



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



Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

Département : Sciences de la matière

Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences de la matière

Filière : Chimie

Option : Chimie des produits naturels

Thème

# Clarification d'une solution colorée par une technique électrochimique

Encadré par :

Dr. TOUAHRIA Soraya

Présenté par :

MERZOUK Yasmine

MAZOUZ Mouna

Devant le jury :

Président : Dr. MANSOURI Lakhdar

MCB

Univ. Tébessa

Examineur : Dr. BOUKHEDANA Wafia

MCB

Univ. Tébessa

Rapporteur : Dr. TOUAHRIA Soraya

MCB

Univ. Tébessa

Année universitaire : 2019/2020

# REMERCIEMENTS

*En tout premier lieu, nous tenons à remercier le dieu « **ALLAH** » le tout puissant, de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener ce modeste travail.*

*Notre gratitude s'adresse à **Dr. TOUAHRIA Soraya** pour son encadrement, ses bons conseils, son aide morale et matériel et sa disponibilité pour nous permettre de mener à bien ce travail.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements aux membres de Jury : **Dr. MANSOURI Lakhdar** et **Dr. BOUKHEDANA Wafia** de l'université de **TEBESSA** qui nous ont fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail.*

*Nous tenons également à remercier **les techniciens de laboratoire** de Sciences de la matière, pour leur contribution et leur aide.*

*Nous somme également reconnaissantes à Monsieur **HAMAIDIA Hassan** de laboratoire de Sciences de la terre et l'univers pour son aide afin de réaliser certaines analyses chimiques.*

*Nous souhaitons aussi témoigner toutes nos gratitude à l'ensemble des **enseignants** rencontrés lors de nos études, pour les connaissances et le savoir qu'ils nous ont apporté.*

*Nous tenons à exprimer nos profondes reconnaissances à **nos familles** pour leurs soutiens, leurs encouragements et l'aide précieuse qu'ils nous ont apporté durant nos années d'études*

**Mouna & Yasmine**

## ملخص

في هذه الدراسة، قمنا باستخدام طريقة كهروكيميائية تتمثل في التخثر الكهربائي، و قد أثبتت فعاليتها في معالجة المياه المستعملة الناتجة عن مختلف الصناعات و بأقل التكاليف، حيث طبقنا هذه الطريقة لمعالجة مياه ملونة اصطناعيا بواسطة ملون نسيج (colorant azoïque) الذي ينتمي إلى أهم فئة من الأصباغ النسيجية و لديه أكبر نسبة إنتاج عالميا حيث يحتوي على المجموعة الوظيفية آزو ( $-N = N-$ ) التي تمنح المواد الكيميائية خصائص مقاومة للضوء، الأحماض، القواعد و الأوكسجين، وهي خصائص مرغوبة للملابس.

لتحديد الظروف المثالية لهذه التقنية تم إجراؤها في بيشر مختبر زجاجي سعته 1 لتر وبواسطة صفائح ألمنيوم وذلك باختبار الشروط التالية:

- تأثير زمن المعالجة من أجل فروق كمون مختلفة.
- تأثير كثافة التيار الكهربائي.
- تأثير سرعة تحريك المحلول أثناء المعالجة.
- تأثير التركيز الابتدائي للملون.
- تأثير المساحة الفعالة للقطبين (الالكترودين).

و في الأخير تم تنويع الدراسة بحساب الطاقة المستهلكة أثناء المعالجة و كذا تقييم تكلفتها التشغيلية. و قد أظهرت النتائج أنه قد تمت إزالة اللون بنسبة تقدر بحوالي 92 % و بتكلفة منخفضة في الظروف المثالية لتقنية المعالجة المستخدمة.

**الكلمات المفتاحية :** نسيج ، صبغة ، معالجة، التخثر الكهربائي، إلكترود، الظروف المثالية، استهلاك الطاقة، التكلفة التشغيلية.

## Résumé

Dans cette étude, on a employé une méthode électrochimique qui est l'électrocoagulation (EC), elle a prouvé son efficacité dans le traitement des eaux résiduaires produites par différentes industries avec des faibles coûts d'exploitation. On a appliqué l'EC pour traiter une solution synthétique à base d'un colorant textile azoïque qui appartient à la catégorie chimique la plus importante des colorants textiles et possède le plus grand pourcentage de production mondiale car il contient le groupe fonctionnel azo ( $-N = N-$ ) qui lui confère une certaine résistance à la lumière, aux acides, aux bases et à l'oxygène qui sont des propriétés souhaitées pour les vêtements.

Pour optimiser les conditions de ce procédé, les essais d'électrocoagulation sont menés dans un réacteur de laboratoire de 1 litre en utilisant des plaques d'aluminium et on a étudié les effets suivants :

- L'effet du temps d'électrolyse pour différents voltages imposés.
- L'effet de la densité de courant électrique appliquée.
- L'effet de la vitesse d'agitation de la solution pendant le traitement.
- L'effet de la concentration initiale en colorant.
- L'effet de la surface active des électrodes.

On a finalisé ce travail par une étude économique présentée par la consommation énergétique et le coût opérationnel du traitement.

Les résultats obtenus montrent qu'il y a une décoloration importante d'environ **92 %** avec un faible coût opérationnel pour les conditions optimales de la technique de traitement utilisée.

**Mots clés :** Textile, Colorant, Traitement, Electrocoagulation, Electrode, Conditions optimales, Consommation énergétique, Coût opérationnel.

---

**Abstract**

In this study, we used an electrochemical method which is electrocoagulation, it has proven its effectiveness in the treatment of waste water produced by different industries with low operating costs. EC was applied to treat a synthetic solution based on an azo textile dye which belongs to the most important chemical class of textile dyes and has the highest percentage of world production because it contains the azo functional group (-N = N-) which gives it a certain resistance to light, acids, bases and oxygen which are desired properties for clothes.

To optimize the conditions of this process, electrocoagulation tests are carried out in a 1 liter laboratory reactor using aluminum plates and the following effects were studied:

- The effect of electrolysis time for different imposed voltages.
- The effect of the electric current density.
- The effect of the mixing speed.
- The effect of the initial dye concentration.
- The effect of electrode active surface.

This work was finalized by an economic study presented by the energy consumption and the operational cost of the treatment.

The results obtained show that there is a significant discoloration of approximately **92%** with a low operational cost for the optimum conditions of the treatment technique used.

**Keywords:** Textile, Dye, Treatment, Electrocoagulation, Electrode, Optimal conditions, Energy consumption, Operational cost.

---

## LISTE DES ABREVIATIONS

**A**: Absorbance (ou densité optique D.O).

**C** : Concentration de l'élément recherché ( $\text{g.L}^{-1}$ ).

**C électrode** : La consommation d'aluminium aux électrodes.

**C<sub>0</sub>** : concentration initiale en colorant.

**C<sub>f</sub>**: la concentration du colorant après le traitement ( $\text{g.L}^{-1}$ ).

**C<sub>i</sub>**: la concentration du colorant avant le traitement ( $\text{g.L}^{-1}$ ).

**d** : distance inter-électrode (cm).

**DBO** : Demande biologique en oxygène.

**DCO** : Demande chimique en oxygène.

**E**: énergie consommée (KW.h).

**EC** : Electrocoagulation.

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

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

**i** : Densité de courant ( $\text{mA.cm}^{-2}$ ).

**I**: intensité du faisceau émergeant de la cellule de référence.

**I<sub>0</sub>**: intensité du faisceau de lumière monochromatique de longueur d'onde  $\lambda$  à l'entrée de la cellule de référence (la cuve).

**ℓ**: longueur du trajet optique (épaisseur de la cuve) (cm).

**m** : masse théorique dissoute en (g).

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

**M** : la masse moléculaire de l'aluminium ( $\sim 0,027 \text{ Kg/mol}$ ),

**MES** : Matière en suspension.

---

**n** : nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction considérée.

**pH** : Le potentiel d'hydrogène.

**R<sub>anode</sub>** : Rendement anodique.

**R<sub>cathode</sub>** : Rendement cathodique.

**S<sub>A</sub>** : surface active d'électrode (cm<sup>2</sup>).

**t** : temps d'électrolyse (s).

**TR<sub>C</sub>** : taux de réduction de la couleur.

**U** : tension d'électrolyse (Volt).

**V** : volume de l'eau à traiter (m<sup>3</sup>).

**z** : le nombre d'électrons transférés (z = 3).

**ε** : coefficient d'extinction molaire ( L.mole<sup>-1</sup>.cm<sup>-1</sup>).

**λ** : Longueur d'onde (nm).

**λ<sub>max</sub>** : Longueur d'onde d'absorbance maximale (nm).

**v<sub>a</sub>** : La vitesse d'agitation (tr.min<sup>-1</sup>).

**σ** : Conductivité électrique (μS.cm<sup>-1</sup>).

**σ<sub>i</sub>** : Conductivité électrique initiale (μS.cm<sup>-1</sup>).

---

## LISTE DES FIGURES

N°	Titre	Page
1	Exemple de colorant azoïque (l'azobenzène)	06
2	Structure d'un colorant triphénylméthane	06
3	Structure d'un colorant indigoïde	07
4	Structure moléculaire d'un colorant xanthène	07
5	Structure d'un colorant anthraquinonique	08
6	Structure de phtalocyanine (Exemple : phtalocyanine de cuivre).	08
7	Structure de la molécule d'un colorant nitré et nitrosé	09
8	Processus de coagulation, floculation et de sédimentation	11
9	Schéma du principe de l'EC	20
10	Le processus de formation d'hydroxydes métalliques-colloïdes	21
11	Les différents modes de connexions électriques pour une cellule d'EC et les circuits électriques associés	26
12	Schéma du dispositif expérimental d'EC utilisé	31
13	Trajet optique	36
14	Spectre d'absorption en UV-visible de colorant azoïque hydrosoluble ( $C_0 = 0,5 \text{ g.L}^{-1}$ , pH initial = 7,80, $\sigma_i = 1770 \text{ } \mu\text{S.cm}^{-1}$ )	39
15	Courbe d'étalonnage du spectrophotomètre avec le colorant azoïque ( $C_0=0,5 \text{ g.L}^{-1}$ , pH initial = 7,80)	40
16	Effet du temps d'électrolyse sur la réduction de la couleur pour différents voltages imposés ( $C_0=0,5 \text{ g.L}^{-1}$ , pH initial = 7,80, $d=1\text{cm}$ )	42
17	Effet de la densité de courant sur la réduction de la couleur ( $C_0=0,5 \text{ g.L}^{-1}$ , pH initial = 7,80, t EC = 30 min, $d=1\text{cm}$ )	43
18	Effet de la vitesse d'agitation sur la réduction de la couleur ( $C_0=0,5 \text{ g.L}^{-1}$ , pH initial = 7,80, t EC = 30 min, $d=1\text{cm}$ )	45
19	Effet de la concentration initiale du colorant sur la décoloration (t EC = 30 min, $d=1\text{cm}$ )	47
20	Effet de la surface active d'électrode $S_A$ sur la décoloration ( $C_0=0,5 \text{ g.L}^{-1}$ , pH initial = 7,80, t EC = 30 min, $d=1\text{cm}$ )	48
21	Effet de la surface active d'électrode $S_A$ sur la densité du courant $i$ ( $C_0=0,5 \text{ g.L}^{-1}$ , pH initial = 7,80, t EC = 30 min, $d=1\text{cm}$ )	49
22	Variation de la conductivité électrique des solutions traitées en fonction du temps d'EC ( $C_0=0,5 \text{ g.L}^{-1}$ , pH initial = 7,80, $i= 7,6 \text{ mA.cm}^{-2}$ , $d=1\text{cm}$ )	50

**LISTE DES TABLEAUX**

<b>N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>1</b>	Principaux groupes chromophores et auxochromes classés par intensité croissante	<b>05</b>
<b>2</b>	Avantages et inconvénients des techniques de traitement des effluents textiles	<b>13</b>
<b>3</b>	Valeurs limites des paramètres de rejets d'effluents liquides industriels <b>(JORADP N° 26, 2006).</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	Valeurs limites des paramètres de rejets d'effluents d'industries textiles <b>(JORADP N° 26, 2006).</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	Applications du procédé d'EC	<b>27</b>
<b>6</b>	Paramètres étudiés en traitement d'EC	<b>33</b>
<b>7</b>	Les valeurs des paramètres physico-chimiques principaux caractérisant la solution préparée	<b>39</b>
<b>8</b>	Valeurs d'absorbance A à $\lambda$ max = 552 nm	<b>40</b>
<b>9</b>	Etude du coût opérationnel de l'EC <b>(pHi = 7,80, C<sub>0</sub> = 0,5 g.L<sup>-1</sup>).</b>	<b>52</b>

---

**LISTE DES PHOTOS**

<b>N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>1</b>	Exemple d'une pollution d'un cours d'eau par les colorants textiles (Rivière Xiang, située dans la province chinoise Hunan)	<b>10</b>
<b>2</b>	Exemple d'un traitement d'une eau résiduaire par coagulation-floculation	<b>12</b>
<b>3</b>	Installation d'EC utilisée	<b>32</b>
<b>4</b>	pH mètre et conductimètre	<b>32</b>
<b>5</b>	Phénomène de décantation pendant 30 min	<b>33</b>
<b>6</b>	Solution à traiter	<b>34</b>
<b>7</b>	Colorant azoïque hydrosoluble	<b>34</b>
<b>8</b>	Balance électronique ( <b>KERN ALS 220-4 N</b> )	<b>34</b>
<b>9</b>	Vue des électrodes d'aluminium utilisées après un traitement d'EC	<b>35</b>
<b>10</b>	Spectrophotomètre SHIMADZU UV-1700PC	<b>37</b>
<b>11</b>	Solutions préparées pour la courbe d'étalonnage	<b>37</b>
<b>12</b>	Comparaison des volumes des boues produites après le traitement d'EC	<b>41</b>
<b>13</b>	La production des bulles de gaz d'H <sub>2</sub> pendant le traitement d'EC	<b>44</b>
<b>14</b>	Solutions préparées avec différentes concentrations en colorant étudié	<b>46</b>

---

INTRODUCTION GENERALE.....	01
----------------------------	----

## PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

### Chapitre I : Les colorants synthétiques et les effluents textiles

I-1- Introduction.....	03
I-2- Définition d'un colorant.....	03
I-3- Structure d'un colorant.....	04
I-3-1- Groupement chromophore.....	04
I-3-2- Groupement auxochrome.....	05
I-4- Classification chimique des colorants.....	05
I-4-1- Les colorants azoïques.....	06
I-4-2- Les colorants triphénylméthanes .....	06
I-4-3- Les Colorants indigoïdes.....	07
I-4-4- Les colorants xanthènes.....	07
I-4-5- Les colorants anthraquinoniques.....	08
I-4-6- Les colorants phtalocyanine.....	08
I-4-7- Les colorants nitrés et nitrosés.....	08
I-5- Les effluents textiles et leurs techniques de traitement .....	09
I-5-1- Traitements physiques.....	10
I-5-1-1- Adsorption de charbon actif.....	10
I-5-1-2- Coagulation-floculation.....	11
I-5-1-3- Filtration membranaire.....	12
I-5-2- Traitements chimiques.....	12
I-5-3- Traitements biologiques.....	12
I-6- Législation sur l'environnement.....	15

### Chapitre II : Traitement d'électrocoagulation (EC)

II-1- Introduction.....	17
II-2- Historique du procédé d'électrocoagulation.....	17
II-3- Description technique du procédé d'électrocoagulation.....	19
II-3-1- Principe du procédé d'électrocoagulation.....	19
II-3-2- Réactions aux électrodes.....	21

---

II-4- Principale loi d'EC (La loi de Faraday).....	23
II-5- L'énergie électrique consommée E.....	24
II-6- Type des connections électriques.....	25
II-7- Applications du procédé d'électrocoagulation.....	27
II-8- Avantages et inconvénients du procédé d'électrocoagulation.....	28

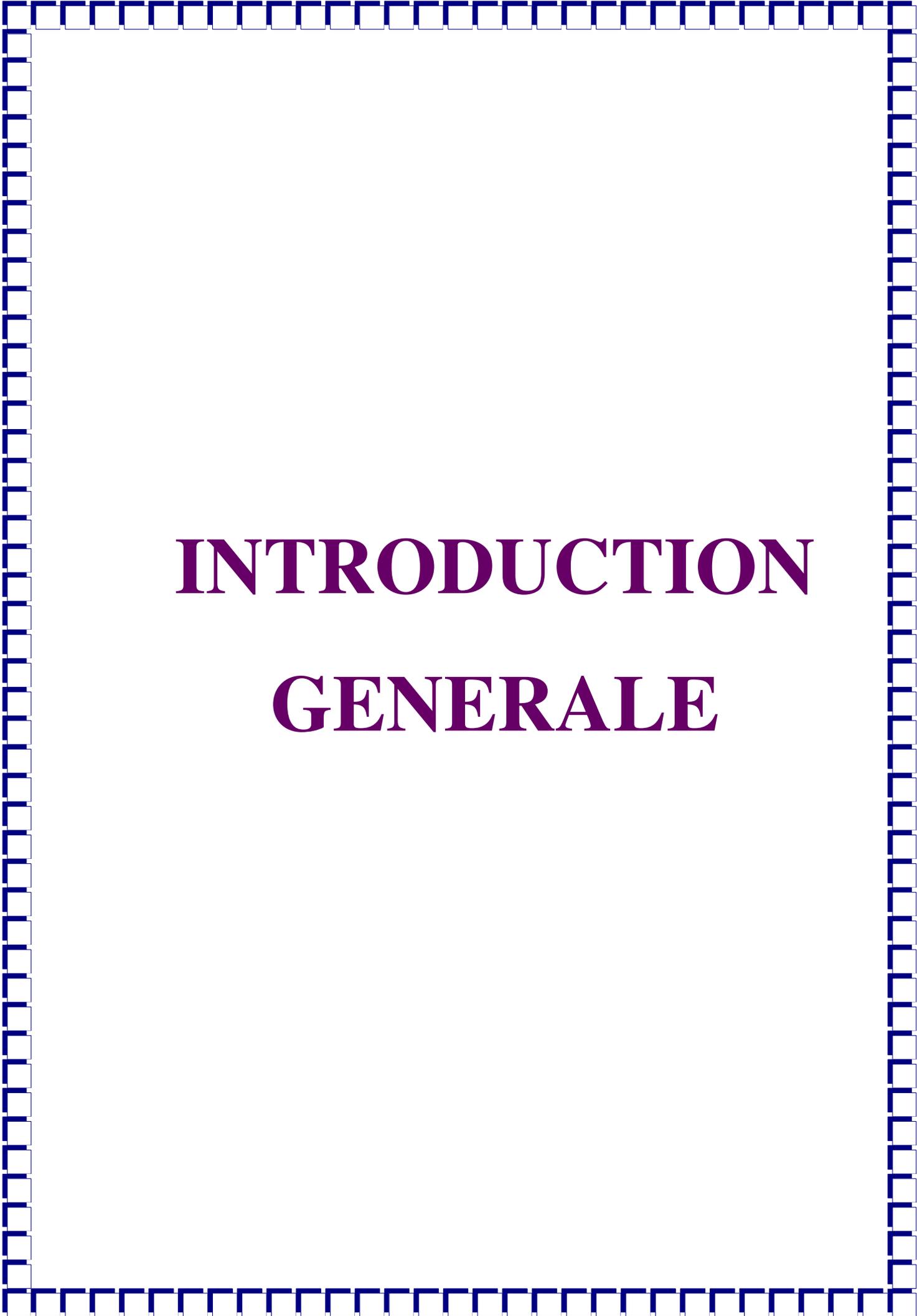
## **PARTIE EXPERIMENTALE**

### **Chapitre III : Matériels et Méthodes**

III-1- Introduction.....	30
III-2- Matériels et Méthodes.....	31
III.2.1. Dispositif expérimental et conditions opératoires.....	31
III-2-2- Solution à traiter.....	34
III-2-3- Les électrodes utilisées.....	35
III-3- Technique d'analyse.....	35
III-3-1 Principe de la spectrophotométrie UV/Visible.....	35

### **Chapitre IV: Résultats et Discussions**

IV-1- Introduction.....	38
IV-2- Paramètres étudiés.....	38
IV-3- Spectre d'absorption en UV-visible.....	38
IV-4- La courbe d'étalonnage $A = f(C)$ .....	40
IV-5- Résultats de traitement des eaux colorées par EC en mode batch .....	41
IV-5-1- L'effet du temps d'électrolyse sur la décoloration pour différents voltages imposés.....	41
IV-5-2- L'effet de la densité de courant sur la décoloration au temps optimal d'EC	42
IV-5-3- L'effet de la vitesse d'agitation sur la décoloration .....	44
IV-5-4- L'effet de concentration initiale sur la décoloration.....	46
IV-5-5- L'effet de la surface active $S_A$ des électrodes sur l'efficacité d'EC.....	47
IV-6- La conductivité électrique finale des solutions traitées.....	50
IV-7- Etude économique du traitement d'EC aux conditions optimales.....	51
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>53</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>54</b>



# **INTRODUCTION**

## **GENERALE**

L'eau a toujours figuré au premier plan des ressources naturelles primordiales pour la vie de l'Homme. Cependant, la raréfaction de cette ressource et la dégradation sans cesse accrue des écosystèmes aquatiques ont pris, au cours des dernières décennies, une ampleur catastrophique et constituent des dimensions environnementales les plus préoccupantes. La dégradation de l'eau est liée fortement, non seulement aux pathogènes biologiques, mais également aux produits chimiques fabriqués par l'Homme. Leur présence dans l'environnement, et plus particulièrement dans l'eau, présente un grand risque de pollutions de plus en plus importantes et récurrentes rendant très difficile voire impossible de protéger la qualité des écosystèmes.

L'un des importants produits chimiques polluants, ce sont les colorants, une fois ils se dissolvent dans l'eau, ils seront parfois difficiles à traiter car ils ont généralement une origine synthétique et une structure moléculaire complexe qui les rendent plus stables et difficiles à être biodégradés. Notons que plus de 60% de la production mondiale en colorant est utilisé par les industries textiles et plus de la moitié de cette quantité est déversée dans les eaux réceptrices plus ou moins sans traitement (**Khadhraoui et al., 2009**).

L'industrie du textile consomme énormément d'eau pendant les opérations d'impression, de teinture et de finissage (200 L.kg<sup>-1</sup> en moyenne) et par conséquent produit un volume important d'eaux résiduaires qui sont caractérisées par de fortes colorations, de fortes variations de pH et des charges organiques élevées (**Garg et al., 2004**). Le rejet de ces effluents fortement colorés dans les eaux naturelles peut causer des dommages sévères à l'environnement (**Aksu et Tezer , 2001**). Les colorants peuvent notamment causer des dermatites et des irritations de la peau et certains sont cancérigènes et mutagènes pour les organismes aquatiques (**Mathur et al., 2006**).

En raison du le caractère récalcitrant des colorants de synthèse et à la forte salinité des eaux résiduaires contenant ces colorants, la plupart des procédés classiques de traitement biologique est moins efficace (**Lazaridis et al., 2003, Walker et al., 2003**). Sous conditions anaérobies, les colorants azoïques sont facilement réduits en amines aromatiques potentiellement dangereuses, (**Baughman & Weber, 1994**). Ces polluants s'accumulent dans la nature et peuvent avoir des effets nocifs pour la santé humaine et la vie aquatique (la faune et la flore) (**Khare et al. 1988**). Les méthodes physicochimiques utilisées pour l'élimination des colorants des eaux résiduaires 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>...) (**Chebli, 2012**).

Dans cette étude, il est tenté le traitement physico-chimique en employant le processus d'électrocoagulation (EC) en mode batch. Ce processus très sollicité dans le traitement d'eaux résiduaires de textile, permet leur clarification (**Maalem., 2016, Naje et al., 2015, Zidane et al., 2012, Aoudj et al., 2010, Eyvaz et al., 2009, Kobya et al., 2003**). En plus, il a l'avantage de la combinaison avec d'autres techniques de traitement comme l'électro-oxydation (EO) pour traiter ce type des eaux (**Gilpavas et al., 2017**).

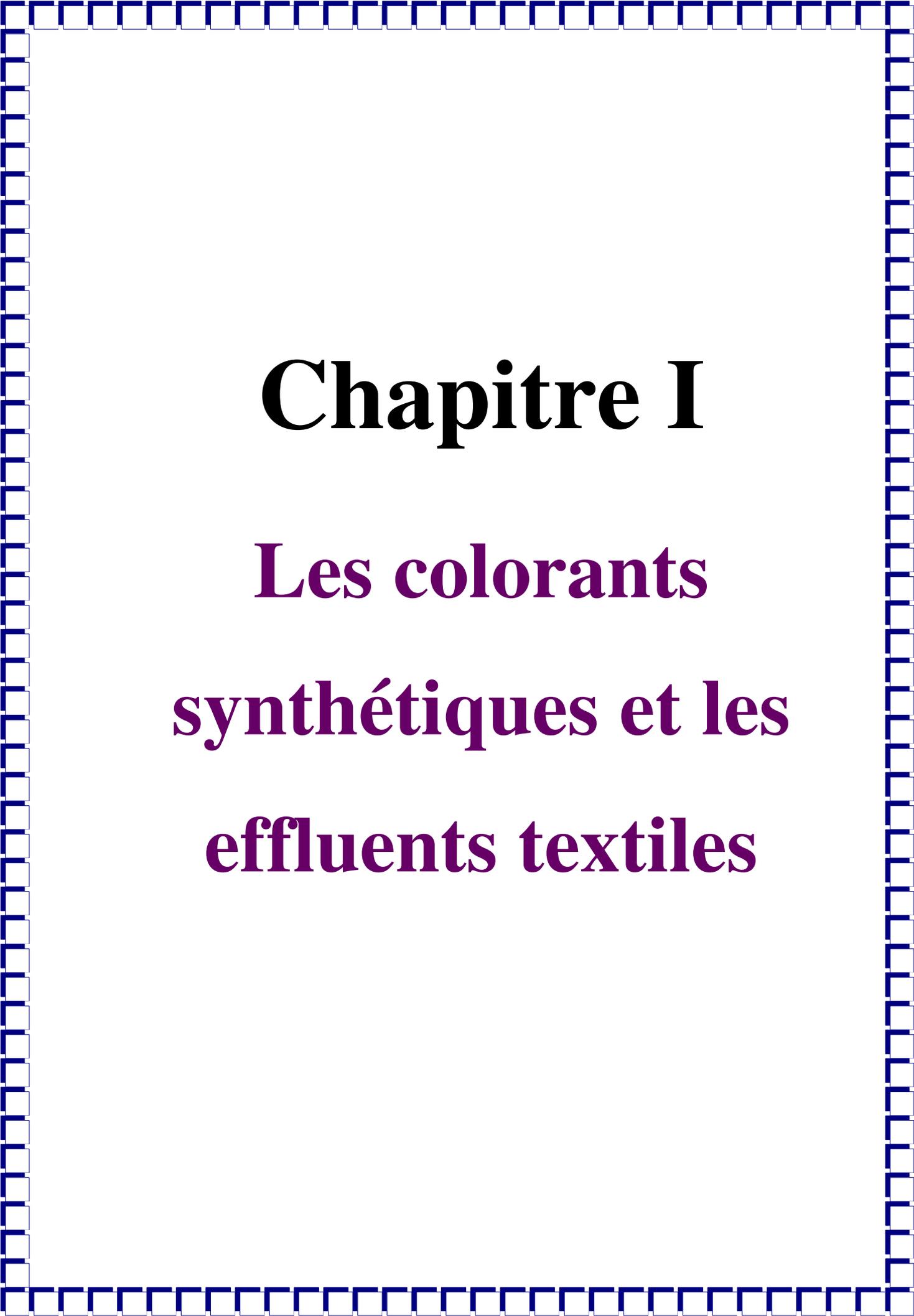
Dans le but d'évaluer la performance de cette technique, on a réalisé des essais sur des solutions artificielles typiques d'un rejet liquide d'industrie de textile, ces solutions sont préparées à base d'un colorant azoïque hydrosoluble.

Dans la partie bibliographique de ce travail, on a essayé de donner en premier lieu un aperçu général sur les colorants synthétiques et leur classification chimique, ainsi que les méthodes utilisées pour leurs éliminations des eaux puisque ils sont connus comme des produits réfractaires et qui peuvent devenir toxiques après leur décomposition dans la nature. En second lieu, une attention bien particulière a été donnée à la synthèse bibliographique sur la méthode électrochimique de traitement des eaux résiduaires contenant les colorants de textile en employant le processus d'électrocoagulation (EC) en batch. Il a été prouvé que cette technique offre la simplicité, l'efficacité, la compatibilité environnementale, la sécurité, la sélectivité, pour un faible coût opérationnel (**Mollah et al., 2004**).

La partie expérimentale de cette étude est divisée en deux chapitres : L'un est réservé pour détailler l'ensemble des méthodes expérimentales et du matériels utilisés on étudiant l'effet des paramètres opératoires tels que le voltage appliqué, le temps d'électrolyse, la surface active d'électrode, la concentration du colorant, la vitesse d'agitation de la solution pour optimiser l'efficacité du traitement. L'autre chapitre est consacré aux résultats obtenus suite à la décoloration des solutions étudiées. Enfin, on a conforté cette étude par des calculs énergétiques et de coût opérationnel.



**PARTIE**  
**BIBLIOGRAPHIQUE**



# **Chapitre I**

## **Les colorants synthétiques et les effluents textiles**

### I.1. Introduction :

Depuis le début de l'humanité, les colorants ont été appliqués pratiquement dans toutes les sphères de notre vie quotidienne pour la peinture et la teinture du papier, de la peau et des vêtements, etc. (**Bengrine, 2011**). Ainsi, dès l'antiquité, il a su extraire les matières colorantes à partir de végétaux comme l'indigo et d'animaux comme le carmin extrait de la cochenille (**Khelloul, 2012**). Ceci a permis le développement du commerce entre les différentes peuplades de l'époque. L'utilisation de ces colorants naturels s'est prolongée jusqu'à la première moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle. Ils furent en suite progressivement remplacés par des colorants synthétiques, lesquels sont mieux adaptés à de nombreux usages particuliers

Les colorants synthétiques dominent aujourd'hui le marché, leur production mondiale est estimée à 700 000 tonnes/ an (**Chetioui, 2010**). Ils sont synthétisés principalement à partir des produits pétroliers, notamment du benzène et de ses dérivés (toluène, naphthalène, xylène et anthracène) (**Oubagha, 2011**). Les colorants synthétiques ont été conçus afin d'avoir une durée de vie plus longue que les colorants naturels. Ils donnent des couleurs plus intenses, ils sont de plus en plus utilisés dans les industries textiles grâce à leur synthèse assez facile, à leur production rapide et à la variété de leurs couleurs comparées aux colorants naturels (**Griffiths, 1984**). De plus, ils sont utilisés en plus petites quantités et donc moins onéreux que les colorants naturels. En effet, selon le type d'application et d'utilisation, les colorants synthétiques doivent répondre à un certain nombre de critères: résistance à l'abrasion, stabilité photolytique des couleurs, résistance à l'oxydation chimique (notamment aux détergents) et aux attaques microbiennes (**Guivarch, 2004**), les caractéristiques propres aux certains colorants accroissent leur persistance dans l'environnement et les rendent peu disposés à la biodégradation (**Pagga, 1986**).

L'industrie textile utilise environs 10000 types de colorants synthétiques, la majorité est constituée de substances toxiques qui présentent un danger autant pour l'homme que sur la vie aquatique. (**Ben Mansour et al., 2011**).

### I.2. Définition d'un colorant :

Un colorant est défini comme étant un produit capable de teindre une substance d'une manière durable. Cette propriété résulte d'une affinité particulière entre le colorant et la fibre en lui conférant une nouvelle propriété : " la couleur " (**Merouani, 2011**). La coloration plus ou moins intense des différentes substances est liée à leur constitution chimique (**Benaissa, 2012**). L'industrie moderne définit un colorant comme un produit contenant le colorant organique pur avec différents additifs et agents de couplage, qui facilitent son utilisation (**Ait Salim, 2018**).

---

Le colorant possède des groupements qui lui confèrent la couleur appelés **chromophores** et des groupements qui permettent sa fixation : **auxochromes**.

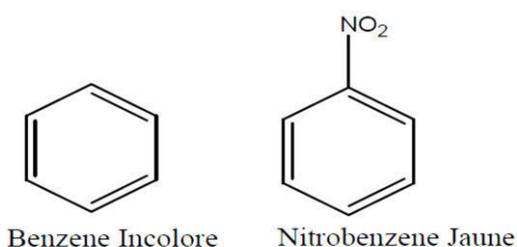
Les matières colorantes se caractérisent par leur capacité à absorber les rayonnements lumineux dans le spectre visible (de 380 à 750 nm) (**Ben Mansour et al., 2011**). La transformation de la lumière blanche en lumière colorée par réflexion sur un corps, par transmission ou diffusion, résulte de l'absorption sélective d'énergie par les chromophores (**Guivarch, 2004**).

### I.3. Structure d'un colorant :

La structure joue un rôle important dans la détermination des propriétés colorantes des composés organiques. En général, ce sont des composés organiques insaturés et / ou aromatiques qui sont utilisés comme colorants. Une molécule type de colorant est généralement constituée de trois parties : un **chromophore**, un groupe **auxochrome** et un groupe **solubilisant**. Le chromophore est en quelque sorte la portion responsable de la couleur du composé, l'auxochrome est la partie influençant l'intensité de la coloration et il fixe avec efficacité le colorant sur le support et enfin le groupe solubilisant améliore la solubilité du colorant et ainsi, il peut être potentiellement appliqué en milieu aqueux. (**Chetioui, 2010**).

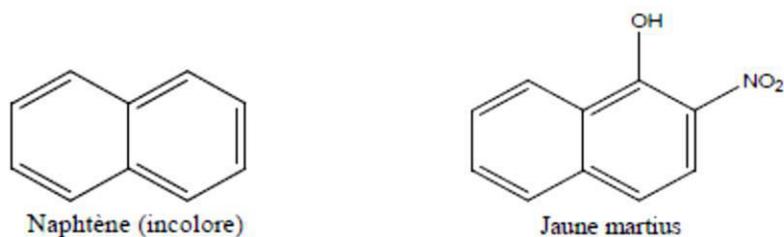
#### I.3.1. Groupement chromophore :

Le chromophore est un groupement fonctionnels insaturé ayant des électrons mobiles (électrons  $\pi$  et/ou des doublets libres) qui sont à l'origine de l'absorption des radiations lumineuses vers les grandes longueurs d'ondes, c'est-à-dire vers le domaine du spectre visible (**Larbi, 2008**). L'œil perçoit le mélange des radiations qui n'ont pas été absorbées. Plus le groupement chromophore donne facilement un électron, plus la couleur est intense. Par exemple la présence du groupement  $-\text{NO}_2$  lié au noyau benzénique, lui donne une coloration jaune.



### I.3.2. Groupement auxochrome :

Le déplacement de l'absorption vers les plus grandes longueurs d'onde, dans le domaine du visible, est dû, dans la molécule de colorant, à la présence de groupements auxochromes couplés aux groupements chromophores. **L'auxochrome** est donc la partie influençant l'intensité de la coloration et il fixe le colorant avec efficacité sur le support (**tableau 1**) (**Benaissa et Kacem, 2011**). Exemple :



Les chromophores et les auxochromes habituels sont résumés dans le **tableau 1** (**Guivarch, 2004**).

**Tableau 1** : Principaux groupes chromophores et auxochromes classés par intensité croissante.

Groupes chromophores	Groupes auxochromes
N = N : groupe azoïque	NH <sub>2</sub> : Amino
N = O : groupe nitroso	NHCH <sub>3</sub> : Méthylamino
C = O : groupe cétonique ou carbonyle	N(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> : Diméthylamino
C=C : groupe vinyle	OH: Hydroxyle
C = S : groupe thiocarbonyle	OR: Alkoxy

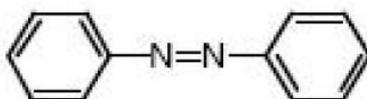
### I.4. Classification chimique des colorants :

Les principaux modes de classification des colorants reposent soit sur leur constitution chimique, soit sur leurs méthodes d'application aux différents substrats que sont les fibres textiles, le papier, le cuir, les matières plastiques, etc (**Laid, 2010**).

Le classement des colorants selon leur structure chimique repose sur la nature du groupe chromophore (**Tafer, 2007**).

#### I.4.1. Les colorants azoïques :

Les colorants azoïques sont caractérisés par la présence au sein de la molécule d'un groupement fonctionnel azo (-N=N-) reliant deux noyaux benzéniques **figure 1 (Aidaoui et Kouadri, 2018)**. Ces colorants sont les plus communément utilisés en raison de la présence du groupe azo qui confère à ces produits chimiques, une certaine résistance à la lumière, aux acides, aux bases et à l'oxygène, propriétés souhaitées pour les vêtements (**Shu et Chang, 2005**). Cette catégorie de colorants est actuellement la plus répandue sur le plan d'application, puisqu'elle représente plus de **50%** de la production mondiale de matières colorantes (**Ait Salem, 2018, Ben Mansour et al., 2009 a**). Ces colorants peuvent être hydrosolubles ou non. Il est estimé que **10-15 %** des quantités initiales de ces colorants sont perdues durant les procédures de teinture et sont évacuées sans traitement préalable dans les effluents (**Guillard, 2003**). Notons que plus de **53%** de colorants utilisés sont identifiés comme étant des composés stables, non biodégradables, (**Pagga et Brown, 1986**) ce qui présente un risque pour l'environnement.

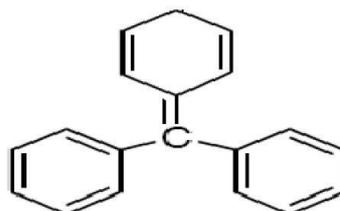


**Figure 1 :** Exemple d'un colorant azoïque (l'azobenzène).

#### I.4.2. Les colorants triphénylméthanes :

Les colorants triphénylméthanes et leurs dérivés hétérocycliques constituent la plus ancienne classe de colorants synthétiques. Actuellement ils sont moins importants que les colorants azoïques et anthraquinoniques, ils ont conservé une certaine valeur commerciale, car ils permettent de couvrir la totalité de la gamme de nuances (**Djeralfia et Fakir, 2015**).

Les triphénylméthanes sont utilisés intensivement dans les industries papetières et textiles pour teindre le nylon, la laine, la soie et le coton. Leur utilisation ne se limite pas à l'industrie. On les retrouve également dans le domaine médical comme marqueur biologique et comme agent antifongique chez les poissons et la volaille (**Saaidia, 2018**).



**Figure 2 :** Structure d'un colorant triphénylméthane.

### I.4.3. Les colorants indigoïdes :

Les colorants indigoïdes tirent leur appellation de l'indigo dont ils dérivent. Ainsi, les homologues séléniés, soufrés et oxygénés du bleu indigo provoquent d'importants effets hypochromes avec des coloris pouvant aller de l'orange au turquoise. (Saaidia, 2018). Les colorants indigoïdes sont utilisés comme colorant en textile, comme additifs en produits pharmaceutiques, la confiserie, ainsi que dans des diagnostics médicales (Amalric, 1996). Le plus important des colorants indigoïdes est l'indigo servant principalement à la coloration de jeans, de formule chimique  $C_{16}H_{10}N_2O_2$  (Saaidia, 2018).

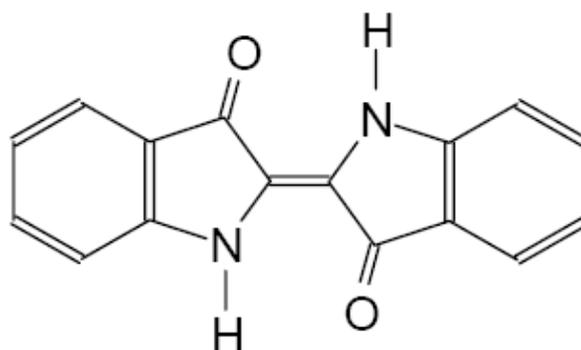


Figure 3 : Structure d'un colorant indigoïde.

### I.4.4. Les colorants xanthènes :

Les colorants xanthènes sont des composés qui constituent les dérivés de la fluorescéine halogénée. Ils sont dotés d'une intense fluorescence. Leur propriété de marqueurs lors d'accident maritime ou de traceurs d'écoulement pour des rivières souterraines est malgré tout bien établie. Ils sont aussi utilisés comme colorant en alimentaire, cosmétique, textile et impression (Aga, 2015).

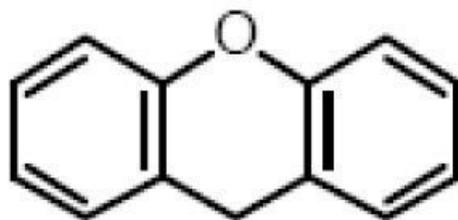
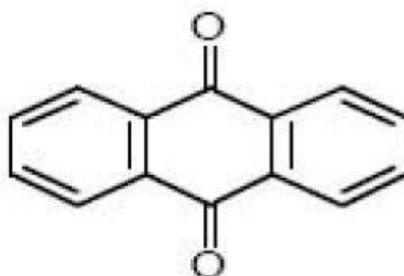


Figure 4 : Structure moléculaire d'un colorant xanthène.

#### I.4.5. Les colorants anthraquinoniques :

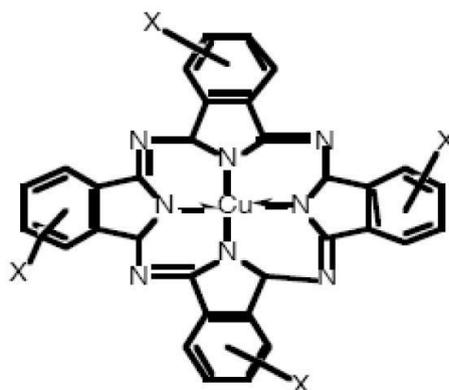
D'un point de vue commercial, ces colorants sont les plus importants après les colorants azoïques. Leur formule générale dérivée de l'anthracène montre que le chromophore est un noyau quiconque sur lequel peuvent s'attacher des groupes hydroxyles ou amines (**Abbas et Messaad, 2017**).

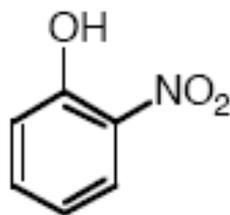


**Figure 5 :** Structure d'un colorant anthraquinonique.

#### I.4.6. Les phtalocyanines :

Les phtalocyanines ont une structure complexe possédant un atome métallique central. Les colorants de ce groupe sont obtenus par réaction du dicyanobenzène en présence d'un halogénure métallique (Cu, Ni, Co, Pt, etc) (**Lamri, 2010**)





**Figure 7 :** Structure de la molécule d'un colorant nitré et nitrosé (Aga, 2015).

### **I.5. Les effluents textiles et leurs techniques de traitement :**

Les principales questions environnementales soulevées par les activités de l'industrie textile concernent essentiellement les rejets dans l'eau, les émissions dans l'air ainsi que la consommation d'énergie. Parmi celles-ci, l'eau représente la préoccupation première. L'industrie textile utilise environ 10000 types de colorants, la majorité est constituée de substances toxiques qui présentent un danger autant pour l'homme que sur la vie aquatique (**Ben Mansour et al, 2011**). Cette industrie est parmi les industries les plus consommatrices d'eau en grande quantité. Les secteurs de teintures, de l'impression ou du finissage du textile y occupent une place de choix. Ces activités génèrent une pollution importante en eaux résiduaires fortement chargés en colorants acides ou basiques, des sels et des adjuvants. Ces eaux constituent d'énormes nuisances pour l'homme et son environnement et présentent généralement des problèmes de couleur, de température relativement élevée et de concentrations élevées de DBO<sub>5</sub>, de DCO, de solides en suspension, ainsi que de toxicité et de conductivité élevées. Leurs caractéristiques peuvent être extrêmement variables en raison du large spectre de colorants, de pigments, de produits auxiliaires et de procédés utilisés (**Bouafia, 2010**). Le rejet de ces eaux résiduaires dans l'écosystème est une source dramatique de pollution, d'eutrophisation et de perturbation non esthétique dans la vie aquatique (**Aliouche, 2007**) **photo 1** et par conséquent présente un danger potentiel de bioaccumulation qui peut affecter l'homme par transport à travers la chaîne alimentaire.

Les colorants rejetés par les industries textiles et les officines de nettoyage des vêtements sont peu ou pas biodégradables et résistent bien aux traitements classiques d'épuration. Ils créent surtout une nuisance visuelle dans les eaux contaminées bien qu'un certain nombre d'entre eux est mutagène et cancérigène (**Belaid et Fouhama, 2015**). Ces rejets font parties des eaux résiduaires les plus mal traitées et sont caractérisés par de fortes variations de pH, ainsi qu'une biotoxicité accrue à l'égard des bactéries (**Larbi, 2008**). Ces eaux doivent donc être traitées avant leur décharge finale, pour des raisons environnementales et légales (**Sbai et Loukil, 2015**).



**Photo 1** : Exemple d'une pollution d'un cours d'eau par les colorants textiles  
(Rivière Xiang, située dans la province chinoise Hunan)

Le traitement des eaux colorées a fait l'objet de plusieurs études afin de réduire l'intensité de la couleur et de la matière organique contenue dans ces eaux (**Benaissa, 2012**). De nombreuses techniques de dépollution des effluents chargés en colorants sont développées au cours de ces dernières années. Parmi ces techniques on peut citer (**Benamraoui, 2014**) :

### **I.5.1. Traitements physiques :**

#### **I.5.1.1. Adsorption sur charbon actif :**

Le charbon actif ou d'autres matériaux adsorbants peuvent être utilisés pour éliminer plusieurs colorants des eaux usées. Comme les colorants ne sont pas tous ioniques, la plupart des adsorbants ne peuvent pas réduire tous les colorants. Le charbon actif, adsorbant le plus communément utilisé pour la réduction de la couleur (à cause de sa capacité d'adsorption élevée), est capable d'adsorber la plupart des colorants. Toutefois, cette technique ne résout pas le problème, elle ne fait que déplacer la pollution de l'état liquide à l'état solide. De plus, ces techniques, non destructives, nécessitent des opérations postérieures onéreuses de régénération et de post traitement des déchets solides (**Hammami, 2008**).

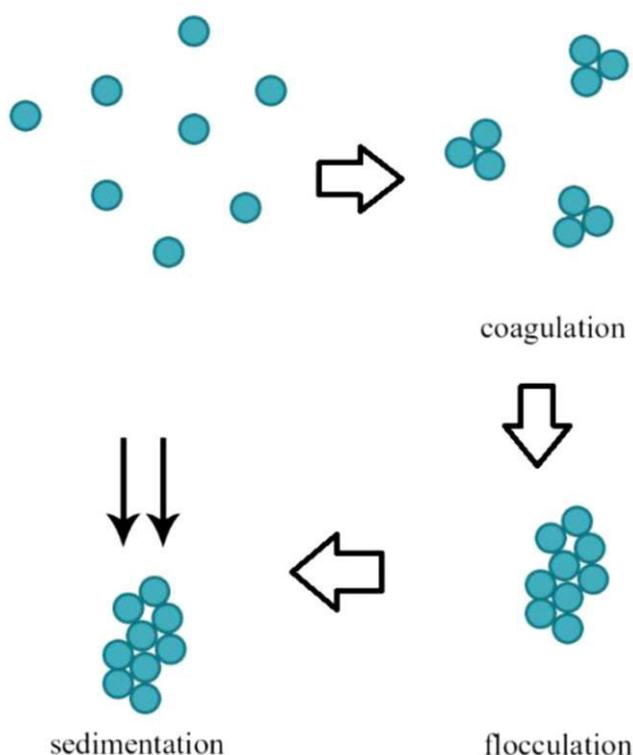
### I.5.1.2. La coagulation – floculation :

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 floculants chimiques en espèces plus visibles et séparables (les floes). Les floes formés sont ensuite séparés par décantation et filtration puis évacués (**Djab, 2012**).

La coagulation a pour but principale de déstabiliser les particules en suspension, c'est-à-dire de faciliter leur agglomération. En pratique, ce procédé est caractérisé par l'injection et la dispersion rapide de produits chimiques : sels minéraux cationiques (sels de fer ou d'aluminium). Ces produits s'appellent des coagulants et ont une charge positive. La charge positive du coagulant neutralise la charge négative des particules colloïdales dans la solution à traiter. Les coagulants inorganiques tels que l'alun (sulfate d'aluminium) donnent les résultats les plus satisfaisants pour la décoloration des effluents textiles.

La floculation a pour objectif de favoriser, à l'aide d'un mélange lent, les contacts entre les particules déstabilisées. Ces particules s'agglutinent pour former un floe qu'on peut facilement éliminer par les procédés de décantation et de filtration (**Metahri, 2012**).

Les floes les plus lourds se retrouvent rapidement au fond de la solution a traitée. Ce processus s'appelle la sédimentation. **La figure 8** illustre les processus de base qui se produisent durant la coagulation.



**Figure 8** : Processus de coagulation, floculation et de sédimentation (**Hashlamon et al., 2015**).



**Photo 2 :** Exemple d'un traitement d'une eau résiduaire par coagulation-floculation.

### **I.5.1.3. La filtration membranaire :**

La filtration sur membrane est pilotée par une pression hydraulique qui se décline en microfiltration, ultrafiltration, nano-filtration et osmose inverse (**Ouari, 2017**). L'effluent passe à travers une membrane semi perméable qui retient en amont les contaminants de taille supérieure au diamètre des pores, pour produire un perméat purifié et un concentré qui reçoit les impuretés organiques (**Khelloul, 2012**).

### **I.5.2. Traitements chimiques :**

Dans la littérature, les techniques d'oxydation chimiques sont généralement appliquées pour le traitement des organiques dangereux présents en faibles concentrations, en prétraitement avant des procédés biologiques, traitement d'eaux usées chargées de constituants résistants aux méthodes de biodégradation et en post-traitement pour réduire la toxicité aquatique. Parmi les techniques de traitement chimique on peut citer : (**Maalem, 2017**)

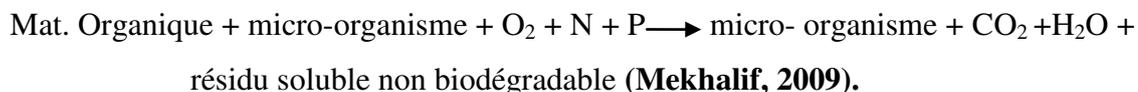
- Oxydation en phase liquide (oxygène, ozone, oxydants tels que NaOCl, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).
- Méthode complexométrique.
- Echange d'ions (résine échangeuse d'ions) (**Bouafia, 2010**).

### **I.5.3. Traitements biologiques :**

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 (**Hemsas, 2008**).

Son principe est de provoquer une prolifération de micro-organismes aux dépens des matières organiques apportées par l'effluent, en présence ou non d'oxygène. Il s'agit en fait d'un

véritable transfert d'une forme non préhensible (matières colloïdales et dissoutes) en un élément manipulable (suspension de micro-organismes). Le résultat de cette dégradation est un accroissement de la masse épuratrice, et le rejet de déchets dans l'eau.



Le tableau suivant présente les principaux avantages et inconvénients des techniques de dépollution des effluents textiles (**tableau 2**) (**Benaïssa, 2012**).

**Tableau 2 :** Avantages et inconvénients des techniques de traitement des effluents textiles

Technologie	Exemples	Avantages	Inconvénients
<b>Coagulation / Flocculation</b>	Chaux FeCl <sub>3</sub> Polyélectrolyte	- Equipement simple - Décoloration relativement rapide - Réduction significative de la DCO	- Formation de boues - Adjonction de produits chimiques nécessaires - Fonctionnement onéreux - Coagulants non réutilisables - Réduction spécifique de la couleur - Peu d'informations sur la réduction de DBO et DCO
<b>Filtration sur membranes</b>	Osmose inverse Nano filtration Microfiltration Ultrafiltration	- Utilisation simple et rapide - Pas d'addition de produits chimiques - Faible consommation énergétique - Réduction de la couleur - Grands volumes traités	- Investissement important - Sélectif - Encrassement rapide des membranes - Prétraitements nécessaires
<b>Adsorption</b>	Carbone activé Silice	- Réduction efficace de la couleur - Technologie simple - Faible coût d'utilisation pour certains adsorbants	- Investissement et coût de fonctionnement élevés - Lent et limité en volume - Régénération des adsorbants onéreuse voire

			<p>impossible</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sélectif</li> <li>- Formation de boue</li> </ul>
<b>Oxydation chimique</b>	<p>Ozone Réactifs de Fenton Chloration</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Traitement de gros volumes</li> <li>- Diminution nette de la chloration</li> <li>- Décoloration rapide et efficace</li> <li>- Opération simple</li> <li>- Oxydant puissant</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Investissement et coût de fonctionnement très élevés</li> <li>- Efficacité limitée pour certains colorants</li> <li>- Produits d'oxydation inconnus</li> <li>- Coût élevé</li> <li>- Produits d'oxydation inconnus</li> <li>- Formation de sous-produits de chloration (cancérogènes)</li> </ul>
<b>Réduction chimique</b>	<p>Chlorure d'étains hydro sulfite</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Décoloration efficace des azoïques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Formation d'amines aromatiques</li> <li>- Dégradation incomplète</li> </ul>
<b>Procédés biologiques</b>	<p>Aérobic Anaérobic</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Approprié pour les colorants insolubles</li> <li>- Décolore la plupart des colorants par un mécanisme de réduction</li> <li>- Réutilisation du méthane produit comme source d'énergie sur le site</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Spécifique à certains colorants</li> <li>- Décoloration variable</li> <li>- Grandes quantités de boues générées</li> <li>- Besoins énergétiques importants</li> <li>- Produits de dégradation inconnus</li> <li>- Beaucoup de produits toxiques non dégradés</li> <li>- Nécessite de grands réservoirs d'aération</li> </ul>

**I.6. Législation sur l'environnement :**

Depuis 2003 l'année d'apparition de la loi cadre de l'environnement: Protection de l'Environnement dans le cadre du Développement Durable N°03-10 du 19 juillet 2003, la législation Algérienne est dotée d'une réglementation sur les rejets d'effluents liquides industriels définissant les valeurs limites des ces rejets 'Décret exécutif N °06-141 au 19 avril 2006' (**tableau 3**) et (**tableau 4**) qui concerne l'industrie textile.

**Tableau 3 :** Valeurs limites des paramètres de rejets d'effluents liquides industriels (**JORADP N° 26, 2006**).

Paramètres	Unité	Valeurs Limites	Tolérances aux valeurs limites Anciennes Installations
Température	°C	30	30
pH	-	6,5-8,5	6,5-8,5
MES	mg/l	35	40
Azote Kjeldahl	mg/l	30	40
Phosphore total	mg/l	10	15
DCO	mg/l	120	130
DBO5	mg/l	35	40
Aluminium	mg/l	3	5
Substances toxiques bio-accumulables	mg/l	0,005	0,01
Cyanures	mg/l	0,1	0,15
Fluor et composé	mg/l	15	20
Indice de phénol	mg/l	0,3	0,5
Hydrocarbures totaux	mg/l	10	15
Huiles et Graisse	mg/l	20	30
Cadmium	mg/l	0,2	0,25
Cuivre total	mg/l	0,5	1
Mercure total	mg/l	0,01	0,05
Plomb total	mg/l	0,5	0,75
Chrome Total	mg/l	0,5	0,75
Etain total	mg/l	2	2,5
Manganèse	mg/l	1	1,5
Nickel total	mg/l	0,5	0,75
Zinc total	mg/l	3	5
Fer	mg/l	3	5

**Tableau 4** : Valeurs limites des paramètres de rejets d'effluents d'industries textiles (JORADP N° 26, 2006).

<b>Paramètres</b>	<b>Unité</b>	<b>Valeurs Limites</b>	<b>Tolérances aux valeurs limites Anciennes Installations</b>
Température	°C	30	35
pH	-	6,5-8,5	6 – 9
DCO	mg/l	250	300
DBO5	mg/l	150	200
Matière décantable	mg/l	0,4	0,5
Matière non dissoute	mg/l	30	40
Oxydabilité	mg/l	100	100
Permanganate	mg/l	20	25

# **Chapitre II**

## **Traitement**

### **d'électrocoagulation**

**(EC)**

## II.1. Introduction :

Les activités industrielles génèrent une pollution importante en eaux résiduaires qui constituent d'énormes nuisances pour l'environnement et la santé publique; pour cela les recherches actuelles sont orientées vers des technologies simples, efficaces et moins coûteuses pour le traitement et la gestion de rejets industriels. De ce point de vue, les procédés électrochimiques sont particulièrement intéressants. Ils sont reconnus pour leur efficacité de traitement et d'assainissements des eaux (**Feng et al., 2003**). Ils se caractérisent par un aspect non polluant et une facilité d'automatisation et constituent l'une des méthodes visant à réduire l'emploi de réactifs.

Parmi ces procédés on a l'électrocoagulation (EC) qui est l'objet de ce travail, elle a montré son efficacité dans le traitement de divers rejets industriels et urbain (**Naje et al., 2015 ; Khennoussi et al., 2013**). Elle est utilisée avec succès dans le traitement des eaux brutes naturelles et résiduaires en raison de sa capacité d'élimination des matières solides en suspension et colloïdale et aussi l'élimination concomitante de substances inorganiques et organiques (**Bensadok et al., 2011**).

Tel que son nom l'indique, l'EC est la fusion des sciences de l'électrochimie et de la coagulation. En effet, l'EC est un procédé électrochimique complexe qui met à profit un éventail de phénomènes physiques et chimiques pour entraîner l'abattement des polluants disséminés dans l'effluent, ce phénomène s'opère à l'aide d'électrodes (anodes et cathodes), lesquelles sont plongées dans le milieu aqueux, la quantité d'ions métalliques injectés est contrôlée par le courant électrique (**Holt et al., 2004**).

## II.2. Historique du procédé d'électrocoagulation :

L'EC est une technique de traitement développée avant le 20<sup>ème</sup> siècle. Le premier document rapportant l'utilisation de l'EC pour le traitement des effluents, est un brevet américain déposé en 1880 par Webster (**Picard, 2000**), qui utilisait des électrodes en fer.

**En 1909**, J.T. Harries reçut une licence des USA pour le traitement des eaux usées par des électrodes de fer et d'aluminium (**Zongo, 2009**).

**En 1912**, deux autres stations de traitements des eaux usées furent construites sur ce principe, aux Etats-Unis.

En 1946, Stuart étudia plus précisément le procédé avec un réacteur équipé d'électrodes en aluminium. Comparant le procédé de coagulation physico-chimique et le procédé électrochimique, il observa que le phénomène de coagulation semble plus rapide avec la méthode électrochimique (**Bengana et Boudaa, 2014**).

Les recherches se sont poursuivies sur les effluents de caractéristiques très différentes :

- **Holden (1956)** s'intéressa à la possibilité de traiter les eaux de surface pour la production d'eau potable alors que Sadek (1970) proposa un traitement des eaux usées en éliminant les phosphates par l'EC
- **Back et al, en 1974**, employèrent le procédé pour le traitement des effluents issus des industries agro-alimentaires.
- **En 1975**, Strokach en URSS, évoqua divers « électro coagulateurs » permettant le traitement et le recyclage des eaux usées pour une éventuelle réutilisation en agriculture.
- **En 1980**, de nombreux travaux ont été présentés par des chercheurs russes sur l'EC comme moyen de traitement efficace des eaux usées.
- **Enfin, en 1984**, Vik réalisa un travail conséquent démontrant la possibilité de produire de l'eau potable par le procédé d'EC à partir des eaux naturelles norvégiennes fortement chargées en substances humiques (**Zidelkhir, 2016**).

L'intérêt de l'EC ne cesse de croître depuis les années 80. Aujourd'hui, grâce à une plus grande conscience de pollution et de conditions de normalisation de l'industrie. Plus récemment, plusieurs applications du procédé ont été réalisées sur différents types d'effluents et montrent une efficacité très élevée et un coût de traitement compétitif par rapport aux procédés classiques. L'EC a été étudiée pour l'élimination de divers polluants minéraux ou organique (**Sahraoui et Yahia, 2018**).

Les industries de traitement de surface ont été les premières à instaurer des procédés d'EC, en France, dans les années 90. Depuis, la technologie des procédés EC n'a cessé d'être développée et améliorée dans des domaines industriels variés (textile, agroalimentaire, semi - conducteurs...). L'importance de l'EC s'est accrue du fait de son efficacité, généralement supérieure aux autres techniques, pour éliminer les différentes formes de pollution, répertoriées par les indicateurs suivants : (**Bennajah, 2007**)

- DCO : Demande chimique en oxygène.
- DBO : Demande biologique en oxygène.
- COT : Carbone organique total.
- MES : Matières en suspensions.
- TDS : Taux de solides dissous.
- TAC : Titre alcalimétrique complet.
- Les métaux lourds.
- ABS : Coloration liée à l'absorbance de l'effluent (**Bessioud, 2010**).

### II.3. Description technique du procédé d'électrocoagulation :

#### II.3.1. Principe du procédé d'électrocoagulation :

Le principe de l'EC consiste à générer in situ dans la cellule d'électrolyse des ions métalliques susceptibles de provoquer la coagulation des particules colloïdales par dissolution d'anodes solubles immergées dans la solution à traiter sous l'action d'un courant afin d'éliminer la pollution (**Ammouch et Slimani., 2017, Drogui et al., 2007**). Le processus d'EC combine d'autres phénomènes (complexation, précipitation et flottation...) (**Vepsäläinen, 2012**) fonctionnant de manière synergique pour éliminer efficacement les différents types des polluants. La coagulation est l'opération de déstabilisation des particules colloïdales en suspension par neutralisation de la charge surfacique négative responsable de la force de répulsion entre ces particules à l'aide des cations générés par le matériau de l'anode et des produits de leur hydrolyse. Les particules déstabilisées s'adsorbent sur les précipités tels que  $\text{Al(OH)}_3$  (**Dia et al., 2017**). Ces espèces amorphes, appelés aussi «champ de floculation », possèdent une large surface convenable pour l'adsorption rapide des composés organiques solubles et au piégeage des particules colloïdales, ceci conduit à la formation des floes qui seront ensuite séparés aisément du milieu aqueux soit par sédimentation, soit par flottation favorisée par la génération des bulles de dihydrogène ( $\text{H}_2$ ) et de dioxygène ( $\text{O}_2$ ) comme le montre le schéma suivant **figure 9** :

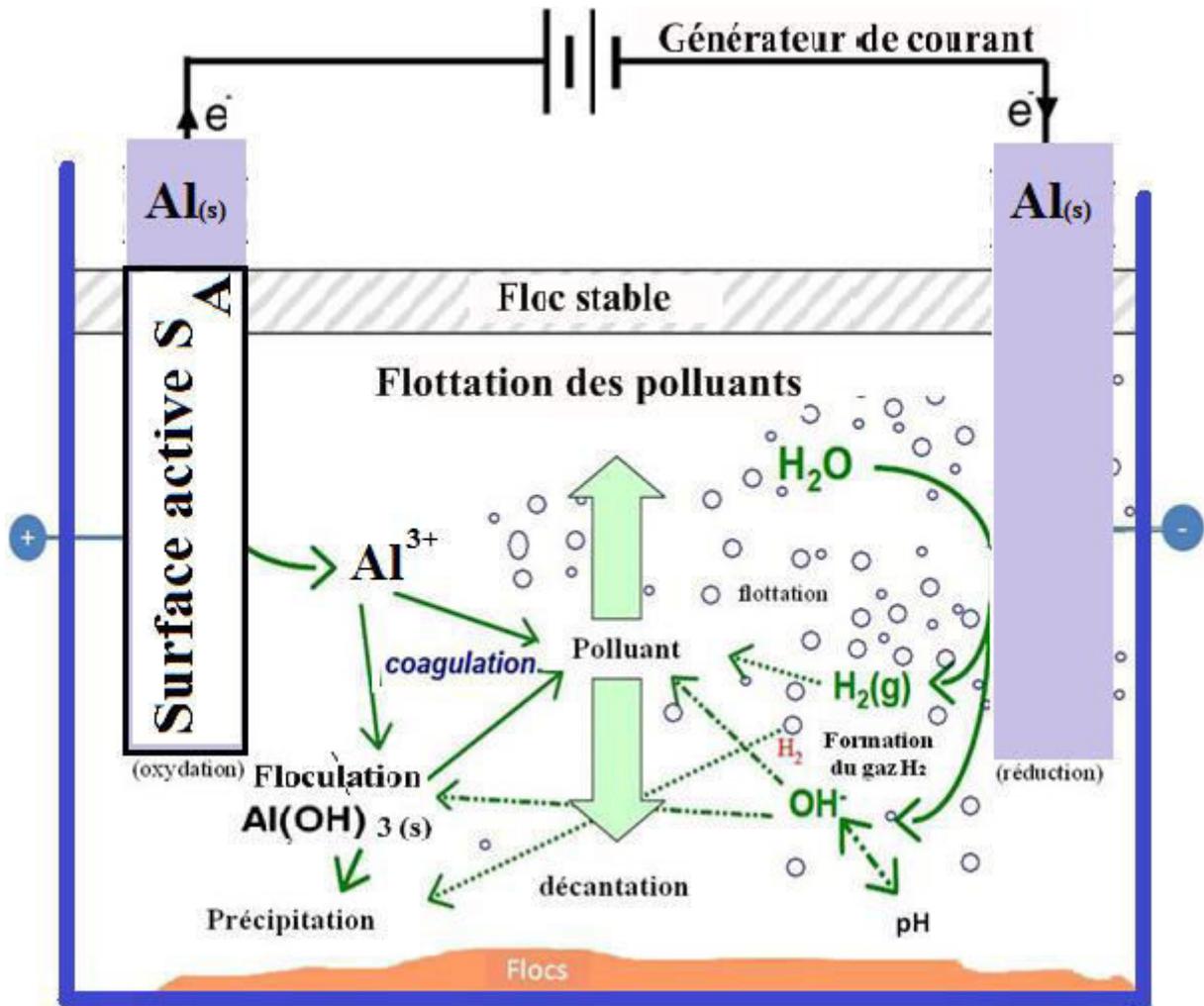
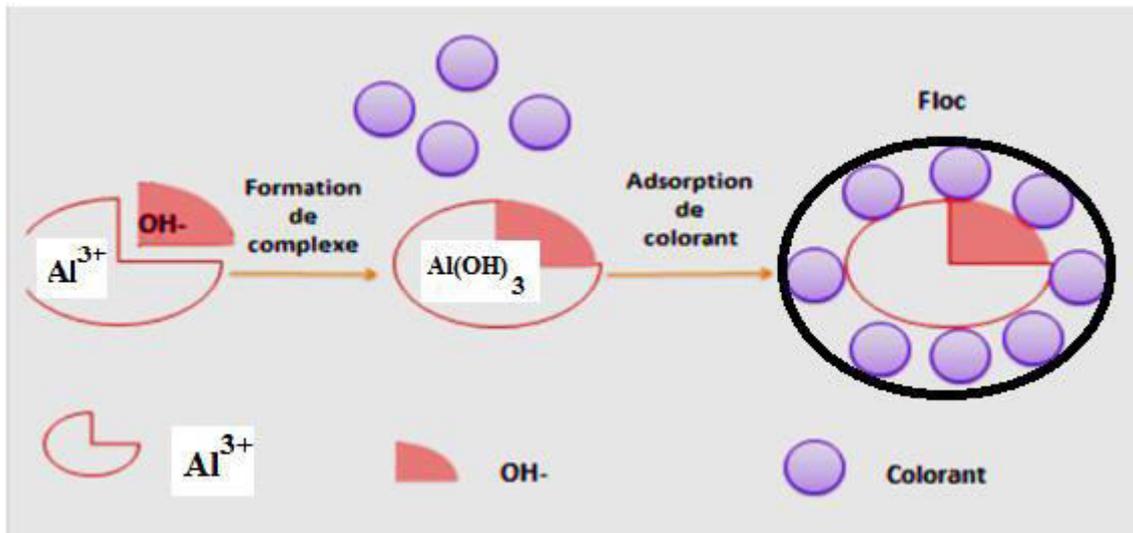


Figure 9: Schéma du principe de l'EC (Zodi, 2012).

Certains auteurs résument ce processus comme suit :

- La formation des coagulants par l'oxydation électrolytique de l'anode.
- La déstabilisation des matières en suspension et la cassure des émulsions
- L'agrégation des phases déstabilisées pour former les flocs **figure 10** (Benahmed Daidj, 2018).



**Figure 10 :** Le processus de formation d'hydroxydes métalliques-colloïdes (Aidaoui et Kouadri, 2018).

Les hydroxydes d'aluminium ainsi générés dans la solution, peuvent éliminer les polluants soit par complexation de surface où le polluant est comme un ligand qui se fixe chimiquement à l'ion hydraté, soit par attraction électrostatique de type Vander-Waals. D'une façon générale, les cations métalliques, lors de l'EC jouent le même rôle de déstabilisation des colloïdes que les coagulants utilisés en coagulation chimique (Aidaoui et Kouadri, 2018).

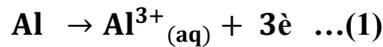
### II.3.2. Réactions aux électrodes :

Dans le procédé d'EC le coagulant est produit in situ par oxydation électrolytique d'une anode suite au passage d'un courant. Les électrodes les plus couramment utilisées en EC sont en aluminium ou en fer grâce à leur prix abordable, leur importance au sein des processus de coagulation et de précipitation (Annane, 2011) et à leur forme ionique qui présente une valence élevée (Bennajah, 2007; Kobya et al., 2003). Elles peuvent se présenter sous forme de plaques, de boules, de sphères à lit fluidisé, de fil, de tige ou de tube (Bennajah, 2007).

Un réacteur simple d'EC est composé d'une anode et une cathode comme il est représenté dans la **figure 9**. Quand une tension est appliquée à partir d'une source d'alimentation externe, le matériau de l'anode subit l'oxydation, tandis que la cathode est soumise à la réduction. Les principes réactions mises en jeu pour les électrodes en aluminium sont (Bessioud, 2010) :

➤ **A l'anode :**

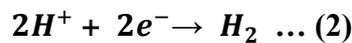
Dans le cas d'une anode en aluminium, le cation métallique formé est  $Al^{3+}$  (Essadki et al., 2008; Khemis et al., 2006). Cette demi-réaction d'oxydation entraîne la solubilisation du métal (va passer de l'état solide à l'état ionique) selon la réaction suivante :



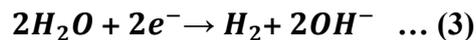
Ces ions réagissent avec les espèces ioniques du milieu aqueux, ce qui résulte l'abattement des polluants. Lors du processus d'oxydation, il peut aussi y avoir une autre réaction, secondaire, qui entraîne la formation d'oxygène par hydrolyse de l'eau. Cette demi-réaction se module en fonction du pH (acide ou basique) du milieu aqueux.

➤ **A la cathode :**

Au voisinage de la cathode, la réduction du solvant (eau) provoque la formation du gaz hydrogène. Ce dégagement de gaz se présente sous formes de bulles, estimées à un diamètre d'environ 10 à 100  $\mu m$  et contribuent fortement à l'agitation du milieu (Abbas et Messaad, 2016). Dont le dégagement permet la flottation des particules floculées. Sous conditions acides la réduction de l'eau est la suivant :



Sous conditions basiques, elle prend la forme suivant :



Réaction au sein de la solution :



Les cations métalliques forment des complexes avec les ions hydroxydes. L'espèce majoritaire dépend du pH du milieu. Dans le cas de l'aluminium, on trouve une multitude de complexes anioniques et cationiques (Murugunathan et al, 2004). On peut distinguer:

- Les mono complexes tels que:  $Al(OH)^{2+}$ ,  $Al(OH)_2^+$ ,  $Al(OH)_4^-$
- Les poly complexes tels que:  $Al_2(OH)_2^{4+}$ ,  $Al_2(OH)_5^+$ ,  $Al_6(OH)_{15}^{3+}$ ,  $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$
- Les espèces amorphes et très peu solubles telles que:  $Al(OH)_3$ ,  $Al_2O_3$ .

Ainsi, le mécanisme de formation des hydroxydes métalliques peut être décrit de la manière suivante :



Les complexes s'adsorbent sur les particules et annulent aussi leurs charges colloïdales, ce qui conduit à déstabiliser l'émulsion. Cela se passe de cette manière dans le cas de la coagulation chimique. On note les différences au niveau de la source de coagulant chimique et électrochimique et au niveau de la présence du champ électrique dans le cas de l'EC qui facilite la migration des espèces.

A la cathode, la réduction de l'eau conduit à la formation d'hydrogène dont le dégagement permet la flottation des particules flocculées. La taille des microbulles est assez faible et estimée entre 10 et 100  $\mu\text{m}$  (Essadki et al., 2008). Ces bulles empêchent ou réduisent la formation des dépôts sur la cathode et donc augmentent le rendement de l'EC quel que soit le type d'électrode utilisé.

#### II.4. Principale loi d'EC (La loi de Faraday) :

Une des principales lois explicitant les réactions d'EC est la seconde loi de Faraday. Cette loi montre que la quantité d'ion métallique dissous par oxydation anodique est directement proportionnelle à l'intensité du courant électrique imposée  $I$  et à la durée d'électrolyse  $t$  mais inversement proportionnelle à la valence de l'ion émis. La loi de Faraday est exprimée par l'équation suivante :

$$m = \frac{I \cdot t \cdot M}{n \cdot F} \quad \dots \dots \dots (5)$$

$m$  : masse théorique dissoute en (g).

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

$t$  : durée d'électrolyse (s).

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

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

$n$  : nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction considérée (Belayachi, 2016).

A partir de la loi de faraday, il est donc possible d'estimer la masse d'électrode théorique consommée par électrolyse et d'en déduire un rendement anodique  $R_{\text{anode}}$  exprimé par l'équation suivante :

$$R_{\text{anode}} = \frac{\text{masse expérimentale dissoute(g)}}{\text{masse théorique donnée par la loi de faraday (g)}} \cdot 100 \quad \dots(6)$$

A la cathode, et sans autres réactions de réduction, la production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau suit également la seconde loi de faraday, de même le rendement cathodique  $R_{\text{cathode}}$  peut être exprimé par l'équation suivante :

$$R_{\text{cathode}} = \frac{\text{masse expérimentale formée (g)}}{\text{masse théorique donnée par la loi de faraday (g)}} \cdot 100 \quad \dots (7)$$

## II.5. L'énergie électrique consommée E:

La différence entre l'EC et la coagulation chimique réside principalement dans la source des coagulants, qui sont générés électrochimiquement (in situ) dans l'une, et ajoutés directement sous forme de composés chimiques dans l'autre. En revanche, les procédés classiques basés sur la coagulation chimique n'ont besoin que l'énergie mécanique pour réaliser l'agitation tandis que l'EC consomme aussi de l'énergie électrique essentiellement pour dissoudre l'anode sacrificielle (Belayachi, 2016).

L'énergie consommée est l'un des paramètres les plus importants dans le calcul du coût d'exploitation qui conditionne l'application de toute méthode de traitement. De nombreux travaux sur l'EC ont porté sur la consommation énergétique en termes d'Energie Electrique Spécifique Consommée **E** (Daneshvar et al., 2007). Cette énergie a souvent été estimée en fonction des paramètres de contrôle de l'EC qui sont en générale : la tension appliquée à la cellule électrochimique, l'intensité du courant, le volume de l'eau à traiter et le temps de traitement.

La valeur de la consommation énergétique est calculée selon l'expression suivante :

$$E = \frac{U \cdot I \cdot t}{V} \quad \dots \dots \dots (8)$$

Avec:

**E**: énergie consommée (KWh).

**U**: tension d'électrolyse (volt).

**I**: intensité de courant (A).

**t**: temps d'électrolyse (h).

**V**: volume de l'eau à traiter (m<sup>3</sup>).

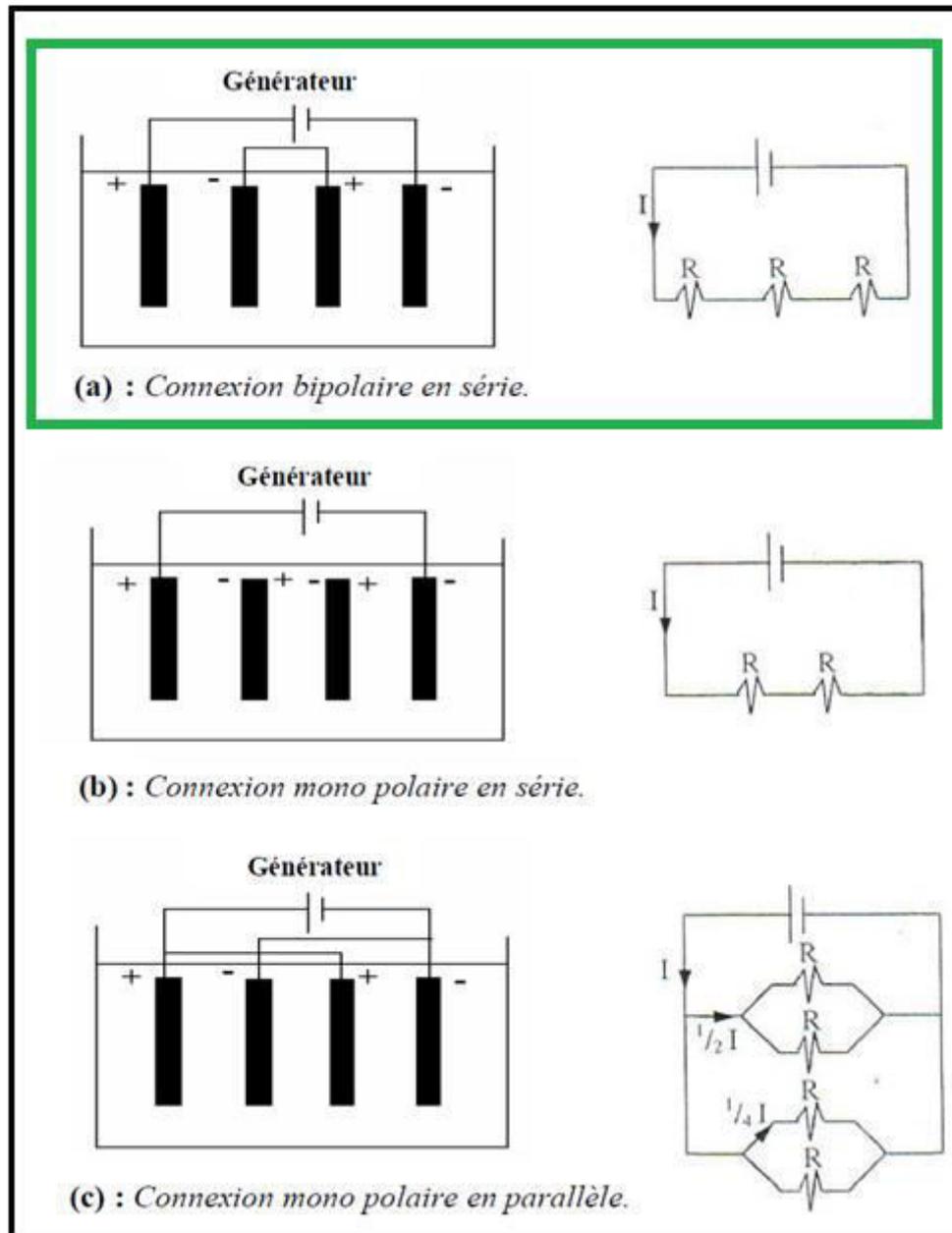
## **II.6. Type des connexions électriques :**

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

On distingue généralement trois modes de connexion électrique: **figure 11**.

- a-** Mode bipolaire en série.
- b-** Mode mono polaire en série.
- c-** Mode mono polaire en parallèle, (Salmi et Slimani, 2014).

La différence entre les trois modes se trouve dans la connexion entre les électrodes qui entraîne une différence des expressions des tensions et des intensités de courant dans les cellules.



**Figure 11** : Les différents modes de connexions électriques pour une cellule d'EC et les circuits électriques associés (Salmi et Slimani, 2014).

Si on compare les circuits électriques associés aux divers modes de connexions, on constate que, pour une intensité donnée, la tension nécessaire sera plus importante pour le mode en série que pour le mode en parallèle puisque les résistances s'additionnent. En mode en série, l'intensité qui parcourt chacune des électrodes est identique alors qu'en mode parallèle, elle dépend de la résistance de chaque cellule individuelle (composée de deux électrodes).

Pour travailler en mode parallèle, il faudrait disposer d'un générateur permettant de délivrer un courant élevé, sous une faible tension alors qu'en mode en série, il faudrait un générateur permettant d'imposer des intensités relativement faibles et des tensions plus élevées. D'où, il est judicieux de travailler en mode bipolaire en série car celui-ci ne nécessite le branchement que de deux (quel que soit le nombre d'électrodes), il en résulte donc une moindre consommation d'énergie (Ayhan et mahmut, 2006). En plus, ce mode de connexion permet de travailler à faibles densités de courant et dégréner de manière plus efficace et plus rapide les espèces coagulantes (Koby et al., 2003).

## II.7. Applications du procédé d'électrocoagulation :

**Tableau 5** : Applications du procédé d'EC (Annane, 2011).

Domaine	Industries	Objectifs
<b>Industriel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Centrales thermiques</li> <li>- Industries de transformation</li> <li>- Mines</li> <li>- Transformation des métaux</li> <li>- Fabrication de teintures</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Métaux</li> <li>- Huiles et hydrocarbures</li> <li>- Détergents et autres composés organiques</li> <li>- MES</li> <li>- DCO</li> </ul>
<b>Transport</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transport naval</li> <li>- Transport routier</li> <li>- Entreposage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Huiles et hydrocarbures</li> <li>- DCO</li> <li>- MES</li> </ul>
<b>Agroalimentaire</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transformation de nourriture</li> <li>- Restauration</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- MES</li> <li>- DCO</li> <li>- Huiles et graisses</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Porcheries</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Phosphore</li> <li>- MES</li> <li>- DCO</li> </ul>
<b>Municipal</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eau potable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enlèvement de fluorures</li> <li>- Couleur</li> <li>- Turbidité</li> <li>- Désinfection</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eaux usées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- MES</li> <li>- DCO</li> <li>- Phosphore</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lixiviats de sites d'enfouissement ou de sites contaminés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- DCO</li> <li>- Métaux solubilisés</li> </ul>

### II.8. Avantages et inconvénients du procédé d'électrocoagulation :

Comme tous les procédés d'épuration des eaux, l'EC possède des avantages et des inconvénients qui favorisent ou limitent ses domaines d'applications. Selon certains auteurs (**Lemlikchi, 2012, Annane , 2011**) le procédé d'EC présente aussi bien des avantages que des inconvénients comparativement aux procédés physicochimiques.

Parmi les avantages de l'EC on peut citer :

- ❖ L'EC nécessite un équipement simple avec un mode opératoire facile laissant suffisamment de latitude pour régler les problèmes de manipulation éventuelles.
- ❖ Le traitement d'une eau résiduaire par EC donne une eau agréable au goût, claire, sans couleur et inodore.
- ❖ L'efficacité du procédé d'EC à déstabiliser les polluants colloïdaux très fins grâce au champ électrique qui les met en mouvement, comparé aux procédés chimiques qui nécessite des étapes de traitement plus lents et des quantités de coagulant plus élevées.
- ❖ L'EC ne demande pas d'ajout de substances chimique et donc pas d'impacts importants sur l'environnement.
- ❖ Le temps de traitement est réduit.
- ❖ L'EC permet l'élimination de certains composés tels que le chrome les nitrites, les sulfures, les cyanures, les sulfites et les ions fluor (**Ishaka, 2019**).
- ❖ La technique de l'EC peut être utilisée en association avec d'autre technique de traitement.
- ❖ La biodégradabilité des effluents traités par EC est améliorée (**Abbas et Messaad, 2016**).
- ❖ Une production minimale des boues plus denses et moins hydrophiles rend leur séparation (décantation, flottation ou filtration) plus aisée et permettre de réduire le temps et les coûts de traitement de ces boues.
- ❖ La technique d'EC peu être utilisée dans les zones rurales ou l'électricité n'est pas disponible par simple raccordement à un panneau solaire qui génère assez d'électricité pour le processus.
- ❖ Plusieurs études ont montré l'efficacité de l'EC sans aucune variation de conductivité initiale du rejet à traiter, ce qui évite d'autres formes de traitement en aval. Les travaux (**Essadki et al, 2008, Maalem, 2017**) ont confirmé cet avantage.
- ❖ Les électrodes peuvent être réutilisées plusieurs fois sans perte d'efficacité ce qui présente un caractère économique pour l'EC (**Maalem, 2017**).

L'EC présente quelques inconvénients parmi lesquelles on peut citer :

- ❖ L'effluent traité par EC doit être un électrolyte ce qui impose un ajout de sel pour certains effluents faiblement conducteurs.
- ❖ Electrodes sacrificatoires sont dissoutes dans l'effluent à traiter en raison de l'oxydation, et doivent être régulièrement remplacées.
- ❖ Un film imperméable d'oxyde sur la cathode peut être forme, ce qui conduit à une perte d'efficacité de l'unité d'EC.
- ❖ La maintenance des installations est parfois couteuse, le nettoyage et changement des électrodes nécessite l'arrêt du procédé au cours de ces opérations **(Salmi et Slimani, 2014)**.



**PARTIE**  
**EXPERIMENTALE**



# **Chapitre III**

## **Matériels et Méthodes**

**III.1. Introduction :**

Les effluents liquides des industries textiles sont généralement traités par le procédé classique de coagulation floculation avec un succès relatif. En effet, rarement une décoloration complète est obtenue. Notons que cette technique produit des volumes de boues non négligeables qui présentent un problème de gestion de déchets.

Pour cette raison on a choisi dans ce travail, une technique électrochimique présentée par l'électrocoagulation (EC) pour l'élimination d'un colorant synthétique azoïque hydrosoluble. Ce procédé possède l'avantage d'une utilisation très réduite des produits chimiques. En plus, il nécessite un équipement simple avec un mode opératoire facile, un faible coût d'exploitation, un temps de traitement réduit avec un faible volume de boues (flocs), comparé aux traitements chimiques. Les bulles de gaz produites durant l'électrolyse peuvent transporter le polluant vers le haut de la solution où il est plus facilement concentré, collecté puis éliminé.

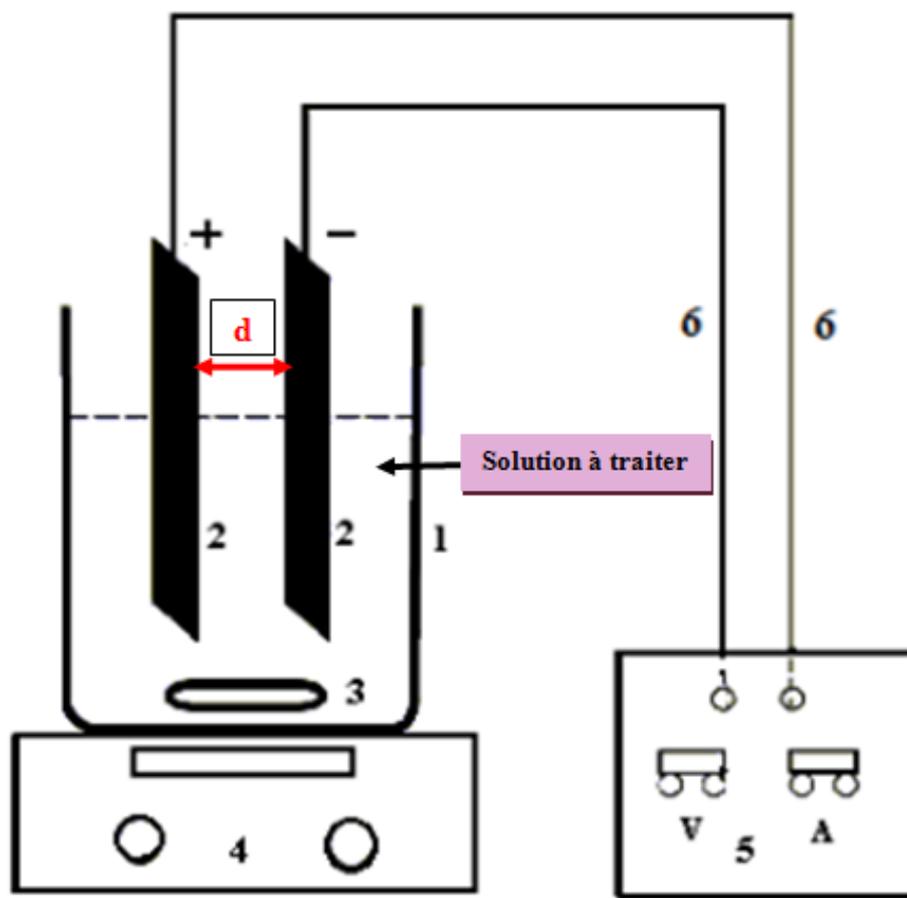
Pour optimiser les conditions d'EC, les essais sont menés dans un réacteur de laboratoire de 1 litre contenant une solution synthétique typique d'un rejet liquide d'une société de textile, en utilisant des plaques d'aluminium avec des différents temps du traitement, différents voltages appliqués, 3 surfaces d'électrodes, différentes vitesses d'agitation du solutions à traiter, différentes concentrations du colorant étudié.

Dans ce chapitre, on a présenté le montage expérimental mis en œuvre au cours de cette étude et les méthodes analytiques ainsi que le détail des conditions opératoires choisies pour vérifier la performances du procédé afin d'éliminer le colorant.

### III.2. Matériels et méthodes :

#### III.2.1. Dispositif expérimental et conditions opératoires :

Les expériences d'EC ont été réalisées grâce au montage schématisé sur la **figure 12** et la **photo 3** dans les conditions opératoires choisies. Un litre de solution colorée est introduit dans le réacteur en verre dans lequel est plongé verticalement deux électrodes solubles d'aluminium de dimensions approximativement identiques et distancées de 1cm. La tension aux bornes des électrodes est assurée par un potentiostat (**Consort E143**), l'agitation et l'homogénéisation de la solution colorée est assurée par un agitateur magnétique (**Stuart CD 162**) durant toute la durée de l'essai d'EC, la conductivité et le pH de la solution lors des expériences, ont été mesurés en utilisant respectivement un conductimètre (**inoLab cond 7310**) (**photo 4-a**) et un pH mètre (**inoLab 720**) (**photo 4-b**).



**Figure 12** : Schéma du dispositif expérimental d'EC utilisé.

Où : (1) Réacteur en verre, (2) électrodes en Aluminium, (3) Barreau magnétique, (4) agitateur magnétique, (5) source de tension (V) et courant (A), (6) fils électrique, (d) distance inter-électrode ( $d = 1$  cm).



**Photo 3 :** Installation d'EC utilisée.



**(a)** pH mètre (inoLab 720).

**(b)** Conductimètre (inoLabcond 720).

**Photo 4 :** pH mètre et conductimètre.

#### ✓ Conditions opératoires

Pour optimiser les conditions opératoires de traitement d'EC on a étudié l'influence de quelques paramètres physicochimiques sur la performance de procédé tel que : le temps d'électrolyse ( $t$ ), le voltage appliqué ( $U$ ), la surface active d'électrode ( $S_A$ ), la vitesse d'agitation ( $v_a$ ), la concentration initiale du colorant utilisé ( $C_0$ ). Les valeurs de ces grandeurs sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau 6** : Paramètres étudiés en traitement d'EC.

Electrodes utilisés (Largeur/Longueur) (cm/cm)	Surface active d'électrode (S <sub>A</sub> ) (cm <sup>2</sup> )	Concentration de colorant (C) (g.L <sup>-1</sup> )	Vitesse d'agitation v <sub>a</sub> (Tr/min)	Voltage U (V)	Temps d'EC (t)(min)
2/15	24,6	0,1	100	De 1 à 5	15
3/15	36,9	0,5	300		30
			500		45
5/15	61,5	1	700		60

En fin de chaque essai d'EC désiré, l'application de potentiel est suspendue et l'échantillon est décanté pendant 30 min (**photo 5**). Ce temps est inspiré de la coagulation-chimique (Jar-Test), il permet aux particules floculés de bien sédimentées ou éventuellement floculées comme il est courant dans le procédé d'EC.

**Photo 5** : Phénomène de décantation pendant 30 min.

La décoloration, le pH et la conductivité électrique sont mesurés avant et après chaque traitement pour déterminer les conditions opératoires optimales.

Le calcul du taux de réduction de la couleur  $TR_C$  exprimé en pourcentage  $TR_C$  (%), est basé sur l'équation suivante (eq 9):

$$TR_C = \frac{C_i - C_f}{C_i} \cdot 100 \dots \dots (9)$$

Où  $C_i$  et  $C_f$  sont, respectivement, les concentrations du colorant avant et après ce traitement.

### III.2.2. Solution à traiter :

La solution à traiter (**photo 6**) a été préparée en dissolvant un colorant synthétique azoïque hydrosoluble dans l'eau de robinet. Ce colorant (**photo 7**) est largement utilisé dans l'industrie textile et surtout pour la teinture de jeans. Comme on a déjà vu précédemment que les colorants azoïques sont les plus communément utilisés en raison de la présence du groupe **azo (-N=N-)** qui confère à ces produits chimiques, une certaine résistance à la lumière, aux acides, aux bases et à l'oxygène, propriétés souhaitées pour les vêtements. Ils sont identifiés comme étant des composés stables, non biodégradables ce qui présente un risque pour l'environnement. Ces colorants sont encore en augmentation et il est très difficile de connaître leur libellé exact, car les entreprises les considèrent comme des secrets commerciaux.



**Photo 6 :** Solution à traiter.



**Photo 7 :** Colorant azoïque hydrosoluble.

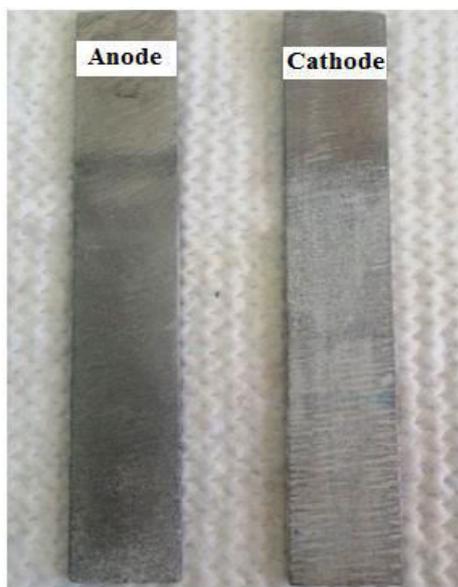
La masse du colorant a été pesée à l'aide d'une balance électronique (**KERN ALS 220-4 N**) présentée par **la photo 8**.



**Photo 8 :** Balance électronique (**KERN ALS 220-4 N**).

### III.2.3. Electrodes utilisées :

Le choix des électrodes utilisées dans ce travail est basé sur la disponibilité et l'efficacité du matériau constituant. Les électrodes en Aluminium qui ont prouvé leurs efficacité de traitement, ils sont récupérées des déchets d'aluminium ce qui rend leur coût supportable pour un procédé de dépollution. Les deux plaques parallèles et rectangulaires, ont été préalablement traitées avec un papier abrasif au niveau de leur surface, dans le but d'homogénéiser celles-ci et d'éliminer les impuretés et les dépôts qui peuvent les contaminer. Les électrodes sont extraites du réacteur, après chaque manipulation d'EC dans le but de les examiner, et de les nettoyer, étant donné que les résidus de décomposition des polluants peuvent se déposer sur leur surface et former une couche résistante.



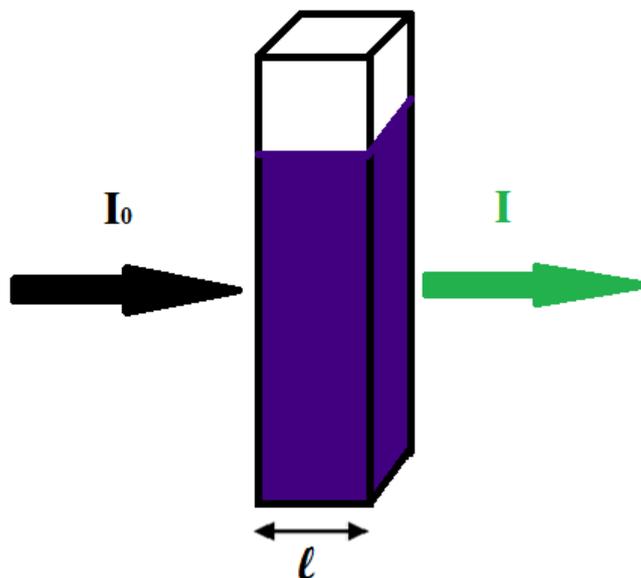
**Photo 9** : Vue des électrodes d'aluminium utilisées après un traitement d'EC.

### III.3. Technique d'analyse :

#### III.3.1. Principe de la spectrophotométrie UV /Visible :

La spectrométrie UV-visible est une méthode analytique quantitative qui consiste à mesurer l'absorbance ou la densité optique d'une substance chimique donnée en solution. Elle s'appuie sur le fait que toute solution colorée (solution contenant une substance chromophore) traversée par un faisceau de lumière laisse passer une fraction de lumière incidente ; la quantité de lumière absorbée (l'absorbance  $A$  à une longueur d'onde donnée) est proportionnelle à la concentration du composé coloré recherché et à la longueur du trajet optique  $\ell$  (distance sur laquelle la lumière traverse la solution) **figure 13**, comme le montre la loi de Beer – Lambert (**eq 10**) :

$$A = \log \left( \frac{I_0}{I} \right) = \varepsilon \cdot \ell \cdot C \dots \dots \dots (10)$$



**Figure 13 :** Trajet optique.

Avec :

**A:** Absorbance (ou densité optique D.O).

**$I_0$ :** intensité du faisceau de lumière monochromatique de longueur d'onde  $\lambda$  à l'entrée de la cellule de référence (la cuve).

**I:** intensité du faisceau émergeant de la cellule de référence.

**$\ell$ :** longueur du trajet optique (épaisseur de la cuve) (cm).

**$\varepsilon$ :** coefficient d'extinction molaire (  $L \cdot mole^{-1} \cdot cm^{-1}$  ).

**C :** concentration de l'élément recherché ( $g \cdot L^{-1}$ ).

Dans ce travail on a utilisé un Spectrophotomètre (SHIMADZU UV-1700PC) (photo 10), l'absorbance varie avec la longueur d'onde de la lumière: elle passe par un maximum qui correspond à une longueur d'onde pour laquelle la sensibilité est maximale. Le spectre d'absorption en UV-visible d'un colorant azoïque hydrosoluble a été obtenu par un balayage spectral entre 190 et 1100 nm, d'une solution de colorant à  $0,5 g \cdot L^{-1}$ , ce spectre montre bien la longueur d'onde d'absorbance maximale ( $\lambda_{max}$ ) (voire le chapitre suivant).



**Photo 10 :** Spectrophotomètre SHIMADZU UV-1700PC.

L'analyse spectrophotométrie UV-Visible est fondée sur l'étude du changement d'absorption de la lumière par le milieu (solution), en fonction de la variation de la concentration de l'élément. Le principe d'analyse est basé sur la loi de Beer-Lambert. La linéarité de cette loi n'existe que dans un certain domaine de concentration appelé domaine de validité de la méthode, déterminé par étalonnage. Donc, il est nécessaire de connaître le domaine de la linéarité de la courbe d'étalonnage  $A = f(C)$ .

Pour établir la courbe d'étalonnage, on a préparé une série des solutions (**photo 11**) de concentrations différents et bien déterminé à partir de dilution de la solution mère ( $0,5 \text{ g.L}^{-1}$ ), puis on a les analysées par spectrophotométrie UV-visible à la longueur d'onde d'absorbance maximale ( $\lambda_{\text{max}}$ ). Les lectures de l'absorbance ( $A$ ) des différentes solutions permettent de tracer la courbe d'étalonnage  $A = f(C)$ , celle-ci doit obéir à la loi de Beer-Lambert.



**Photo 11 :** Solutions préparées pour la courbe d'étalonnage.



# **Chapitre IV**

## **Résultats et Discussions**

### IV.1. Introduction:

Ce chapitre rassemble tous les résultats des expériences d'EC sur l'eau colorée artificiellement par un colorant azoïque hydrosoluble (colorant textile), pour les différents paramètres étudiés afin de définir les conditions optimales de décoloration des solutions étudiées et d'évaluer les performances du traitement à pH libre des solutions et à température ambiante ( $19 \pm 2^\circ\text{C}$ ).

### IV.2. Paramètres étudiés :

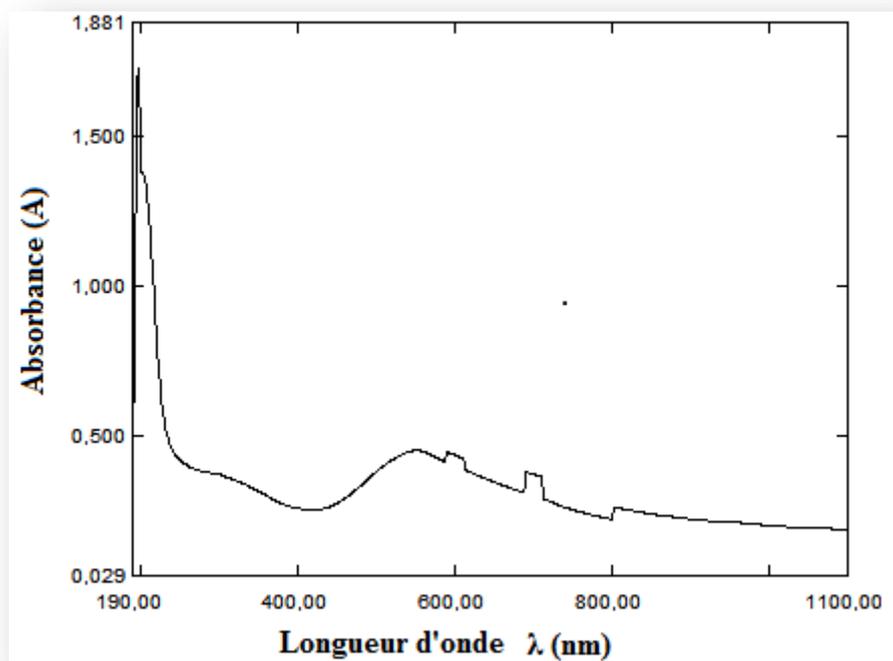
Afin d'optimiser le traitement d'EC, on a varié les paramètres suivants :

- Le temps d'électrolyse **t (min)** pour différents voltages imposés **U (V)**.
- La vitesse d'agitation **v<sub>a</sub> (tr.min<sup>-1</sup>)**.
- La concentration initiale **C<sub>0</sub>** en colorant (**g.L<sup>-1</sup>**).
- La surface active d'électrodes **S<sub>A</sub> (cm<sup>2</sup>)**.

### IV.3. Spectre d'absorption en UV-visible :

Le spectre d'absorption en UV-visible du colorant étudié **figure 14** a été obtenu par un balayage spectral, entre **190** et **1100 nm**, d'une solution de colorant à **0,5 g.L<sup>-1</sup>**. Ce spectre montre bien la longueur d'onde d'absorbance maximale dans le visible (**λ max**) **552 nm** et on a vérifié la validité de la loi de Beer-Lamber.

Par ailleurs, les analyses par spectroscopie UV visible **figure 14** montre l'existence d'une autre bande d'absorbance UV à la longueur d'onde maximale **λ<sub>1</sub> max = 197 nm (A = 1,726)** qui révèle la présence d'un autre chromophore dans la solution à traiter et qui absorbe dans cette longueur d'onde (**Jarmany et al, 2002**).



**Figure 14** : Spectre d'absorption en UV-visible de colorant azoïque hydrosoluble.

( $C_0 = 0,5 \text{ g.L}^{-1}$ , pH initial = 7,80,  $\sigma_i = 1770 \text{ } \mu\text{S.cm}^{-1}$ )

Le tableau suivant présente les valeurs des paramètres physico-chimiques principaux caractérisant la solution préparée à base du colorant textile.

**Tableau 7** : Les valeurs des paramètres physico-chimiques principaux caractérisant la solution préparée.

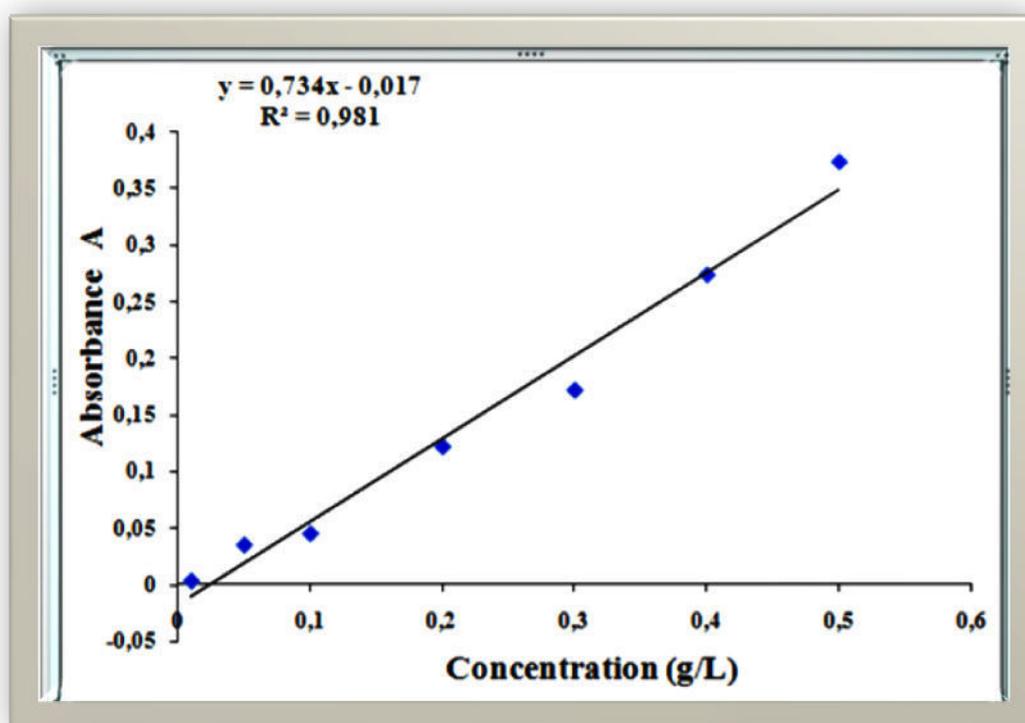
Volume de solution synthétique V (L)	Concentration initiale $C_0$ ( $\text{g.L}^{-1}$ )	pH Initial	Conductivité électrique initiale $\sigma_i$ ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$ )	Absorbance UV -visible	
				190 nm	552 nm
01	0,5	7,80	1770	1,726	0,374

**IV.4. La courbe d'étalonnage  $A = f(C)$  :**

Pour vérifier la loi de Beer-Lambert (eq 10), nous avons tracé la courbe d'étalonnage pour le colorant utilisé afin de déterminer les domaines de concentration pour lesquels la loi de Beer-Lambert est respectée (obtention d'une droite).

**Tableau 08** : Valeurs d'absorbance  $A$  à  $\lambda_{\max} = 552 \text{ nm}$ .

<b>C (g.L<sup>-1</sup>)</b>	0.01	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
<b>A</b>	0.003	0.035	0.045	0.122	0.172	0.274	0.374



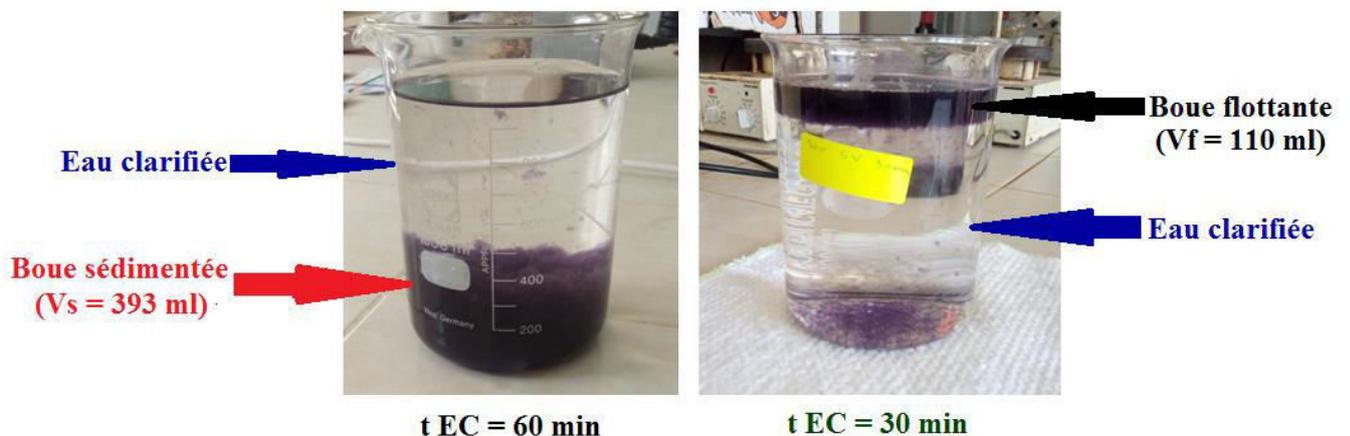
**Figure 15**: Courbe d'étalonnage du spectrophotomètre avec le colorant azoïque.  
( $C_0=0,5 \text{ g.L}^{-1}$ , pH initial = 7,80)

#### IV.5. Résultats de traitement des eaux colorées par EC en mode batch :

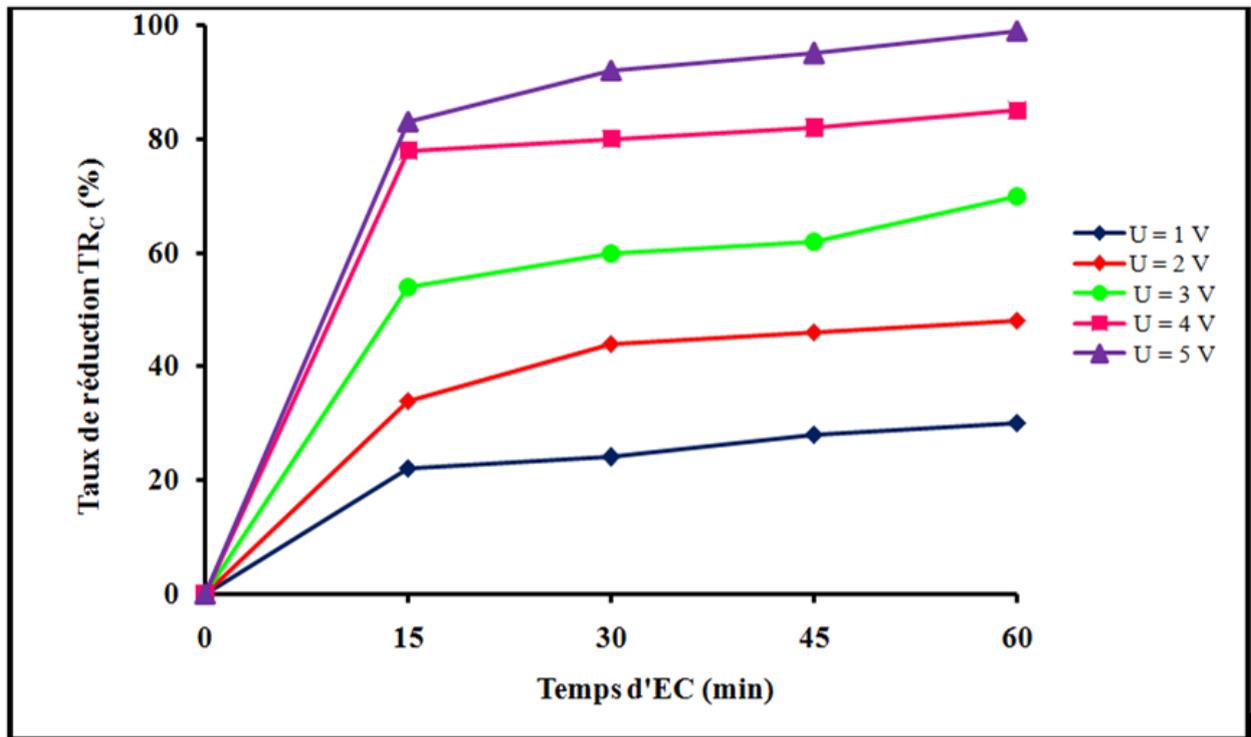
##### IV.5. 1. Effet du temps d'électrolyse sur la décoloration pour différents voltages imposés :

Le temps de réaction influence l'efficacité du traitement électrolytique (Kobya et al, 2007, Zaroual et al, 2006). Pendant l'électrolyse, l'électro-dissolution anodique a conduit à la libération d'espèces coagulantes. L'efficacité d'élimination des colorants dépend directement de la concentration d'ions métalliques produits sur les électrodes est directement proportionnelle à la tension imposée et à la durée d'électrolyse selon la loi de Faraday (eq 5). L'évolution de l'efficacité du procédé d'EC en fonction du temps d'électrolyse (de 15 à 60 min) pour différents voltages (de 1 à 5 V) est représentée sur la figure 16. Les résultats obtenus montrent que le taux d'élimination du couleur augmente avec l'élévation du temps d'électrolyse pour chaque voltage appliqué. Ces résultats peuvent s'expliquer par l'augmentation de la concentration d'ions métalliques produits sur les électrodes et également la vitesse de génération de bulles d'hydrogène et par conséquent la croissance des floccs d'hydroxyde d'aluminium qui va améliorer le taux de décoloration des eaux. Lorsque le voltage appliqué augmente, le temps de traitement diminue en raison de la forte dissolution des électrodes (Aswathy et al., 2015 ; Limbasiya et Upadhyay, 2015). L'efficacité de décoloration à 5 V atteint 92 % et 99% pour des temps d'EC de 30 et 60 min respectivement.

Les volumes des boues générées à la fin de traitement après une décantation de 30 min photo 12 impliquent que le  $V_s$  (volume de boue sédimentée) est plus de 3,5 fois de  $V_f$  (volume de boue flottante), pour cette raison on a choisi le temps de traitement 30 min comme un temps optimal du traitement qui va réduire la consommation énergétique et par conséquent le coût opérationnel du procédé.



**Photo 12 :** Comparaison des volumes des boues produites après le traitement d'EC.



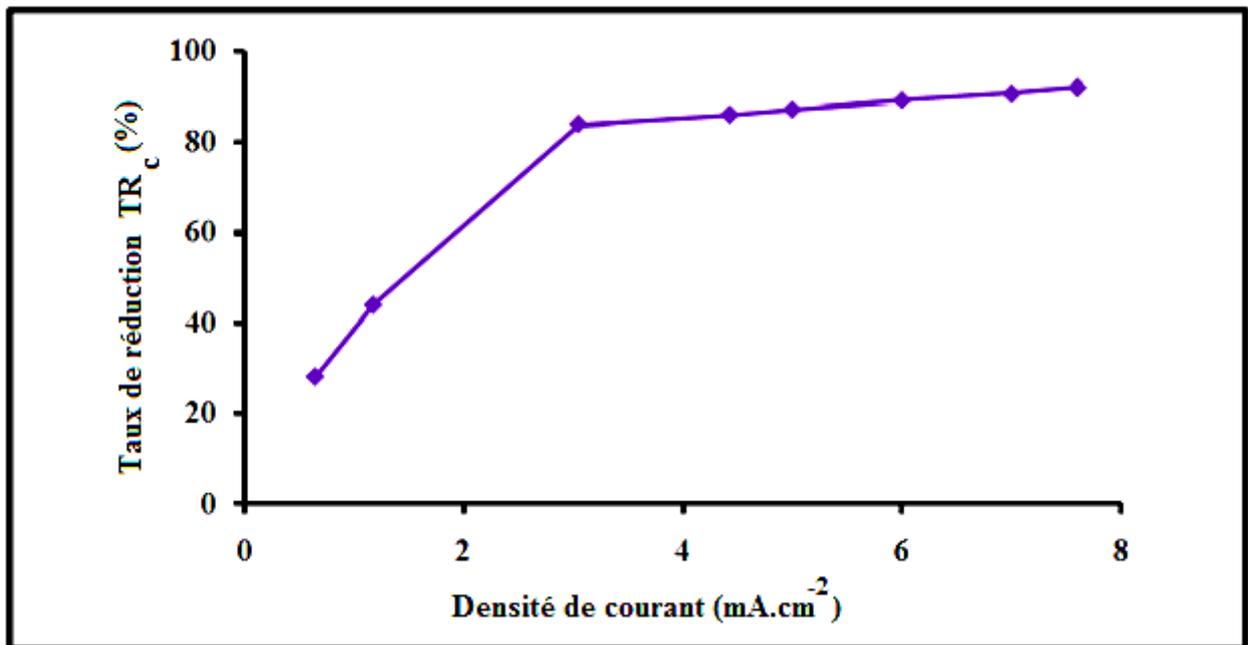
**Figure 16** : Effet du temps d'électrolyse sur la réduction de la couleur pour différents voltages imposés  
( $C_0=0,5 \text{ g.L}^{-1}$ , pH initial = 7,80, d=1cm)

#### IV. 5. 2. L'effet de la densité de courant sur la décoloration au temps optimal d'EC :

La densité de courant représente le rapport entre l'intensité de courant appliquée et la surface de l'électrode. Elle est considérée comme un paramètre important qui influence l'efficacité du traitement d'EC (Naje et al., 2015). Selon la loi de Faraday (eq 5), les concentrations des ions métalliques  $\text{Al}^{3+}$  produites à l'anode sont directement proportionnelle à la densité de courant appliquée, cette dernière permet de déterminer la dose de coagulant formée et ajuster le taux et la taille des bulles produites dans le réacteur **photo 13** et affecter donc la croissance des floes et par conséquent la consommation énergétique et le coût opérationnel du procédé (Khandegar and Saroha, 2013, Holt et al ; 2005, Chen, 2004). Pour étudier l'effet de la densité de courant sur l'efficacité de décoloration, l'EC a été réalisé en utilisant diverses densités de courant pour un temps d'électrolyse de **30 min**. La **figure 17** montre le pourcentage d'élimination de la couleur par rapport à la densité de courant appliqué. Comme on peut le remarquer, la réduction de la couleur suit deux étapes. La première étape une diminution significative de coloration avec l'augmentation de la densité du courant qui

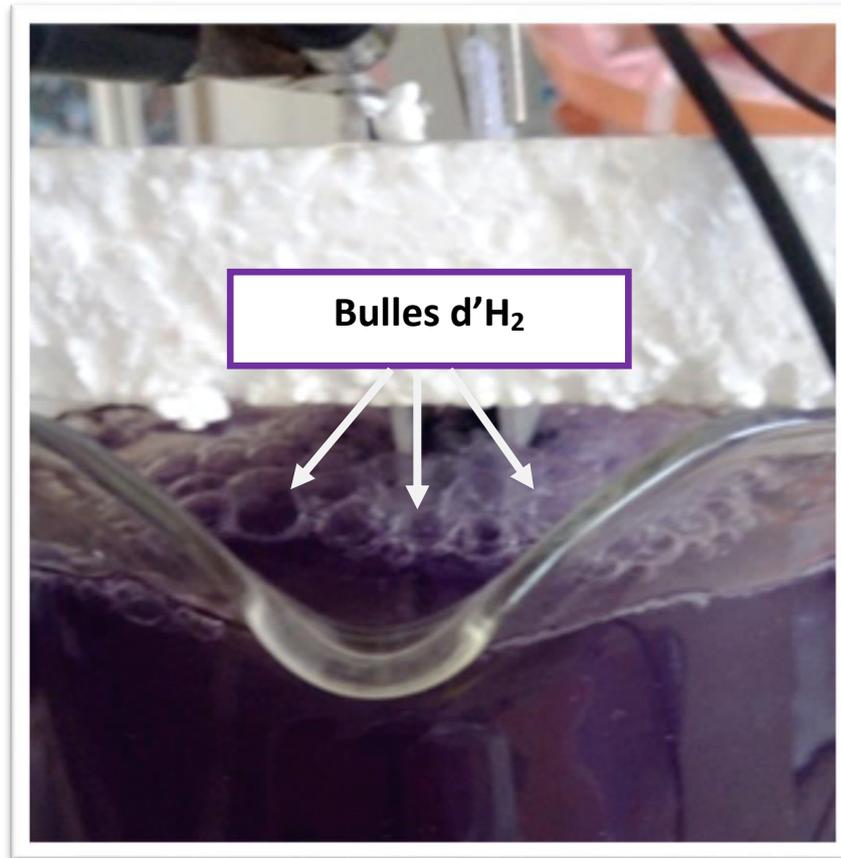
peut être due à l'augmentation de la production des ions  $\text{Al}^{3+}$  provenant de la dissolution anodique. Ce phénomène de dissolution ou de perte de masse à l'anode en aluminium, a été modélisé par beaucoup d'auteurs en se servant de la loi de Faraday (eq 5). Pour La seconde étape ou phase stationnaire (entre  $i = 3$  et  $7 \text{ mA.cm}^{-2}$ ) les taux d'élimination de la couleur sont convergents, malgré l'apport en continue des ions métalliques  $\text{Al}^{3+}$ , le pourcentage de décoloration atteint **92%** pour une densité de courant de  **$7,6 \text{ mA.cm}^{-2}$** .

Il est à noter, qu'aux densités de courants élevées, la formation des ions d'aluminium est produite rapidement, par rapport aux processus de la coagulation, en effet la densité des bulles d' $\text{H}_2$  augmente et leur taille diminue conduisant à la suppression rapide de l'hydroxyde d'aluminium de la solution par flottation ce qui va réduire la probabilité de collision entre les polluants et le coagulant  $\text{Al}(\text{OH})_3$  limitant ainsi l'efficacité du traitement (Kholksa et al., 1991).



**Figure 17** : Effet de la densité de courant sur la réduction de la couleur.

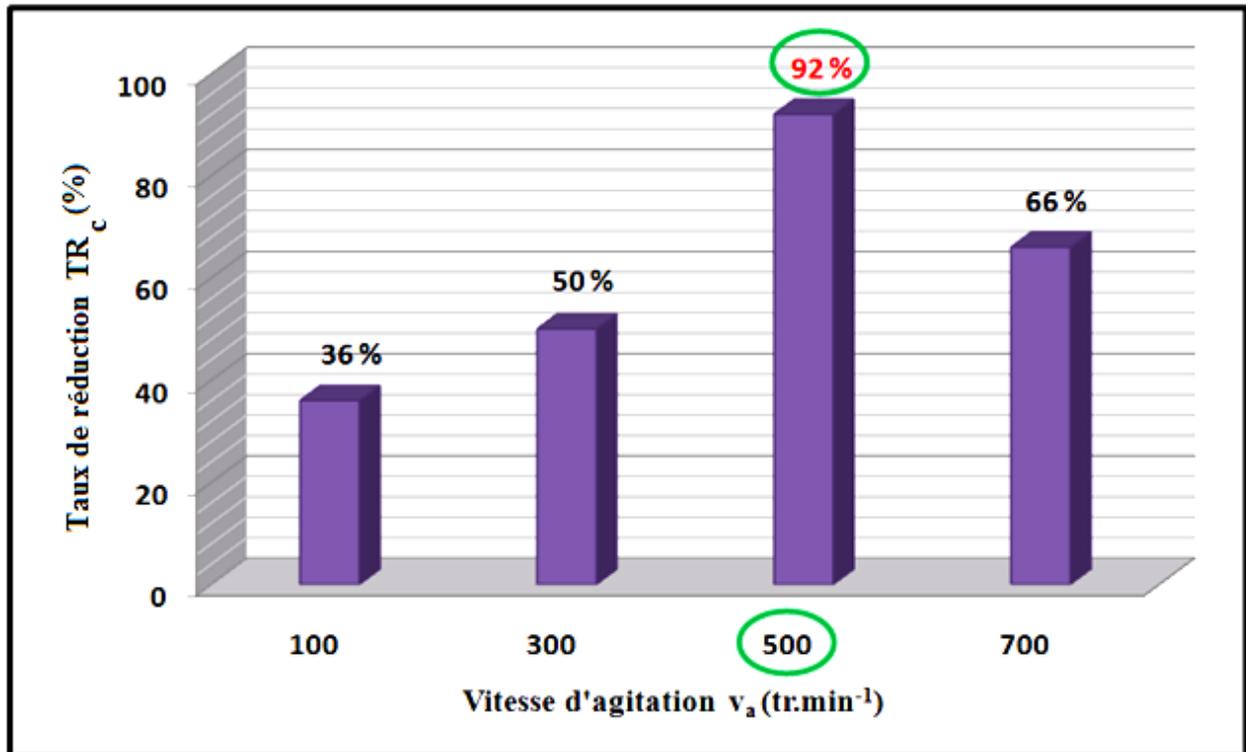
( $C_0=0,5 \text{ g.L}^{-1}$ , pH initial = 7,80, t EC = 30 min, d=1cm)



**Photo 13** : La production des bulles de gaz d' $H_2$  pendant le traitement d'EC.

#### **IV.5. 3. L'effet de la vitesse d'agitation sur la décoloration :**

La vitesse d'agitation est un paramètre essentiel dans le procédé d'EC pour homogénéiser les coagulants dans toute la phase aqueuse afin de déstabiliser les impuretés colloïdales présentes dans la solution colorée, ce paramètre peut améliorer la cinétique de transfert de masse. Pour établir l'effet de la vitesse d'agitation  $v_a$  sur la cinétique de décoloration nous avons effectué une série d'essais avec différentes vitesses à savoir : (100, 300, 500, 700  $tr.min^{-1}$ ). Les résultats sont montrés sur **la figure 18**.



**Figure 18 :** Effet de la vitesse d'agitation sur la réduction de la couleur.

( $C_0=0,5 \text{ g.L}^{-1}$ , pH initial = 7,80, t EC = 30 min, d=1cm)

D'après les résultats obtenus, nous avons constaté que la vitesse d'agitation  $500 \text{ tr.min}^{-1}$  donne le meilleur rendement de décoloration **92 %**, cette vitesse est considérée comme une vitesse optimale dans notre étude.

Pour les vitesses d'agitation inférieures à  $500 \text{ tr.min}^{-1}$ , nous avons remarqué une amélioration de la cinétique de décoloration (effet positif).

Pour une vitesse plus élevée de  $700 \text{ tr/min}$ , nous avons constaté une cinétique moins rapide (effet négatif) traduit par un faible rendement de décoloration de **66 %**.

Ces comportements peuvent être expliqués comme suit :

La déstabilisation des colloïdes par les coagulants nécessite le contact entre les deux. Ce contact est assuré par une bonne homogénéisation du mélange réactionnel, ce qui explique l'effet positif de l'agitation. De plus, étant donné qu'un des mécanismes de la coagulation-floculation fonctionne par le piégeage des solides afin de les isoler de la phase liquide, la promotion du cisaillement des floes formés pourrait entraver ce processus d'enlèvement, c'est l'effet négatif de l'agitation (Naje et al., 2015, Al-Shannag et al., 2014, Can et al., 2003, Daneshvar et al., 2003, Gürses et al., 2002).

#### IV.5.4. L'effet de la concentration initiale sur la décoloration :

La concentration initiale  $C_0$  des solutions colorées est un paramètre très important dans le traitement des effluents des industries textiles. Pour cette raison, ce paramètre est souvent étudié dans le procédé EC. Pour évaluer l'efficacité du traitement d'EC en fonction de la concentration initiale en colorant, on a testé différentes concentrations de colorant **photo 14**, dans la gamme de  $0,1$  à  $1 \text{ g.L}^{-1}$  dans les conditions optimales: ( $i = 7,6 \text{ mA.cm}^{-2}$ ,  $t_{\text{EC}} = 30 \text{ min}$ ,  $S_A = 24,6 \text{ cm}^2$ ). L'efficacité d'élimination de la couleur par rapport à la concentration initiale de colorant est présentée sur **la figure 19**, les résultats indiquent que le rendement de décoloration diminue avec l'augmentation de la concentration de colorant, les rendements de décoloration sont **97%**, **92%** et **83 %** pour les concentrations **0,1**, **0,5** et **1  $\text{g.L}^{-1}$**  respectivement. La raison présumée de ces résultats est déductible de la loi de Faraday (**eq 5**). Selon cette loi, une quantité constante des ions métalliques  $\text{Al}^{3+}$  est transmise à la solution à la même densité de courant et au même moment pour toutes les concentrations de colorant. Par conséquent, la même quantité de floccs serait produite dans les solutions. En conséquence, les floccs produits à une concentration élevée en colorant étaient insuffisants pour adsorber toutes les molécules de colorant de la solution. (Maalem, 2017, Daneshvar et al, 2007, Mollah 2004, Kim et al, 2002).



$C_i = 0,1 \text{ g.L}^{-1}$

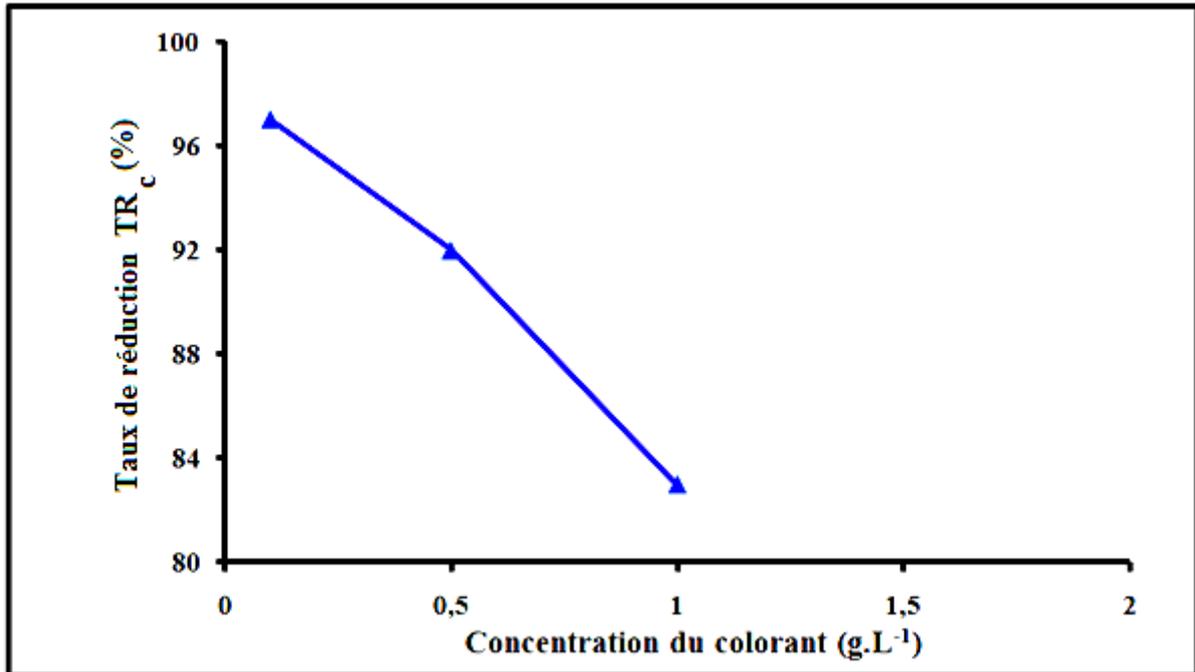


$C_i = 0,5 \text{ g.L}^{-1}$



$C_i = 1 \text{ g.L}^{-1}$

**Photo 14** : Solutions préparées avec différentes concentrations en colorant étudié.



**Figure 19** : Effet de la concentration initiale du colorant sur la décoloration.  
(t EC = 30 min, d=1cm)

#### IV.5.5. L'effet de la surface active $S_A$ des électrodes sur l'efficacité d'EC :

L'effet de la surface active  $S_A$  des électrodes sur l'efficacité d'élimination de la couleur a été évalué à différentes surfaces à savoir : **24,6, 36,9, 61,5 cm<sup>2</sup>**. Les résultats ont montré que l'efficacité d'élimination de la couleur augmentait légèrement avec l'augmentation de  $S_A$ . Pour cette étude, le rendement de traitement est entre **92 et 97 %** **figure 20** ce résultat montre que la surface active d'électrode n'a pas une influence significative sur l'efficacité de décoloration, cependant elle a un effet positif sur la consommation énergétique  $E$  du procédé. Lorsque la surface active  $S_A$  des électrodes augmente, la chute ohmique  $IR$  va diminuer (**El-Shazly et al, 2011**) ( **eq 11**) (**Naje et al, 2015, Bennajah, 2007**) et ainsi la densité de courant diminue **figure 21** et par conséquent l'énergie électrique consommée  $E$  sera réduite ce qui va favoriser la performance de la cellule de traitement avec un faible coût opérationnel (**Ozyonar, 2016, Aswathy et al., 2015, Zongo, 2011, Daneshvar et al, 2007**).

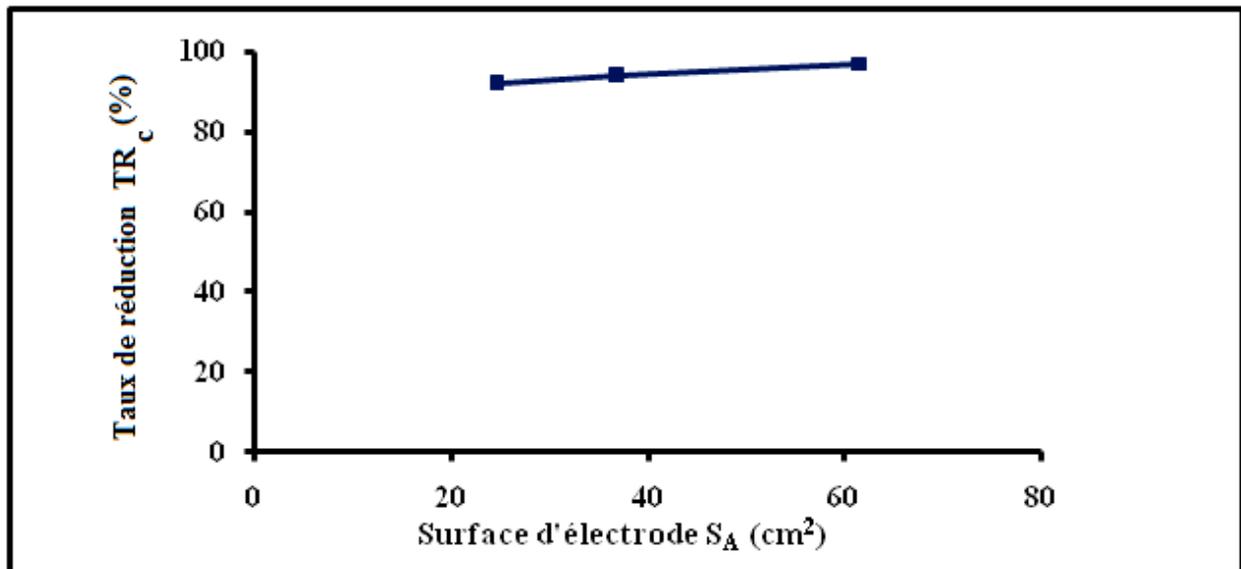
$$IR = \frac{I \cdot d}{S_A \cdot \sigma} \dots \dots \dots (11)$$

Où **I** : représente le courant (A).

**d** : représente la distance entre la cathode et l'anode (m).

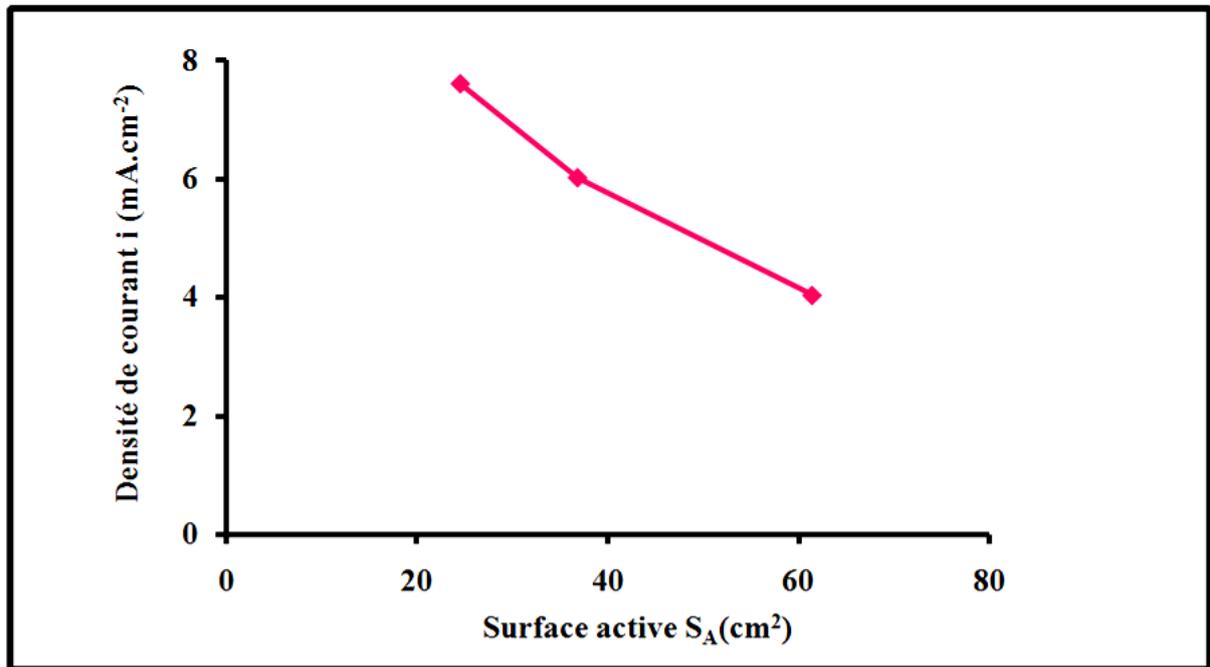
**S<sub>A</sub>** : représente la surface active de l'anode (m<sup>2</sup>).

**σ**: représente la conductivité (mS.m<sup>-1</sup>).



**Figure 20** : Effet de la surface active d'électrode S<sub>A</sub> sur la décoloration.

(C<sub>0</sub>=0,5 g.L<sup>-1</sup>, pH initial = 7,80, t EC = 30 min, d=1cm)



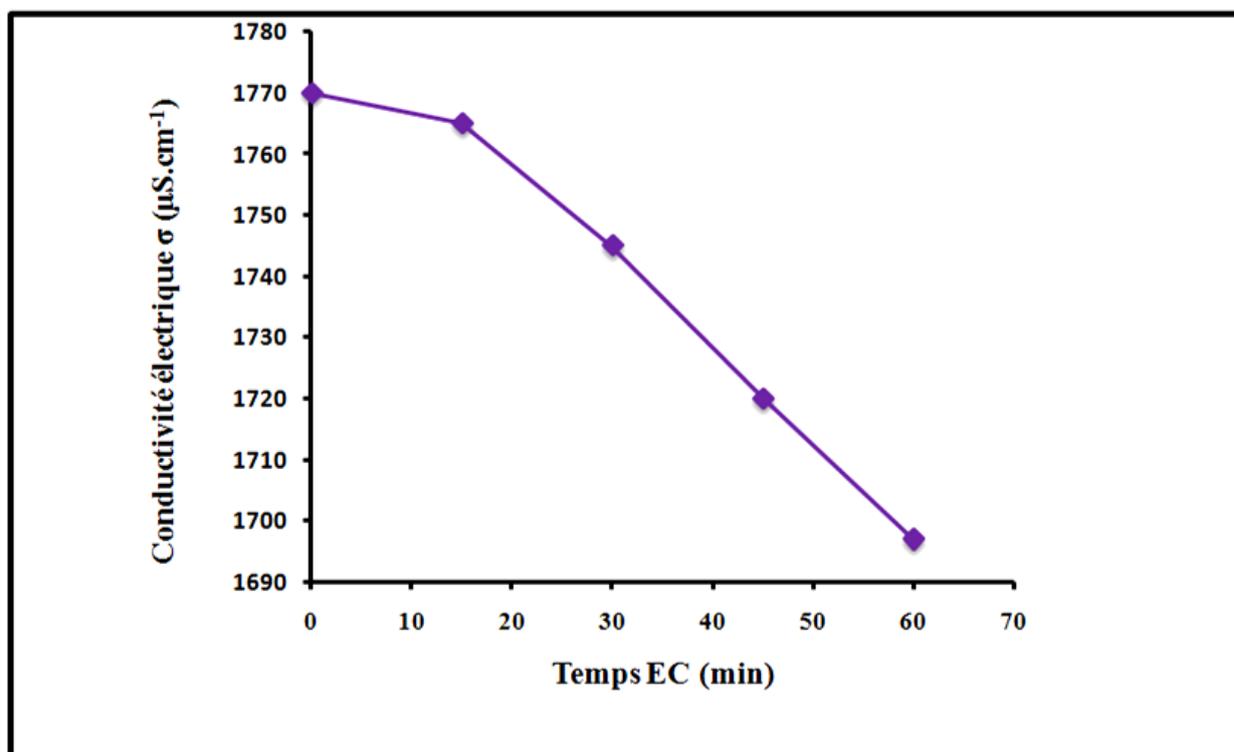
**Figure 21** : Effet de la surface active d'électrode  $S_A$  sur la densité du courant  $i$ .

( $C_0=0,5 \text{ g.L}^{-1}$ , pH initial = 7,80, t EC = 30 min, d=1cm)

#### IV.6. La conductivité électrique finale des solutions traitées :

Le mécanisme d'EC est extrêmement dépendant de la chimie du milieu aqueux, en particulier de sa conductivité électrique (Ilhan et al., 2008). Cette dernière permet le bon transfert ionique dans la solution à traiter. En effet, la conductivité du rejet doit être suffisante pour permettre le bon passage du courant sans consommation excessive d'électricité (Naje et al., 2015, Yousuf et al., 2001). Plusieurs études ont montré l'efficacité de l'EC sans aucune variation de conductivité initiale du rejet à traiter, ce qui évite d'autres formes de traitement en aval. Les travaux de (Essadki et al, 2008, Maalem, 2017) ont confirmé cet avantage.

Pour notre étude, la solution à traiter a été conductrice ( $\sigma = 1770 \mu\text{S.cm}^{-1}$ ) et n'a pas besoin d'augmenter sa conductivité. Le changement de la conductivité de la solution traitée en fonction du temps d'électrolyse est présenté sur la figure 22, l'efficacité d'EC est montrée par la diminution de la conductivité électrique avec le temps d'EC, cela peut s'expliquer par l'abattement de minéraux dans la solution traitée, l'étude de Ilhan et al., 2008 confirme ce résultat.



**Figure 22 :** Variation de la conductivité électrique des solutions traitées en fonction du temps d'EC.

( $C_0 = 0,5 \text{ g.L}^{-1}$ , pH initial = 7,80,  $i = 7,6 \text{ mA.cm}^{-2}$ ,  $d=1\text{cm}$ )

#### IV.7. Etude économique du traitement d'EC aux conditions optimales :

Les principaux éléments affectant le coût de fonctionnement sont la consommation d'énergie et le coût du matériau d'électrode dans le processus électrochimique. Le calcul du coût opérationnel, a nécessité la connaissance de l'énergie spécifique aux conditions optimales du traitement ainsi que la consommation d'aluminium aux électrodes. Les équations de calcul, utilisées par différents auteurs (Akyol, 2012 ; Ghosh et al., 2008) peuvent être résumées par (l'eq 12) :

$$\text{Coût opérationnel} = a E + b C \text{ électrode} \dots\dots\dots(12)$$

Où (a) et (b) sont des ratios pour le calcul de prix du marché international sur l'énergie et les produits chimiques. Ils sont successivement ~ 4 DZD/kWh, et 3,08 \$/kg, soit ~ 240 DZD/kg d'aluminium.

La valeur de la consommation énergétique est calculée selon l'équation mentionnée dans le chapitre II (eq 8) :

$$E = \frac{U \cdot I \cdot t}{V}$$

La valeur de la consommation en aluminium aux électrodes (L'unité d'expression de la consommation d'aluminium est le Kg Al/m<sup>3</sup> d'eau traitée), est calculée selon l'équation suivante:

$$C \text{ électrode} = \frac{I \cdot t \cdot M}{z \cdot F \cdot V} \dots\dots\dots(13)$$

Où C : électrode : La consommation d'aluminium aux électrodes.

I : est le courant appliqué (A).

t : est le temps d'électrolyse (S).

M : est la masse moléculaire de l'aluminium (~0,027 Kg/mol).

z : est le nombre d'électrons transférés (z=3).

F : est la constante de Faradays (96487 C/mol).

V : est le volume (m<sup>3</sup>) de solution du réacteur.

Pour cette étude on a calculé le coût opérationnel du procédé d'EC **tableau 9** aux conditions optimales suivantes :

Temps d'électrolyse **t EC = 30 min.**

Densité de courant **i = 7,6 mA.cm<sup>-2</sup>.**

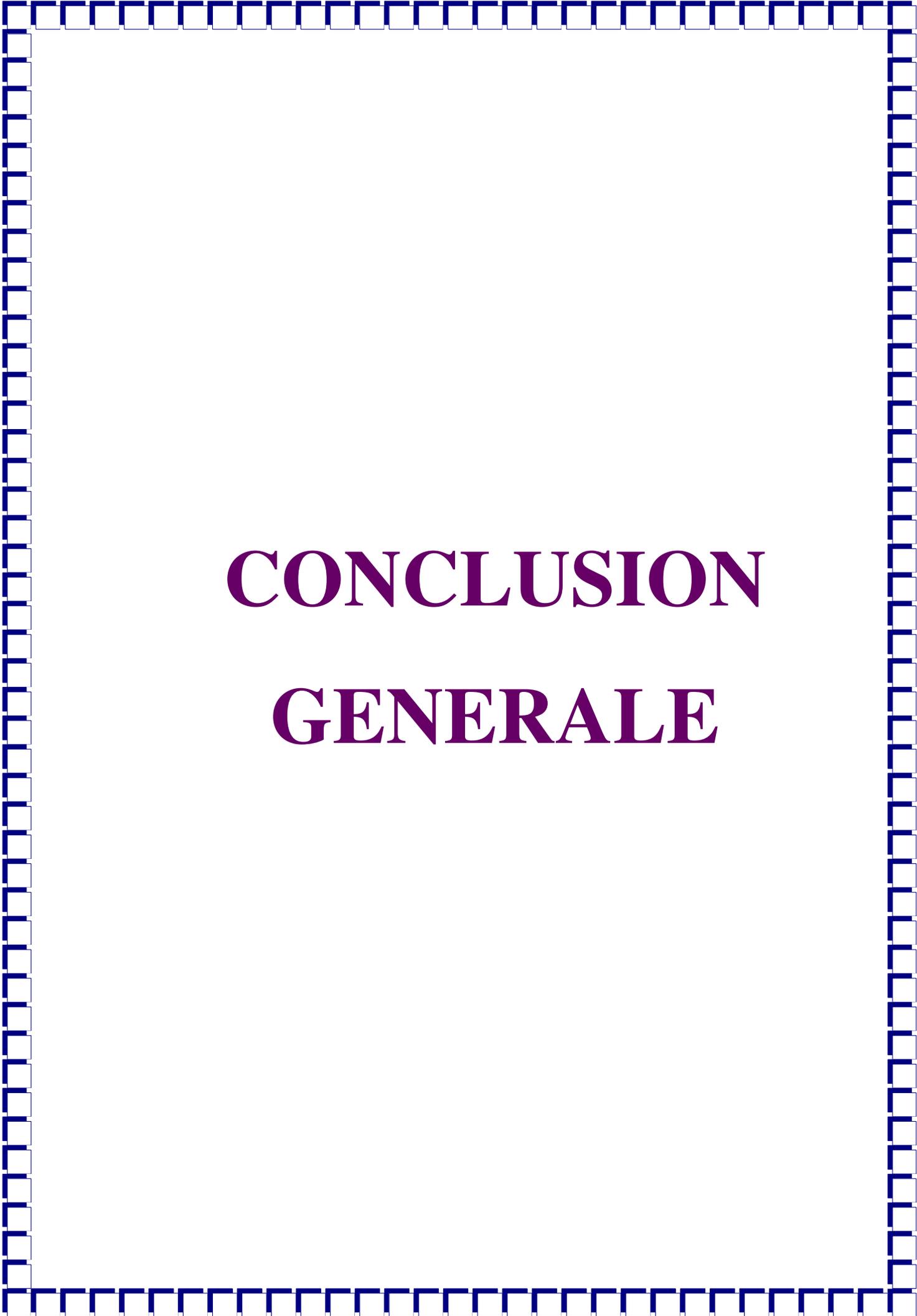
Vitesse d'agitation **v<sub>a</sub> = 500 tr.min<sup>-1</sup>.**

Surface active d'électrode **S<sub>A</sub> = 24,6 cm<sup>2</sup>.**

Distance inter-électrode **d = 1 cm.**

**Tableau 9** : Etude du coût opérationnel de l'EC (pHi = 7,80, C<sub>0</sub> = 0,5 g.L<sup>-1</sup>).

<b>C électrode (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Energie consommée E (KWh/ m<sup>3</sup>)</b>	<b>Coût opérationnel (DZD/m<sup>3</sup>)</b>
<b>0,031</b>	<b>467,5</b>	<b>1877,44</b>



# **CONCLUSION**

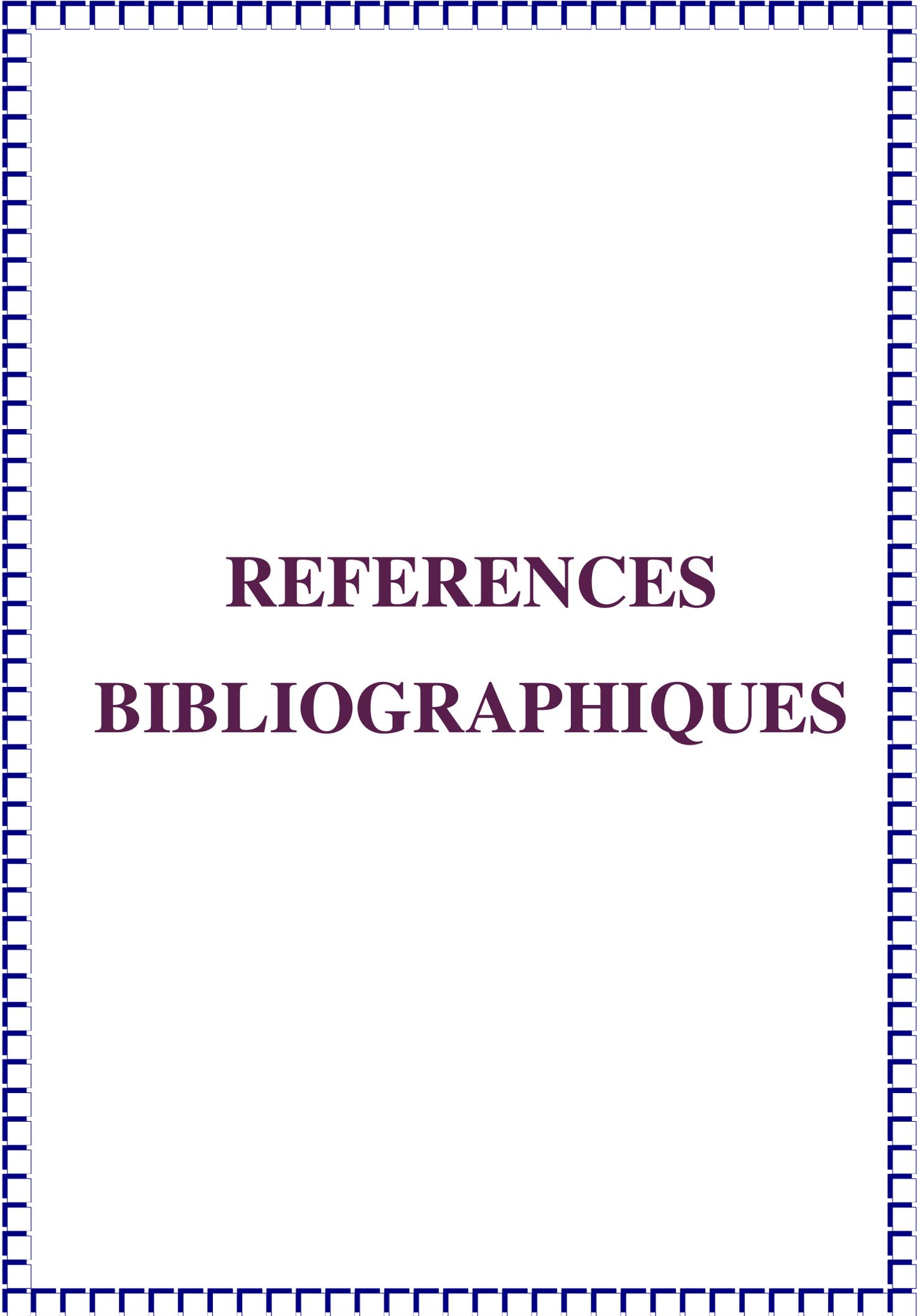
# **GENERALE**

Dans cette étude, on a réalisé l'EC en mode batch pour la clarification des eaux colorées artificiellement qu'on a les préparé au laboratoire par la dissolution d'un colorant azoïque de textile dans l'eau de robinet. Pour optimiser les conditions de ce procédé, les essais d'EC sont menés dans un réacteur de laboratoire de 1 litre dans le pH libre de la solution à traiter ( $\text{pH}_i = 7,80$ ) en utilisant des plaques d'aluminium de différentes surfaces actives ( $S_{A1} = 24,6 \text{ cm}^2$ ,  $S_{A2} = 36,9 \text{ cm}^2$ ,  $S_{A3} = 61,5 \text{ cm}^2$ ) avec différents temps du traitement ( $t \text{ EC}$ ), différents voltages électriques  $U$  (imposés par une source de courant continu), différentes concentrations initiales  $C_0$  de colorant et différentes vitesses d'agitation  $v_a$ .

On a finalisé ce travail par une étude économique présentée par la consommation énergétique et le coût opérationnel du traitement.

Les résultats obtenus indiquent qu'il y a une décoloration importante sans besoin d'ajout d'électrolyte support car la solution est lui-même conductrice en plus l'EC est sollicitée dans le traitement des solutions préparées à pH libre avec un changement légère dans le pH à la fin du traitement ( $\text{pH}_f = 7,85$ ) ce qui présente un avantage pour l'EC, en effet, il est recommandé d'appliquer le procédé d'EC à des pH proches de la neutralité car l'élimination des polluants est plus efficace dans ce plage de pH où on trouve la formation maximale de précipité  $\text{Al}(\text{OH})_3$  qui adsorbe les différent polluants de la solution à traiter (**Chen, 2004**) ce qui va améliorer l'efficacité du traitement.

D'après les résultats obtenus on a constaté que le traitement d'EC induit à une clarification importante avec une décoloration d'environ **92 %** et un faible coût opérationnel (**1877,44 DZD.m<sup>-3</sup>**) pour les conditions optimales suivantes : un temps de traitement  $t \text{ EC}$  de **30 min**, une densité de courant  $i$  de **7,6 mA.cm<sup>-2</sup>**, une vitesse d'agitation  $v_a$  de **500 tr.min<sup>-1</sup>** et une surface active  $S_A$  de **24,6 cm<sup>2</sup>**. En plus les électrodes sont réutilisées plus que 5 fois sans perte d'efficacité ce qui montre que l'EC est une méthode économique.



**REFERENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

A

- Abbas M et Messaad A. (2016).** Utilisation de l'électrocoagulation pour l'élimination de colorants des eaux usées de l'industrie textile. Mémoire de Master. Université Mohamed Boudiaf- M'sila. Algérie.
- Aga S. (2015).** Etude cinétique et thermodynamique de l'adsorption de quelques colorants textiles par des résidus issus de l'industrie agroalimentaire. Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas Setif-1-. Algérie.
- Aidaoui D et Kouadri A. (2018).** Dégradation d'un colorant la gentiane violette par la technique de l'électrocoagulation. Mémoire de Master. Université A. M. Oulhadj - Bouira. Algérie.
- Ait Salem D. (2018).** Adsorption d'un colorant sur un matériau naturel. Mémoire de Master. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Algérie.
- Aksu Z and Tezer S. (2001).** Equilibrium and kinetic modelling of biosorption of remazol black B by *Rhizopus arrhizus* in a batch system: effect of temperature. Proc.Biochem. 36, p 431-439.
- Akyol A. (2012).** Treatment of paint manufacturing wastewater by electrocoagulation. Desalination 285, p 91-99.
- Aliouche S. (2007).** Etude de l'élimination d'un colorant par différentes méthodes photochimiques en milieu aqueux. Mémoire de Magister. Université Mentouri–Constantine. Algérie.
- Al-Shannag M., Al-Qodah Z., Alananbeh K., Bouqellah N., Assirey E and Bani-Melhem K. (2014).** Cod reduction of baker's yeast wastewater using batch electrocoagulation. Environmental Engineering and Management Journal, 13, p 3153-3160.
- Amalric L., Guillard C., Blanc-Brude P., Pichat P. (1996).** Correlation between the photocatalytic degradability over TiO<sub>2</sub> in water of meta and para substituted methoxybenzenes and their electron density, hydrophobicity and polarizability properties, Water Res., 30: 1137-1142.
- Ammouch A et Slimani Y. (2017).** Déphosphatation des eaux usées par le procédé d'électrocoagulation. Mémoire de Master. Université d'Akli Mohand Oulhadj- Bouira. Algérie.
- Annan O. (2011).** Amélioration de la technique de défluoruration par le nouveau procédé d'électrocoagulation bipolaire. Mémoire de Magister. Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Algérie.
- Aoudj S., Khelifa A., Drouiche N., Hecini M., Hamitouche H. (2010).** Electrocoagulation process applied to wastewater containing dyes from textile industry. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 49(11): p 1176-1182.

**Aswathy P., Gandhimathi R., Ramesh S.T., Nidheesh P.V. (2015).** Removal of organics from bilge water by batch electrocoagulation process. *Separation and Purification Technology*, p 40.

**Ayhan Ş.I and Mahmut Ö. (2006).** Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes, *Journal of Hazardous Materials* 137, p 1197-1205.

## B

**Baughman G.L., Weber E.J. (1994).** Transformation of dyes and related compounds in anoxic sediment: kinetics and products, *Environ. Sci. Technol.*, 28, p267-276.

**Belaid I et Fouhma S. (2015).** Synthèse et caractérisation des hydroxydes double lamellaires trimétallique: Etude de l'intercalation des colorants. Mémoire de Master. Université Echahid Hamma Lakhdar. El-oued. Algérie.

**Belayachi A. (2016).** Elimination d'un colorant anionique par adsorption, Electrocoagulation, Fenton. Thèse de Doctorat. Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem. Algérie.

**Benahmed Daidj K. (2018).** Traitement de la pollution organique dans l'eau par des procédés physico-chimique. Thèse de Doctorat. Université Djilali Liabes, Sidi Bel-Abbes. Algérie.

**Benaissa A. (2012).** Etude de la faisabilité d'élimination de certains colorants textiles par certains matériaux déchets d'origine naturelle. Mémoire de Master. Université Abou Bakr Balkaid, Tlemcen. Algérie.

**Benaissa A et Kacem C. (2011).** Etude de la dégradation photo catalytique d'un colorant synthétique et d'un tensioactif. Thèse de Doctorat. Université Mentouri Constantine. Algérie.

**Benamraoui F. (2014).** Elimination des colorants cationiques par des charbons actifs synthétisés à partir des résidus de l'agriculture. Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas Setif-1. Algérie.

**Bengana N et Boudaa T. (2014).** Application de la photocatalyse combinée avec l'électroflotation pour le traitement des effluents de l'industrie textile. Mémoire de Master. Université Abderrahmane Mira – Bejaia. Algérie.

**Bengrine A. (2011).** Dépollution des eaux usées sur un support naturel Chitosane-Bentonite. Mémoire de Magister. Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen. Algérie.

**Bennajah M. (2007).** Traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation-électroflotation en réacteur airlift. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse, France.

**Ben Mansour H., Boughzala O., Dridi D., Barillier D., Chekir-Ghedira L et Mosrati R. (2011).** Les colorants textiles sources de contamination de l'eau : Criblage de la toxicité et des méthodes de traitement.

**Bensadok K., El Hanafi N., Lopicque F. (2011).** Electrochemical treatment of dairy effluent using combined Al and Ti/Pt. electrodes system. *Desalination* 280, p 244-251.

**Bessioud S. (2010).** Traitement d'une eau de surface par électrocoagulation. Mémoire de Magister. Université 08 Mai 1945 Guelma. Algérie.

**Bouafia S. (2010).** Dégradation des colorants textiles par procédés d'oxydation avancée basée sur la réaction de fenton application à la dépollution des rejets industriels. Mémoire de Magister. Université Paris-Est et Saâd Dahlab. Algérie.

## C

**Can O. T., Bayramoglu M., Kobya M. (2003).** Decolorization of Reactive Dye Solutions by Electrocoagulation Using Aluminum Electrodes *Eng. Chem. Res.* 42 (14), p 3391–3396.

**Chebli D. (2012).** Traitement des eaux usées industrielles: Dégradation des colorants azoïques par un procédé intégré couplant un procédé d'oxydation avancée et un traitement biologique. Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie.

**Chen G. (2004).** Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology* 38, p 11-41.

**Chetioui S (2010).** Structures et propriétés physico-chimiques de substances colorantes de synthèse. Mémoire de Magister. Université Mentouri Constantine. Constantine. Algérie.

## D

**Daneshvar N., Ashassi-Sorkhabi H and Tizpar A. (2003).** Decolorization of Orange II by Electrocoagulation Method *Separation and Purification Technology* 31(2), p 153-162.

**Daneshvar N., Khataee A.R., Ghadim A.R.A., Rasoulifard M.H. (2007).** Decolorization of C.I. Acid Yellow 23 solutions by electrocoagulation process: Investigation of operational parameters and evaluation of specific electrical energy consumption (SEEC), *Journal of Hazardous Materials* 148, p566-572.

**Dia O ., Drogui P., Buelna G., Dubé R., Ihsen B.S. (2017).** Electrocoagulation of bio-filtrated landfill leachate: Fractionation of organic matter and influence of anode materials. *Chemosphere* 168, p 1136-1141

**Djab M. (2012).** Modification de la bentonite par des sels de bis imidazolium-Applications à l'adsorption d'un colorant textile (Orange Téton). Mémoire de Master. Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen. Algérie.

**Djeralfia R et Fakir A. (2015).** Elimination du bleu de méthylène par le procédé d'oxydation avancée « Fenton». Mémoire de Master. Université Akli Mohand Oulhadj- Bouira. Algérie.

**Drogui P., Asselin M., Brar S.K., Benmoussa H., Blais J.F. (2007).** Electrochemical removal of pollutants from agro-industry wastewaters. *Separation and Purification Technology* 61, p 301-310.

### E

**El-Shazly A.H., Al-Zahrani A.A., Al-Shahrani S.S. (2011).** Improvement of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> Removal from Wastewater by Using Batch Electrocoagulation Unit with Vertical Monopolar Aluminum Electrodes. *International Journal of Electrochemical Science*. p 4141-4149.

**Essadki A.H., Bennajah M., Gourich B., Vial C., Azzi M and Delmas H. (2008).** Electrocoagulation/électroflotation in an external-loop airlift reactor-Application to the decolorization of textile dye wastewater: a case study. *Chemical Engineering and Processing* 47, p 1211-1223.

**Eyvaz M., Kirlaroglu M., Selami Aktas T., Yuksel E. (2009).** The effects of alternating current electrocoagulation on dye removal from aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal* 153(1): p 16-22.

### F

**Feng C., Sugiura N., Shimada S and Maekawa T. (2003).** Development of a high performance electrochemical wastewater treatment system. *Journal of Hazardous Materials*, B103, p 65-78

### G

**Garg V.K., Amita M., Kumar R., Gupta R. (2004).** Basic dye (methylene blue) removal from simulated wastewater by adsorption using Indian Rosewood sawdust: a timber industry waste. *Dyes Pigments*, 63, p 243-250.

**Ghosh D., Medhi C.R., Purkait M.K. (2008).** Treatment of fluoride containing drinking water by electrocoagulation using monopolar and bipolar electrode connections. *Chemosphere* 73, p 1393-1400.

**GilPavas E., Arbeláez-Castaño P., Medina J., Acosta D.A. (2017).** Combined electrocoagulation and electro-oxidation of industrial textile wastewater treatment in a continuous multi-stage reactor electrocoagulation and electro-oxidation of industrial textile wastewater treatment. *Water Science and Technology*. 76 (9): p 2515–2525.

**Griffiths J. (1984).** Developments in the light absorption properties of dyes—color and photochemical reaction. In: *Developments in the Chemistry and Technology of Organic Dyes*. Society of Chemistry Industry, Oxford, p 1-30.

**Guivarch E.Z. (2004).** Traitement des polluants organiques en milieux aqueux par procédé électrochimique d'oxydation avancée "Electro-Fenton". Application à la minéralisation des colorants synthétiques. Thèse de doctorat, Université de Marne-La-Vallée.

**Guillard C., Lachheb H., Houas A., Ksibi M., Elaloui M., Herrmann J.M. (2003).** Influence of chemical structure of dyes, of pH and of inorganic salts on their photocatalytic degradation by TiO<sub>2</sub> comparison of the efficiency of powder and supported TiO<sub>2</sub>. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, V 158, p27-36.

**Gürses A., Yalçın M., Doğar C. (2002).** Electrocoagulation of some reactive dyes: a statistical investigation of some electrochemical variables. Waste Management, 22(5), p 491-499.

## H

**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 Tunis El Manar. Tunisie.

**Harrlekas F. (2008).** Couplage des Procédés Membranaires aux Techniques Physico-Chimiques ou Biologiques pour le Traitement des Rejets Liquides de l'Industrie de Textile. Thèse de Doctorat. Université Cadi Ayyad de Marrakech et de l'Institut National Polytechnique de Lorraine. Maroc.

**Hashlamon A., Ahmad A and Hang L.C. (2015).** Pre-treatment Methods for Seawater Desalination and Industrial Wastewater Treatment: A Brief Review. International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology, p 422-428.

**Hemsas S. (2008).** Contribution à l'étude de la décoloration des eaux sur grignons d'olives valorisés. Étude dynamique. Mémoire de Magister. Université M'hamed Bougara Boumerdès. Algérie.

**Holt P.K., Barton G.W and Mitchell C.A. (2004).** The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology. Chemosphere 59 (3), p 355-367.

## I

**Ilhan F., Kurt U., Apaydin O. (2008).** Treatment of Leachat by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes. Journal of Hazardous Materials, 154, p 381-389.

**Ishaka O. (2019).** Optimisation du traitement du Phosphore des eaux usées par Electrocoagulation. Mémoire de Master. Université de kara.

**J**

**Jarmany A., Kheribech A et Mountadar M. (2002).** La décoloration des rejets liquides de textile par électrocoagulation Phys. Chem. News 6, p 101-109.

**Journal Officiel de la République Algérienne N° 26, 23 avril 2006,** Décret exécutif n° 06-141 du 20 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 19 avril 2006 définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels. p 4-9.

**K**

**Kabouri H. (2016).** Etude de l'élimination d'un colorant cationique sur une argile provenant du gisement de M'Zila (Mostaganem). Mémoire de Master. Université Abdelhamid Ben Badis-Mostaganem. Algérie.

**Khadhraoui M., Trabelsi H., Ksibi M., Bouguerra S., Elleuch B., (2009).** Discoloration and detoxification of a Congo red dye solution by means of ozone treatment for a possible water reuse, Journal of Hazardous Materials 161, p 974-981.

**Khandegar V and Sarohan A.K. (2013).** Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent. Journal of Environmental Management 128, p 949–963.

**Khare S.K., Ponday K.K., Srivastara R.M., Singh V.N. (1988).** Removal of basic dye (crystal violet) from water using wallastonite as adsorbent. Env. Tech. Let, 9, p1163–1172.

**Khelloul N. (2012).** Dégradation d'un mélange de colorants par plasma glidarc. Étude de l'influence de différentes substances. Mémoire de Magister. Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem. Algérie.

**Khemis M., Leclerc J.P., Tanguy G., Valentin G and Lopicque F. (2006).** Treatment of industrial liquid wastes by electrocoagulation: experimental investigation and an overall interpretation model, Chem. Eng. Sci, 61, p 3602-3609.

**Khenoussi A., Ameziane N., Chahlaoui A et Chaouch M. (2013).** Effet bactéricide et épuratoire de traitement électrochimique sur l'effluent d'abattoir de viande rouge. European Scientific Journal, edition Vol 9, N° 36.

**Kholska N.K., Venkachalam S., Sonrasundaram P. (1991).** Pulsed electrogeneration of bubbles for electroflotation. Journal of Applied Electrochemistry 21, p 986-990.

**Kim T.H., Park C., Shin E.B and Kim S. (2002).** Decolorization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation process. Desalination 150, p 165-175.

**Koby M., Bayramoglo M and Eyvaz M. (2007).** Techno-economical evaluation of electrocoagulation for the textile wastewater using different electrode connections. Journal of Hazardous Materials, 148, p 311-318.

**Koby M., Can O.T., Bayramoglu M. (2003).** Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials B100*, p 163-178.

### L

**Laid N. (2010).** Dégradation photocatalytique du mordant bleu 13 en milieu hétérogène. Mémoire de Magister. Université Mentouri-Constantine. Algérie.

**Lamri N. (2010).** Elimination du colorant orange ii en solution aqueuse, par voie photochimique et par adsorption. Mémoire de Magister. Université Mentouri de Constantine. Algérie.

**Larbi F. (2008).** Contribution à la décoloration des eaux résiduaires textiles par des argiles naturelles. Mémoire de Magister. Université d'Oran Es-Senia. Algérie.

**Lazaridis N.K., Karapantsios T.D et Georgatas D. (2003).** Kinetic analysis for the removal of a reactive dye from aqueous solution onto hydrotalcite by adsorption. *Water Res.*, 37, p 3023-3033.

**Lemlikchi W. (2012).** Elimination de la pollution des eaux industrielles par différents procédés d'oxydation et de co-précipitation. Thèse de Doctorat. Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, Algérie.

**Limbsiya N et Upadhyay A. (2015).** Treatability Study of Leachate by Electrocoagulation - Iron Electrode. *International Journal for Scientific Research and Development*, p 242-244.

### M

**Maalem R. (2017).** Décoloration des eaux par électrocoagulation. Mémoire de Master. Université de Tébessa. Algérie.

**Mathur N., Bhatnagar P et Bakre P. (2006).** Assessing mutagenicity of textile dyes from Pali (Rajasthan) using AMES bioassay. *Appl. Ecol. Environ. Res.*, 4, 111-118.

**Mekhalif F. (2009).** Réutilisation des eaux résiduaires industrielles épurées comme eau d'appoint dans un circuit de refroidissement. Mémoire de Magister. Université du 20 Août 1955 Skikda. Algérie.

**Merouani D.R. (2011).** Traitement de colorants azoïque et anthraquinonique par procédés d'oxydation avancée (poa). Thèse de Doctorat. Université des sciences et technologies - Lille et Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem. Algérie

**Metahri M.S. (2012).** Élimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées, par des procédés mixtes. Cas de la STEP est de la ville de Tizi-Ouzou. Thèse de Doctorat. Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Algérie.

**Mollah M.Y.A., Morkovsky P., Gomes J.A.G., Kesmez M., Parga J and Cocke D.L. (2004).** Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials B* 114, p 199-210.

**Murugananthan M., BhaskarRaju G., Prabhakar S. (2004).** Separation of pollutants from tannery effluents by electro flotation, *Separation and Purification Technology* 40, p 69-75.

#### N

**Naje A.S., Chelliapan S., Zakaria Z and Abbas S.A. (2015).** Treatment performance of textile wastewater using electrocoagulation (EC) process under combined electrical connection of electrodes. *International Journal of Electrochemical Science* 10, p5924-5941.

**Naje A.S., Shreeshivadasan C., Zuriati Z and Saad A.A. (2015).** Enhancement of an electrocoagulation process for the treatment of textile wastewater under combined electrical connections using titanium plates. *International Journal of Electrochemical Science*, 10, p 4495 - 4512.

#### O

**Ouari F. (2017).** Oxydation des colorants par POAs sur catalyseurs à base d'argile commerciale K10 modifiée. Mémoire de Master. Université de Tlemcen. Algérie.

**Oubagha N. (2011).** Décontamination des eaux contenant les colorants textiles et les adjuvants par des matériaux naturels et synthétique. Mémoire de Magister. Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, Algérie.

**Ozyonar F. (2016).** Treatment of train industry oily wastewater by electrocoagulation with hybrid electrode pairs and different electrode connection modes. *International Journal of Electrochemical Science*, 11, p 1456 -1471.

#### P

**Pagga U., Brown D. (1986).** The degradation of dyestuffs. Part II. Behavior of dyestuffs in aerobic biodegradation tests, *Chemosphere* 15, p 479-491.

**Picard T. (2000).** Contribution à l'étude des réactions aux électrodes en vue de l'application à l'électrocoagulation. Thèse de Doctorat. Université de Limoges. France.

**S**

**Saaidia S. (2018).** Dégradation d'un colorant cationique photocatalyse, électro-oxydation et leur couplage. Thèse de Doctorat. Université Badji Mokhtar- Annaba. Algérie.

**Sahraoui H et Yahia M. (2018).** Étude de la dégradation du colorant bleu de méthylène par l'électrocoagulation. Mémoire de Master. Université Djilali Bounaama de KhemisMiliana. Algérie.

**Salmi Dj et Slimani K. (2014).** Application de l'électroflottation-électrocoagulation pour l'élimination d'un colorant textile Cas du Bleu d'indanthrène RS. Mémoire de Master. Université A. Mira-Bejaïa. Algérie.

**Sbai G et Loukil M. (2015).** La décoloration des rejets liquides de textile (noir de soufre) par voie électrochimique. *AfriqueScience*11 (1), p 102-111.

**Shu H.Y., Chang M.C. (2005).** Decolorization effects of six azo dyes by O<sub>3</sub>, UV/O<sub>3</sub> and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes, *Dyes and Pigments*, 65 p25-31.

**T**

**Tafer R. (2007).** Photo dégradation directe et induite de micro-polluants organiques (cas d'un colorant azoïque). Mémoire de Magister. Université Mentouri – Constantine. Algérie.

**V**

**Vepsäläinen M. (2012).** Electrocoagulation in the treatment of industrial waters and wastewaters. VTT Technical Research Centre of Finland,

**W**

**Walker G.M., Hansen L., Hanna J.A., Allen S.J. (2003).** Kinetics of a reactive dye adsorption onto dolomitic sorbents. *Water Res.*, 37, p 2081-2089.

**Y**

**Yousuf M., Mollah A., Schennach R., Parga J.R., Cocke L. (2001).** Electrocoagulation (EC), science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 84, p29-41.

**Z**

**Zaroual Z., Azzi M., Saib N and Chainet E. (2006).** Contribution to the study of electrocoagulation mechanism in basic textile effluent. *Journal of Hazardous Materials*, 131, p73-78.

**Zidane F., Qassid F., El Basri S., Bensaid J., Drogui P et Blais J.F. (2012).** Décoloration des effluents par des structures adsorbantes générées par électrocoagulation avec des électrodes d'aluminium et de fer, *Revue des Sciences de l'Eau* 25(1), p 33-47.

**Zidelkhir R. (2016).** Utilisation de la photovoltaïque pour le Traitement d'un Effluent industriel par d'électrocoagulation. Mémoire de Master. Université Mohamed Boudiaf - M'sila. Algérie.

**Zodi S. (2012).** Étude de l'épuration d'effluents de composition complexe par électrocoagulation et des couplages intervenants entre le traitement électrochimique et l'étape de séparation : application à l'industrie textile et papetière. Thèse de Doctorat. Université de Lorraine.

**Zongo I. (2009).** Étude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation : Application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques.

**Zongo I., Wéthé J., Merzouk B., Maïga A.H., Lopicque F., Leclerc J.P. (2011).** Traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie par électrocoagulation: Etude énergétique et effet des paramètres opératoires sur le traitement des polluants. *European Journal of Scientific Research*, 62, p 216-235.