



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



Université Larbi Tébessi

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 organique et matériaux organiques

Thème

**DECOLORATION DES EAUX PAR
ELECTROCOAGULATION**

Présenté par : Maalem Rabah

Devant le jury :

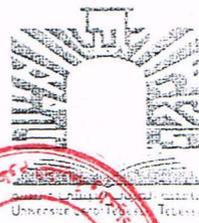
Président : M ^r MANSOURI Lakhdar	MCB	Univ. Tébessa
Rapporteur : M ^{lle} TOUAHRIA Soraya	MAA	Univ. Tébessa
Examineur : M ^{me} GRAIDIA Amel	MAA	Univ. Tébessa

Date de soutenance : 24/05/2017

Note : 17,00 /20

Remarque.....*Tres bien*.....

Année universitaire 2016-2017



Déclaration sur l'honneur de non-plagiat

(à joindre obligatoirement au mémoire, remplie et signée)

Je soussigné(e),

Nom, Prénom :

Mâalem Rabah

Régulièrement inscrit(e) en Master au département :

Sciences de la matière

N° de carte d'étudiant :

1993 / 2M209 / 93

Année universitaire :

2016 - 2017

Domaine :

Sciences de la matière

Filière :

chimie

Spécialité :

chimie organique et matériaux organiques

Intitulé du mémoire :

Decoloration des eaux par électrocoagulation

Atteste que mon mémoire est un travail original et que toutes les sources utilisées ont été indiquées dans leur totalité. Je certifie également que je n'ai ni recopié ni utilisé des idées ou des formulations tirées d'un ouvrage, article ou mémoire, en version imprimée ou électronique, sans mentionner précisément leur origine et que les citations intégrales sont signalées entre guillemets.

Sanctions en cas de plagiat prouvé :

L'étudiant sera convoqué devant le conseil de discipline, les sanctions prévues selon la gravité du plagiat sont :

- L'annulation du mémoire avec possibilité de le refaire sur un sujet différent ;
- L'exclusion d'une année du master ;
- L'exclusion définitive.

Fait à Tébessa, le : 04/06/2017

Signature de l'étudiant(e) :

Mâalem Rabah

Remerciements

Au terme de ce modeste mémoire, je tiens à remercier Dieu, qui ma donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.

Je tiens premièrement à remercier mon encadreur **M^{ELLE} TOUAHRIA SORAYA** avec qui j'ai eu le grand plaisir de travailler tout au long de ce mémoire. Je lui adresse ma gratitude pour sa disponibilité, les conseils scientifiques, judicieux et ses orientations fructueuses, son soutien tout au long de mon travail ainsi que son aide documentaire et ses encouragements.

Ma profonde gratitude à Monsieur **Mansour Lakhdar** pour l'honneur qu'il ma fait en acceptant d'être le président de mon jury.

Je remercie Madame **Graidia Amel** de bien vouloir accepter d'examiner ce travail.

Je remercie profondément tous les enseignants au cours de ce parcours qui ont contribué à me transmettre l'inestimable trésor qui est le savoir.

Je tiens également à remercier mes collègues et partenaires de laboratoire par excellence, avec qui j'ai eu de belles conversations enrichissantes.

Enfin, je remercie toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail dans de meilleures conditions.

ملخص

صناعة النسيج هي واحدة من الصناعات التي تستهلك الكثير من المياه وتنتج مياه مستعملة نسبيا كبيرة، تولد تلوث و أضرار على البيئة. طبيعة وحجم هذه المياه يعتمدان اعتمادا كبيرا على نظام معالجتها لذا يجب إعطاء اهتمام خاص لهذه الصناعة من خلال تطوير الأبحاث لتحديد طرق اقتصادية لمعالجة مياهها المستعملة الملونة لتتطابق مع المعايير المطلوبة. هذه الدراسة تندرج ضمن سياق أوسع لتوفير معرفة أفضل لمعالجة النفايات السائلة لصناعة النسيج باستخدام طريقة كهروكيميائية تتمثل في " التخرثر الكهربائي " هذه التقنية أثبتت نجاعتها في معالجة نفايات النسيج بفاعلية و أقل تكلفة لهذا قمنا بدراسة فعالية هذه الطريقة في معالجة مياه ملونة اصطناعيا بملون نسيج يدعى " Bleu Bemacron P-BG " يستخدم على نطاق واسع في صناعة النسيج و بالأخص صباغة ألياف البوليستر و هو ينتمي إلى فئة أصباغ التثنتت. لتحديد الشروط المثالية لهذه التقنية تم إجراؤها في مفاعل مختبر زجاجي سعته 1 لتر باستخدام صفائح الألمونيوم مع أزمنة مختلفة من المعالجة ، تطبيق كثافات مختلفة للتيار الكهربائي ، أربعة مسافات مختلفة بين قطبي صفحتي الألمنيوم و إضافة كهروليت دعم متمثل في كلوريد البوتاسيوم بتركيز مختلفة.

أظهرت النتائج التجريبية إزالة اللون بنسبة كبيرة تقدر بحوالي 95% و إزالة التعكر بنسبة 98%.

الكلمات المفتاحية: ملون نسيج، معالجة، تخرثر كهربائي، إزالة اللون، التعكر.

Résumé

L'industrie des textiles fait partie des branches industrielles qui consomment énormément d'eau et produit des rejets d'eaux usées proportionnellement importants engendrant une pollution néfaste pour l'environnement. La nature et le volume des eaux usées dépendent beaucoup des programmes de traitement, pour cela; il faut porter une attention particulière à cette industrie en développant la recherche pour l'identification des méthodes économiques de traitement de ses rejets colorés et répondre aux normes exigées.

Cette étude s'inscrit dans un contexte plus large visant à offrir une meilleure connaissance du traitement des rejets de textile par une méthode électrochimique «**ELECTROCOAGULATION**», une solution révèle moins chère et plus efficace pour le traitement de ces rejets. Pour cela on a étudié l'efficacité de cette méthode sur des eaux colorées synthétiquement par le « **Bleu Bemacron P-BG**» qui est largement utilisé en industrie textile pour la teinture de fibre polyester, il entre dans la catégorie des colorants dispersifs.

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 avec des différents temps du traitement, différentes densités de courant appliquées, 4 distances inter-électrodes et l'ajout d'un électrolyte support KCl à différentes concentrations.

Les résultats obtenus montrent qu'il y a une décoloration importante d'environ 95% et une réduction de la turbidité à 98%.

Mots clés :

Colorant, textile, traitement, électrocoagulation, décoloration, turbidité, Bleu Bemacron P-BG

Abstract

The industry of textile is one of the most industries that consumes a lot of water and produces releases proportionally significant amounts of wastewater, causing pollution that is harmful to the environment. The nature and volume of wastewater depend on the treatment programs; that's why this industry should be given a special attention by developing researches to determine economic methods to treat its colored discharges to reach the required standards.

This study is part of a wider context aiming at providing a better knowledge of the treatment of textile releases by an electrochemical method "ELECTROCOAGULATION", a solution that is cheaper and more effective for the treatment of these releases. For this purpose, we studied the effectiveness of this method on water synthetically colored by "**Bemacron Blue P-BG**", which is widely used in the textile industry for dyeing polyester fibers; it is included in the category of dispersive dyes.

To optimize the conditions of this process, the electrocoagulation tests were carried out in a 1 liter laboratory reactor using aluminum plates with different processing times, different current densities applied, 4 inter-electrode distances and the addition of KCl as support electrolyte at different concentrations. The obtained results show that there is a significant discoloration about 95% and a reduction of the turbidity at 98%.

Key words: Dye, textile, treatment, electrocoagulation, discoloration, turbidity, Blue Bemacron P-BG.

LISTE DES TABLEAUX

N°	Titre	Page
01	Principaux groupements chromophores et auxochromes, classes par intensité croissante	04
02	Relation entre la fréquence absorbée et la couleur transmise	04
03	Comparaison des technologies de dépollution des effluents textiles en fonction des avantages et inconvénients	15-16
04	Valeurs limites des paramètres de rejets d'effluents liquides industriels	17
05	Industrie de textile	17
06	Applications du procédé d'électrocoagulation	24
07	Les valeurs des paramètres physico-chimiques principaux caractérisant la solution préparée	34
08	Valeurs d'absorbance = $f(C)$ à $\lambda_{\max} = 535 \text{ nm}$ pour le Bleu Bemacron P-BG	34
09	Conductivité de l'eau avant et après le traitement	43

LISTE DES FIGURES

N°	Titre	Page
01	Structure moléculaire d'un colorant azoïque.	07
02	Structure moléculaire d'un colorant anthraquinoniques.	07
03	Structure de phtalocyanine. Exemple : phtalocyanine de cuivre.	07
04	Structure moléculaire d'un colorant xanthènes.	08
05	Structure moléculaire d'un colorant nitré et nitrosé.	08
06	Structure moléculaire d'un colorant indigoïdes	09
07	Principe du procédé électrocoagulation avec des électrodes d'aluminium.	19
08	Les différents modes de connections électriques pour une cellule d'électrocoagulation.	23
09	Schéma du dispositif expérimental d'électrocoagulation utilisé	28
10	Spectre d'absorption en UV-visible de colorant Bleu Bemacron P-BG (C0=50mg/L, pH initial = 8,11).	34
11	Courbe d'étalonnage du spectrophotomètre avec le Bleu Bemacron P-BG.	35
12-a	Effet de la densité de courant sur la réduction de la couleur (C0=50mg/L, pH initial = 8,11, d=1cm).	36
12-b	Spectres d'absorption en UV-visible de colorant Bleu Bemacron P-BG des différentes solutions traitées.	37
13	Conductivités des différentes solutions traitées (C0=50mg/L, pH initial = 8,11, d=1cm).	37
14	Evolution de pH des solutions traitées en fonction du temps d'EC (C0=50mg/L, pH initial = 8.11, d=1cm).	38
15	Evolution de pH des solutions traitées en fonction de la densité de courant (C0=50mg/L, pH initial = 8,11 , d=1cm).	39
16	Effet de concentration initiale du colorant sur la réduction de la coloration (Temps d'EC t= 45min, d=1cm).	40
17	Effet de concentration initiale du colorant sur la réduction de la coloration (C0=50mg/L, pH initial = 8.11, Temps d'EC t= 45min).	41
18	Conductivités des différentes solutions traitées.	42
19	Effet d'électrolyse support et sa concertation sur la réduction de la coloration.	43

LISTE DES PHOTOS

N°	Titre	Page
01	Installation d'électrocoagulation utilisée	28
02	Conductimètre et pH-mètre	28
03	La solution à traiter	29
04	Balance électronique (KERN ALS 220-4N)	30
05	Le colorant dispersif Bleu BEMACRON P-BG	30
06	Vue des électrodes d'aluminium	30
07	Spectrophotomètre SHIMADZU UV-1601PC	32
08	Le turbidimètre (Phywe System GMBH 2100N, Germany)	32
09	Différents phénomènes d'EC de l'eau colorée	44-45

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	01
PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE	
Chapitre 1 : Généralités sur les colorants synthétiques	
I-1- Introduction.....	03
I-2- Définition d'un colorant.....	03
I-3- Les colorants synthétiques.....	05
I-4- Nomenclature des colorants synthétiques.....	05
I-5- Classification des colorants synthétiques.....	06
I-5-1- Classification chimique.....	06
I-5-1-1- Les colorants azoïques.....	06
I-5-1-2- Les colorants anthraquinoniques.....	07
I-5-1-3- Les phtalocyanines.....	07
I-5-1-4- Les colorants xanthènes.....	08
I-5-1-5- Les colorants nitrés et nitrosés.....	08
I-5-1-6- Colorants indigoïdes.....	08
I-5-2- Classification tinctoriales.....	09
I-5-2-1- Les colorants solubles dans l'eau.....	09
I-5-2-2- Les colorants insolubles dans l'eau.....	10
I-6- Toxicité des rejets contenant les colorants synthétiques.....	11
I-7- Traitement des rejets textiles.....	12
I-7-1- physique.....	13
I-7-1-1- Adsorption.....	13
I-7-1-2- Osmose inverse, filtration.....	13
I-7-2- Chimique.....	13
I-7-3- Biologique.....	14
I-8- Législation sur l'environnement.....	16
Chapitre II : Traitement d'électrocoagulation (EC)	
II-1- Introduction.....	18
II-2- Principe et description technique d'électrocoagulation.....	18
II-2-1- Principe du procédé.....	18
II-2-2- Les électrodes utilisés et leurs réactions.....	20
II-3- Principale loi régissant l'électrocoagulation.....	24
II-4- Connexions électriques.....	21
II-4-1- Connexion monopolaire en parallèle.....	22
II-4-2- Connexion monopolaire en série.....	22

II-4-3- Connexion bipolaire en série.....	22
II-5- Applications de l'électrocoagulation.....	23
II-6- Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation.....	25
II-6-1- Avantages.....	25
II-6-2- Inconvénients.....	26
PARTIE EXPERIMENTALE	
Chapitre III : Matériels et Méthodes	
III-1- Introduction.....	27
III-2- Matériels.....	27
III-2-1- Dispositif expérimental.....	27
III-2-2- Solution étudiée.....	29
III-2-3- Colorant synthétique employé.....	30
III-2-4- Les électrodes utilisées.....	30
III-3- Techniques d'analyse.....	31
III-3-1-La spectrométrie UV-visible.....	31
III-3-2- Mesure de la turbidité.....	32
Chapitre IV: Résultats et Discussions	
IV-1- Introduction.....	33
IV-2- Paramètres étudiés.....	33
IV-3- Spectre d'absorption en UV-visible.....	33
IV-4- La courbe d'étalonnage $A = f(C)$	34
IV-5- Résultats de traitement des eaux colorées par EC en mode batch	35
IV-5- 1- Influence de la densité de courant et du temps d'électrolyse sur la décoloration.....	35
IV-5- 2- Effet de concentration initiale sur la réduction de la coloration.....	39
IV-5- 3- Effet de la distance inter-électrode (d).....	40
IV-5- 4- Effet d'électrolyte support et sa concertation sur la réduction de la coloration.....	42
CONCLUSION GENERALE.....	46
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	47

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La demande mondiale d'eau grimpe en flèche en même temps que la démographie. La qualité des ressources en eaux existantes baisse à cause de la pollution. En outre, La nécessité de répondre aux besoins toujours plus importants de notre industrie provoque la destruction des écosystèmes hydriques à un rythme inquiétant. Il est donc essentiel de protéger l'eau qui est une denrée rare et il est nécessaire de pouvoir fournir la quantité nécessaire à la consommation domestique et industrielle, de recycler autant que possible les eaux usées et de limiter les rejets polluants dans le milieu naturel.

L'industrie textile est l'une des sources les plus importantes de pollution de l'environnement. De plus, il a été estimé que 28. 10⁴ tonnes de colorants synthétiques de textiles sont rejetés annuellement à l'environnement dans le monde. Les effluents contenant ces colorants sont hautement colorés, ce qui rend la couleur le premier contaminant des effluents (**Ali, 2010**). Cette industrie consomme une grande quantité d'eau et par conséquent produit un volume important d'eau usée provenant des opérations d'impression, de teinture et de finissage. Ce rejet liquide a généralement une couleur intense, un pH élevé, une quantité importante des particules en suspension et une forte demande chimique en oxygène. L'industrie textile utilise environ 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**). Ces eaux doivent donc être traitées avant leur décharge finale, pour des raisons environnementales et légales.

Les méthodes conventionnelles, généralement utilisées pour l'élimination des colorants des eaux polluées industrielles, sont principalement les traitements biologiques et physicochimiques ainsi que leurs diverses combinaisons (**Slokar et Le Marechal, 1998**). La toxicité des colorants pose le problème de la croissance des bactéries, limitant ainsi l'efficacité de la décoloration (**Greaves et al., 1999**). Les méthodes physicochimiques sont généralement basées sur l'adsorption (par exemple, sur charbon actif, coagulation / floculation (en utilisant des sels ou des polymères inorganiques), oxydation chimique (chloration, ozonation...) et la photo dégradation (UV / H₂O₂, UV / TiO₂...) (**Chebli, 2012**). L'incapacité de ces procédés réside dans la transformation inefficace des molécules réfractaires ou toxiques et dans la production d'une nouvelle pollution venant particulièrement de l'utilisation des quantités importantes de produits chimiques qui conduisent à des volumes importants de solides récupérés (**Kim et al., 2002**). Il s'est récemment avéré que la technique de traitement des eaux polluées, basée sur la technique électrochimique employant l'électrocoagulation EC, économiquement attractive, permet d'éviter la majorité de ces problèmes.

Dans le but d'évaluer la performance de cette technique, nous avons réalisées des essais sur des solutions synthétiques typiques d'un rejet liquide d'industrie de textile.

Dans la partie bibliographique de ce travail, nous avons essayé de donner en premier lieu un aperçu général sur l'origine de la couleur et la classification des colorants synthétiques qui constituent aujourd'hui une véritable industrie et un capital de la chimie moderne et ils ont presque supplanté complètement les colorants naturels ainsi que les méthodes utilisées pour leurs éliminations des eaux puisque ils sont connus comme des produits réfractaire 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 traitements des eaux usées contaminées par les colorants de textile en employant le processus d'électrocoagulation (EC) en batch. Ce processus très sollicité dans le traitement d'eaux usées de textile, permet la clarification de ces eaux (**Naje et al., 2015, Zidane et al., 2012**). Il a été prouvé que cette technique offre la simplicité, l'efficacité, la compatibilité environnementale, la sécurité, la sélectivité, pour un faible coût (**Mollah et al., 2004**).

La partie expérimentale de cette étude divisée en 2 chapitres : L'un est réservé pour détailler l'ensemble des méthodes expérimentales et du matériel utilisé et l'autre est consacré aux résultats obtenus suite à la décoloration des solutions étudiées.

PARTIE
BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I

Généralités sur

les colorants synthétiques

I-1- Introduction :

Depuis le début de l'humanité, les colorants ont fait l'objet de plusieurs travaux liés à notre vie journalière à savoir la peinture et la teinture du papier, de la peau et des vêtements, etc. Jusqu'à la moitié du 19^{ème} siècle, les colorants appliqués étaient d'origine naturelle. Des pigments inorganiques tels que l'oxyde de manganèse, l'hématite et l'encre étaient utilisés.

Par ailleurs, des colorants naturels organiques ont été appliqués, surtout dans l'industrie textile. Ces colorants sont tous des composés aromatiques qui proviennent essentiellement des plantes, telles que l'alizarine et l'indigo (**Mehdi, 2014**).

L'industrie des colorants synthétiques est née en 1856 quand le chimiste anglais William Henry Perkin, dans une tentative de synthèse de la quinine artificielle pour soigner la malaria, a obtenu la première matière colorante synthétique qu'il appela « mauve » (aniline, colorant basique). Perkin a breveté son invention et il a installé une chaîne de production, qui serait bientôt suivie par d'autres. De nouveaux colorants synthétiques commencent à paraître sur le marché. Ce processus a été stimulé par la découverte de la structure moléculaire du benzène en 1865 par Kekulé. En conséquence, au début du 20^{ème} siècle, les colorants synthétiques ont presque complètement supplantés les colorants naturels (**Messemeche, 2014**).

I-2- Définition d'un colorant :

Un colorant est une substance colorée qui interagit avec le milieu dans lequel elle est introduite, et le colore en s'y dissolvant et/ou dispersant donc la propriété de teindre.

Cette propriété résulte d'une affinité particulière entre le colorant et la fibre (**Merouani, 2011**).

La coloration plus ou moins intense des différentes substances est liée à leur constitution chimique (**Benaissa, 2012**).

Les matières colorantes se caractérisent par leur capacité à absorber les rayonnements lumineux dans le spectre visible (380 à 750 nm). 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 certains groupes d'atomes appelés chromophore (**Guivarch, 2004**). La molécule colorante étant le chromogène (**Merouani, 2011**).

Les chromophores sont des groupes aromatiques conjugués (liaison p), comportant des liaisons non liantes (électron n) ou des complexes de métaux de transition. D'autres groupes d'atomes du chromogène intensifient ou changent la couleur due au chromophore dit auxochromes, ces derniers permettent la fixation des colorants sur les substrats.

En effet, l'auxochrome a la propriété d'augmenter sa coloration.

Plus la facilité du groupe chromophore à donner un électron est grande plus la couleur sera intense. Les chromophores et auxochromes habituels sont résumés dans le **tableau 1**.

Tableau 01 : Principaux groupements chromophores et auxochromes, classés par intensité croissante (**Guivarch, 2004**).

Groupes chromophores	Groupes auxochromes
N = N	NH : groupe azoïque
N = O : groupe nitroso	NHCH ₃ : Methylamino
C = O : groupe cétonique ou carbonyle	N(CH ₃) ₂ : Demethylamino
C=C : groupe vinyle	OH: Hydroxyle
C = S : groupe thio carbonyle	OR: Alkoxy
C=S : Sulfure	Groupes donneurs d'électrons

D'une manière générale ; lorsque le nombre de noyau aromatique augmente, la conjugaison des doubles liaisons s'accroît et le système conjugué s'élargit. L'énergie des liaisons p diminue tandis que l'activité des électrons p ou n augmente et produit un déplacement vers les grandes longueurs d'onde. De même, lorsqu'un groupe auxochrome donneur d'électrons (amino, hydroxy, alkoxy,...) est placé sur un système aromatique conjugué, ce groupe se joint à la conjugaison du système p, la molécule absorbe dans les grandes longueurs d'onde et donne des couleurs plus foncées (**Hammami, 2008**). La relation entre la longueur d'onde et la couleur transmise est donnée dans le **tableau 02 (Juster, 1962)**.

Tableau 02 : Relation entre la fréquence absorbée et la couleur transmise.

λ longueur d'onde absorbée	Couleur observé (transmise)
4000 (violet)	Jaune - verdâtre
4250 (bleu nuit)	Jaune
4500 (bleu)	Orange
4900 (bleu-vert)	Rouge
5100 (vert)	Pourpre
5300 (jaune-vert)	Violet
5500 (jaune)	bleu nuit
5900 (orange)	bleu
6400 (rouge)	bleu-vert
7300 (pourpre)	vert

Les matières colorantes se divisent en deux grands groupes:

Colorant : matière colorante soluble dans les solvants et les substrats.

Pigment : matière colorante insoluble dans les solvants et les substrats.

De ces définitions, il résulte que colorants et pigments sont donc deux termes à ne pas confondre lorsque l'on parle de matières colorantes, les colorants se distinguent des pigments du fait qu'ils sont solubles dans le milieu d'application, l'eau, alors que les pigments, insolubles, sont mis en suspension dans un liant organique comme de l'huile ou de la gomme, permettant ainsi de colorer le support (**Merouani, 2011**).

I-3- Les colorants synthétiques:

L'industrie des colorants synthétiques est née en 1856 quand le chimiste anglais William Henry Perkin a obtenu le premier colorant de synthèse: la mauvéine. Ce premier succès encouragea les chercheurs, qui soumirent l'aniline et la mauvéine à l'action des réactifs les plus divers dans l'espoir de préparer de nouveaux colorants. Les colorants synthétiques dominent aujourd'hui le marché surtout que leurs propriétés peuvent être précisément adaptées à leur utilisation. Tous ces colorants sont synthétisés principalement à partir des produits pétroliers, notamment du benzène et de ses dérivés (toluène, naphthalène, xylène et anthracène) (**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 de coloration et des 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.

Selon le type d'application et d'utilisation, les colorants synthétiques doivent répondre à un certain nombre de critères afin de prolonger la durée de vie des produits colorés sur lesquels ils sont appliqués : résistance à l'abrasion, stabilité photolytique des couleurs, résistance à l'oxydation chimique (notamment les détergents) et aux attaques microbiennes (**Guivarch, 2004**).

I-4- Nomenclature des colorants synthétiques :

La dénomination des colorants commerciaux est loin de présenter la rigueur de celle des composés chimiques, parce que, d'une part, ce ne sont généralement pas des produits purs et que, d'autre part, les fabricants préfèrent très souvent ne pas en divulguer la constitution exacte.

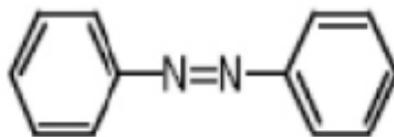


Figure 01 : Structure moléculaire d'un colorant azoïque

1-5-1-2- Les colorants anthraquinoniques :

Les colorants anthraquinoniques sont d'un point de vue commercial, les plus importants après les colorants azoïques. Leur formule générale dérivée de l'anthracène, montre que le chromophore est un noyau quinonique sur lequel peuvent s'attacher des groupes hydroxyles ou amino (Lamri, 2010). La molécule de base de ce groupe de colorants est l'anthraquinone (figure 2) qui présente le groupe chromophore carbonyle ($>C=O$) sur un noyau quinonique, qui est le chromogène.

Ces produits sont utilisés pour la coloration des fibres polyester, acétate et tri acétate de cellulose (Heddi, 2013). Ils constituent en effet la classe de colorants présentant la plupart du temps les meilleures stabilités à la lumière et aux agents chimiques.

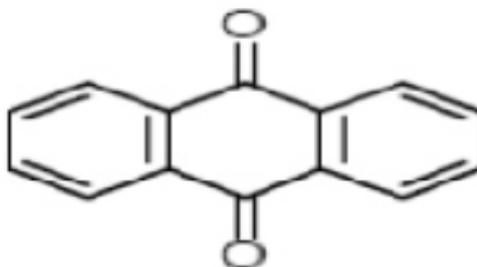


Figure 02 : Structure moléculaire d'un colorant anthraquinoniques

I-5-1-3- Les phtalocyanines :

Les phtalocyanines ont une structure complexe possédant un atome métallique central. Ils sont obtenus par réaction du dicyanobenzène en présence d'un halogénure métallique (Cu, Ni, Co, Pt, Cr....ect) (Boulal et Bouachema, 2014).

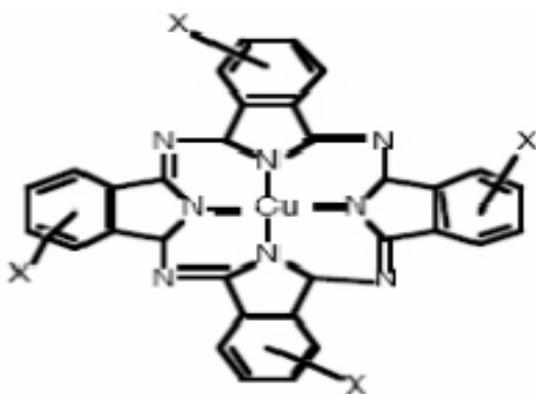


Figure 03 : Structure de phtalocyanine. Exemple : phtalocyanine de cuivre

I-5-1-4- Les colorants xanthènes :

Ce sont des composés qui constituent les dérivés de la fluorescéine. Ils sont dotés d'une intense fluorescence. Peu utilisés en tant que teinture, leur faculté de marqueurs lors d'accidents maritimes ou de traceurs d'écoulement pour des rivières souterraines est malgré tout bien établie.

Ils sont aussi utilisés comme colorants alimentaires, cosmétiques, textiles et impression (Belaid et Fouhma, 2015).

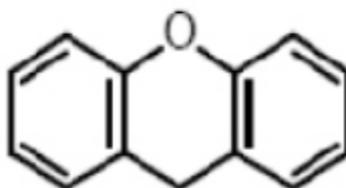


Figure 04 : Structure moléculaire d'un colorant xanthènes

I-5-1-5- Les colorants nitrés et nitrosés :

Ils forment une classe de colorants très limitée en nombre et relativement ancienne. Ils sont actuellement encore utilisés, du fait de leur prix très modéré lié à la simplicité de leur structure moléculaire caractérisée par la présence d'un groupe nitro (-NO) en position ortho d'un groupement électro-donneur (hydroxyle ou groupes aminés) Figure (Oubagha, 2011).

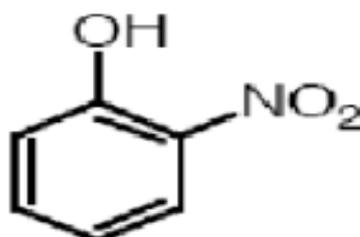


Figure 05 : Structure moléculaire d'un colorant nitré et nitrosé.

I-5-1-6- Colorants indigoïdes :

Les colorants indigoïdes tirent leur appellation de l'indigo, déjà utilisé par les Égyptiens il y a quelques milliers d'années. L'indigo est un des plus anciens colorants connus avec la pourpre, qui est un dérivé dibromo-6,6-indigo. Par la suite, des centaines de dérivés ont été synthétisés en fixant des substituants sur la molécule de l'indigo ou en y introduisant de nouveaux atomes. Ainsi, les homologues sélénié, soufré et oxygéné du bleu de l'indigo provoquent d'importants effets hypsochromes conduisant à des coloris pouvant aller de l'orange au turquoise (**Boulal et Bouachema, 2014**).

De façon générale, les colorants indigoïdes se caractérisent par une remarquable résistance aux traitements de lavage, alors que la solidité à la lumière est très moyenne. Les colorants indigoïdes sont utilisés comme colorants textiles, comme additifs en produits pharmaceutiques en confiserie, ainsi que dans les diagnostics médecine (**Heddi, 2013**).

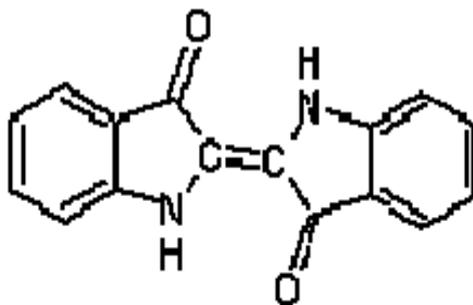


Figure 06 : Structure moléculaire d'un colorant indigoïdes

I-5-2- Classification tinctoriales :

La classification par domaines d'application présente un intérêt pour les producteurs des colorants, la solubilité du colorant dans le bain de teinture, son affinité pour les diverses fibres et sur la nature de la fixation. Celle-ci est de force variable selon que la liaison colorant-substrat est du type ionique, hydrogène, de Van der Waals ou covalente. On distingue plusieurs catégories tinctoriales définies cette fois par les auxochromes.

I-5-2-1- Les colorants solubles dans l'eau :

a- Les colorants acides ou anioniques : Comme leur nom l'indique, se sont des «acides », la molécule comporte une ou plusieurs fonctions acides (SO_3H^- et COOH). Leur nature acide explique leur affinité pour les fonctions basiques des fibres, comme les polyamides (**Benaissa, 2012**).

b- Les colorants basiques ou cationiques : ils sont des sels d'amines organiques, ce qui leur confère une bonne solubilité dans l'eau. Les liaisons se font entre les sites cationiques des colorants et les sites anioniques des fibres. En phase de disparaître dans la teinture de la laine et

de la soie, ces colorants ont bénéficié d'un regain d'intérêt avec l'apparition des fibres acryliques, sur lesquelles ils permettent des nuances très vives et résistantes (**Nait Merzoug, 2014**).

c- Les colorants directs ou substantifs : Ce sont des colorants à caractères anioniques; ils sont solubles dans l'eau et utilisés en solution aqueuse. La solubilité de ces colorants dans l'eau est réduite par l'addition des sels neutres. Ceux d'entre eux qui sont les moins stables à la lumière sont utilisés à la teinture des tissus de doublures, des fils de laine, des tapis et pour beaucoup d'articles à bon marché (**Papic et al, 2000**).

Les avantages principaux de ces colorants sont la grande variété des coloris, leur facilité d'application et leur prix modique. Par contre, leur inconvénient principal réside dans leur faible solidité au mouillé (**Merouani, 2011**).

d- Les colorants mordant: Les colorants à mordants contiennent généralement un ligand fonctionnel capable de réagir fortement avec un sel d'aluminium, de chrome, de cobalt, de cuivre, de nickel ou de fer pour donner différents complexes colorés avec le textile (**Boulal et Bouachema, 2014**). Les hydroxydes métalliques correspondant sont appelés mordants.

I-5-2-2- Les colorants insolubles dans l'eau :

a- Les colorants de cuve : Les colorants de cuve sont insolubles et doivent être transformés en leuco dérivés par réduction alcaline. La teinture se termine par la réoxydation in situ du colorant sous sa forme insoluble initiale. Réputés pour leur bonne résistance aux agents de dégradation, les colorants de cuve sont encore utilisés, à l'image de l'indigo pour la teinture des articles jean ou denim (**Bousnoubra, 2010**).

b- Les colorants azoïques insolubles : Les colorants azoïques constituent la famille la plus importante tant sur le plan de l'application, puisqu'ils représentent plus de 50% de la production mondiale de matières colorantes que sur celui de la multiplicité des structures étudiées. Les colorants azoïques se répartissent en plusieurs catégories : les colorants basiques, acides, directs et réactifs solubles dans l'eau, les azoïques dispersés et à mordant non ioniques insolubles dans l'eau (**Bousnoubra, 2010**).

c- Les colorants dispersés : Ils ont été découverts dans les années 1920 pour résoudre le problème de la teinture de l'acétate de cellulose qui faisait alors son apparition. Cette fibre ne présentait aucune affinité pour les colorants qui étaient alors disponibles sur le marché et qui étaient des colorants solubles dans l'eau. Cependant, on a constaté que la teinture pouvait être obtenue en utilisant des colorants faiblement polaires de taille moléculaire relativement petite. De tels colorants, en raison de leur manque de groupements solubilisant, sont pratiquement insolubles dans l'eau et cela signifie qu'ils doivent être appliqués sous forme de dispersion aqueuse contenant essentiellement des particules de colorant. Une telle méthode d'application a

conduit naturellement à l'adoption du nom de « colorant dispersé ». On les qualifie également de « colorants plastosolubles » c'est-à-dire des colorants très peu solubles dans l'eau mais solubles dans les fibres synthétiques hydrophobes (Casetta, 2000).

d- Les colorants réactifs : Ces colorants contiennent des groupes chromophores issus essentiellement des familles azoïques, anthraquinoniques et phtalocyanines. Leur appellation est liée à la présence d'une fonction chimique réactive, de type triazinique ou vinylsulfone assurant la formation d'une liaison covalente forte avec les fibres. Ils sont solubles dans l'eau et entrent de plus en plus fréquemment dans la teinture du coton et éventuellement dans celle de la laine et des polyamides (Lamri, 2010).

I-6- Toxicité des rejets contenant les colorants synthétiques : Par définition, la toxicité est la mesure de la capacité d'une substance à provoquer des effets néfastes sur toute forme de vie, telle qu'un être humain, une bactérie ou une plante ou une sous structure de cet organisme tel que le foie. Le sujet d'une étude toxicologique se fait sur une substance ou sur les conditions externes et leurs effets délétères sur les organismes vivants, tissus, cellules ou organites. Selon la dose on distingue trois formes de toxicité (Trabelsi, 2014):

La toxicité aigue

La toxicité sub-aigue

La toxicité à long terme

La toxicité des différents types de colorants (mortalité, effet mutagénique et cancérigène) a été étudiée par plusieurs travaux de recherche aussi bien sur des organismes aquatiques (poisson, algue, bactéries, etc.) que sur les mammifères. En outre, des recherches ont été effectuées pour étudier l'effet des colorants sur l'activité des bactéries aérobies et anaérobies dans des systèmes de traitement des eaux résiduaires (Hammami, 2008).

Beaucoup de colorants sont visibles dans l'eau même à de très faibles concentrations ($< 1\text{mg.l}^{-1}$). Ainsi, ils contribuent aux problèmes de pollution liés à la génération d'une quantité considérable d'eau usée contenant des colorants résiduels (Mansour et al, 2011). 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 et par conséquent présente un danger potentiel de bioaccumulation qui peut affecter l'homme par transport à travers la chaîne alimentaire (Hammami, 2008).

Dans ces conditions la dose létale 50 (DL50) reste le meilleur paramètre pour évaluer les effets toxiques causés par ces déversements. Ainsi, une DL50 signifie la mort de 50% des espèces animales testées en expérimentation (Aliouche, 2007). Elle s'exprime en milligrammes de matière active par kilogramme de biomasse (Trabelsi, 2014).

Les données bibliographiques ont mentionné que :

- Le colorant "noir de l'uxanthol G" est très nocif pour les jeunes guppies à la concentration de 5mg/l.
- La fuchsine inhibe la croissance des algues et des petits crustacés pour des concentrations minimales de 1mg/l et 20mg/l respectivement.
- Le bleu de méthylène est toxique pour les algues et les petits crustacés à partir des concentrations de 0,1 mg/l et 2 mg/l respectivement.
- Le bleu de victoria, le violet de méthyle, le noir anthracite BT et le vert diamant sont très toxiques pour la faune et la flore à partir de concentrations de 1mg/l.
- Les colorants cationiques (ou basiques) sont généralement très toxiques et résistent à toute oxydation. En effet, d'autres études ont montré que le colorant cationique (sandocryl orange) est très toxique pour les micro-organismes. En effet, après un temps de contact de 5 jours, le taux d'inhibition a été de l'ordre de 96,5%. Ce taux, est cependant plus faible avec le colorant acide, le Lanasyn Black (32,8%) et pratiquement nul avec un autre colorant de cette même famille, le sandolan (**Bousnoubra, 2010**).

Pour protéger l'environnement et la santé public les effluents industrielle doit subir un traitement efficace.

I-7- Traitement des rejets textiles :

Le traitement des rejets textiles, compte tenu de leur hétérogénéité de composition, conduira toujours à la conception d'une chaîne de traitement assurant l'élimination des différents polluants par étapes successives. La première étape consiste à éliminer la pollution insoluble par l'intermédiaire de prétraitements (dégrillage, dessablage, déshuilage..) et/ou de traitements physiques ou physico-chimiques assurant une séparation solide - liquide. Les techniques de dépollution intervenant le plus couramment en deuxième étape dans les industries textiles se divisent en trois types (**Barclay et Buckley, 2000**) :

I-7-1- Physique :

Méthodes de précipitation (coagulation, floculation, sédimentation) : processus physico- chimiques par lesquels des particules colloïdales ou des solides en fine suspension sont transformés par des flocculant chimiques en espèces plus visibles et séparables (les floccs). Ce processus est utilisé lorsque la décantation naturelle des matières en suspension dans l'eau est trop lente pour obtenir une décantation efficace (**Harrlekas, 2008**). Ce procédé est basé sur l'addition d'un coagulant qui va former des floccs avec les polluants organiques.

Ces floccs sont ensuite séparés par décantation et filtration puis évacués. Les principaux coagulants utilisés pour déstabiliser les particules en suspension et produire des floccs, sont: le sulfate d'aluminium (alun) ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$), l'aluminate de sodium (NaAlO), le chlorure ferrique ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), le sulfate ferreux ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), le sulfate ferrique ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$).

9H₂O). Les coagulants inorganiques tels que l'alun (Al₂ (SO₄)₃. 18HO) donnent les résultats les plus satisfaisants pour la décoloration des effluents textiles contenant des colorants dispersés, de cuve et au soufre, mais sont totalement inefficace pour les colorants réactifs, azoïques, acides et basiques (**Barclay et Buckley, 2000, Vendevivere et al, 1998**).

Toutefois, ce procédé génère des quantités énormes de boues en fin de traitement, ce qui nécessite des investissements supplémentaires pour leur traitement en vue de valorisation (**Bousnoubra, 2010**).

I-7-1-1- Adsorption :

L'adsorption est un procédé d'élimination des polluants organiques ou minéraux présents dans des effluents aussi bien liquides que gazeux. Plusieurs modèles théoriques ont été élaborés pour décrire les mécanismes de ces phénomènes. Par ce procédé, le polluant est transféré de la phase liquide vers la phase solide. Le charbon activé est l'adsorbant le plus utilisée pour la réduction de la couleur, mais cette technique n'est efficace que sur certaines catégories de colorants (cationiques, à mordant, colorants dispersés, de cuve et réactifs (**Raghavacharya, 1997**). Les techniques d'adsorption non destructives requièrent des opérations postérieures onéreuses de régénération et de post traitement des déchets solides. Dans la plupart des cas, les résidus solides sont répandus dans de remblais, mais des dispositions particulières doivent être prises à l'égard des organiques qui peuvent lixivier avec le temps (**Merouani, 2011**).

I-7-1-2- Osmose inverse, filtration :

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

I-7-2- Chimique :

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 (**Merouani, 2011**).

Parmi les techniques de traitement chimique on peut citer :

- Oxydation (oxygène, ozone, oxydants tel que NaOCl, H₂O₂).
- Réduction (Na₂S₂O₄).
- Méthode complexométrique,
- Résine échangeuse d'ions.

I-7-3- Biologique :

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. Ce procédé peut conduire soit à une biodégradation totale avec formation de CO₂ et de H₂O, soit à une biodégradation incomplète, pouvant aboutir à un composé ayant une structure différente du parent produit. Le traitement biologique est souvent caractérisé par des mesures de la D.B.O (demande biologique en oxygène) et de la D.C.O (demande chimique en oxygène) (**Bousnoubra, 2010**). Ces techniques sont adaptées à un grand nombre de polluants organiques, elles ne sont pas suffisamment efficaces pour les rejets textiles. De nombreuses classes de colorants telles que les azoïques, les colorants acides (à cause des groupes sulfonés) et les colorants réactifs y sont récalcitrants (**Merouani, 2011**). Seuls les colorants de structure chimique simple et de faible poids moléculaire et faiblement substitués ont des taux de décoloration importants (**Sanir et Banerjee, 1999**).

Le **tableau 03** présente les principaux avantages et inconvénients des techniques citées précédemment pour le traitement des colorants (**Guivarch, 2004**).

Tableau 03 : Comparaison des technologies de dépollution des effluents textiles en fonction des avantages et inconvénients

Technologie	Exemples	Avantages I	Inconvénients
Coagulation/ Floculation	Chau, FeCl ₃ , Polyélectrolyte	<ul style="list-style-type: none"> - Equipement simple. - Décoloration relativement rapide. - Réduction significative de la DCO. 	<ul style="list-style-type: none"> - 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.
Filtration sur membranes	Osmose inverse, Nanofiltration, Microfiltration, Ultrafiltration.	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation simple et rapide. - Pas d'addition de produits chimiques. - Faible consommation énergétique. - Réduction de la couleur. - Grands volumes traités. 	<ul style="list-style-type: none"> - Investissement important - Sélectif. - Encrassement rapide des membranes. - Pré et post traitement nécessaires.
Adsorption	Carbone activé, Silice,	<ul style="list-style-type: none"> -Réduction efficace de la couleur. -Technologie simple. - Faible coût d'utilisation pour certains adsorbants. 	<ul style="list-style-type: none"> -Investissement et coût de fonctionnement élevés. - Lent et limité en volume. - Régénération des adsorbants onéreuse voire impossible. - Sélectif. -Formation de boue.
Oxydation chimique	Ozone	<ul style="list-style-type: none"> - Traitement de gros volumes. - Diminution nette de la chloration. 	<ul style="list-style-type: none"> - Investissement et coût de fonctionnement très élevés. - Efficacité limitée pour certains colorants. -Produits d'oxydation inconnus.
	Réactifs de Fenton	<ul style="list-style-type: none"> -Décoloration rapide et efficace. - Opération simple. 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût élevé. -Produits d'oxydation inconnus.
	Chloration	<ul style="list-style-type: none"> - Oxydant puissant 	<ul style="list-style-type: none"> - Formation de sous produits de chloration (cancérogènes).
Réduction chimique	Chlorure d'étains, hydrosulfite	<ul style="list-style-type: none"> -Décoloration efficace des azoïques. 	<ul style="list-style-type: none"> - Formation d'amines aromatiques. - Dégradation incomplète.
	Aérobie	<ul style="list-style-type: none"> - Approprié pour les 	<ul style="list-style-type: none"> - Spécifique à certains

		colorants insolubles.	colorants. - Décoloration variable - Grandes quantités de boues générées. - Besoins énergétiques importants.
Procédés biologiques	Anaérobie	- Décolore la plupart des colorants par un mécanisme de réduction. - Réutilisation du méthane produit comme source d'énergie sur le site.	- Produits de dégradation inconnus. - Beaucoup de produits toxiques non dégradés. - Nécessite de grands réservoirs d'aération.

I-8- 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 limitent des ces rejets 'Décret exécutif N °06-141 au 19 avril 2006' (**tableau 04**) et (**tableau 05**) qui concerne l'industrie textile.

Tableau 04 : 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	"	30	40
Phosphore total	"	10	15
DCO	"	120	130
DBO ₅	"	35	40
Aluminium	"	3	5
Substances toxiques bio-accumulable	"	0,005	0,01
Cyanures	"	0,1	0,15
Fluor et composés	"	15	20
Indice de phénols	"	0,3	0,5
Hydrocarbures totaux	"	10	15
Huiles et Graisses	"	20	30
Cadmium	"	0,2	0,25
Cuivre total	"	0,5	1
Mercure total	"	0,01	0,05
Plomb total	"	0,5	0,75
Chrome Total	"	0,5	0,75
Etain total	"	2	2,5
Manganèse	"	1	1,5
Nickel total	"	0,5	0,75
Zinc total	"	3	5
Fer	"	3	5

Tableau 05 : Industrie de textile (JORADP N° 26, 2006)

Paramètres	Unité	Valeurs Limites	Tolérances aux valeurs limites anciennes Installations
Température	°C	30	35
PH	/	6,5-8,5	6 -9
DCO	mg/l	250	3 00
DBO ₅	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'electrocoagulation

(EC)

II-1- Introduction :

L'eau résiduaire qui provient des activités industrielles sont trop chargés en matières polluantes de différents types : organique, minérale, physique, toxique etc... (**Mercado et Ivan, 2005**). 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. Le traitement chimique des rejets industriels a besoin d'addition de produits divers (coagulant, floculant) qui, même s'il réduit la toxicité des effluents, se traduit toujours par une augmentation des volumes des boues ou de salinité (**Bayramoglu et al., 2004, Persin et Rumeau, 1989**). De ce fait, l'application de traitements électrochimiques permet d'éviter ces inconvénients, avec la possibilité d'obtenir des produits différents, en partant de la même substance.

Parmi ces techniques d'épuration électrochimiques, on a l'électrocoagulation (EC) qui est l'objet de ce travail et tel que son nom l'indique ; est la fusion des sciences de l'électrochimie et de la coagulation chimique. Cette technique est très sollicitée dans le traitement de divers rejets industriels et urbain, tels que les effluents des industries de textile (**Naje et al, 2015, Vinodha et al, 2012**) et des industries agroalimentaires (**Irmedez et al., 2006**). Ces procédés peuvent être utilisés pour éliminer les matières en suspension, les émulsions huileuses, la DCO (**Chen et al., 2000**), la couleur des effluents (**Zidane et al, 2012**), les germes pathogènes (**Khennoussi et al, 2013**)...etc.

II-2- Principe et description technique d'électrocoagulation :

II-2-1- Principe du procédé :

L'électrocoagulation est une technologie innovante qui peut s'adresser à toutes les industries générant de la pollution d'origine minérale ou organique. Elle est basée sur la dissolution électrochimique d'un métal sous l'effet d'un courant électrique (ou potentiel) entre deux électrodes (fer ou aluminium) immergées dans les eaux à traiter qui permet de générer au cours du traitement des cations solubles de (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+}) (**Chen et al., 2000 ; Ibanez et al., 1988**) et forment des espèces polymériques chargées d'hydroxyle métalliques.

Ces espèces neutralisent les charges électrostatiques des particules colloïdales en suspension et facilitent leur agglomération ayant pour résultat leur séparation de la phase aqueuse par un procédé physique classique (décantation, flottation, filtration) (**Mohammad et Muttucumar, 2006**).

Au voisinage de la cathode, la réduction de l'eau provoque la formation du gaz hydrogène (H_2), sous forme des bulles, estimées à un diamètre d'environ 10 à 100 μm d'après (Essadki et al., 2008), ces bulles vont en remontant à la surface entraîner les matières en suspension, les hydrocarbures, les huiles, les graisses et les colloïdes etc. et en provoquant ainsi, déjà au cours de cette phase, une clarification des liquides traités (Flottation). (Bebeselea et al., 2006).

Le phénomène de flottation et de décantation des particules colloïdales déstabilisées par l'EC de l'anode sacrificielle en aluminium est illustré sur la **figure 7**.

Le processus d'EC implique les trois étapes suivantes (Mollah et al., 2001) :

- Formation des coagulants par oxydation électrolytique de l'électrode sacrificielle (l'anode).
- Déstabilisation des particules de la suspension, et le cassage des émulsions.
- Agrégation des phases déstabilisées pour former des floccs.

Le mécanisme de déstabilisation des contaminants, suspension particulaire et rupture des émulsions peut être résumé comme suit (Lemlikchi, 2012) :

- Présence forte de la double couche diffuse autour des espèces chargées obtenues grâce aux interactions des ions métalliques provenant de la dissolution de l'anode sacrificielle.
- Neutralisation des espèces ioniques présentes dans l'eau par les cations.
- Formation de floccs comme le résultat de l'agglomération des particules et des colloïdes autour des espèces coagulées (Zongo, 2009).

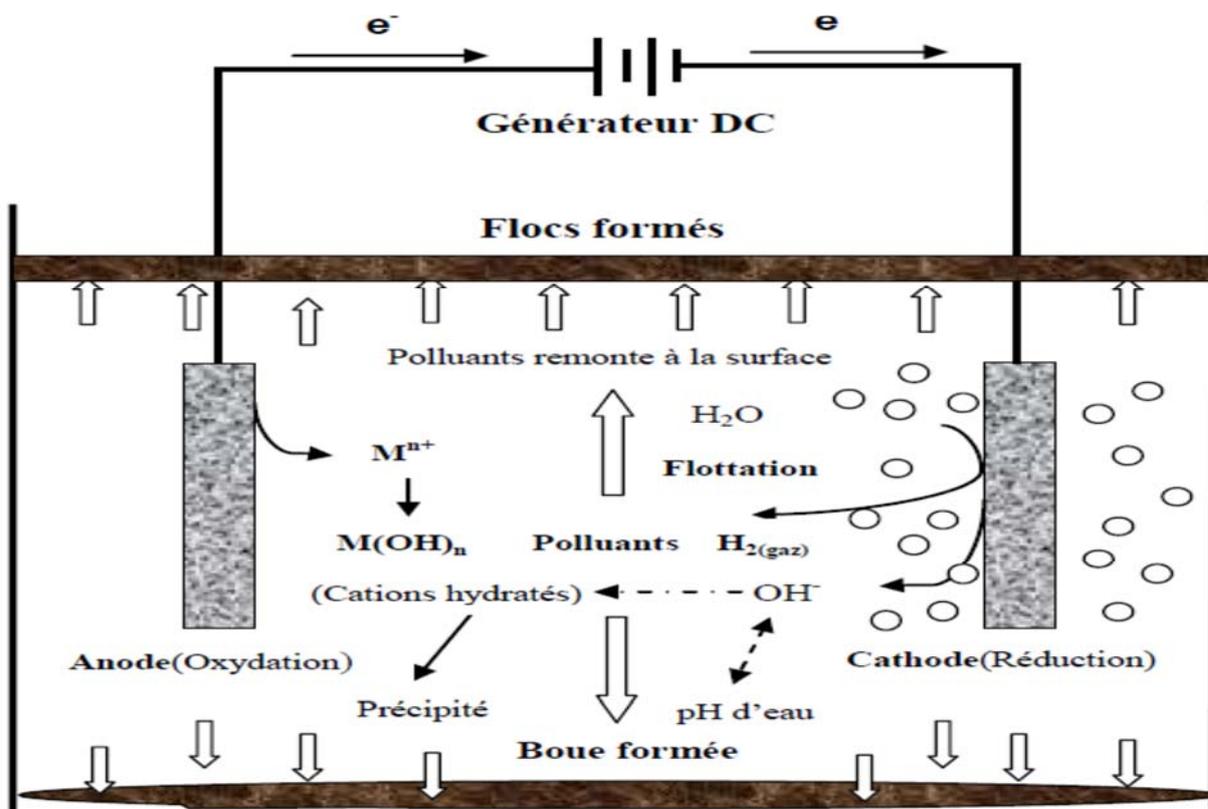


Figure 07 : Principe du procédé électrocoagulation avec des électrodes d'aluminium

II-2-2- Les électrodes utilisés et leurs réactions :

Dans le procédé d'EC, le coagulant est produit in situ par oxydation électrolytique d'une anode suite au passage d'un courant. Les métaux les plus couramment utilisés en électrocoagulation, sont l'aluminium et le fer puisqu'ils possèdent des formes ioniques trivalentes (Zongo, 2009). Elles peuvent se présenter sous forme de plaques, de boules, de sphères à lit fluidisé, de fil, de tige ou de tube (Bennajah, 2007).

Les principales réactions mises en jeu pour les électrodes en Aluminium sont:

- A l'anode :

Dans le cas d'une anode en aluminium, le cation métallique forme est Al^{3+} (Khemis et al., 2006 ; Essadki et al., 2008). 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.

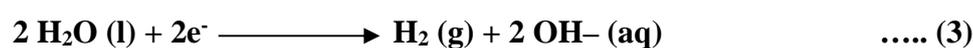
A la cathode :

La réduction de l'eau à la cathode conduit à la formation d'hydrogène dont le dégagement permet la flottation des particules floculées. Ces bulles empêchent ou réduisent la formation des dépôts sur la cathode et donc augmentent le rendement de l'EC.

Les demi-réactions données par la réduction de l'eau sont en fonction du pH du milieu. Sous conditions acides, la réduction de l'eau est la suivante :



Sous conditions basiques, elle prend la forme suivante :



Avec en fin de processus d' EC la formation d' hydroxyde d' Aluminium selon :



II-3- Principale loi régissant l'électrocoagulation :

Michael Faraday a été le premier, en 1832, à déterminer la relation entre la charge traversant le système et la quantité de substance oxydée ou réduite à une électrode.

La loi quantitative de Faraday est ordinairement utilisée pour calculer la quantité de matériel séparé d'une électrode par électrolyse.

Cette loi montre que la quantité d'ions métalliques dissous par oxydation anodique est directement proportionnelle à l'intensité imposée et à la durée d'électrolyse mais inversement proportionnelle à la valence de l'ion émis (Tir, 2009). Ottewill & Walsh expriment la seconde loi de Faraday relative à une électrode comme :

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

Avec :

m : masse du métal dissous ou de gaz formé (g).

I : intensité du courant imposé (A).

t : durée d'électrolyse (s).

M : poids moléculaire de l'élément considéré (g.mol).

F : constante de Faraday (96500 C.mol)

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

-La loi de Faraday s'applique à toutes les réactions électrochimiques mais la quantité dissoute dépend également du nombre d'électrodes et du mode de connexion, dans le mode bipolaire, pour (P) électrodes, le système sous tension est constitué de (P - 1) anode (Jiang et al., 2002) et la masse dissoute s'exprime par :

$$m = \frac{I \cdot t \cdot M}{n \cdot F} (P - 1) \quad \dots\dots\dots(6)$$

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.

$$R_{cathode} = \frac{M_{exp\ disoute}}{M_{the\ donnée\ par\ loi\ de\ Faraday}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(7)$$

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 peut être exprimé par :

$$R_{cathode} = \frac{M_{exp\ formée}}{M_{the\ donnée\ par\ loi\ de\ Faraday}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(8)$$

II-4- Connexions électriques :

Une cellule d'électrocoagulation typique est composée d'une anode et d'une cathode toutes deux reliées à une source d'alimentation, les électrodes sous forme de plaques sont placées verticalement les unes face aux autres. Cette configuration s'avère généralement peu efficace à long terme et ce pour diverses raisons:

- La cathode perd de son efficacité graduellement alors que l'anode se dissocie par oxydation, ce qui affaiblit inévitablement l'efficacité du traitement au fil du temps.
- Les surfaces des électrodes doivent être excessivement grandes pour assurer une solubilisation suffisante de métal dans la cellule d'électrocoagulation (**Bennajah, 2007**).

On distingue trois modes de connexion électrique :

Le mode monopolaire en série (**Bayramoglu et al., 2006**), le mode bipolaire série et le mode monopolaire en parallèle (**Golder et al., 2006, 2007**). 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.

II-4-1- Connexion monopolaire en parallèle : Dans ce mode de connexions (**figure 8-a**), la cellule d'EC consiste essentiellement en paires de plaques de métal conducteur placées entre deux électrodes parallèles et une source de courant continu. L'anode sacrificielle abaisse le potentiel de dissolution de l'anode et minimise la passivation de la cathode ; les électrodes sacrificielles peuvent être constituées des mêmes matériaux que l'anode ou de matières différentes.

II-4-2- Connexion monopolaire en série : Le dispositif d'électrocoagulation monopolaire en série (**figure 8-b**) montre que chaque paire d'électrodes sacrificielles est connectée intérieurement avec l'autre paire et il n'y a pas d'interconnexions avec les électrodes extérieures. Ce dispositif d'électrodes monopolaires avec cellules en séries est similaire électriquement à une simple cellule avec plusieurs électrodes et interconnexions. Dans le dispositif en série de cellules, il est nécessaire d'imposer une différence de potentiel élevée pour donner du courant au flux car les cellules connectées en séries ont une grande résistance. Le même courant peut cependant passer à travers toutes les cellules.

II-4-3- Connexion bipolaire en série : Dans ce cas, les électrodes sacrificielles sont placées entre deux électrodes parallèles sans connexion électrique à l'extérieur (**figure 8-c**). Seulement deux électrodes monopolaires sont connectées à la source électrique sans interconnexions entre les électrodes sacrificielles. Ce dispositif de cellules procure un simple montage, qui facilite une maintenance aisée durant l'utilisation. Quand le courant électrique est passé à travers les deux électrodes, le côté neutre de la plaque conductrice peut être transformé au côté

chargé, qui est en opposition de charge comparé au côté parallèle d'à côté. Dans ce cas les électrodes sacrificielles sont aussi montrées comme électrodes bipolaires.

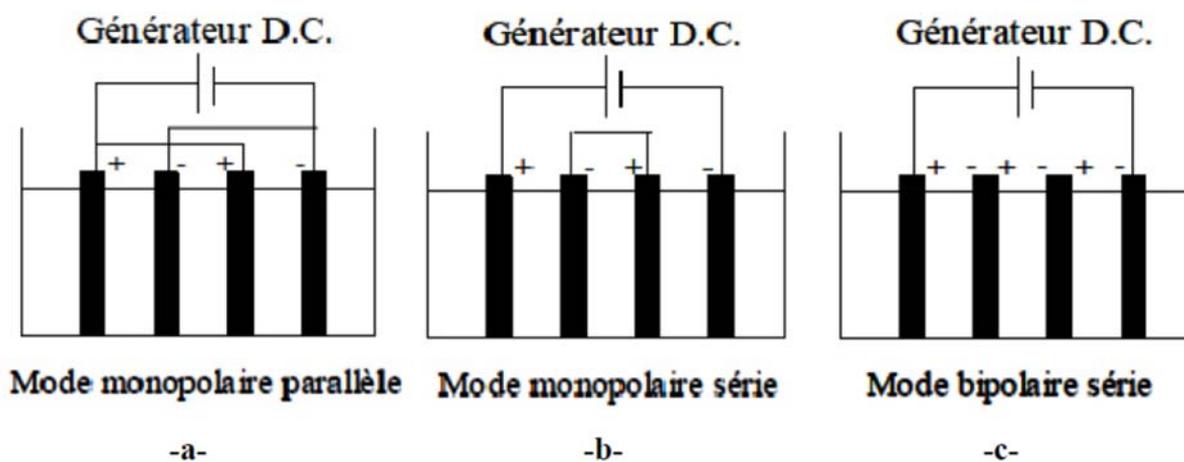


Figure 08 : Les différents modes de connections électriques pour une cellule d'électrocoagulation

Dans la plupart des installations industrielles, les électrodes sous forme de plaques sont placées verticalement les unes face aux autres. Cela s'explique par la simplicité de montage, de remplacement et de nettoyage. Trois possibilités s'offrent à l'utilisateur pour la circulation de l'effluent (Tir, 2009):

- **Système discontinu (batch)**: l'effluent est introduit dans le réacteur puis après l'électrocoagulation, la totalité du volume traité est évacué. Cependant, en cas d'agitation insuffisante, les hydroxydes de fer peuvent précipiter sur les électrodes et induire leur passivation (Olivier, 2003). Ce système est approprié pour de faibles volumes ayant une charge polluante élevée, de manière à mieux contrôler le temps de séjour.
- **Système continu** : l'effluent circule en continu avec un débit constant ou variable. Ce système est utilisé lorsque les volumes sont plus importants.
- **Système continu avec recirculation** : une partie de l'effluent déjà traité est réintroduit en tête de réacteur. La réintroduction de floes favorise la formation de nouveaux floes dans le réacteur.

II-5- Applications de l'électrocoagulation :

L'EC s'apparente fortement à la coagulation classique sans toutefois composer avec certains de ses inconvénients de conception et d'opération, ce qui ravive l'intérêt manifesté par nombre de chercheurs envers cette technologie. L'importance de l'EC s'est accrue ces dernières années du fait de son efficacité, son faible cout, généralement supérieure aux autres techniques, pour éliminer les différentes formes de pollution organique ou métallique (Drogui et al. 2007).

Les applications de l'EC sont diversifiées à différentes activités : agricoles, industrielles, traitement des eaux etc. Le **tableau 6**, fait référence à ces domaines d'activités.

Tableau 06 : Applications du procédé d'électrocoagulation

Domaine	Industries	Objectifs	Bibliographie
Industriels	<ul style="list-style-type: none"> - Centrales thermiques - Industries de transformation - Mines - Transformation des métaux - Fabrication de teinture 	<ul style="list-style-type: none"> - Métaux - Huiles et hydrocarbures - Détergents et autres - Composés organique - MES et DCO 	<p>(Ge et al., 2004. Ugurlu, 2004. Kobyas et al., 2003. Gurses et al., 2001. Larue et al., 2003. Biswas et lazarescu,1991)</p>
Transport	<ul style="list-style-type: none"> Transport naval Transport routier Entreposage 	<ul style="list-style-type: none"> -Huiles et hydrocarbures - DCO - MES 	<p>(Albert, 2006 ; Laridi et al., 2005).</p>
Agroalimentaire	<ul style="list-style-type: none"> - Transformation denourriture - Restauration 	<ul style="list-style-type: none"> -MES - DCO - Huiles et graisses 	<p>(Chen et al., 2000).</p>
	<ul style="list-style-type: none"> - Porcherie 	<ul style="list-style-type: none"> - Phosphore - MES - DCO 	<p>(Irmedez et al., 2006; Sakakibara et Nakajima, 2002).</p>
Municipal	<ul style="list-style-type: none"> - Eaux potables 	<ul style="list-style-type: none"> - Fluorures - Turbidité - Couleur - Désinfection 	<p>(Lin et al., 2005 . Holt et al., 2004. Mameri et al., 2001 ;Vik et al., 1984. Nikolaev et al.,1982).</p>
	<ul style="list-style-type: none"> - Eaux usées 	<ul style="list-style-type: none"> - MES - DCO - Phosphore 	<p>Yu et al., 2006 et2005 ; Pouet et Grasmick, 1995).</p>
	<ul style="list-style-type: none"> - Lixiviats de sites d'enfouissement ou de sites contaminés 	<ul style="list-style-type: none"> - DCO - Métaux. 	<p>(Koparal et Ogutveren, 2002).</p>

II-6- Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation :

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

Selon certains auteurs (Anane , 2011, Lemlikchi, 2012 , Tir, 2009) le procédé d'EC présente aussi bien des avantages que des inconvénients comparativement aux procédés physicochimiques.

II-6-1-Avantages:

- L'électrocoagulation nécessite un équipement simple avec un mode opératoire facile laissant suffisamment de latitude pour régler les problèmes de manipulation éventuelle.
- Le traitement d'une eau usée par EC donne une eau agréable au goût, claire, sans couleur et inodore.
- L'électrocoagulation évite l'utilisation de réactifs chimiques, de telle sorte qu'il n'y a aucun problème de neutralisation des réactifs en excès et aucune possibilité de pollution secondaire par les substances chimiques ajoutées comme dans le cas des traitements chimiques des eaux usées. Cette absence de réactif chimique rajouté permet d'assurer avec succès un traitement biologique réalisé en aval.
- Une production minimale des boues plus denses et moins hydrophiles rend leur séparation (décantation, flottation ou filtration) plus aisée et permet de réduire le temps et les coûts de traitement de ces boues.
- L'efficacité des procédés d'électrocoagulation 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 lentes et des quantités de coagulant plus élevées.
- Les bulles d'air produites peuvent entraîner les polluants à la surface de la solution à traiter ou ils peuvent être facilement concentrés, rassemblés et éliminés.
- La technique d'EC peu être utilisée dans les zones rurales où l'électricité n'est pas disponible par simple raccordement à un panneau solaire qui génère assez d'électricité pour le processus.
- L'électrocoagulation offre la possibilité de réduire remarquablement de nombreuses pollutions et composés dissous tel que la DCO, MES, les métaux lourds, les nitrites, les sulfures, les cyanures, les sulfites, les chromates et les ions fluorures.
- L'utilisation de l'électrocoagulation permet de réduire le temps de traitement ; ce procédé permet aussi un grand gain en compacité des installations et une possibilité d'automatisation.
- La technique de l'électrocoagulation peut être utilisée en association avec d'autres techniques de traitement.

II-6-2- Inconvénients :

- Les électrodes « sacrificielles » sont dissoutes dans l'eau usée par effet d'oxydation, ce qui nécessite le remplacement régulier de ces électrodes.
- Un film imperméable d'oxyde sur la cathode peut être formé, ce qui conduit à une perte d'efficacité de l'unité d'électrocoagulation.
- La technique EC nécessite que la suspension d'eau usée traitée ait une conductivité élevée.
- L'utilisation de l'électricité peut revenir chère voire difficile dans certaines régions.

PARTIE EXPERIMENTALE

Chapitre III

Matériels et Méthodes

III-1- Introduction :

Cette étude s'inscrit dans un contexte plus large visant à offrir une meilleure connaissance du traitement des rejets de textile par une méthode électrochimique " **électrocoagulation EC**", une solution révèle moins chère et plus efficace pour le traitement de ces rejets. Pour cela on a étudié l'efficacité de cette méthode sur une eau colorée synthétiquement par le « **Bleu Bemacron P-BG** » qui est largement utilisé en industrie textile, il entre dans la catégorie des colorants dispersifs. Pour optimiser les conditions de ce procédé, les essais d'EC 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, différentes densités de courant appliquées, 4 distances inter-électrodes et l'ajout d'un électrolyte support KCl à différents concentrations.

Dans ce chapitre, on a présenté le montage expérimental mis en œuvre au cours de cette étude et les méthodes analytiques et les performances du procédé d'élimination de colorant étudié.

III-2- Matériels :

a- Dispositif expérimental :

Les expériences d'EC ont été réalisées grâce au montage schématisé sur la **figure (9)** et la **photo (1)** dans les conditions opératoires choisies. Un litre de solution colorée est introduit dans le réacteur en verre dans lequel est plongé deux électrodes solubles d'aluminium de dimensions approximativement identiques: Longueur de 15 cm et une largeur de 2,5 cm donnant une surface totale de 37,5cm² dont la surface active est de 26 cm². La tension aux bornes des électrodes est assurée par un potentiostat (**Consort E143**), l'agitation et l'homogénéisation de la solution est assurée par un agitateur magnétique (**Stuart CD 162**) à 500 tours par minute pendant 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**) (**photo2 a**) et un pH mètre (**inoLab 720**) (**photo2b**).

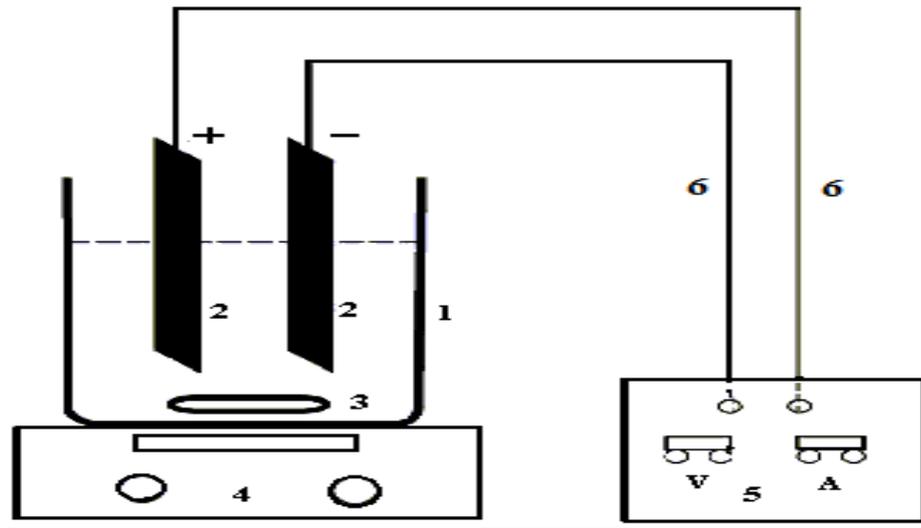


Figure 09: Schéma du dispositif expérimental d'électrocoagulation utilisé

- (1) Réacteur en verre, (2) électrodes en Aluminium, (3) Barreau magnétique,
 (4) agitateur magnétique, (5) source de tension (V) et courant (A), (6) fils électriques



Photo 01: Installation d'électrocoagulation utilisée



(a) conductimètre



(b) pH mètre

Photo 02

En fin de chaque essai d'EC désiré, l'application de potentiel est suspendue et l'échantillon est décanté pendant 30min. Ce temps est inspiré de la coagulation-chimique (Jar-Test), il permet

aux particules floculées de bien sédimenter ou éventuellement floculées comme il est courant dans le procédé d'EC.

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

Le calcul du taux d'abattement d'un paramètre donné X, exprimé en pourcentage TX(%), est basé sur l'équation suivante **eq 1**:

$$TX (\%) = [(C_iX - C_fX) / C_iX] \times 100 \dots \dots (1)$$

Où, C_iX et C_fX sont, respectivement, les mesures d'un paramètre donné avant et après ce traitement.

a- Solution étudiée:

Les expériences ont été réalisées sur des solutions synthétiques typiques d'un rejet liquide d'industrie de textile. La solution à traiter (**photo 03**) a été synthétisée en dissolvant le colorant dans l'eau de robinet, à une concentration de $C_0 = 50\text{mg/L}$, la masse du colorant a été pesée à l'aide d'une balance électronique (**KERN ALS 220-4N**) présentée par **la photo 04**.



Photo 03 : La solution à traiter



Photo 04 : Balance électronique (KERN ALS 220-4N)

b- Colorant synthétique employé:

Le colorant utilisé est le **Bleu bemacron P-BG (photo 05)** largement utilisé en industrie textile entre dans la catégorie des colorants dispersifs. Il est utilisé pour la teinture de polyester.



Photo 05 : Le colorant dispersif Bleu BEMACRON

c- Les électrodes utilisées :

Le métal des électrodes peut être obtenu par récupération des déchets d'aluminium, ce qui rend leur coût supportable pour un procédé de dépollution. Les deux plaques parallèles et rectangulaires d'aluminium (**photo 06**) 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 essai d'EC dans le but de les examiner, et de les nettoyer pour éliminer les dépôts des polluants pouvant former une couche résistante sur leur surface.



Photo 06: Vue des électrodes d'aluminium

III-3- Techniques d'analyse :

a- La spectrométrie 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 est proportionnelle à la concentration du composé coloré recherché comme le montre la loi de Beer – Lambert (eq 2):

$$A = \log I / I_0 = \epsilon.l.C \quad (\text{Eq 2})$$

Avec :

A: Absorbance (ou densité optique D.O)

I_0 : intensité du faisceau de lumière monochromatique de longueur d'onde λ à l'entrée de la cellule de référence (la cuve) , et à la sortie de la cellule de référence.

I: intensité du faisceau émergeant de la cellule de référence

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

ϵ : coefficient d'extinction molaire (l/mg.cm ou l/mole.cm).

C : concentration de l'élément recherché (mg/l ou mole/l).

Dans ce travail on a utilisé un Spectrophotomètre (SHIMADZU UV-1601PC) (photo..), 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 du bleu bemacon P BG a été obtenu par un balayage spectral entre 200 et 800 nm, d'une solution de colorant à 50 mg.L⁻¹, ce spectre montre bien la longueur d'onde d'absorbance maximale (λ_{max}) (voire le chapitre suivant).

L'absorbance est proportionnelle à la concentration pour une épaisseur donnée. La linéarité de la loi de Beer-Lambert 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 $A = f(C)$.



Photo 07: Spectrophotomètre SHIMADZU UV-1601PC

b- Mesure de la turbidité :

La turbidité est l'effet optique qui traduit le caractère trouble de l'eau. Elle est due à la présence de diverses matières en suspension finement divisées telles que des particules de matières organiques ou minérales. Ces particules ont une taille variant entre 10 nm et 100 μm . On a utilisé le turbidimètre (**Phywe System GMBH 2100N, Germany**) (photo..).

L'unité utilisée pour la mesure de turbidité est (NTU) « Nephelometric Turbidity Unit » Unité néphélométrique de turbidité.



Photo 08: Le turbidimètre (Phywe System GMBH 2100N, Germany)

Chapitre IV

Résultats et Discussions

IV-1- Introduction:

Ce chapitre rassemble tous les résultats des expériences d'EC sur l'eau colorée synthétiquement par le **Bleu Bemacron P-BG** (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 ($\sim 8,11$) et à température ambiante.

IV-2- Paramètres étudiés :

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

- La densité de courant imposée (i en mA/cm²) et le temps d'électrolyse (t en min)
- La concentration en colorant (C en mg/l) (la dilution des solutions synthétisées).
- La distance inter- électrodes (d en cm).
- La conductivité ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) (l'addition d'électrolyte support KCl).

Tous les essais d'EC sont effectués à température ambiante ($19 \pm 2^\circ\text{C}$) et à pH libre des solutions préparées (pH $\sim 8,11$).

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

Le spectre d'absorption en UV-visible du bleu bemacron P-BG (**Figure 10**) a été obtenu par un balayage spectral, entre 200 et 800 nm, d'une solution de colorant à 50 mg/L. Ce spectre montre bien la longueur d'onde d'absorbance maximale dans le visible (λ_{max}) 535 nm et on a vérifié la validité de la loi de Beer-Lamber.

Par ailleurs, les analyses par spectroscopie UV visible (**Figure 10**) montre l'existence d'une autre bande d'absorbance UV à la longueur d'onde maximale $\lambda_{\text{max}} = 290\text{nm}$ 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**).

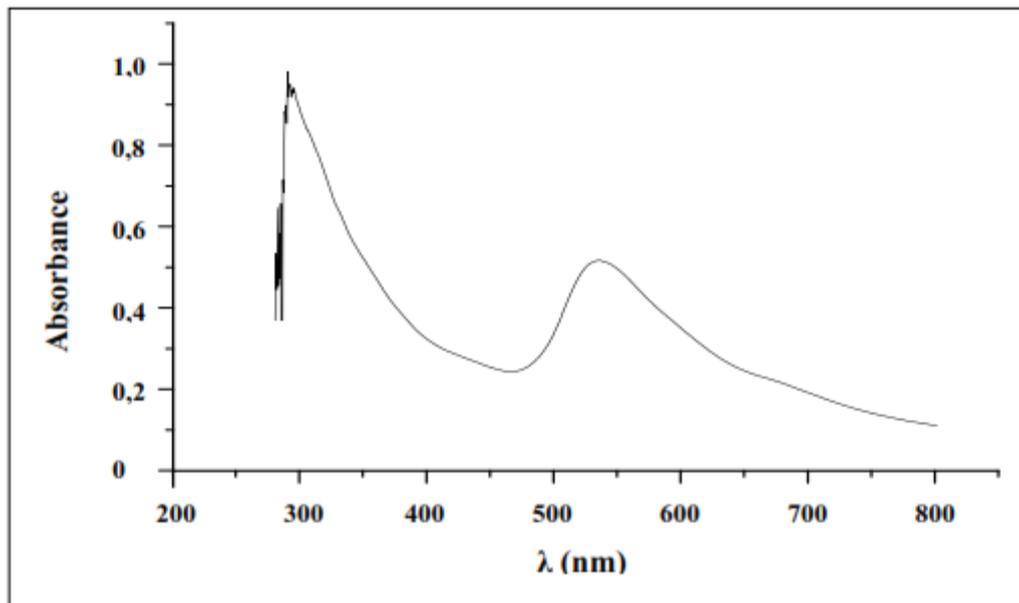


Figure 10 : Spectre d'absorption en UV-visible de colorant Bleu Bemacron P-BG
($C_0=50\text{mg.L}^{-1}$, pH initial = 8, 11)

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

Tableau 07 : les valeurs des paramètres physico-chimiques principaux caractérisant la solution préparée

Volume de solution synthétique	C0 (mg/l)	pH Initial	C.E initiale ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	Turbidité initiale (NTU)	Salinité initiale (mg/l)	Absorbance UV -visible	
						290 nm	535 nm
01 litre	50	8,11	1021	450	0,4	0,9858	0,5222

IV-4- La courbe d'étalonnage $A = f(C)$

Pour vérifier la loi de Beer-Lambert (eq 2), nous avons tracé la courbe d'étalonnage pour le colorant utilisé afin de déterminer les domaines de concentration pour les quels la loi de Beer-Lambert est respectés (obtention d'une droite).

Tableau 08 : Valeurs d'absorbance = $f(C)$ à $\lambda_{\text{max}} = 535 \text{ nm}$ pour le Bleu Bemacron P-BG

C (mg/l)	0	10	20	30	40	50
A	0	0,142	0,246	0,3556	0,4511	0,5222

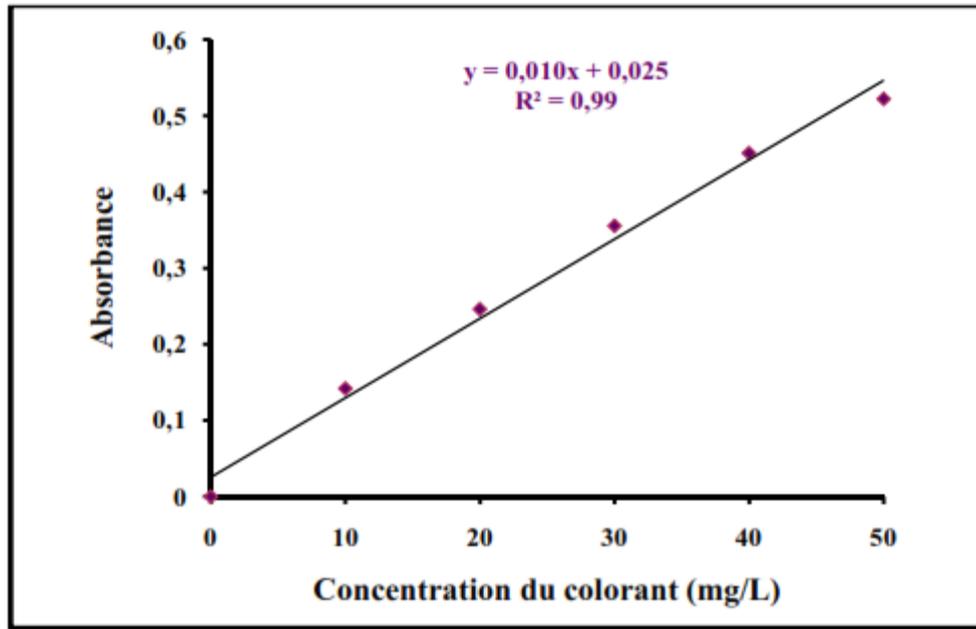


Figure 11: Courbe d'étalonnage du spectrophotomètre avec le Bleu Bemacron P-BG

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

IV-5- 1- Influence de la densité de courant et du temps d'électrolyse sur la décoloration :

La densité de courant est jugée comme un paramètre essentiel qui influence l'efficacité du traitement d'EC (Kim et al, 2002, Bennajeh, 2007, Naje et al., 2015) spécifiquement pour la cinétique de décoloration. Elle peut influencer la vitesse de réaction dans le réacteur pendant la dissolution anodique et permet de déterminer la dose de coagulant produite aux électrodes et d'ajuster le taux et la taille des bulles produites dans le réacteur et par conséquent affecte la croissance des floes (Khandegar and Saroha, 2013). Le temps de réaction influence l'efficacité du traitement électrolytique. 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. L'augmentation du temps d'EC implique la croissance des floes d'hydroxyde d'aluminium et par conséquent l'amélioration du taux de décoloration des eaux. Lorsque la densité de courant augmente, le temps de traitement diminue en raison de la forte dissolution des électrodes. Il en résulte donc davantage de déstabilisation des particules du polluant ; par ailleurs le taux de production des bulles d'hydrogène augmente et leur taille diminue lorsque la densité de courant augmente. Tous ces effets sont bénéfiques pour une élimination efficace du polluant par flottation (Mollah, 2004; Lemlikchi, 2012).

Pour cette étude, l'influence de la densité de courant a été étudiée pour les valeurs suivantes : 6,15, 6,92, 7,53 et 7,84 mA/cm² en fonction de temps variable de 15 à 60 minutes à pH libre de l'eau (8,11), à turbidité initiale de 450 NTU, à conductivité de 1021 μS.cm⁻¹ et à température

d'eau $\sim 20^{\circ}\text{C}$. La **figure 12-a** représente les résultats expérimentaux de variation des efficacités de décoloration en fonction du temps pour différentes densités de courant. Ces résultats ont été illustrés par le spectre d'absorption en UV-visible de colorant de différentes solutions étudiées (**figure 12-b**). Les résultats montrent que la décoloration augmente avec l'augmentation de la densité de courant. Pour le temps optimal d'électrolyse 45 min ; décoloration importante environ de 95% et une réduction de la turbidité à 98%. L'efficacité d'EC est montrée aussi par la diminution de la conductivité électrique **Figure 13** cela peut s'expliquer par l'abatement de minéraux dans la solution traitée.

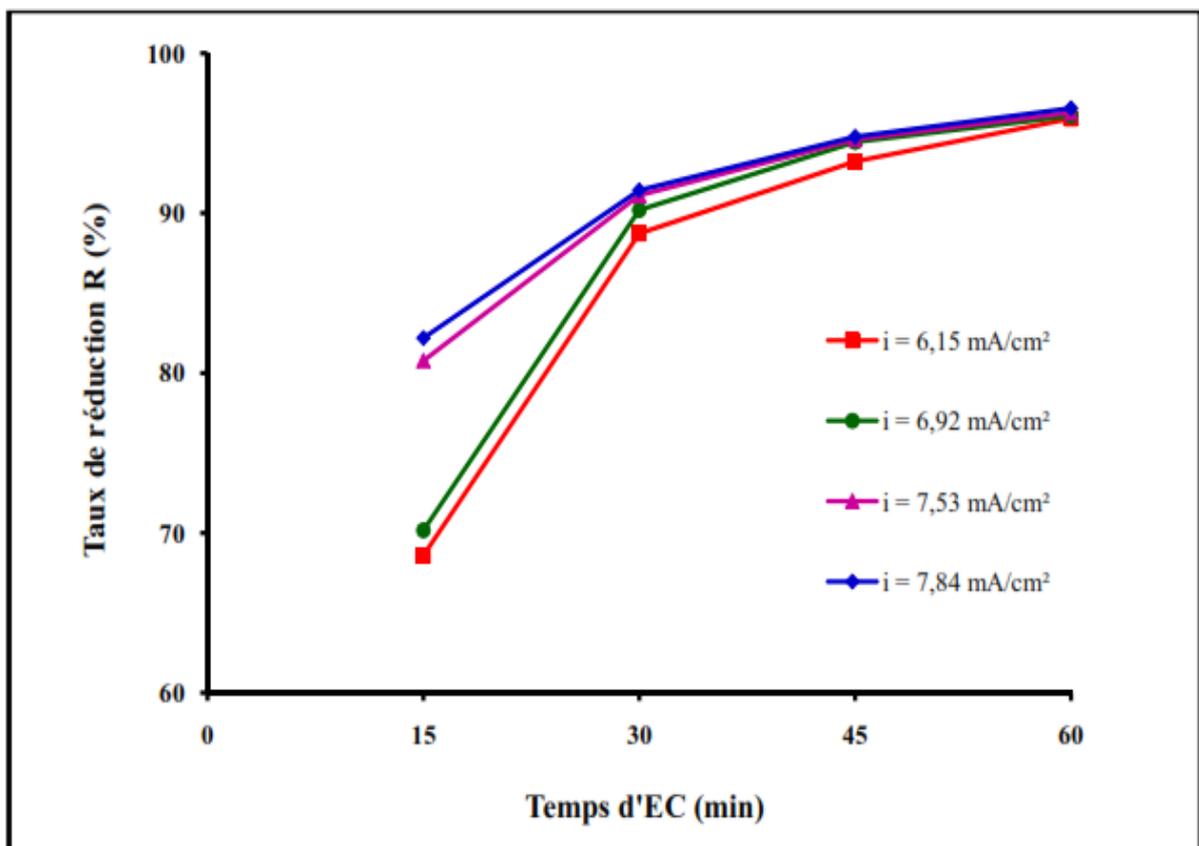


Figure 12-a : Effet de la densité de courant sur la réduction de la couleur
($C_0=50\text{mg.L}^{-1}$, pH initial = 8.11, $d=1\text{cm}$)

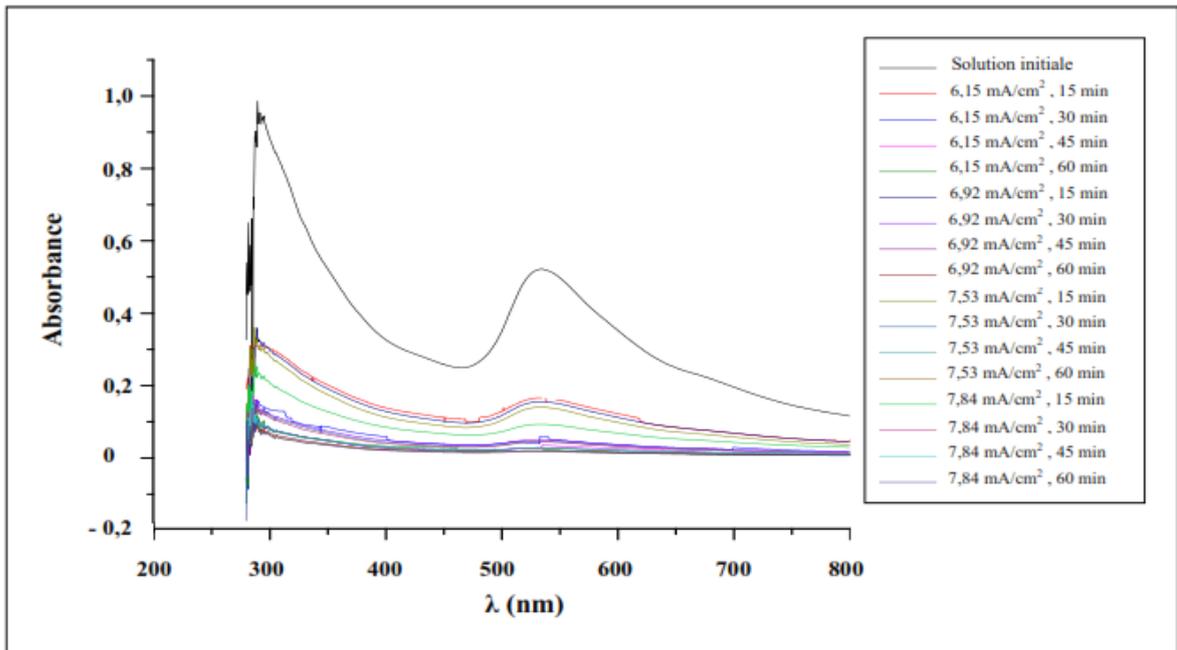


Figure 12-b: Spectres d'absorption en UV-visible de colorant Bleu Bemacron P-BG des différentes solutions traitées

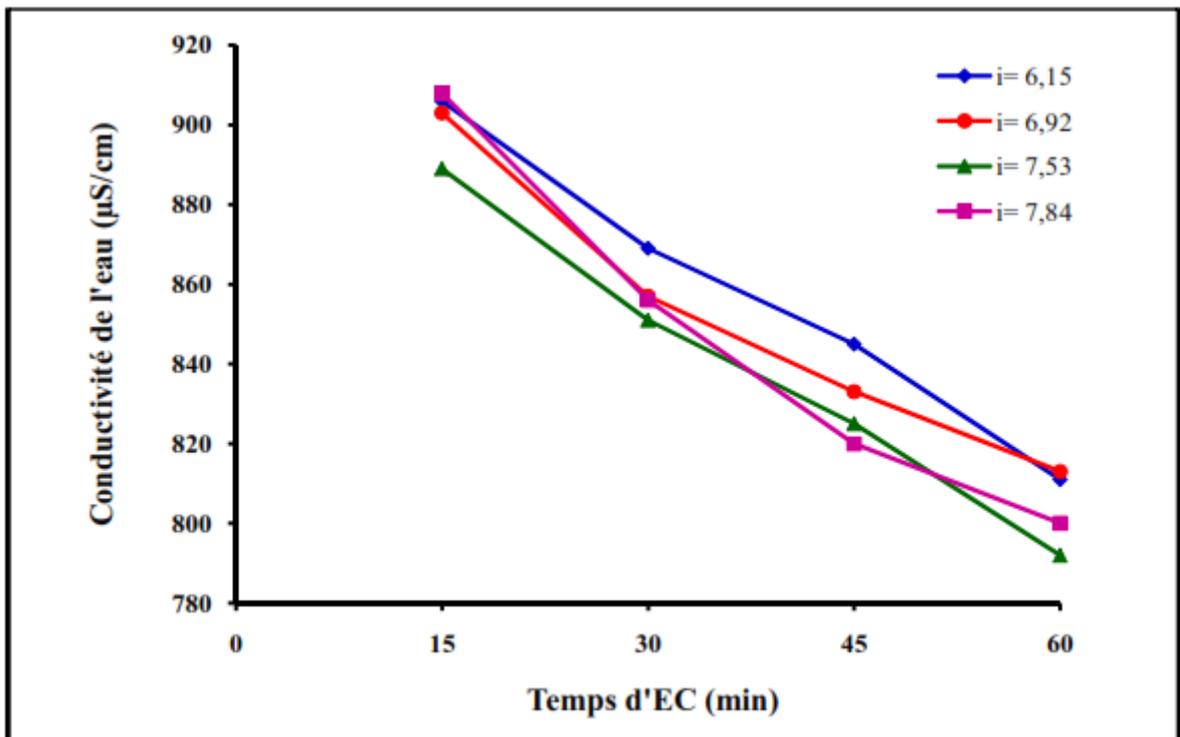


Figure 13 : Conductivités des différentes solutions traitées
($C_0=50\text{mg.L}^{-1}$ pH initial = 8.11, $d=1\text{cm}$)

En électrocoagulation, une légère augmentation du pH a été observée avec le temps pour une densité constante (**figure 14**), cette croissance de pH est attribuée à la formation d'hydrogène gazeux et la production d'ions OH^- à la cathode (**Chen et al., 2000, Kumar et al., 2004**).

De l'autre coté une diminution du pH en fonction de la densité de courant a été observée (**figure 15**), cela peut être attribuée à la quantité d'aluminium dissous et à la formation des floes d'hydroxydes métalliques. Selon le diagramme de solubilité de l'aluminium; les valeurs de pH (entre 7 et 8) correspondent à la formation maximale des floes d'hydroxyde d'aluminium insolubles amorphes $\text{Al}(\text{OH})_3$ (**Bayramoglu et al., 2004**) ce qui implique les meilleurs rendements de décoloration.

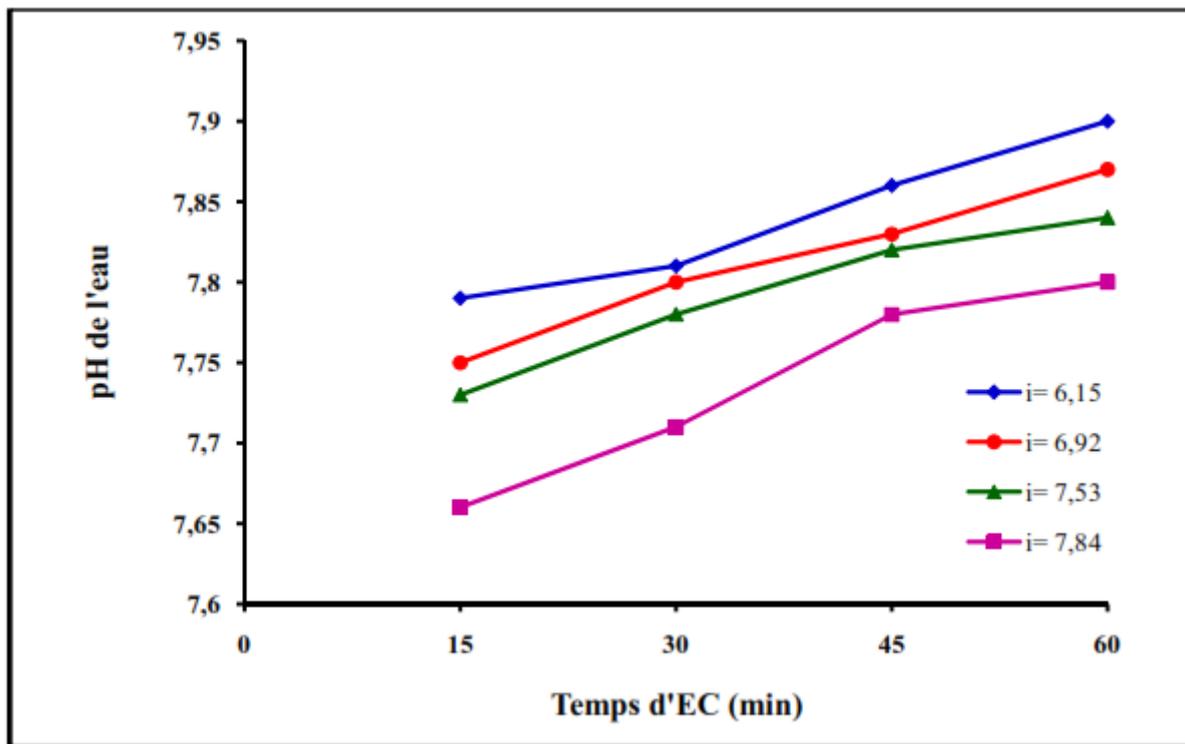


Figure 14 : Evolution de pH des solutions traitées en fonction du temps d'EC
($C_0=50\text{mg.L}^{-1}$, pH initial = 8.11, $d=1\text{ cm}$)

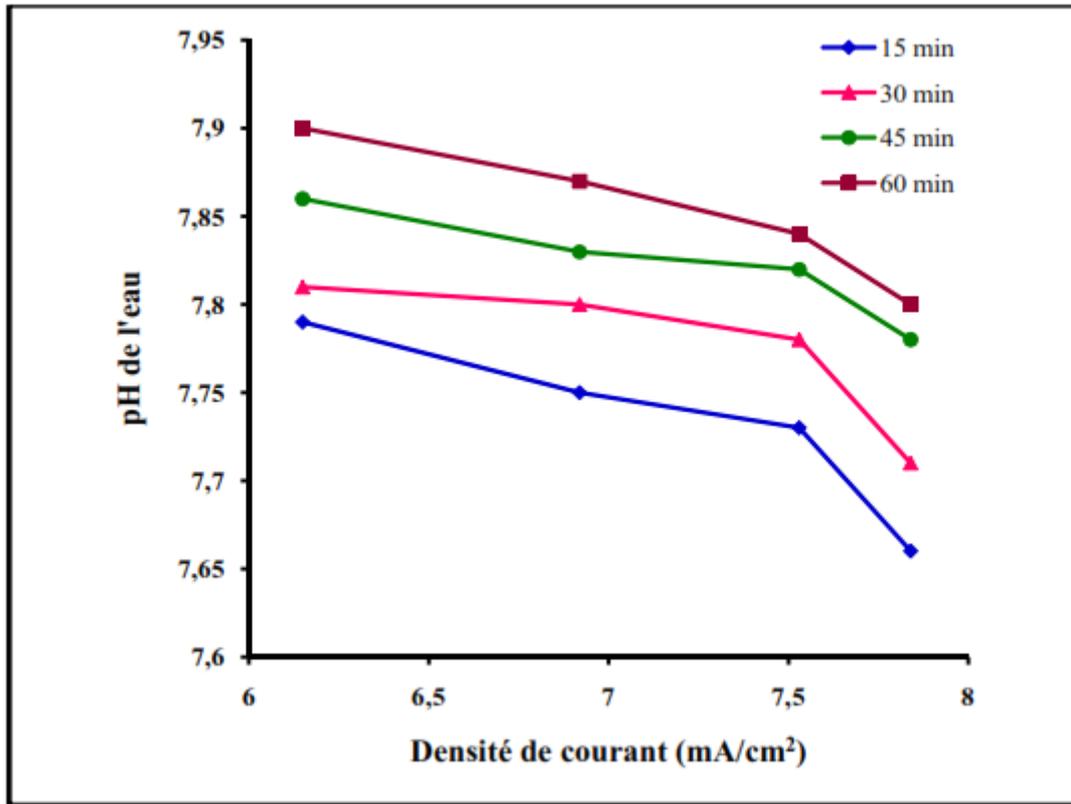


Figure 15: Evolution de pH des solutions traitées en fonction de la densité de courant ($C_0=50\text{mg.L}^{-1}$, pH initial = 8.11, $d=1\text{cm}$).

IV-5- 2- Effet de concentration initiale sur la réduction de la coloration :

En pratique, les eaux usées d'industrie textile ont des concentrations de colorant différentes. Il est donc crucial d'étudier l'effet de la concentration initiale du colorant sur le processus d'électrocoagulation. Par conséquent, différentes concentrations de colorant, dans la gamme de 10 à 50mg.l^{-1} , ont été testées dans les conditions optimales : (la densité de courant i égale à $7,53\text{mA/cm}^2$ et un temps d'EC $t=45\text{min}$). Les résultats (**figure 16**) montrent que l'augmentation de la concentration initiale de colorant provoque une diminution de l'efficacité de décoloration. Ceci est probablement dû à la formation insuffisante des complexes d'hydroxyde d'aluminium pour coaguler l'excès des molécules de colorant présent à des concentrations élevées. (Mollah 2004, Lemlikchi, 2012, Kim et al ; 2002, Ögütveren et al ; 2008).

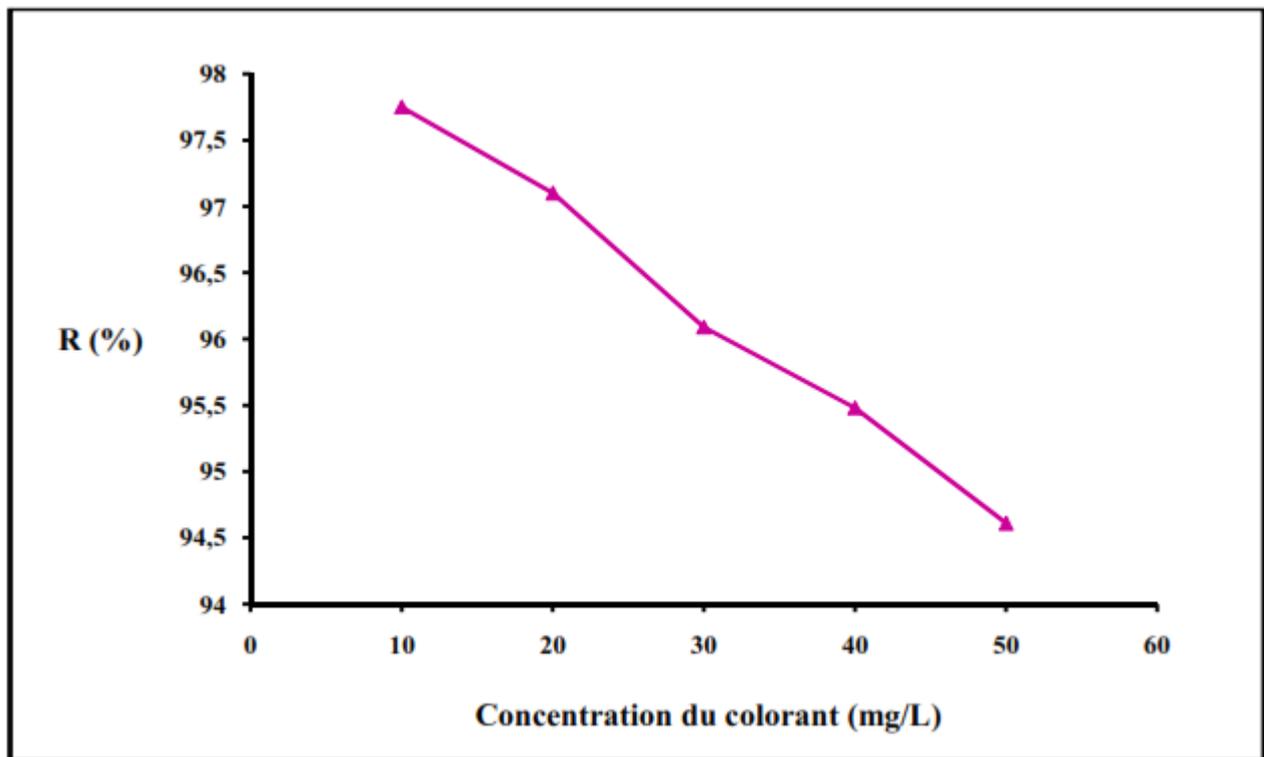


Figure 16 : Effet de concentration initiale du colorant sur la réduction de la coloration
(Temps d'EC $t=45$ min, $d=1$ cm)

IV-5- 3- Effet de la distance inter-électrode (d) :

La distance inter-électrode est aussi un paramètre important à déterminer puisqu'il définit le volume relatif d'électrolyte par unité de surface de l'électrode. Plusieurs chercheurs ont étudié l'impact de la distance inter-électrode sur l'efficacité de l'élimination des polluants par EC. Cette distance dépend de la nature des polluants, de la structure des électrodes. Dans cette étude, l'impact de (d) a été étudié à 4 distances différentes; 1, 2, 3 et 4cm. Une diminution de l'efficacité du traitement a été observée lorsque l'espace entre les électrodes a été augmenté (Naje et al, 2015, Modirshahla et al., 2008, kim et al., 2002), d'après la **figure 17** on a remarqué que le meilleur rendement a été d'environ 95% à $d=1$ cm. Les interactions moléculaires entre les ions et les polymères hydroxydes deviennent faibles lorsque la distance dépasse 1 cm, ce qui entraîne une baisse de l'efficacité du traitement. Cette décroissance d'efficacité se produit probablement parce que les effets électrostatiques dépendent de la distance inter-électrode, donc, lorsque cette distance augmente, le mouvement des ions produits serait plus lent et ils auront moins de possibilités d'agréger et de produire des floccs d'hydroxyde d'aluminium ce qui va affecter négativement la cinétique de décoloration.

En plus, le dégagement de l'hydrogène H_2 à la cathode à la faible distance ($d=1$ cm) permet le phénomène de flottation d'extraire les floes (**photo 9**) (**Annane, 2008**) ce qui va améliorer l'efficacité du traitement.

Tout fois travailler avec de très faibles distances inter-électrode, la densité de courant devient très élevée et pourrait causer des courts circuits (**Mameri et al ; 1998**). Il se trouve ainsi que la distance inter-électrode (d) dans notre étude soit de 1cm, cette distance est celle qui est généralement recommandée par plusieurs chercheurs (**Naje et al, 2015, kim et al, 2002, Annane, 2008**).

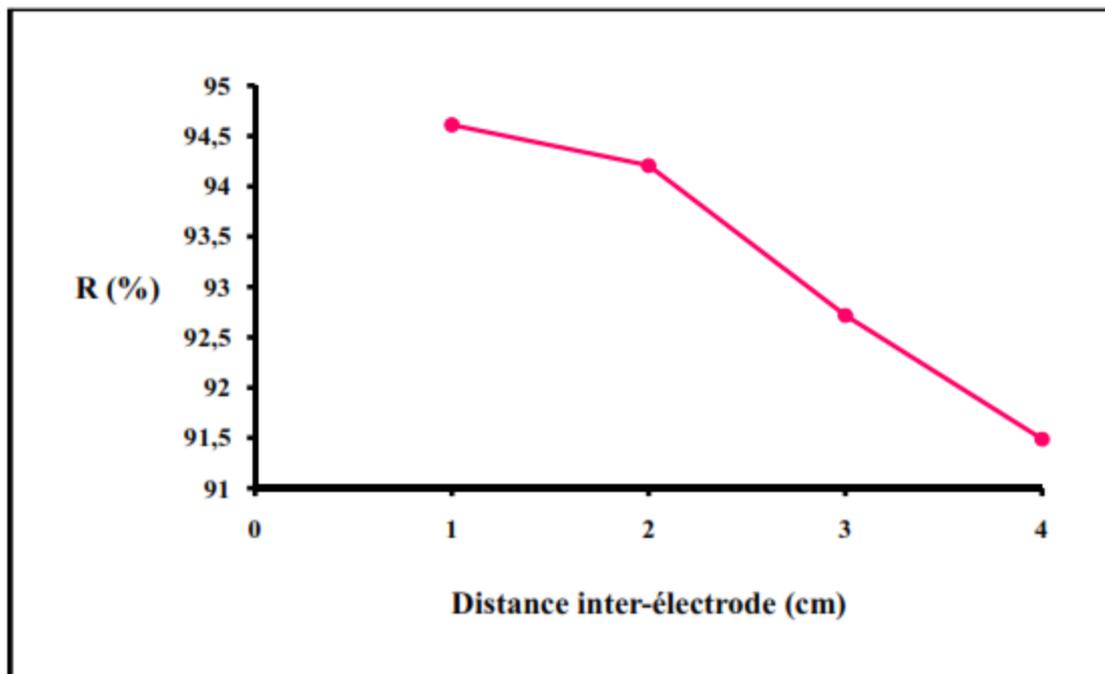


Figure 17: Effet de concentration initiale du colorant sur la réduction de la coloration

($C_0=50\text{mg.L}^{-1}$, pH initial = 8,11, Temps d'EC $t= 45\text{min}$)

L'efficacité d'EC est montrée aussi par la diminution de la conductivité électrique avec la diminution de (d) comme il est illustré dans **la figure 18** ($\sigma = 825 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à $d=1\text{cm}$ et $\sigma = 863 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à $d=4\text{cm}$) ce résultat implique qu'il y'a un abattement des minéraux d'eau traitée par EC.

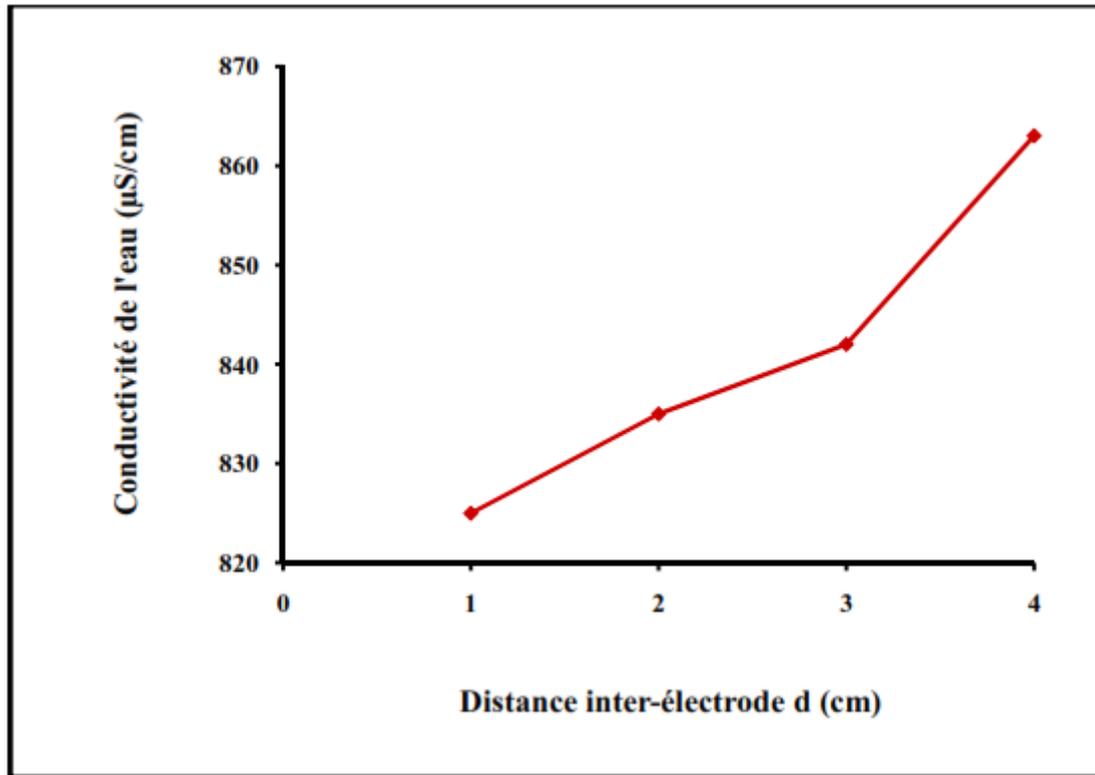


Figure 18 : Conductivités des différentes solutions traitées

IV-5- 4- Effet d'électrolyte support et sa concertation sur la réduction de la coloration :

La conductivité électrique du milieu permet le bon transfert ionique dans la solution à traiter, ce qui implique qu'elle doit être appropriée et assez élevée pour permettre un bon passage de courant (Naje et al., 2015). L'augmentation de la conductivité par l'ajout d'électrolyse support (KCl) est l'un des principaux paramètres influençant le traitement des eaux par EC (Jiang et al ; 2002, Naje et al, 2015) pour réduire la tension U entre les électrodes à une densité de courant constante, en raison de la diminution de la résistance de l'eau colorée.

Le choix du chlorure de potassium découle du fait que les ions chlorures réduisent les effets indésirables d'autres anions. Afin d'étudier l'influence de la conductivité de solution sur le rendement de décoloration nous avons effectué une série d'essais avec des concentrations différentes de KCl allant de 100mg/l à 500mg/l. Le suivi de l'évolution de la réduction de la coloration en fonction des différentes concentrations en KCl est illustré sur la **figure 19**.

D'après les résultats obtenus on a constaté que l'ajout d'électrolyte support a un effet négligeable sur l'efficacité de décoloration, cela peut s'expliquer par le fait que la solution à traiter est conductrice ($\sigma = 1021 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) et n'a pas besoin d'augmenter sa conductivité. En plus la conductivité a été très élevée après traitement **tableau 9**. Ce qui peut causer un court circuit.

Tableau 09 : Conductivité de l'eau avant et après le traitement

Concentration KCl mg/l	Conductivité avant EC $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	Conductivité après EC $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$
100	1144	1057
250	1401	1287
500	1858	1777

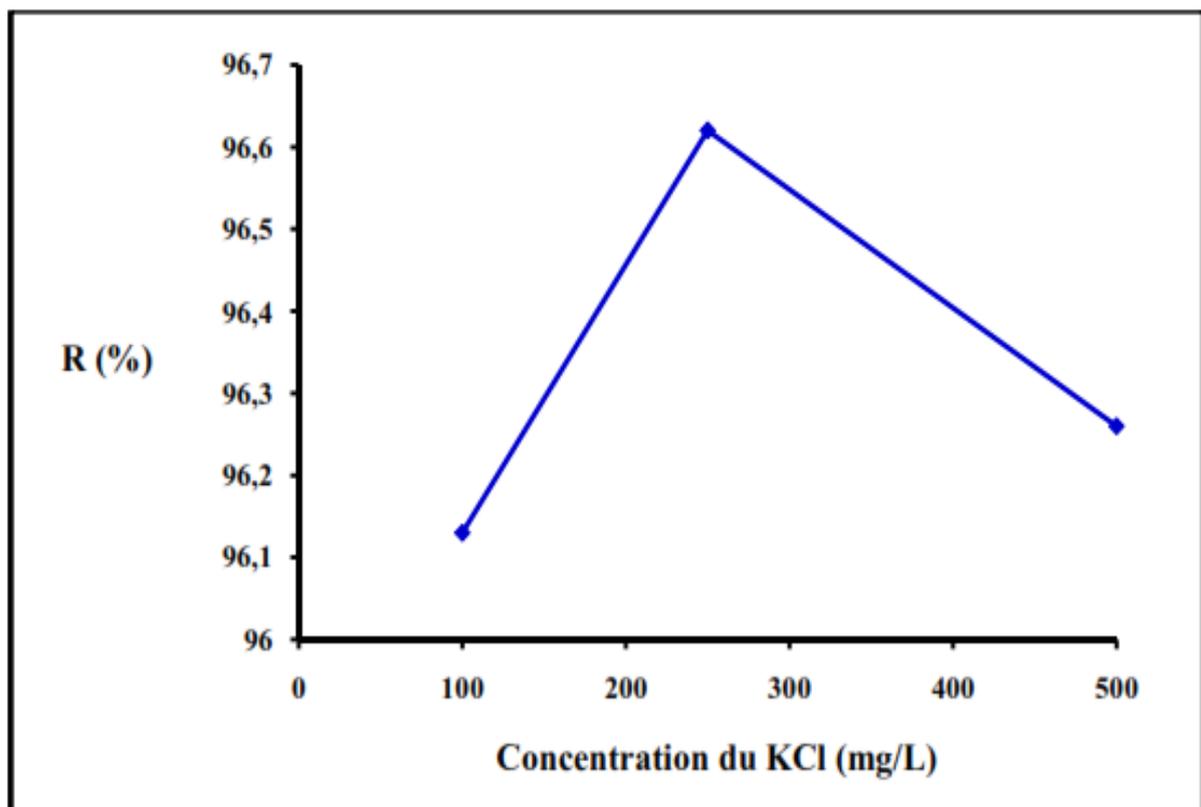


Figure 19 : Effet d'électrolyse support et sa concentration sur la réduction de la coloration



L'échantillon d'eau colorée avant traitement d'EC



L'échantillon d'eau pendant l'EC (coagulation)



Bulles d' H_2

Phénomène de Flottation



La boue flottante

La boue sédimentée



L'échantillon d'eau après traitement (décolorée)

Photo 09 : Différents phénomènes d'EC de l'eau colorée

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

Les colorants de l'industrie textile, sont des sources dramatiques de pollution, d'eutrophisation et de perturbation non esthétique dans la vie aquatique et par conséquent présente un danger potentiel de bioaccumulation qui peut affecter les espèces animales et végétales y compris l'homme par transport à travers la chaîne alimentaire. Il est devenu, alors impératif de réduire voire éliminer ces colorants des effluents liquides par des techniques efficaces et moins coûteuses et non polluantes comme l'électrocoagulation (EC).

L'électrocoagulation est une technique attirante et convenable pour le traitement des différents effluents en raison de ses nombreux avantages tels que sa compatibilité environnementale, son adaptabilité, son efficacité et son faible coût (**Bayramoglu et al., 2004**). Ce processus est caractérisé par un matériel simple, facile à réaliser et ne nécessitant pas l'ajout de produits chimiques. Dans l'électrocoagulation, le coagulant est libéré dans la solution in situ, en utilisant la dissolution d'une anode sacrificielle. Lors de l'alimentation des électrodes en courant, il y a simultanément une dissolution du métal de l'anode et un dégagement du gaz d'hydrogène au voisinage de la cathode. Les métaux aluminium et fer sont généralement utilisés comme anode. Leur dissolution conduit à la formation des hydroxydes métalliques, oxy-hydroxydes métalliques et des hydroxydes polymériques. Ces composés ont généralement une meilleure efficacité de coagulation que celle des produits chimiques utilisés dans les techniques conventionnelles. Ils peuvent déstabiliser les colloïdes en suspension, en adsorbant, neutralisant ou précipitant les espèces polluantes dissoutes dans le liquide, pour les transformer finalement en floccs facilement extractibles par précipitation, filtration ou flottation. Dans cette étude nous avons réalisé l'EC en mode batch pour la décoloration des eaux colorées par un colorant dispersé de textile (des solutions synthétiques typiques d'un rejet liquide d'une société de textile). Pour optimiser les conditions de ce procédé, les essais d'EC sont menés dans un réacteur de laboratoire de 1 litre en utilisant des plaques d'aluminium identiques ($S=37,5 \text{ cm}^2$, dont la surface active est de 26 cm^2) avec des différents temps du traitement, différentes densités de courant appliquées imposées par une source de courant continu, 4 distances inter-électrodes (d) et l'ajout d'un électrolyte support KCl à différentes concentrations.

Les résultats obtenus montrent qu'il y a une décoloration importante environ de 95% et une réduction de la turbidité à 98% dans les conditions optimales ($t=45\text{min}$, $d=1\text{cm}$, $i=7,53\text{mA/cm}^2$) et sans besoin à l'ajout d'électrolyte support car la solution est lui-même conductrice, en plus l'EC est sollicité dans le traitement des solutions préparées à pH libre sans l'utilisation des réactifs chimiques, d'une autre façon l'EC est une méthode économique et elle peut être appliquée plus que 6 fois sans perte d'efficacité des électrodes avec un volume minimal de boue ($90 \text{ cm}^3/\text{L}$) et un faible coût.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

A

- Albert R.M. (2006).** Traitement du lisier de porc par électroépuration. Mémoire de maîtrise sciences appliquées. École Polytechnique de Montréal. Montréal, Canada.
- Ali H. (2010).** Biodegradation of Synthetic Dye, A Review, Water, Air and Soil Pollution, 213, p 251–273.
- Aliouche S. (2007).** Etude de l'élimination d'un colorant par différentes méthodes photochimiques en milieu aqueux. Mémoire de Magister. Université Mentouri - Constantine, Algérie, 110 p.
- Annane O. (2011).** Amélioration de la technique de défluoruration par le nouveau procédé d'électrocoagulation bipolaire. Mémoire de Magister. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, Algérie, 89 p.

B

- Barclay S and Buckley C.(2000).** Waste minimization guide for the textile industry, a step towards cleaner production. The pollution research group, Water research Commission, volume 1.
- Bayramoglu M., Kobya M., Can O.T and Sozbir M. (2004).** Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. Sep. Purif. Technol, 37, p 117-125.
- Bayramoglu M., Kobya M., Eyvaz M and Senturk E. (2006).** Technical and economic analysis of electrocoagulation for the treatment of poultry slaughterhouse wastewater, Sep. Purif. Technol., 51, p 404-408.
- Bebeselea A., Pop A., Orha C., Danielescu C., Manea F and Burtica G. (2006).** Electrocoagulation application on organic load and suspended solids removal from wastewater, The 13th Symposium on Analytical and Environmental Problems, Szeged, 25 September 2006.
- 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, 79 p.
- 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.
- 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, 56 p.

Références bibliographiques

Bennajah M. (2007). Traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation / électroflotation en réacteur airlift. Thèse de doctorat .Institut national polytechnique de Toulouse, France, 197 p.

Biswas N and Lazarescu G. (1991). Removal of oil emulsions using electrocoagulation. The International Journal of Environmental Studies 38 (1), p 65-75.

Boulal A et Bouachema M. (2014). Etude cinétique de la dégradation d'un colorant par oxydation. Mémoire de Master. Université de Saida, Algérie, 56 p.

Bousnoubra I. (2010). Etude comparative de la photodegradation du vert de méthyle par divers procédés photochimiques en milieu aqueux. Mémoire Magister Université Mentouri Constantine, Algérie, 103p.

C

Casetta M. (2000). Procédé de teinture du polyester par les colorants dispersés : étude physico-chimique et modélisation. Université des sciences et technologies de LILLE I. France, thèse de doctorat, 244 p.

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, 210 p.

Chen X., Chen G and Yue P.L. (2000). Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. Sep. Purif. Technol., 19, p 65-76.

D

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

E

Essadki A.H., Bennajah M., Gourich B., Vial C., Azzi M and Delmas H. (2008). Electrocoagulation/electroflotation 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.

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

- Ge J., Qu J., Lei P and Liu H. (2004).** New bipolar electrocoagulation-électroflotation process for the treatment of laundry wastewater. *Separation and Purification Technology* 36 (1), p 33-39.
- Golder A.K., Samanta A.N., Ray S. (2007a).** Removal of chromium by electrocoagulation with multiple electrodes: Bipolar and monopolar configurations. *Journal Hazardous Materials* 141, p 653-661.
- Golder, A.K., Samanta, A.N., Ray, S. (2007b).** Removal of trivalent chromium by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology* 53, p 33-41.
- Greaves A.J., Phillips D.A.S and Taylor J.A. (1999).** Correlation between the bioelimination of anionic dyes by an activated sewage sludge with molecular structure. Part 1: Literature review, 115, p 363-365.
- 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.
- Gurses A., Yalçın M and Dogar C. (2001).** Electrocoagulation of some reactive dyes: a statistical investigation of some electrochemical variables. *Waste Management*, 22 (5), p 491- 499.

H

- Hammami S. (2008).** Etude de dégradation des colorants de textile par les procédés d'oxydation avancée. Application à la dépollution des rejets industriels. Thèse de doctorat, Université Paris-Est et Tunis El Manar. Tunisie, 176 p.
- 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, 141 p.
- Heddi D. (2013).** Interaction des copolymères P4VP-alkylbromé avec les colorants textiles Mémoire de Master. Université Abou-Bakr Belkaid -Tlemcen, Algérie, 65 p.
- 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

Ibanez J.G., Singh M.M., Szafran Z and Pike R.M. (1998). Laboratory experiments on electrochemical remediation of the environment. Part 4: Color removal of simulated wastewater by electrocoagulation-electroflotation, *J. Chem. Educ.* 75(8), p 1040-1041.

Irdemez S., Yildiz Y.S and Tosunoglu V. (2006). Optimization of phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with aluminum plate electrodes. *Separation and Purification Technology* 52 (2), p 394-401.

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

Jiang J.Q., Graham N., André C., Kelsall G.R and Brandon N. (2002). Laboratory study of electro-coagulation-flotation for water treatment. *Water Research* 36 (16), p 4064-4078.

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.

Juster N.J. (1962). Color and Chemical Constitution, California Association of Chemistry Teachers, *Journal of Chemical Education*, 39 (11), p 596-601.

K

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

Khemis M., Leclerc J.P., Tanguy G., Valentin G and Lopicque F. (2006). Treatment of industrial liquid wastes by electrocoagulation : experimental investigations 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, No.36 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431.

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

Références bibliographiques

Koparal A.S and Ogutveren U.B. (2002). Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials B89*, p 83-94.

Kumar P.R., Chaudhari S., Khilar K.C., Mahajan S.P. (2004). Removal of arsenic from water by electrocoagulation. *Chemosphere*, 55, p 1245-1252.

L

Lamri N. (2010). Elimination du colorant orange ii en solution aqueuse, par voie photochimique et par adsorption. Mémoire Magister. Université Mentouri de Constantine, Algérie, 104 p.

Laridi R., Drogui P., Benmoussa H., Blais J.F and Auclair J.C. (2005). Removal of refractory organic compounds in liquid swine manure obtained from a biofiltration process using an electrochemical treatment. *Journal of Environmental Engineering* 131 (9), p 1302-1310.

Larue O., Vorobiev E., Vu C and Durand B. (2003). Electrocoagulation and coagulation by iron of latex in aqueous suspensions. *Separation and Purification Technology* 31 (2), p 177-192.

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, 167 p.

Lin C.J., Lo S.L., Kuo C.Y and Wu C.H. (2005). Pilot scale electrocoagulation with bipolar aluminum electrodes for on-site domestic greywater reuse. *Journal of Environmental Engineering* 131 (3), p 491-495.

M

Mameri N., Lounici H., Belhocine D., Grib H., Piron D.L and Yahiat Y. (2001).

Defluoridation of Sahara water by small plant electrocoagulation using bipolar aluminum electrodes. *Separation and Purification Technology* 24 (1-2), p 113-119.

Mehdi F. (2014). Modification de la bentonite par un sel de diphosphonim – Applications à l'adsorption des colorants textiles (rouge, bleu et jaune Bemacide). Mémoire de Master. Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 69 p.

Mercado M and Ivan D. (2005). The electrocoagulation, a new alternative for wastewater treatment, (In Spanish), Medellin, Diploma Project (Environmental engineering specialist.

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, 202 p.

Messemeche F. (2014). Etude qualitative et quantitative de l'adsorption d'un colorant organique sur le charbon actif. Mémoire de Master. Université Med Khider Biskra, Algérie, 43 p.

Références bibliographiques

- Modirshahla N., Behnajady M.A and Mohammadi-Aghdam S. (2008).** Investigation of the effect of different electrodes and their connections on the removal efficiency of 4-nitrophenol from aqueous solution by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materiel* 154, p 778-786.
- Mohammad M.E and Muttucumaru S. (2006).** An empirical model for defluoridation by batch monopolar electrocoagulation/flotation (ECF) process. *Journal of Hazardous Materials B* 131, p 118-125.
- Mollah M.Y.A., Schennach R., Parga J.R and Cocke D.L. (2001).** Electrocoagulation (EC)-science and applications. *Journal of Hazardous Materials B* 84, p 29-41.
- 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.

N

- Nait Merzoug N. (2014).** Application des tiges de dattes dans l'adsorption de polluants organiques. Mémoire de Magister. Université Mohamed Cherif Massaadia Souk-Ahras, Algérie, 104 p.
- 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, p 5924-5941.
- Nikolaev N.V., Kozlovskii A.S and Utkin I.I. (1982).** Treating natural waters in small water systems by filtration with electrocoagulation. *Soviet Journal of Water Chemistry and Technology* 4 (3), p 70-73.

O

- Olivier L. (2003).** Application d'un champ électrique continu pour améliorer la séparation liquide-solide de suspensions colloïdales. Thèse de doctorat .Université de Technologie de Compiègne France, 189 p.
- Ottewill G.A., Walsh F.C. (1995).** Faraday's laws revisited. In: *Education in chemistry*.p 158-162.
- 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, 116 p.

P

- Papic S., Koprivanac N., Bozic A.L.C. (2000).** Removal of reactive dyes from wastewater using Fe (III) coagulant, *Color. Technol.* 116, p 352-358.

Références bibliographiques

Persin F et Rumeau M. (1989). Le traitement électrochimique des eaux et des effluents, Tribune de l'eau, 42, 539, p 45-56.

Pouet M.F and Grasmick A. (1995). Urban wastewater treatment by électrocoagulation and flotation. Water Science and Technology 31 (3-4), p 275-283.

R

Raghavacharya C. (1997). Colour removal from industrial effluents – a comparative review of available technologies». Chem. Eng. World, 32, p 53-54.

S

Sakakibara, Y., Nakajima, H. (2002). Phosphate removal and recovery by a novel electrolytic process. Water Science and Technology 46 (11-12), p 147-152.

Sanir K and Banerjee U.C. (1999). Decolorization of triphenylmethane dyes and textile and dye-stuff effluent by Kurthia »sp. Enzyme and microbial Tech., 24, p 433-437.

Shu H.Y., Chang M.C. (2005). Decolorization effects of six azo dyes by O₃, UV/O₃ and UV/H₂O₂ processes, Dyes and Pigments, 65, p 25-31.

Slokar Y.M and Le Marechal A.M. (1998). Methods of decoloration of textilewastewaters, Dyes Pigments, 37, p 335-356.

T

Tir M. (2009). Utilisation des Techniques Electrochimiques dans le Traitement des Emulsions Hydrocarbures/ Eau. Thèse de doctorat. Université M'hamed Bougara – Boumerdès, Algérie, 178 p.

Trabelsi H. (2014). Etude de la dégradabilité et de la toxicité des colorants par ozonation et photocatalyse, Thèse de Doctorat, Université DE Monastir, Tunisie, 159 p.

U

Ugurlu M. (2004). The removal of some inorganic compound from paper mill effluents by the electrocoagulation method. G. U. Journal of Science 17 (3), p 85-99.

V

Vendevivere P.C., Bianchi R and Verstraete W. (1998). Treatment and creuse form the textile wet-processing industry: review of emerging technologies». J. Chem. Techn. Biotechn. 72, p 289-302.

Vik K., Carlson D.A., Eikum A.S and Gjessing E.T. (1984). Electrocoagulation of potable water. Water Research 18 (11), p 1355-1360.

Vinodha S., Diego C., Jegathambal P. (2012). Comparison of Fe and Al electrodes in the treatment of blue ca dye effluent using electrocoagulation process. International Journal of

Références bibliographiques

Engineering Science and Technology (IJEST), Vol. 4 No.05, Vol. 4 No.05, p 2188-2196.

WWu J., Wang T. (2001). Ozonation of aqueous azo dye in a semi batch reactor, *Wat. Res.*, 35 (4), p 1093-1099.

Y

Yu M.J., Koo J.S., Myung G.N., Cho Y.K and Cho Y.M. (2005). Evaluation of bipolar électrocoagulation applied to biofiltration for phosphorus removal. *Water Science and Technology* 51 (10), p 231-239.

Yu M.J., Ku Y.H., Kim Y.S and Myung G.N. (2006). Electrocoagulation combined with the use of an intermittently aerating bioreactor to enhance phosphorus removal. *Environnemental Technology* 27 (5), p 483-491.

Z

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

Zongo I. (2009). Etude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation: application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simule de tannerie. Thèse de doctorat. INPL, Nancy, France, 226 p.