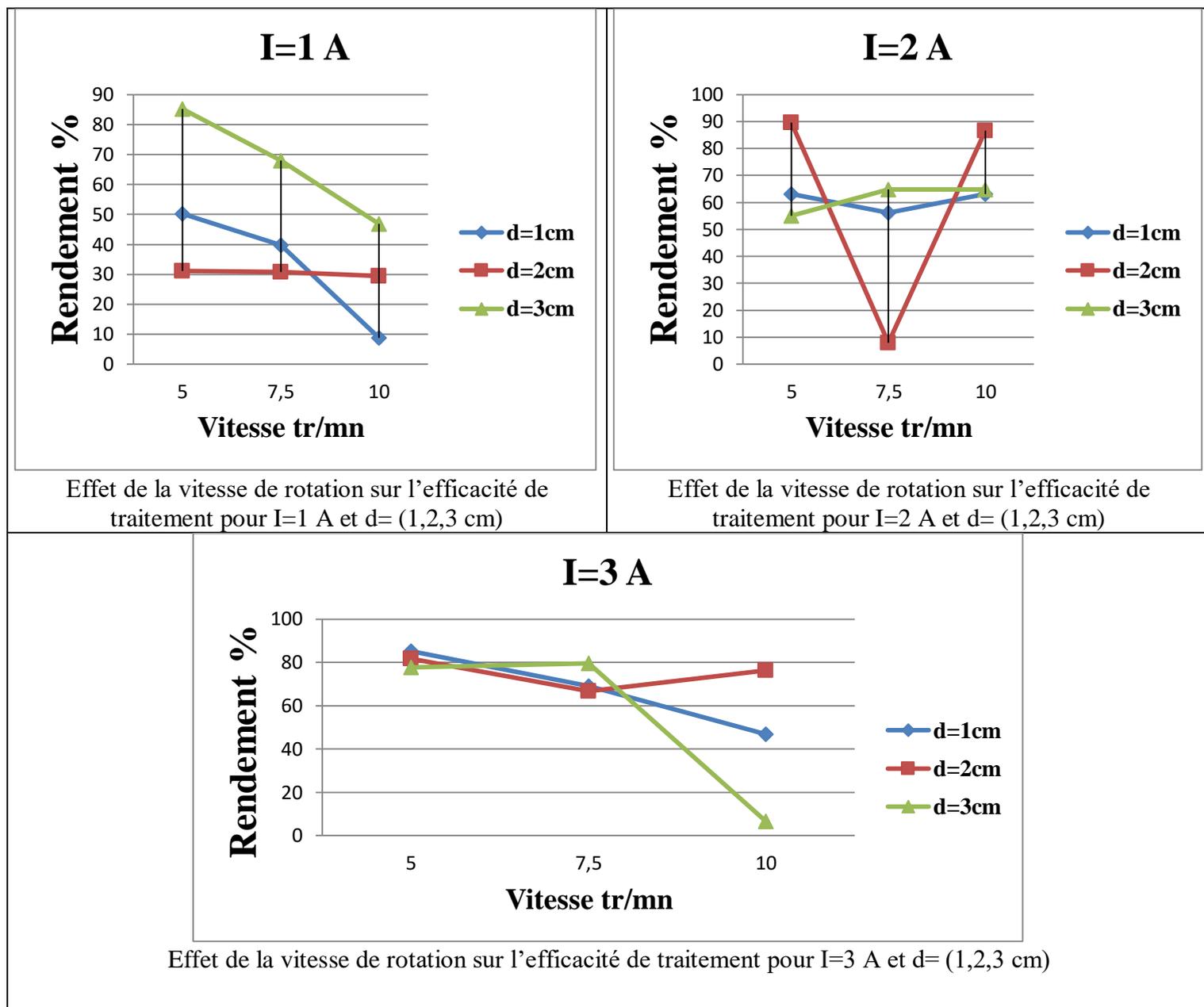
**IV.5. Effet de la vitesse de rotation des électrodes :**

L'agitation est généralement réalisée dans le but de bien homogénéiser le milieu réactionnel et d'accélérer de ce fait la diffusion du coagulant à la surface des particules en suspension. En plus de cet objectif reconnu dans la coagulation conventionnelle, nous jugeons que la rotation des électrodes pourrait aussi nous assurer une bonne répartition des microbulles dans la cellule électrochimique, palliant ainsi au problème de zones mortes et favorisant également l'auto-détartrage des anodes.

Les résultats obtenus sont portés dans le (Tableau IV.3). Les courbes établies sont représentées par les (Figures IV.3) :

| Distance cm | I=1A          |             | I=2A          |             | I=3A          |             |
|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
|             | Vitesse tr/mn | Rendement % | Vitesse tr/mn | Rendement % | Vitesse tr/mn | Rendement % |
| 1 cm        | 5 tr/mn       | 50,27%      | 5 tr/mn       | 63,18%      | 5 tr/mn       | 85,27%      |
|             | 7,5 tr/mn     | 39,79%      | 7,5 tr/mn     | 56,12%      | 7,5 tr/mn     | 68,95%      |
|             | 10 tr/mn      | 8,76%       | 10 tr/mn      | 63,08%      | 10 tr/mn      | 46,76%      |
| 2 cm        | 5 tr/mn       | 31,17%      | 5 tr/mn       | 89,65%      | 5 tr/mn       | 81,70%      |
|             | 7,5 tr/mn     | 30,70%      | 7,5 tr/mn     | 7,91%       | 7,5 tr/mn     | 66,58%      |
|             | 10 tr/mn      | 29,42%      | 10 tr/mn      | 86,54%      | 10 tr/mn      | 76,20%      |
| 3 cm        | 5 tr/mn       | 64,88%      | 5 tr/mn       | 55,06%      | 5 tr/mn       | 77,79%      |
|             | 7,5 tr/mn     | 49,24%      | 7,5 tr/mn     | 64,82%      | 7,5 tr/mn     | 79,57%      |
|             | 10 tr/mn      | 69,66%      | 10 tr/mn      | 64,88%      | 10 tr/mn      | 6,58%       |

**Tableau IV.3.** Variation du rendement en fonction de la vitesse de rotation



**Figure IV.3.** Évolution du rendement de dégradation du BIRS en fonction de la vitesse d'agitation pour les différentes intensités et distances appliqués

Pour étudier l'effet de la vitesse de rotation des électrodes sur l'efficacité de traitement et sur le détartrage des électrodes, nous l'avons fait varier de 5 à 10 tr/mn.

Pour des faibles vitesses de rotation (5tr/mn), on obtient une meilleure décoloration (89,65%). Il apparaît que l'agitation favorise une bonne répartition du coagulant et des microbulles d'aire formées, ce qui se manifeste par la formation d'une écume très stable (**Figure IV.4**). Le

détartrage des électrodes est aussi bien assuré par cette rotation des électrodes, ce qui pourrait réduire le temps et le coût d'entretien du système.



**Figure IV.4.** Image démontrant la stabilité de l'écume

#### IV.6. Conclusion

En étudiant l'effet des trois paramètres, jugés important dans le traitement électrochimique, à savoir l'intensité du courant, la distance inter-électrodes et la vitesse de rotation des électrodes, le choix de la valeur optimale d'un paramètre étudié s'est basé, sur la comparaison des rendements obtenus pour chaque niveau appliqué. Si on compare tous les rendements de l'efficacité de décoloration avec la variation des trois paramètres, les optimaux des trois paramètres sont retenus, en se basant sur leur effet positif sur l'efficacité de traitement, leur coût, et en se référant aux travaux faits.

On conclut que le rendement optimale (89,65%) pour l'efficacité d'élimination de polluant est obtenu pour  $I=2$  A ;  $d= 2$  cm et  $V= 5$  tr/mn.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

---

### Conclusion générale

Ces dernières années, les recherches se sont axées sur le développement des procédés avancés pour traiter efficacement les eaux usées fortement chargées en polluants.

Ce travail avait pour objectif la contribution à la dégradation d'un colorant textile « Bleu d'Indanthrène RS » par le procédé d'électrocoagulation dans un nouveau réacteur à électrodes mouvantes. Cette technique s'adapte au traitement des effluents liquides chargés en métaux lourds, colorants, matière organique et colloïdes. L'avantage par rapport à la coagulation-floculation chimique est que les floccs sont plus compacts et par conséquent les boues produites sont en quantité plus faible. Toutefois, comme tous autres procédés, l'électrocoagulation, présente quelques inconvénients entre autres, la maintenance des installations qui est coûteuse, le nettoyage et changement des électrodes nécessitent l'arrêt du procédé au cours de ces opérations. C'est dans le but d'y remédier à ce problème d'entartrage des électrodes, que ces dernières ont été mises en rotation, assurant ainsi un auto-nettoyage.

La dégradation du colorant par électrocoagulation, s'est avéré efficace, on a obtenu des résultats de traitement satisfaisants avec des rendements d'abattement atteignant 90%.

L'influence de trois paramètres à savoir l'intensité du courant (I), la distance inter-électrodes (d) et la vitesse de rotation de ces derniers étés étudiés sur l'efficacité de décoloration. Les résultats expérimentaux, permettent de déduire que l'application du procédé (EC) donne des rendements d'élimination des colorants satisfaisants. Les valeurs optimales retenues pour les paramètres étudiés sont :

- L'intensité du courant  $I=2$  A ;
- La distance inter-électrodes,  $d=2$  cm ;
- La vitesse de rotation,  $V=5$  tr/mn.

Il apparait aussi que l'agitation favorise une bonne répartition du coagulant et des microbulles d'aire formées, ce qui se manifeste par la formation d'une écume très

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

---

stable. Le détartrage des électrodes est aussi bien assuré par cette rotation des électrodes, ce qui pourrait réduire le temps et le cout d'entretien du système.

A titre de perspectives, d'autres travaux peuvent être envisagés :

- Etude de l'influence d'autres paramètres comme :
  - ✓ La nature ; la position ; la dimension ; la connexion ; le nombre et la géométrie des électrodes ;
  - ✓ Ajustement de l'intervalle de variation de la vitesse pour mieux conclure sur influence ;
  - ✓ Le pH ;
  - ✓ La concentration initiale du polluant ;
  - ✓ Le temps de séjour ;
  - ✓ La température ;
  - ✓ La conductivité ;
  - ✓ L'aération ;
  - ✓ Etc.....
- Caractérisation et valorisation de la boue formée lors du traitement par EC ;
- Optimisation et automatisation du prototype ;
- Etude comparative avec d'autres techniques de traitement ;
- Combinaison avec d'autres procédés ;
- Essais sur d'autres effluents ;
- Etc...

## BIBLIOGRAPHIE

1. **ARAYA-FARIAS M.**, 1999. La clarification du jus de pomme par électroflottation. *Mémoire M-Sc, Université Laval, Canada* ; 133p.
2. **B. ZIELINSKA, J. GRZECHUSLKA, A.W. MORAWSKI**, 2003, Photocatalytic decomposition of textile dyes on TiO<sub>2</sub> Tytanpol A11 and TiO<sub>2</sub>-Degussa P25, *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, 157, 65–70.
3. **BAYRAMOGLU.M, KOBYA. M., O.T. CAN, SOZBIR. M.**, 2004, Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. *Sep. Purif. Technol*, 37, 117–125.
4. **BAYRAMUGLU M, KOBYA M, CAN O.T SOZBIR M**, Operating costanalysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. *Sep. Punif. Technol.* 37 (2004) 117-125.
5. **BEAUCHESNE I.**, 2008. Enlèvement par voie électrochimique des métaux de boues d'épuration biologiques municipales. *Thèse Ph.D., Sciences de l'Eau, Université du Québec*, 326p.
6. **BELEGALD.J.**, 1987, Les colorants industriels, Encyclopédie médico-chirurgicale pathologie du travail, intoxications maladies par agents physiques 16082 à paris. Edition techniques ; pp 5.
7. **BENAISSA. Akila.**, 2010, Étude de la dégradation photocatalytique d'un colorantsynthétique et d'un tensioactif. Thèse Doctorat, Université de Constantine.
8. **BENNAJAH M**, 2007, *Traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation/électroflottation en réacteur airlift.* (Institut National Polytechnique de Toulouse).
9. **BRANDON N.P., KELSAL G.H., LEVINE S. AND SMITH A.L.**; 1985. Interfacial electrical properties of electrogenerated bubbles. *J. Appl. Electrochem.*, 18 ; 485-493.
10. **Brett C.M. A. and Brett A.M.O.**, 1994. Electrochemistry: Principles, Methods, and Applications. *Oxford University press, Oxford, New York*; 427p.
11. **BURUS .S. E, YIACOUMI. S and TSOUNS .C.**, (1997), Microbubble generation for environmental and industrial separations. *Sup parif .Techol.* 11. 221-232.
12. **CAMILLERI C.**, 1985, Electroflottation et flotational'airdisous, Industrie Minéral. *Les Techniques*, 67: 25–30.
13. **CAROLYNE BOURASSA.**, 2000, Étude de l'influence de la technologie des microparticules Avec les zéolites sur le traitement d'une eau usée désencrage Mémoire fin études, Université du Québec à Trois-Rivières.
14. **CHEN G.**, 2004, Eetrochemical technology in wastewater treatment, *Sep purify Techno* 38.1, 11-41.

## BIBLIOGRAPHIE

15. CHEN L, LAI, SCHENG.H, LIN., 2003, Electrocoagulation of chemicalmechanical polishing (CMP) wastewater from semiconductor fabrication. *ChemicalEngineering Journal*, 205-211.
16. CHEN X., CHEN G. AND YUE P.L., 2000. Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, 19; 65-76.
17. CHEN X., CHEN G. AND YUE P.L., 2002. A novel electrode system for electroflotation of wastewaters. *Environ. Sci. Technol.*, 36; 778–783.
18. CHEN.G., 2003. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification technology*; 31-91.
19. COMMINELLIS.C.H., 1994, Electrocatalysis in the electrochemical conversion/combustion of organic pollutants for waste water treatment. *Electrochim. Acta*, 39; 1857–1862.
20. DANESHVAR N., H. ASHASSI-SORKHABI ET A. TIZPAR , 2003, decolorization of orange II by electroagulation method. *Sep. Purif. Technol.*, 21, 153-162.
21. DIB GH., 2012, *Étude de la dégradation d'un colorant synthétique par photocatalyse en présence de dioxyde de titane en suspension*. Mémoire de magister, Université de Bejaïa, Algérie.
22. DONZÉ J-J., 1988, *Colorants textiles*. Technique de l'ingénieur K350, P.1-6.
23. ELMORE E.E., 1905. A process for separating certain constituents of subdivided ores and like substances, and apparatus therefor. *Brevet Patent*, 13; 578.
24. ELSKENS M., 2010, *Analyse des eaux résiduaires-Mesure de la pollution*. Technique de l'ingénieur 200V2, P.1-4.
25. FAROOQUL.M.S., 2004, Combined electrooxidation and electrocoaculation processes for the treatment of municipal wastewater. Master of Science Degree; King Fahd University of petroleum et Minerals Dhahran, Saudi Arabia.
26. FAROOQUL.M.S., 2004, Combined electrooxidation and electrocoaculation processes for the treatment of municipal wastewater. Master of Science Degree; King Fahd University of petroleum et Minerals Dhahran, Saudi Arabia.
27. Fukui Y. and Yuu S., 1985. Removal of colloidal particles in electroflotation. *AIChE J.*, 31; 201–208.
28. GARCIA A-R., 2004, *Étude de la congélation comme technique de traitement des eaux: applications spécifiques*. Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse.

## BIBLIOGRAPHIE

29. **GAUJONS D.**, 1995. La pollution des milieux aquatiques : Aide-mémoire. 2<sup>ème</sup> édition Lavoisier TEC & DOC. 275P.
30. **GLEMBOTSKII V.A., MAMAKOV A.A., RAMANOV A.M. AND NENNO V.E.**, 1975. In: Proceedings of the 11th International Mineral Processing Congress. *Cagliari*,; 562–581.
31. **GOLDER. A.K, HRIDAYA. N, SAMANTA A.N, RAY S.**, 2005, Electrocoagulation of méthylène bleu and eosin yellowish using mild steelectrodes, journal of Hazardous Materials, 134-140.
32. **GOMELLA C & GUERRÉE H.**, 1986, *Guide de l'assainissement dans les agglomérations urbaines et rurales*. Tome I, La collecte. Edition Eyrolles, Paris, France.
33. **GREAVES, D.A.S. PHILLIPS, J.A. TAYLOR**, 1999, Correlation between the bioelimination of anionic dyes by an activated sewage sludge with molecular structure. Part 1: Literature review, page 115, 363–365.
34. **GROSCLAUDE G.**, 1999, Un point sur l'eau, tome II : Usages et polluants. Versailles, Institut National de la recherche Agronomique, Paris.210p
35. **Guide colorant indanthrène Tome1**, BASF avtiengesellschaft D-6700Ludwigshafen, République Fédéral l'Allemagne. (document ALFDADITEXRemila, Bejaia).
36. **GUILLARD C**, 2011, *La photocatalyse : dépollution de l'eau ou de l'air et matériaux autonettoyants*. Technique de l'ingénieur j1270, p.1-13.
37. **GVOZDEZ V.D. and KSENOFONTOV B.S.**, 1986. Waste water treatment in an electroflotation apparatus with a fluidized media. *KhimiyaI Tekhnologiya Vody*, 8: 70–72.
38. **HAMMAMI S.**, 2008, *Étude de dégradation des colorants de textile par les procédés d'oxydation avancée. Application à la dépollution des rejets industriels*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est et Tunis El Manar.
39. **HOLT P.K., BARTON G.W., WARK M. AND MITCHELL C.A.**, 2002. A quantitative comparaison between chemical dosing and electrocoagulation, Colloids and Surfaces. *Physicochemical Engineering Aspects*, 211; 233-248.
40. **HOSNY.A.Y**, 1996, Separation oil form oil-water emulsions using anelectroflotation cell with insoluble electrodes. *Filtration Sep, Journal* 29(5), 419-423.
41. **IL'IN V.I., KOLESNIKOV V.A. AND PARSHINA YU.I.**, 2002. Purification of highly concentrated industrial sewage from the porcelain and faience industry by the electric flotation method. *Glass Ceram.*, 59 : 242–244.

## BIBLIOGRAPHIE

42. **İRDEMEZ Ş ET AL.** 2006b, The effects of current density and phosphate concentration on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation using aluminum and iron plate electrodes. *Separation and Purification Technology* 52(2):218-223.
43. **KHALDI S, LEMLIKCHI W, LOUNICI H, MECHERRI M.O, MAMERI N,** Traitement des eaux textiles par électrocoagulation bipolaire en utilisant les électrodes d'Aluminium, 3ème Séminaire scientifique et technique sur l'environnement, Faculté des sciences biologiques et des sciences Agronomiques et le Laboratoire des eaux, 5-6 Juin 2006, UMMTO, Tizi-Ouzou.
44. **KHOSLA N.K., VENKATACHALAM S. AND SOMASUNDARAQ P.,** 1991. Pulsed electrogeneration of bubbles for electroflotation. *J. Appl. Electrochem.*, 21; 986-990.
45. **KOBYA MEHMET C.O.T. AND BAYRAMOGLU M.;** 2003. Treatment of textile wastewater by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials*; 16- 178.
46. **KOBYA.M, CAN O.T, BAYRAMOGLU M.,** (2003), treatment of textile wastewater by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes, *Journal Hazard Mater* 100. 163-178.
47. **KOREN J.P.F. AND SYVERSEN U.,** 1995. State-of the-Art Electroflocculation. *Filtration ans Separation*; 153-156.
48. **LAURENT J-L.,** 1994, L'assainissement des agglomérations : techniques d'épuration actuelles et évolutions. 170p.
49. **LEMLIKCHI W., MECHERRI M.O., SHARROCK P., M. FIALLO** Recyclage d'apatite calcinée après traitement de colorants synthétiques en solution aqueuse ; deuxièmes Journées Scientifiques sur les Matériaux et l'Innovation Technologique avec l'apport du secteur industriel (2èmes JSMIT'II) 18 Mai 2011 Faculté des sciences de l'ingénieur, Université M'HAMED BOUGARA de Boumerdes.
50. **LEMLIKCHI WAHIBA,** 2012, «élimination de la pollution des eaux industrielles par différentsprocédé d'oxydation et de co-précipitation»thèse du doctorat , université Mouloud Mammeri-Tizi ouzou.
51. **LEMLIKCHI. W, MECHERRI .M.O, SHARROCK. P,** Elimination de rouge disperse C.I. 167 par hydroxyapatite en solution aqueuse : coprécipitation ; Deuxièmes journées nationales du génie des procédés Tlemcen 03-04/11/2010).
52. **LEROY J-B.,** 1999, *La pollution des eaux.* 4<sup>ème</sup> édition que sais-je?, Paris, France.

## BIBLIOGRAPHIE

53. **LIN S.H. AND WU C.L.**, 1997. Electrochemical nitrite and ammonia oxidation in sea water. *J. Environ. Sci. Health*, 8; 2125-2138.
54. **MARTEL O.**, 2007, *Eau, fleuves et patrimoine*. Livret ressource Communauté urbaine de Lyon Direction Prospective et Stratégie d'Agglomération.
55. **MEINCK F., STOOFF H & KOHLSCHUTTER H.**, 1977, *Les eaux résiduaires industrielles*. 2<sup>ème</sup> édition. Traduit par André Gasser. Édition Masson, Paris.
56. **MEKHALIF F.**, 2009, *Réutilisation des eaux résiduaires industrielles épurées comme eau d'appoint dans un circuit de refroidissement*. Mémoire de magister, Université de Skikda, Algérie.
57. **MERZOUK B., GAUDRICH B., SEKKI A., MADANI K., VIAL CH., BARKAOUL.**, Studies on the decolorization of textile dye wastewater by continuous electrocoagulation process, *Chem. Eng. J.* 149 (2009) 207-214.
58. **MERZOUK B., MADANI KH & SEKKI A.**, 2010, Using electrocoagulation–electroflotation technology to treat synthetic solution and textile wastewater, two case studies. *Desalination*, 250; 573–577.
59. **MERZOUK B., SEKKI A., MADANI K.**, Treatment characteristics of textile wastewater and removal of heavy metals using the electroflotation technique, *Desalination*, 228 (2008) 245-254.
60. **MOLLAH M.Y.A., SCHENNACH R., PARGA J.R. AND COCKE D.L.**, 2001. Electrocoagulation (EC)- Science and applications, *Journal of Hazardous Materials B*, 84; 29-41.
61. **OKUN E.P. AND MATOV B.M.**, 1984. Investigation of the influence of wire cathode parameters on the purification efficiency of liquids by electroflotation. In: *Food. Hzhstrzes And The Environment- Wollo, J. Ed. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands*; 69-74.
62. **OUBAGHA NOURA** «décontamination des eaux contenant les colorants textiles et les adjuvants» mémoire de magister, université Mouloud Mammeri-Tizi ouzou, 2011.
63. **OUBAGHA NOURA**, 2012, Décontamination des eaux contenant les colorants textiles et les adjuvants par des matériaux naturels et synthétiques. Mémoire de Magister. université de Tizi Ouzou.
64. **PATERMARAKIS.G AND FOUNTOUKIDIS. E.**, (1990). Disinfection of water by electrochemical treatment. *Wat. Res.*, 12; 1491-1496.
65. **PEREZ M, TORRADES F, DOMENECH X, PERAL J.**, 2002, Fenton and photo-Fenton oxidation of textile effluents, *Water Res.*, 36, 2703–2710.

## BIBLIOGRAPHIE

66. **REJSEK.**, 2002, Analyse des eaux, aspect réglementaire et techniques, édition scréren CPDP Aquitaine, Bordeaux.
67. **RODIER & COLL.**, 2009, *Analyse de l'eau*. 9<sup>ème</sup> Édition DUNOD, Paris.
68. **RODIER J., BAZIN C., BROUTIN J. P., CHAMBON P., CHAMPSAUR H., RODI L.**, 2005. L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, chimie, physico-chimie, microbiologie, biologie, interprétation des résultats. Paris (2009), 9<sup>ème</sup> édition.
69. **SAIDI FATIMA ZAHRA.**, 2013, Élimination de bleu Méthylène par des procédés d'oxydation avancée. mémoire de magister, univ de Tlemcen, p11.
70. **SERVOS M.R., D.T. BENNIE, B.K. BURNISON, A. JURKOVIC, R. MCINNIS, T. NEHELL, A. SCHNELL, S.A. SMYTH et T.A. TERNES**, 2005. Distribution of estrogens, 17 $\beta$ -estradiol and estrone, in Canadian municipal wastewater treatment plants. *Sci. Tot. Environ.*, 336, 155-170.
71. **SLOKAR ET LE MARECHAL, 1998, GREAVES ET COLL.**, 1999, Methods of decoloration of textile wastewaters, *Dyes Pigments*, 37, 335–356.
72. **SNYDER S.A., P. WERSTERHOFF, Y. YOON et D.L. SEDLAK**, 2003. Pharmaceuticals, personal care products, and endocrine disruptors in water: Implication for water industry. *Environ. Eng. Sci.*, 20, 449-469.
73. **STROKACH P.P.**, 1975. Electrochemical. *Ind. Process. Bio.* 55; 375p.
74. **T.H. KIM, C. PARK, E.-B. SHIN, S. KIM**, 2002, Decolorization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation process, *Desalination*, 150,165–175.
75. **TIR MOHAMED**, Utilisation des techniques électrochimique dans le traitement des émulsions Hydrocarbures/eau. Thèse de Doctorat, Faculté des Hydrocarbures et de la chimie, Universités de M'hamedBougara-Boumerdès, 2009.
76. **VERSTRAETEN I.M., T. HEBERER, J.R. VOGEL, T. SPETH, S. ZUEHLKE et U. DUENNBIER**, 2003. Occurrence of endocrine-disrupting and other wastewater compounds during water treatment with case studies from Lincoln, Nebraska and Berlin, Germany. *Pract. Period. Hazard. Toxic. Rad. Waste Manag. ASCE*, 7, 253-263.
77. **YANG M .LU.**, (2007) electrochemical coagulation for oily water demulsification, *Seppurifites Techno* 54; 388-395.
78. **YU M.J., J.S. KOO, G.N. MYUNG, Y.K. CHO ET Y.M CHO**, 2005, Evaluation of bipolar electrocoagulation applied to biofiltration for phosphorus removal. *Water Science & Technology*, 51(10), 231-239.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- 79. ZANONI M.V.B., SENE J, ANDERSON M.A.,** 2003, Photoelectrocatalytic degradation of Remazol Brilliant Orange 3R on titanium dioxide thin-film electrodes, *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, 157, 55–63.
- 80. ZHU .X, XU.X.,** 2004, treatment of refractory oily wastewater by electro coagulation process, *Chemosphere* 56. 889-894.
- 81. ZODI S., MERZOUK B., POTIER O., LAPICQUE F., LECLERC J.-P,** Direct red 81 dye removal by a continuous flow electrocoagulation/flotation reactor, *Sep. Purif. Technol.* 108 (2013) 215-222.
- 82. ZOLOTUKHIN I-A.,** 1988, Effect of built-in partitions and electrode systems on the operating efficiency of an electroflotation unit. *KhimiyaTekhnologiyaVody*, 10: 342–344.