

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
Université A. M. OULHADJ - Bouira
Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie des Procédés
Laboratoire de Génie des Procédés



Mémoire

Présenté par

OURAHMOUNE Tilali

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie de l'Environnement

**Elimination de colorant brillant bleu
par procédé électrocoagulation**

Soutenu le 10/07/2024

Devant le jury composé de :

M. AOUDJIT F.	MCA	UAMO, Bouira	Président
Mme EL HANAFI N.	MCB	UAMO, Bouira	Examinatrice
Mr LOUNICI. H	Professeur	UAMO, Bouira	Encadrant

Année Universitaire 2023/2024

Résumé

Le procédé d'électrocoagulation à cause de son efficacité est toujours choisi comme alternative dans le domaine de traitement des eaux pour sa facilité à mettre en œuvre, son efficacité, sa capacité à éliminer une très large gamme de polluants en plus il ne nécessite pas l'ajout des produits chimiques

Dans cette étude, nous nous intéressons à l'élimination du Bleu brillant par électrocoagulation en utilisant l'aluminium comme matériau d'électrode. Plusieurs paramètres, tels que, la concentration initiale du colorant, le nombre d'électrode, la distance inter-électrodes et l'intensité du courant ont été étudiés dans le but d'atteindre une capacité d'élimination plus élevée. Les résultats obtenus ont permis d'obtenir des taux de dégradation du colorant pouvant atteindre 100 %, pour un temps d'électrolyse correspondant à 60 minutes, une tension électrique imposé égal à 20 volts, une distance inter-électrodes de 1 cm, et une faible quantité de NaCl=1g et une concentration initiale de colorant égal à 50 mg/L.

Abstract

The electrocoagulation process is always chosen as an alternative in the field of water treatment for its ease of implementation, its effectiveness, its ability to eliminate a very wide range of pollutants and its, and it does not require the addition of chemicals.

In this study, we are interested in the elimination of Brilliant Blue by electrocoagulation using aluminum as the electrode material. Several parameters, such as, the initial dye concentration, the number of electrodes inter-electrode distance and current intensity were studied with the aim of to achieve a higher removal capacity. The results obtained achieved dye degradation rates of up to 100%, for an electrolysis time of 60 minutes, an electrical voltage of 20 volts, an inter-electrode distance of 1 cm, and a small amount of NaCl and an initial dye concentration equal to 50 mg/L.

Remerciements

Tous d'abord Je remercie DIEU qui m'a offert la force et la patience pour accomplir le présent travail.

Je me remercie et je me félicite de la persévérance et de la patience dont j'ai fait preuve pour accomplir ce travail.

Je remercie mon encadrant Mr. H. LOUNICI

Je remercie mes très chers parents.

Je remercie l'équipe des techniciennes de laboratoire de génie des procédés à l'université de BOUIRA.

Je remercie aussi mes amies AICHA et MELISSA.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents.

A mes chères sœurs ROUMAÏSSA et AYA.

A mon cher frère AGHILES.

A mes amies AICHA et MELISSA.

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1 Introduction 4

I.2 Le colorant bleu brillant 4

I.2.1 Définition..... 4

I.2.2 Les propriétés physiques et chimiques de brillant bleu 5

I.2.3 Domaine d'utilisation de colorant brillant bleu 5

I.2.3.1 L'industrie alimentaire..... 5

I.2.3.2 L'industrie pharmaceutique 5

I.2.3.3 L'industrie textile..... 5

I.2.3.4 L'industrie cosmétique..... 5

I.2.4 Ce qu'il faut avoir sur le colorant brillant bleu 6

I.3 L'électrocoagulation..... 7

I.3.1 Définition..... 7

I.3.2 Principe de l'électrocoagulation 7

I.3.3 Réaction aux électrodes 8

I.3.4 Les différents type d'électrodes utilisée dans l''électrocoagulation 10

I.3.4.1 Matériau des électrodes..... 10

I.3.4.2 Géométrie des électrodes (la forme des électrodes) 11

I.3.5 Modes de connexion des électrodes 12

I.3.5.1 Connexion monopolaire en parallèle 12

I.3.5.2 Connexion monopolaire en série 12

I.3.5.3 Connexion des électrodes bipolaire 13

I.3.6 Les facteurs influencent l'électrocoagulation..... 13

I.3.7 Les avantages et les inconvénients de procédé électrocoagulation 15

I.3.7.1 Avantages..... 15

I.3.7.2 Inconvénients 15

Sommaire

I.3.8 Historique de procédée de l'électrocoagulation	17
Chapitre II : Matériel et méthodes	
II.1 Produits et réactifs utilisée	20
II.2 Matériels utilisée	20
II.3 La verrerie utilisée et les instruments :	21
II.4 Mode opératoire	22
II.4.1 Préparation de solution.....	22
II.4.2 Protocole expérimentale.....	23
II.4.2.1 Montage expérimentale	23
II.4.2.2 Déroulement de l'expérience	23
II.4.3 Les paramètres étudiés	24
II.4.4 Méthodes d'analyse.....	24
Chapitre III : Résultats et discussions	
III.1 Introduction	26
III.2 Etude spectroscopique Visible de la molécule du Bleu Brillant	26
III.2.1 Bailliage de λ_{\max} :	26
III.2.2 Effet du pH sur la courbe d'absorption à λ_{\max}	27
III.2.3 Courbe d'étalonnage	27
III.3 Paramètres influence l'électrocoagulation.....	28
III.3.1 Influence de l'intensité de courant	28
III.3.2 Effet de concentration initiale de polluant	30
III.3.3 Etude de l'Influence du nombre d'électrodes.....	31
III.3.4 Influence de la distance interlectrode	33
Conclusion générale	36
Perspectives	36
Références bibliographiques	

Liste des figures

Liste des figures

Figure I. 1: schéma présentatif de principe de l'électrocoagulation.	8
Figure I. 2: connexion monopolaire des électrodes en parallèle.	12
Figure I. 3: connexion des électrodes monopolaire en série.	13
Figure I. 4: connexion des électrodes bipolaire.....	13
Figure II. 1: le brillant bleu.	20
Figure II. 2: le chlorure de sodium.....	20
Figure II. 3: Générateur de courant.	20
Figure II. 4: un PH mètre.	20
Figure II. 5: balance.	21
Figure II. 6: spectrophotomètre.....	21
Figure II. 7: les solution etalons.	22
Figure II. 8: courbe d'étalonnage.	23
Figure II. 9: montage expérimentale de procédée électrocoagulation.	23
Figure III. 1: Effet de la teneur du colorant sur la longueur λ_{max}	26
Figure III. 2: Stabilité de λ_{max} en fct du pH.	27
Figure III. 3: la courbe d'étalonnage.	27
Figure III. 4: effet de l'intensitee de courant sur la degradation de coloran BB.....	29
Figure III. 5: rendement de l' effet de l'intensité de courant sur la degradation de colorant BB.	30
Figure III. 6: rendement de l'effet de concentration initiale de colorant sur la degradation de colorant BB.	31
Figure III. 7: l'effet de nombre de plaque sur la concentration de colorant BB.	32
Figure III. 8: rendement de l'effet de nombre de plaques.	32
Figure III. 9: rendement de l'effet de la distance entre les electrodes.	33
Figure III. 10: effet de la distance entre les électrode sur la dégradation de colorant BB par procédée électrocoagulation.....	34

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I. 1: propriétés physiques et chimique de colorant brillant bleu.	5
Tableau I. 2: ce qu'il faut savoir sur le colorant brillant bleu.	6
Tableau I. 3: électrocoagulation par différents électrodes et leurs rendements	10
Tableau I. 4: différents utilisation de procédé d'électrocoagulation.	11
Tableau I. 5: Etude comparative entre la coagulation chimique et l'électrocoagulation [9]. ..	16
Tableau I. 6: Etude comparative du coût d'exploitation entre la coagulation chimique et l'électrocoagulation [9].	16
Tableau I. 7: Historique de l'électrocoagulation.	17
Tableau II. 1: les solution etalons.....	22
Tableau III. 1: paramètre influencent l'électrocoagulation.	28
Tableau III. 2: parametre operatoires (l'intensitee de courant).	28
Tableau III. 3: parametre operatoires (concentration initiale de polluant).....	30
Tableau III. 4: rendement de l'effet de concentration initiale de colorant sur la dégradation de colorant BB.	31
Tableau III. 5: condition operatoire (distance interlectrode).....	33

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

En 21^{ème} siècle et avec la croissance démographique rapide, le plus grand défi c'est la préservation et la gestion durable des ressources en eau.

L'eau est un capital vital, elle recouvre plus de 70% de la surface de notre planète, mais seulement 2% de cette eau est douce et potable, cette eau potable provient des glaciers, nappes souterraine et eau de surface (lacs et rivières), donc la limitation des sources de l'eau en plus la pollution des eaux sont des problèmes qui touchent de nombreux pays dans le monde, notamment les pays de l'Afrique de sud et l'Inde.

Parlons de la pollution des eaux ou leurs contaminations, la contamination des eaux (soit par des substances organiques ou inorganiques) peut avoir un impact sérieux sur l'environnement en général et les écosystèmes aquatiques en particulier. Les colorants sont l'un des importants polluants leurs présences dans l'eau peut présenter des risques pour l'environnement et la santé humaine, aussi la présence des colorants dans les eaux provoque un changement de couleur et de gout. Il est donc nécessaire de développer des technologies efficaces pour le traitement et l'élimination de ces matières dangereuses, afin de diminuer leur risque et d'améliorer la qualité de ces eaux.

Plusieurs techniques et méthodes ont été développer pour traiter et éliminer les polluant des eaux, on trouve alors des méthode biologiques (les boues activées), les méthode chimiques (par exemple la coagulation floculation), les méthodes physiques (l'osmose inverse) et les méthodes électrochimiques (l'électrocoagulation). Si on parle de l'électrocoagulation, est une technique prometteuse pour traiter les eaux, elle présent de nombreux avantages dont :

L'efficacité de procédé, l'équipement simple, un temps de traitement très réduit, pas besoins d'ajout des produits chimiques et le principe de fonctionnement simple, il est basée sur la génération in situ des coagulants par la dissolution électrochimique des électrodes en métal, ensuite la déstabilisation et l'agglomération des colloïdales. [3]

L'objectif de notre travail est l'application de procédée électrocoagulation en vue de l'élimination de colorants brillant bleu, en utilisant des électrodes en aluminium.

Voici le plan de notre mémoire :

Dans le premier chapitre de ce travail nous avons donné une synthèse bibliographique qui rassemble des données essentielles sur :

Les colorants, Le brillant bleu, L'électrocoagulation Les électrodes utilisé dans l'électrocoagulation, Et finalement une comparaison entre l'électrocoagulation et la coagulation floculation classique.

Introduction générale

Le deuxième chapitre décrit le matériel utilisé (l'appareillage, les produits et la verreries) ainsi que le mode opératoire utilisé pour le traitement.

Le troisième chapitre présente les résultats obtenus, il détaille l'influence de certains paramètres sur l'électrocoagulation (l'intensité de courant, la concentration de colorant, le nombre de plaques, etc.)

La conclusion générale qui est une synthèse de cette étude.

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1 Introduction

Les colorants sont des substances chimiques utilisées dans différents domaines pour donner de la couleur aux matériaux ou aux d'autre substances par exemple : les textiles les médicaments les produits alimentaires etc. on distingue trois définitions essentielles de colorants

- **Substances colorantes** : ce sont les substances chimiques qui absorbent la lumière visible et la reflètent sous forme de couleur.
- **Agent colorants** : ils ont été utilisés pour colorer les matériaux.
- **Les pigments** : ce sont des substances qui restent en suspension dans le matériau.

Les colorants se divisent en deux types :

- 1) **Colorants naturels** : sont extraits de sources végétales (les plantes), animales ou minérales.
- 2) **Colorants synthétiques** : sont fabriqués au niveau de laboratoire à partir des composés chimiques.

Parlons des caractéristiques, les colorants doivent être stables, solubles dans le milieu, avoir une bonne résistance à la lumière et la chaleur pour éviter la dégradation de couleur, et être non toxique dans le cas d'utilisation des colorants dans le domaine alimentaire et pharmaceutique.

La présence des colorants dans les eaux est un problème qu'on doit traiter, les rejets des usines, en particulier l'industrie textile sont des rejets qui présentent des effets néfastes sur l'environnement, les écosystèmes aquatiques et l'être humain. Il est nécessaire donc de trouver des solutions et de traiter ces rejets.

Pour cela il existe plusieurs méthodes de traitement dont les traitements physiques, les traitements chimiques et électrochimiques et les traitements biologiques.

On a choisi de parler de l'électrocoagulation ce procédé électrochimique qui consiste à utiliser un courant électrique pour coaguler les polluants présents dans l'eau. Est un procédé largement utilisé pour éliminer des déchets polluants présents dans l'eau tel que les métaux lourds, les huiles, les colorants, etc.

I.2 Le colorant bleu brillant**I.2.1 Définition**

Le bleu brillant est un sel de sodium comportant trois groupes sulfonate dans sa structure. À un pH égal ou supérieur à 4, plus de 95 % des molécules auront un seul groupe amine qui sera chargé positivement et les trois groupes acides sulfoniques seront chargés négativement, ce qui donnera une charge négative nette. [1] connu dans la nomenclature

européen des additifs sous le nom additif E13. Il est très utilisé dans l'industrie agroalimentaire, l'industrie pharmaceutique et cosmétique.

I.2.2 Les propriétés physiques et chimiques de brillant bleu :

Tableau I. 1: propriétés physiques et chimique de colorant brillant bleu.

Propriété	Brillant bleu
Solubilité dans l'eau (valeur ajustée en mg/l)	$1,8 \cdot 10^3$
Solubilité dans l'eau (valeur expérimentale en mg/l)	$3 \cdot 10^4$
Pression de vapeur en (Pa)	$3 \cdot 10^{-31}$
Constante de la loi d'Honry (Pa.m ³ /mol)	$1,4 \cdot 10^{-41}$

I.2.3 Domaine d'utilisation de colorant brillant bleu

I.2.3.1 L'industrie alimentaire

Le brillant bleu est largement utilisé dans l'industrie agroalimentaire pour donner de la couleur

- **Les boissons** : les boissons gazeuses, les boissons aux fruits, les boissons pour enfants.
- **Confiseries** : Les bonbons, les sucettes, les gommes à mâcher et autres produits sucrés.
- **Produits laitiers** : Certaines variétés de yaourts, de puddings, de fromages à pâte molle.
- **Décorations alimentaires** : colorer les glaçages, les nappages, les garnitures, les décorations en sucre, etc.

I.2.3.2 L'industrie pharmaceutique

Le brillant bleu peut être utilisé comme colorant dans certains médicaments sur tous les sirops.

I.2.3.3 L'industrie textile

Le brillant bleu est utilisé pour teindre les tissus synthétiques

I.2.3.4 L'industrie cosmétique

Le brillant bleu est utilisé dans certains produits tels que les rouges à lèvres, les champoings, le vernis à ongles, etc.

Au Canada le colorant brillant bleu est très utilisé, pour cela plusieurs travaux de recherches ont été faits. Ces travaux parlent d'une manière générale sur les colorants et

spécifiquement sur triarylméthanés compris le brillant bleu. Parmi ces travaux on trouve l'article de gouvernement canadien sur l'évaluation préalable, groupe de triarylméthanés.

Voici quelques utilisations :

- Substances utilisées à des fins agricoles.
- Encre, encre en poudre et colorants.
- Détergents à lessive et à vaisselle.
- Produits de formulation dans des produits antiparasitaires homologués au Canada
- Base des données interne sur les produits pharmaceutiques, présent comme ingrédients médicaux ou non médicaux dans les désinfectants ou dans les médicaments destinés au humains ou les animaux au canada.
- Encres. [1]

En France le colorant brillant bleu été interdit a utilisée pendant plusieurs années, aujourd'hui ce colorant il est de nouveau autorisé, cet additif doit respecter les critères de pureté mentionnée par la commission européenne.

Il est donc utilisé dans les bonbons de couleur bleu ainsi que les boissons, aussi dans les produits de soin personnel dont les mousses à raser les bains de bouche. [2]

I.1.4 Toxicité et risques connus

D'après l'autorité européenne de sécurité alimentaire (EFSA) le colorant brillant bleu n'est ni cancérrogène ni génotoxique.

Par contre le brillant bleu est capable de provoquer des allergies les personnes intolérantes aux salicylates et aux personnes asthmatiques. Chez les enfants de 3 ans à 10 ans le colorant brillant bleu peut favoriser l'hyperactivité, car ils sont les plus consommateurs de produits qui contient ce colorant (les bonbons les sucettes etc.)

I.2.4 Ce qu'il faut avoir sur le colorant brillant bleu

Tableau I. 2: ce qu'il faut savoir sur le colorant brillant bleu.

Famille	Triarylmthane
Classification	Colorant, additif alimentaire
Toxicité	Modérée
Caractéristiques	Couleur intense Solubilité dans l'eau Stabilité Compatibilité

I.3 L'électrocoagulation**I.3.1 Définition**

L'électrocoagulation est un procédé électrochimique de traitement des eaux polluées ce procédé est un type de procédé classique coagulation-floculation, cette technique permet de éliminer la pollution dissoute ou colloïdale.

Cette technique entraîne une dissolution du métal de l'anode avec formation simultanée d'ions hydroxydes et de gaz hydrogène à la cathode [11]. Donc la production in situ d'ions métalliques pour la coagulation-floculation par la dissolution anodique des électrodes métalliques [8]

I.3.2 Principe de l'électrocoagulation

Avant de parler de l'électrocoagulation on doit parler sur le principe de coagulation-floculation classique car c'est la base de procédé électrocoagulation.

Donc, la coagulation est un procédé basée sur la formation après l'accumulation des colloïdales, cette coagulation est renforcée par des agents coagulants, l'accumulation des colloïdales forment des blocs appelée floc plus ou moins compact. [3]

Après la coagulation, l'étape suivante c'est la floculation. La floculation est un procédé qui suit la coagulation sert à regrouper les petites particules (colloïdales) afin de former des blocs plus importants appelés floes. Généralement pour que une floculation soit faite on ajoute des agents floclant.

Parlent de l'électrocoagulation, dans le processus d'électrocoagulation, les espèces coagulantes sont générées in situ par l'électrodissolution d'une anode, généralement en fer ou en aluminium. [3]

Cette étape est suivie par la déstabilisation des colloïdes et finalement il y'a l'agglomération des particules déstabilisées. [2]

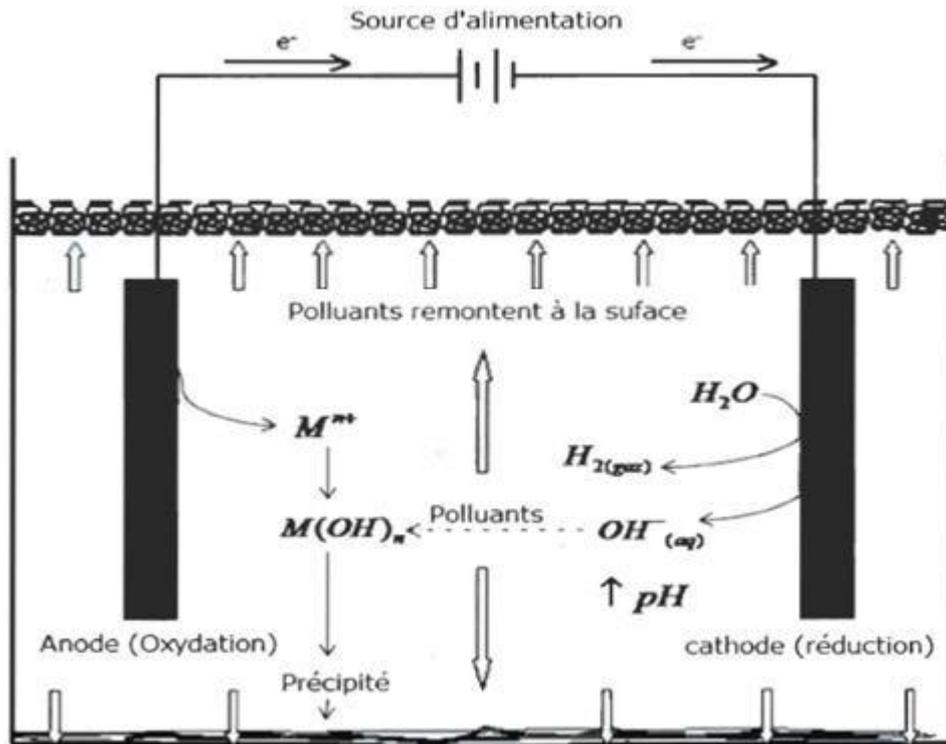
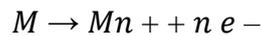


Figure I. 1: schéma présentatif de principe de l'électrocoagulation.

I.3.3 Réaction aux électrodes

Lors d'une électrocoagulation des réactions aura lieu au niveau de l'anode aussi la cathode, ces réactions sont présentes comme suit :

- **A l'anode** (l'électrode positive) : se produit l'oxydation de métal

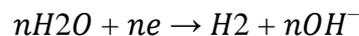


Sachant que :

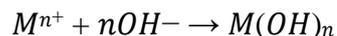
M : c'est le métal de l'anode.

n : le nombre d'électron mis en jeu.

- **A la cathode** (l'électrode négative) : se produit la réduction,



Les ions métalliques libérés à l'anode, se complexent aux ions hydroxydes libérés par l'électrolyse de l'eau et génèrent des hydroxydes de métal, selon la réaction suivante :



Les hydroxydes de métal produite à la cathode sont insolubles, ils jouent le rôle de coagulants et réagissent avec les colloïdes, donc la pollution est éliminée.

❖ Le cas des électrodes en aluminium

Dans l'étude qu'on a réalisé le type des électrodes c'était en Aluminium donc les réactions déroulent selon les réactions suivantes :

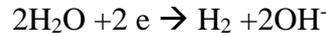
- **A l'anode**

L'oxydation de l'Aluminium en Al^{3+} suivant la réaction :

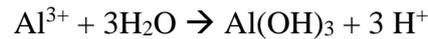


- **A la cathode**

La réduction de l'eau suivant la réaction :



- **La réaction globale est la suivant**



- **Résumé**

- 1) L'oxydation de Al a l'anode.
- 2) Les ions Al^{3+} s'hydratent puis réagissent avec l'eau pour former des hydroxydes d'aluminium $Al(OH)_3$.
- 3) Les hydroxydes métalliques formée jouent le rôle de coagulant.
- 4) Ces coagulants permettent de déstabiliser les particules colloïdales.
- 5) L'agglomération de ses particules pour former des floccs.

- ❖ **L'électrolyse de l'eau**

L'électrolyse de l'eau est la décomposition de l'eau en O_2 et H_2 en présence d'un courant électrique.

Lors d'une électrocoagulation on considère que les réactions chimiques qui déroulent sont seulement l'oxydation de métal et la réduction de l'eau, dans ce cas la loi de FARADAY est applicable on peut donc déterminer la masse de métal dissout :

$$m = (I.t.M) / n.F \quad \text{avec :}$$

m : la masse de métal dissoute en (g).

I : l'intensité de courant en (A).

t : la durée de l'électrolyse en (s).

F : la constante de Faraday en (C/mole).

M : la masse moléculaire de métal en (g/mole).

n : nombre d'électrons mis en jeu.

Il est aussi possible de calculer l'énergie consommée en ($KW h / m^3$) en appliquant la loi suivante :

$$E = U.I.t / V \quad [4]$$

Avec :

U : est la tension aux bornes des électrodes (V).

I : est l'intensité (A).

t : est le temps (h).

V : est le volume (m³).

I.3.4 Les différents type d'électrodes utilisée dans l''électrocoagulation

I.3.4.1 Matériau des électrodes

Les électrodes utilisées peuvent être de différents métaux

- **Aluminium** : il se décompose pour former le coagulant hydroxyde d'aluminium, l'aluminium est utilisée en raison de son efficacité très élevée à éliminer les polluants, son coût bas et sa conductivité électrique. Mais il peut être toxique pour la santé. [5]
- **Le fer** : il est utilisé généralement pour éliminer les composés inorganiques, il agit exactement comme l'aluminium pour former des hydroxydes de fer. Il est moins toxique par rapport à l'aluminium. [5]
- **Le titan** : le titan est connu par sa résistance à la corrosion et sa durabilité, donc il est utilisé dans des milieu corrosifs et des applications de longue durée.
- **L'acier inoxydable** : tout comme le titan, l'acier est utilisé pour sa résistance et sa durabilité.

Comme on peut aussi utilisée les électrodes en cuivre, en arsenic, en graphite, en tungstène etc.

Dans certains travaux de recherche ils ont travaillé avec différents métaux pour l'anode et la cathode, le tableau ci dessus présent les travaux faites :

Tableau I. 3: électrocoagulation par différents électrodes et leurs rendements

Electrodes utilisées	Références
Anode en Pb et cathode en acier inox	Vik et al. (1984)
Titane /Platine et Ti/Pt/Ir	Garrote et al. (1995)
Al et Mn	EDF GDF Services et partenaires (1995)
Fe/Al ou Al/Fe	Gao et al. (2005), Mollah et al. (2004), Holger (1995), Damien et al. (1992), Mrozowski et Zielinski (1983), Kobya et al. (2006), Can et al. (2006).
Al/Cu et Fe/Cu	Tsai et al. (1997)

Ti/acier	Jordao et al. (1997).
----------	-----------------------

Tableau I. 4: différents utilisation de procédé d'électrocoagulation [10].

Electrodes utilisées	Type de l'effluent à traiter	Composition de l'effluent à traiter	Le rendement	Reference
Fe et Al	Effluents textiles	DCO, MES, COT, Turbidité	98% abattement de turbidité ,77% DCO	Koby et al. (2003)
Al et Fe	Eaux usées phosphatées	Phosphate	100% d'abattement de phosphate	Bebahani et al.2010
Al	Rejets pétroliers	DCO Turbidité	83,52% DCO ; 99,59% Turbidité	Gousmi et al.2016
Cu et Ti/IrO ₂	Eaux usées domestiques	Phosphore ; DCO ; N-NH ₄	99,46% Phosphore ; 56,11% DCO ; 58,37% N-NH ₄	Seyf-Laye et al.2018

I.3.4.2 Géométrie des électrodes (la forme des électrodes)

Les électrodes dans l'électrocoagulation peuvent être de différents métaux aussi ils peuvent se présenter sous différentes formes :

- **Plaques** : elles sont souvent utilisées, l'avantage c'est que la surface de contact avec l'effluent à traiter est importante.
- **Sphères et boules** : elles sont très faciles à installer et à remplacer.
- **Fils fin** : utilisées dans les procédures qui demandent une précision vraiment critique.

On a aussi les électrodes sous formes de tiges, barres, cylindre, etc.

La forme d'électrode indique le domaine où on peut l'utiliser, elle est aussi capable d'influencer l'efficacité de traitement en modifiant la surface de contact et la génération de ions métalliques responsables sur la coagulation des polluants. [6]

I.3.5 Modes de connexion des électrodes

Il existe trois modes de connexion des électrodes dans une cellule d'électrocoagulation :

Le mode de connexion des électrodes dans la cellule d'électrocoagulation joue un rôle important, il influence principalement l'efficacité de traitement, aussi la consommation d'énergie.

Donc on peut distinguer trois mode de connexion des électrodes :

I.3.5.1 Connexion monopolaire en parallèle

Ce mode implique la connexion des anodes entre elle, ainsi qu'une connexion entre les cathodes placées en parallèles. Chaque paire de cathodes /anodes présente une petite cellule électrolytique dans laquelle la tension est la même. [7]

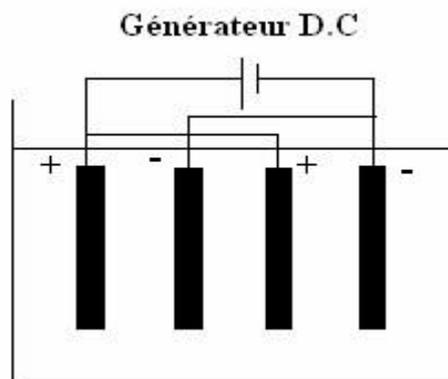


Figure I. 2: connexion monopolaire des électrodes en parallèle.

I.3.5.2 Connexion monopolaire en série

Consiste à placer des électrodes sacrificielles internes (anodes et cathodes) connectées l'une à l'autre, entre des électrodes externes. Les électrodes interne et externe n'ont aucune interconnexion entre elles. Dans ce cas le courant qui traverse toutes les électrodes, est le même, alors la tension globale est la tension dans chaque cellule électrolytique. [7]

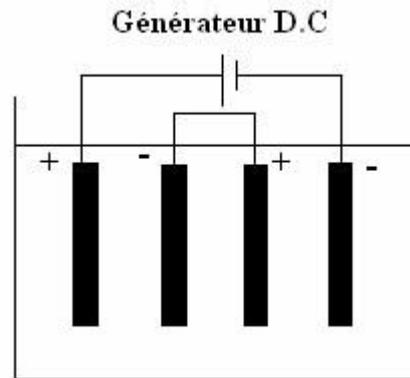


Figure I. 3: connexion des électrodes monopolaire en série.

I.3.5.3 Connexion des électrodes bipolaire

Deux électrodes (anode et cathode) externe connectée a une source de courant électrique, et d'autre électrodes sacrificielles(interne) placée entre les deux électrodes externes. Les électrodes externes sont monopolaire par contre les électrodes interne (sacrificielle) sont bipolaire et ne sont pas interconnectée, chacune de leurs faces agit comme une anode et une cathode. Cela signifie que les côtés opposés de chaque électrode bipolaire sont chargées de manière opposée, la dissolution anodique se produit sur le côté positif tandis que le côté négatif est sujet à des réactions cathodiques. [7]

La connexion des électrodes bipolaire se faite toujours en série. [7]

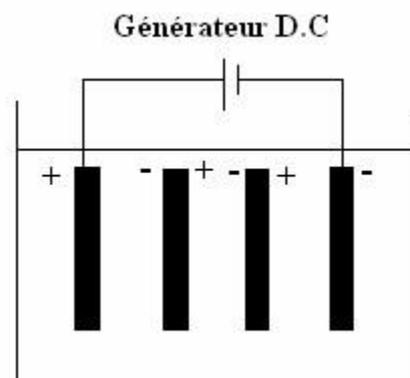


Figure I. 4: connexion des électrodes bipolaire.

Le mode de connexion bipolaire est généralement le plus utilisée en raison de la simplicité de l'emplacement.

I.3.6 Les facteurs influencent l'électrocoagulation

- **L'intensité de courant :** le courant électrique est considéré comme un paramètre clé de l'électrocoagulation, il détermine l'efficacité de procédé. Il permet de contrôler la

cinétique anodiques (dissolution) et les réactions sur les cathodes (formation des bulles d'hydrogène).

- L'application d'un courant de faible intensité implique une faible production des ions hydroxydes et faible dégagement des bulles d'hydrogène. Par contre, si le courant électrique est élevée la vitesse de la réaction augmente donc y'aura une consommation rapide des électrodes. [7]
- **La qualité de l'eau à traiter** : la composition de l'effluent à traiter, le pH de milieu et la conductivité sont des facteurs qui influencent l'efficacité de procédé d'électrocoagulation.
 - ✓ La composition de l'effluent affect la performance de procédé car certains polluants peuvent être facile à coaguler donc facile à éliminer par contre il existe d'autre polluant difficile à coaguler.
 - ✓ Ainsi que le pH de milieu joue un rôle principal lors d'une électrocoagulation, il détermine l'état de métal dans l'effluent à traiter.
 - ✓ Parle de la conductivité, elle doit situer dans un intervalle optimum car c'est la conductivité qui permis un bon transfert ionique dans l'effluent à traiter. Si la conductivité est élevée le transfert ionique est assuré, l'augmentation de conductivité sert à réduire la consommation énergétique et aussi le temps de traitement. Par contre pour des valeurs très faible de conductivité la formation des coagulant est insuffisante ce qui oblige à appliquer une tension de courant très élevée donc une grande dépense énergétique. Pour cela l'ajout d'un électrolyte est obligatoire pour améliorer la conductivité (généralement c'est NaCl).
- **Le type des électrodes** : c'est très important de choisir le matériau d'électrode pour assurer l'efficacité de traitement et la durabilité d'électrode
- **La distance entre les électrodes** : cette distance varier selon le type d'eau à traiter et selon sa conductivité. L'augmentation de la distance entre les électrodes implique une augmentation de la consommation énergétique, par contre la diminution de l'écart entre les électrodes cause une augmentation de température de milieu, cette distance influence aussi le temps de traitement.

A l'échelle industrielle, il est important de prendre en considération la distance entre les électrodes (en cas d'encrassement) pour la facilité à nettoyer le système.

I.3.7 Les avantages et les inconvénients de procédé électrocoagulation

I.3.7.1 Avantages

- La force de l'électrocoagulation est dans sa capacité à éliminer une très grande gamme des polluants soit organique soit inorganique : la DCO et la DBO, les métaux lourds, la matière en suspension, COV, etc.
- Elle est rentable et facile à mettre en œuvre, elle nécessite des équipements simples, pouvant être conçus pour pratiquement n'importe quelle taille.
- L'électrocoagulation ne nécessite pas d'ajout de produits chimiques, donc le risque de pollution secondaire est réduit.
- Il peut être utilisé même par des procédés écologiques, tels que l'énergie solaire, les éoliennes et les piles à combustible. [8]
- Ce procédé peut déstabiliser et éliminer efficacement les plus petites particules colloïdales, avec une production minimale de boues (les bulles de gaz produites pendant l'électrolyse peuvent améliorer la flottation).
- L'électrocoagulation est un procédé très efficace et rapide, on peut gagner le temps de traitement par rapport d'autre procédé.

I.3.7.2 Inconvénients

- L'utilisation d'énergie électrique assez coûteuse surtout dans des régions où le coût d'électricité est élevée.
- La formation des composés organiques chlorés si l'effluent à traiter contient également de chlorures. [8]
- Les électrodes doivent être remplacées périodiquement ou les nettoyer mécaniquement.
- Obligation de l'ajout de l'électrolyte NaCl pour les effluents à faible conductivité.

Le tableau suivant représente une comparaison entre l'électrocoagulation et la coagulation floculation classique

Tableau I. 5: Etude comparative entre la coagulation chimique et l'électrocoagulation [9].

Electrocoagulation	Coagulation floculation classique
Aucun produit chimique est ajouté, car la technique est basée sur l'utilisation de courant électrique pour générer les ions métalliques responsable de l'agglomération des colloïdes.	Implique l'ajoute des produits chimiques (coagulants et flocculants) dans l'effluents afin d'assurer la déstabilisation des colloïdes.
Efficace pour éliminer tous les composés organiques aromatiques et volatiles.	Efficace pour éliminer des polluants particulières.
Le temps de traitement est plus court.	Le temps pour atteindre un traitement efficace est assez long.
Nécessite une alimentation électrique ce qui augmente le cout énergétique.	Bien que elle nécessitant des produits chimiques, peut avoir des coûts opérationnels inférieurs en termes de consommation d'énergie.
Des volumes de boues faibles, avec des floc plus compact.	Des volumes de boues plus importants, ces boues sont plus hydrophiles et moins denses.[9] Etude de l'élimination de la matière organique des eaux par l'électrocoagulation

Tableau I. 6: Etude comparative du coût d'exploitation entre la coagulation chimique et l'électrocoagulation [9].

Turbidité é initiale (NTU)	Electrocoagulation			Coagulation floculation chimique		
	[Al ³⁺] Consommé à l'optimal de	Energie consommée (kWh/m ³)	Coût Total (DZD/m	[Al ³⁺] Consommé à l'optimal de	Energie consommée	Coût Total

	Clarificatio n (kg/m ³)		³)	Clarificatio n (Kg/m ³)	(kWh/m ³)	(DZD/m ³)
200	18.89 10 ⁻³	0.4033	6.15	15.81 10 ⁻³	négligeabl e par rapport au prix du coagulant	11.70
400	37.77 10 ⁻³	0.7776	12.17	39.73 10 ⁻³		29.40
600	56.66 10 ⁻³	1.1981	18.39	55.14 10 ⁻³		40.80
800	67.99 10 ⁻³	1.4377	22.07	79.05 10 ⁻³		58.50
1000	86.87 10 ⁻³	1.7955	28.03	94.86 10 ⁻³		70.20

I.3.8 Historique de procédée de l'électrocoagulation

1880 : le premier brevet sur l'utilisation de l'électrocoagulation pour traiter les effluent en utilisant des électrodes en fer c'était un brevet américain déposée par Webster. La même année à Londres une station d'épuration des eaux urbaines a été installée.

Le tableau suivant présent l'historique de l'électrocoagulation : [10]

Tableau I. 7: Historique de l'électrocoagulation.

Date	Auteur	Type d'électrode	Application
1909	Harries	Al + Fe + sel cuivre	Eaux usées urbaines
1947	Bonilla	Al	Eaux usées urbaines
1956	Holden	Al	Eau de surface
1970	Sadek	Al	Eau riche en phosphates
1974	Beck et Coll.	Al +Fe	Eau riche en phosphates
1984	Vik et Coll.	Al	Eau très chargée en substances humiques
1985	Pazenko et Coll.	Al	Emulsions d'huiles
1988	Renk	Al +Fe	Eau riche en sable bitumeux et schistes pétrolifères
1989	Ryan et Coll.	Al	Suspension d'argile
1992	Shen et Coll.	Al	Eau de teinture et d'impression
1996	Lin et Coll.	Al	Effluents de l'industrie textile
2000	Chen et Coll.	Al	Rejets liquides des industries de la

			restauration
2003	Shen et Coll.	Al	Eau industrielle chargée en fluors
2005	Khemis et Coll.	Al	Emulsions d'huiles industrielles
2007	Essadki et Coll.	Al	Rejets de textiles et eaux industrielles chargées en fluors

Chapitre II : Matériel et méthodes

Dans ce chapitre nous allons présenter le matériel et les méthodes utilisée pour réaliser notre travail qui portée sur l'élimination d'un colorant (le brillant bleu) par le procédé électrocoagulation, le travail a été réalisée au niveau de laboratoire de génie des procédée, université de Bouira.

II.1 Produits et réactifs utilisée

- Brillant bleu

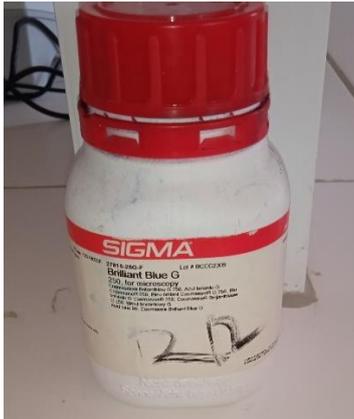


Figure II. 1: le brillant bleu.

- Chlorure de sodium NaCl :

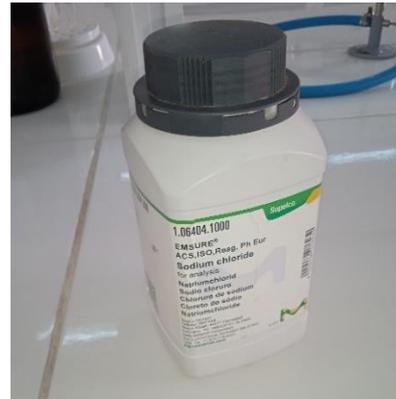


Figure II. 2: le chlorure de sodium.

- NaOH et HCl pour ajuster le pH

II.2 Matériels utilisée

- Un Générateur de courant



Figure II. 3: Générateur de courant.

- Un pH mètre



Figure II. 4: un PH mètre.

- Une balance :



Figure II. 5: balance.

- Un spectrophotomètre



Figure II. 6: spectrophotomètre.

- Un agitateur magnétique

❖ Principe de fonctionnement de spectrophotomètre

Un spectrophotomètre est un appareil utilisé pour mesurer l'absorbance d'une substance chimique en solution, il fonctionne en mesurant l'absorption de lumière par l'échantillon à différentes longueurs d'onde, ce qui permet d'obtenir des informations sur la composition et la concentration des substances présentes dans l'échantillon.

Il utilise une source de lumière polychromatique émet un faisceau de lumière blanche. Ce faisceau passe à travers un monochromateur, qui sélectionne une longueur d'onde spécifique.

Le faisceau de lumière monochromatique sélectionnée traverse alors l'échantillon à analyser, une partie de la lumière qui traverse l'échantillon est absorbée par les molécules de la solution.

Le flux lumineux transmis, d'intensité inférieure au faisceau incident, est alors dirigé vers un photodétecteur qui convertit le signal lumineux en un signal électrique proportionnel à l'intensité lumineuse. Ce signal électrique est traité par un ordinateur pour donner l'absorbance de l'échantillon

II.3 La verrerie utilisée et les instruments :

- Fiole jaugée de 2 L
- Fiole jaugée de 500 ml
- Fioles jaugées de 25 ml
- Pipettes graduées de 5mL
- Becher de 20 ml (pour les mesure de pH)

- Entonnoir
- Verre de montre
- Barreau magnétique
- Spatule
- Des électrodes en aluminium

II.4 Mode opératoire

II.4.1 Préparation de solution

Préparation des solutions de colorant brillant bleu à : 20mg/l, 40 mg/l, 60mg/l, et 80mg/l chaque solution dans 1 litre de l'eau distillée, afin de déterminer la longueur d'onde maximale

A partir d'une solution mère de 20 mg/l on a réalisé une courbe d'étalonnage, on a préparé dix étalons dans es fioles de 25 ml. Voici la courbe d'étalonnage établit :



Figure II. 7: les solutions étalons.

Tableau II. 1: les solution étalons.

C(mg/l)	3	3,5	4	4,5	5	5,5	10
abs	0,172	0,191	0,228	0,25	0,273	0,289	0,51

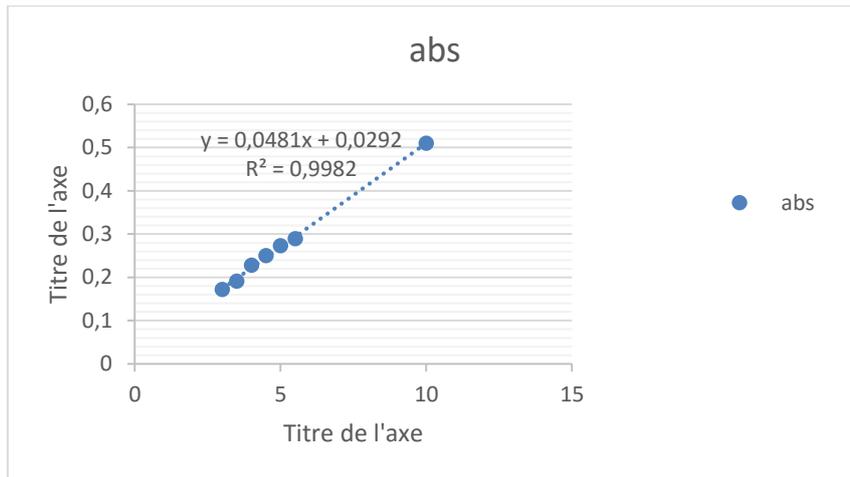


Figure II. 8: courbe d'étalonnage.

II.4.2 Protocol expérimentale

II.4.2.1 Montage expérimentale

Réacteur électrochimique possède un volume de 3 l.

Les électrodes sont prétraitées par une solution d'acide HCl afin de les nettoyer, après il sont placée en mode monopolaire dans le réacteur fermée (mode discontinue).

Les électrodes sont reliées au générateur de courant à l'aide des fils électrique.

Le réacteur est placé sur un agitateur magnétique.

Après chaque manipulation les électrodes sont prétraiter et nettoyer.

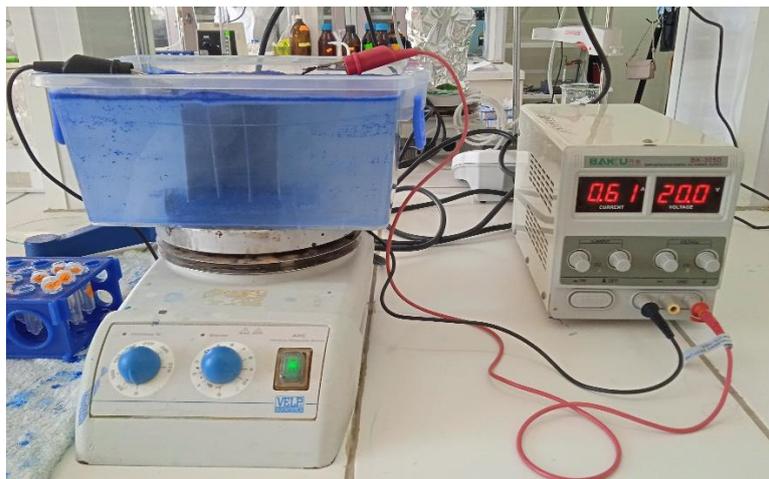


Figure II. 9: montage expérimentale de procédé électrocoagulation.

II.4.2.2 Déroulement de l'expérience

Dans notre réacteur on verse 2,5 l de solution à traiter (solution synthétique de brillant bleu a différents concentrations) après on rajoute 1 g/l de NaCl pour assurer une bonne conductivité dans le milieu tout ça avec une agitation de 400 T/min

Ensuite on relie les électrodes au source d'électricité et on fixe l'intensité de courant, on lance l'expérience en même temps on déclenche le chronomètre.

On fait un prélèvement a $t=0$, à l'aide d'une pipete graduée en suite on fait des prélèvements chaque 5 minute pendant 1 heure pour les analysées par spectrophotomètre, avec mesure de pH chaque 10 min.

II.4.3 Les paramètre étudiier

L'effet de l'intensité de courant : une tension électrique à 10 V, 15 V, 20 V, et 30 V.

L'effet de la concentration initiale de colorant : 20 mg/l, 40 mg/l, 50mg/l et 80 mg/l.

L'effet de nombre de plaque : 2 plaques, 3 plaque, 4 plaques, 5 plaques, et 6 plaques.

L'effet de la distance entre les électrodes, 1 cm, 2 cm et 3 cm.

II.4.4 Méthodes d'analyse

- **Mesure de l'absorbance** : en utilisant le spectrophotomètre

L'efficacité de traitement a été calculer comme suit

$$R (\%) = [(C_0 - C) / C_0] * 100$$

Avec

C_0 c'est la concentration initiale de solution à traiter

C c'est la concentration finale de solution traiter

- **Mesure de pH** : les mesures sont effectuées à l'aide d'un pH mètre, le pH initial varie entre 5,6 et 7

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'évaluation des performances du procédé d'EC pour le traitement d'une solution synthétique de bleu brillant. Les expériences ont été réalisées pour examiner les effets des paramètres de fonctionnement du procédé tels que l'intensité de courant, nombre d'électrodes, espacement entre les électrodes, et la charge initiale en colorant.

III.2 Etude spectroscopique Visible de la molécule du Bleu Brillant

III.2.1 Bailliage de λ_{\max} :

$\lambda_{\max} = 593 \text{ nm}$

On a utilisé de différents concentration afin de fixer la longueur d'onde maximal

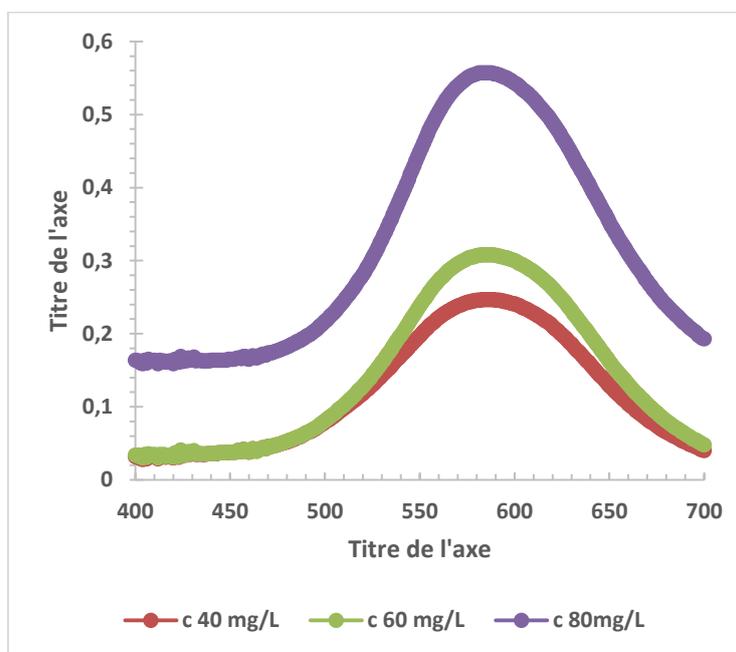


Figure III. 1: Effet de la teneur du colorant sur la longueur λ_{\max} .

Nous observons que la longueur d'onde maximal de colorant brillant bleu n'est pas affectée par les concentrations initiales, la longueur d'onde maximal est toujours 593 nm

III.2.2 Effet du pH sur la courbe d'absorption à λ_{\max}

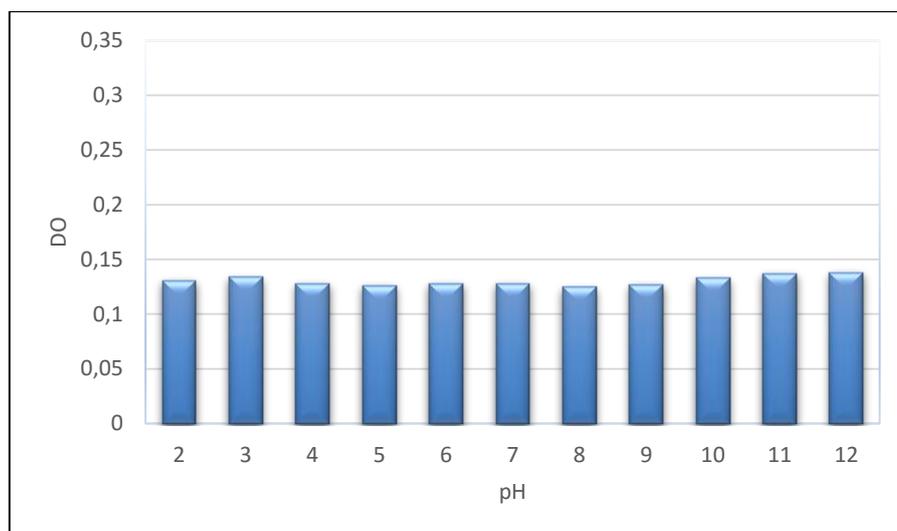


Figure III. 2: Stabilité de λ_{\max} en fonction du pH.

Nous observons que notre molécule n'est pas affectée par les pH extrêmes, ou nous avons observé la rémanence de l'intensité de la couleur et ce pour quel pH applique

III.2.3 Courbe d'étalonnage

Le dosage de colorant bleu brillant a été réalisé par la méthode colorimétrique à une longueur d'onde de 593 nm. La e courbe d'étalonnage a été établie afin d'estimer la concentration de colorant en solution

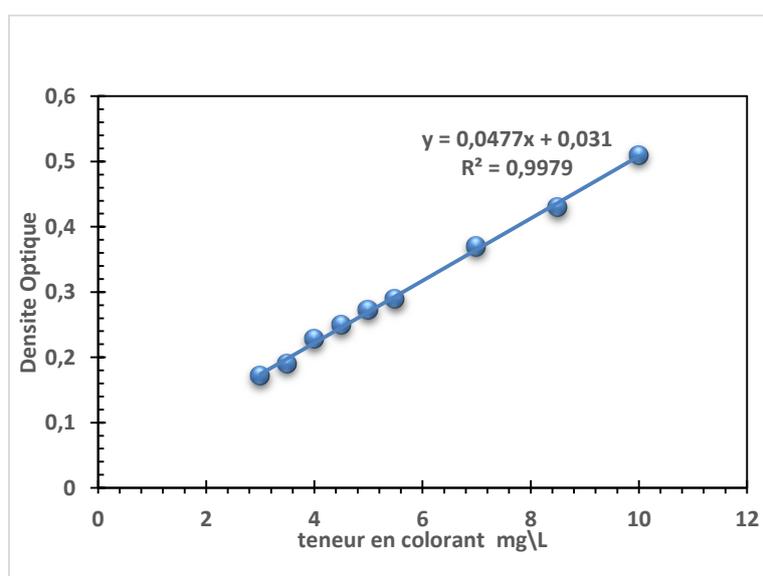


Figure III. 3: la courbe d'étalonnage.

Comme nous l'avons vu précédemment, l'électrocoagulation est une méthode électrochimique qui permet d'étudier les paramètres en variant les niveaux de chacun dans un intervalle donné.

III.3 Paramètres influence l'électrocoagulation

Tableau III. 1: paramètre influencent l'électrocoagulation.

Paramètre	Valeurs
L'intensité de courant (variant les valeurs de tension électrique en volte)	10
	20
	30
Nombre d'électrodes	2
	3
	4
	5
	6
Espacement entre les électrodes en (cm)	1
	2
	3
Concentration initial de polluant (mg/l)	20
	50
	80

Pour suivre la cinétique de dégradation du colorant, nous avons opté pour un seul type d'électrode celle en aluminium. Pour l'échantillonnage, et ce durant toute la durée des manipulations, nous avons effectué des prélèvements à intervalle de temps régulier (5 min).

III.3.1 Influence de l'intensité de courant

❖ **Paramètre opératoires**

Tableau III. 2: condition opératoires (l'intensité de courant).

Paramètre	Valeur
[BB]en mg/l	20
[NaCl] en mg/l	1
Agitation en T/min	400
Nombre de plaques	4

Espacement entre les plaques en cm	2
Température en °C	25

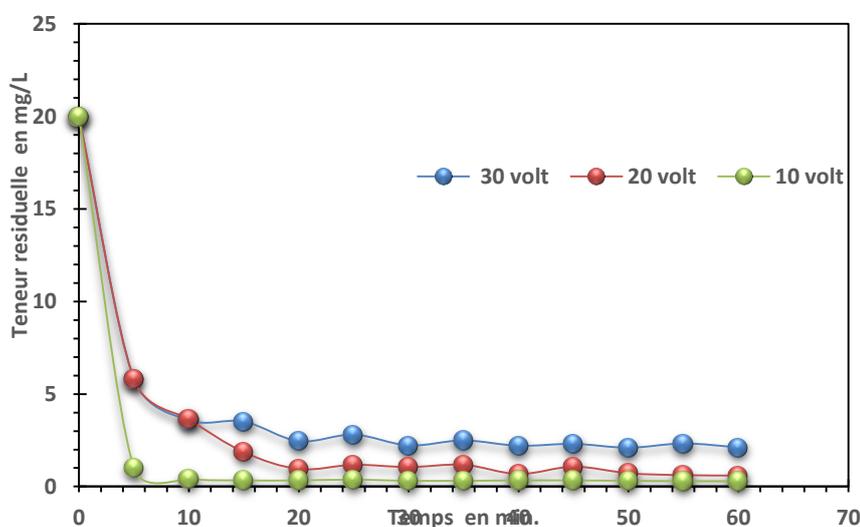


Figure III. 4: effet de l'intensité de courant sur la dégradation de colorant BB.

L'intensité de courant est un paramètre critique en électrocoagulation, il est le seul à pouvoir être contrôlé directement

La figure III.4 montre comment la cinétique de dégradation du bleu brillant varie en fonction de la variation de l'intensité de courant par procédé d'électrocoagulation. On remarque que la décroissance des courbes et la diminution se font d'une manière exponentielle avec le temps pour toutes les valeurs de courant. Les différentes valeurs de l'intensité de courant testées varient de 10 à 30 A. Pour chaque valeur, une dégradation rapide du brillant bleu est observée dans les premières minutes de la réaction, suivie d'une diminution plus lente au fur et à mesure que le temps progresse. Cette diminution est probablement dû à la conductivité très élevée au début de la réaction, avec le temps la conductivité diminue donc la réaction sera lente.

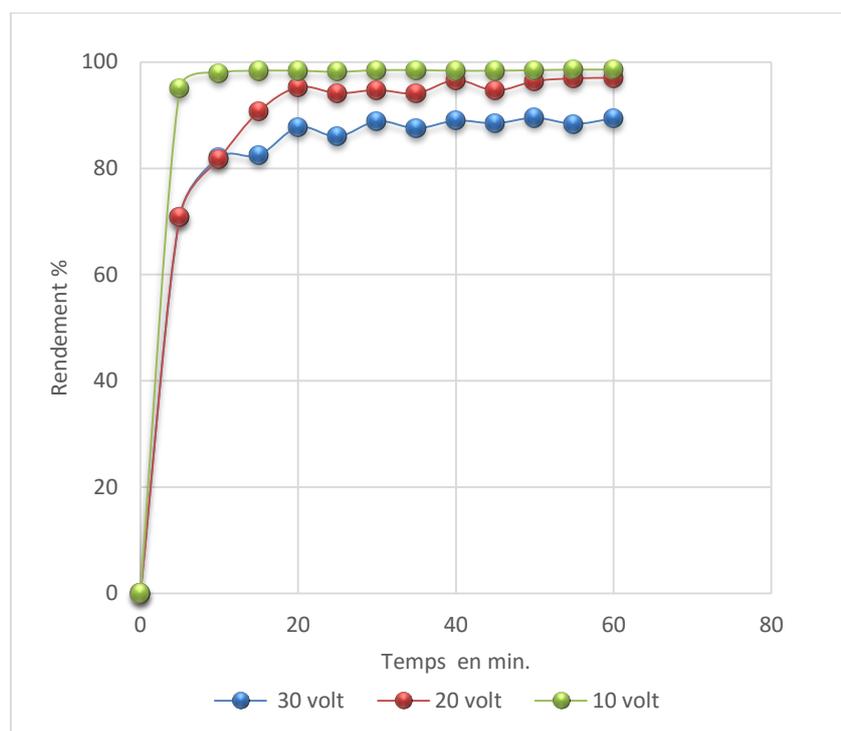


Figure III. 5: rendement de l' effet de l'intensité de courant sur la dégradation de colorant BB.

En suivant le taux d'abattement de décoloration en fonction de temps sur la figure III.4 nous constatons que l'allure des courbes présente un comportement similaire, abattement rapide suivi d'un palier. Il apparaît que l'application de valeurs d'intensité de courant ascendantes améliore le taux de décoloration, en effet au bout de 5 min l'élimination de colorant atteint 70% pour une valeur de 30 V, pareille pour une valeur de 20 V, et un rendement de 95% pour la valeur de 10 V.

L'optimal de rendement est obtenu pour la valeur de courant 10 V c'est à dire l'abattement est d'autant plus élevé quand l'intensité de courant est faible.

III.3.2 Effet de concentration initiale de polluant

❖ Condition opératoires

Tableau III. 3: conditions opératoires (concentration initiale de polluant).

Paramètre	Valeur
Intensité de courant (valeur de tension électrique en volte)	20
[NaCl] en mg/l	1
Agitation en T/min	400
Nombre de plaques	4

Espacement entre les plaques en cm	2
Température en °C	25

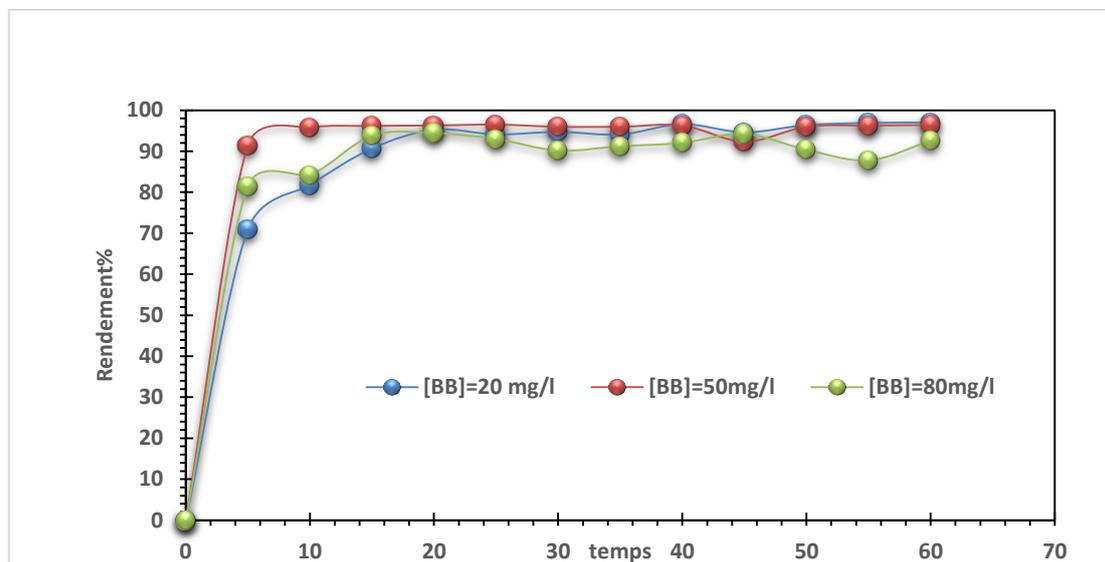


Figure III. 6: rendement de l'effet de concentration initiale de colorant sur la dégradation de colorant BB.

On remarque qu'il y a une meilleure décoloration à une concentration de 50mg/l, puisqu'on obtient un rendement de 96% au bout de 20 min seulement. Pour des concentrations 20mg/l et 80mg/l on a obtenu des rendements de 94% et 92% respectivement au bout de même temps. On conclut que La cinétique de rendement est d'autant plus rapide que la concentration initiale est moyennement faible. Donc le traitement de solutions de plus en plus chargées nécessite un temps réactionnel plus long pour aboutir à l'élimination totale du colorant.

III.3.3 Etude de l'Influence du nombres d'électrodes

❖ Condition opératoires

Tableau III. 4: rendement de l'effet de concentration initiale de colorant sur la dégradation de colorant BB.

Paramètre	Valeur
Intensité de courant(valeur de tension de courant en volte)	20
[NaCl] en mg/l	1
Agitation en T/min	400

[BB] en mg/l	40
Espacement entre les plaques en cm	2
Température en °C	25

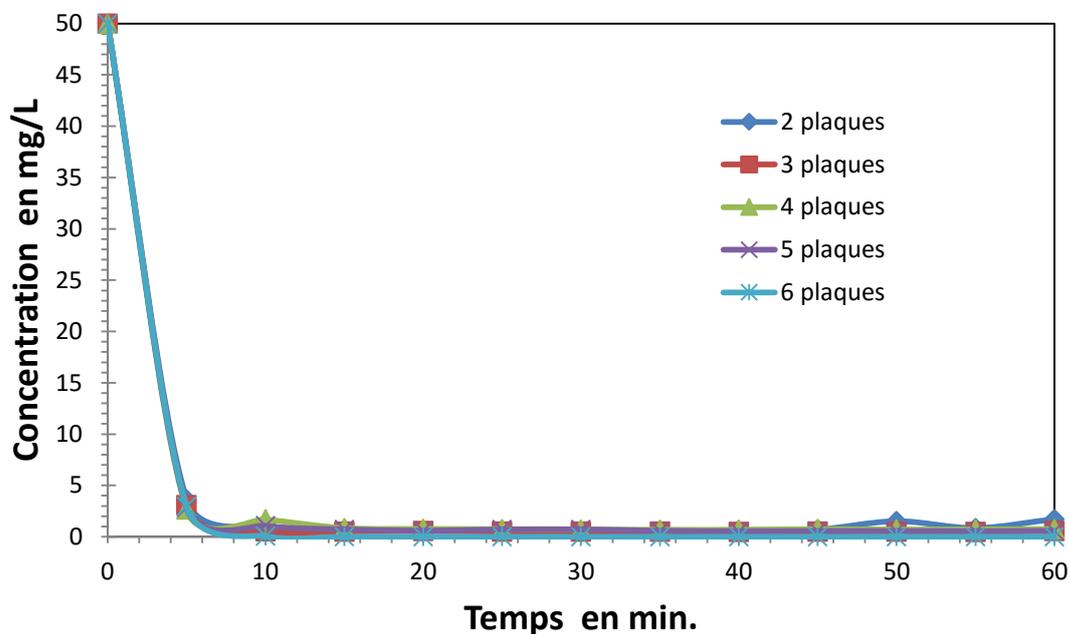


Figure III. 7: l'effet de nombre de plaque sur la concentration de colorant BB.

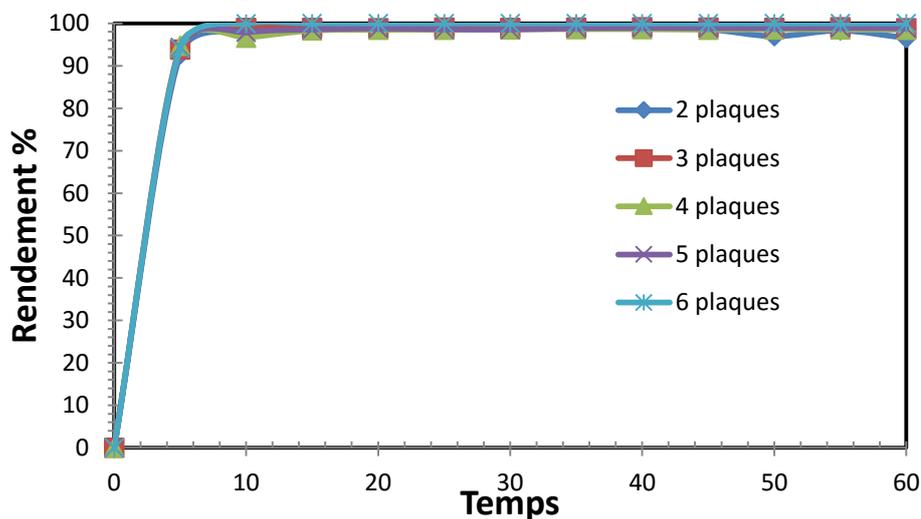


Figure III. 8: rendement de l'effet de nombre de plaques.

A la fin du traitement et d'après l'allure des courbes, nous constatons ce qui suit : L'allure des courbes suit un abattement rapide suivi d'un palier. Un rendement de 100% est obtenu avec six électrodes au bout de 15 min alors qu'avec deux électrodes le rendement

obtenu en 15 min est à 98%, le même rendement est enregistré pour trois, quatre et Cinq électrodes.

Donc l'augmentation de nombre d'électrodes augmente le rendement d ; élimination de colorant et diminue le temps de traitement

III.3.4 Influence de la distance interlectrode

❖ Condition opératoires

Tableau III. 5: condition opératoires (distance interlectrode).

Paramètre	Valeur
Intensité de courant (valeur de tension de courant en volte)	20
[NaCl] en mg/l	1
Agitation en T/min	400
[BB] en mg/l	50
Nombre de plaque	4
Température en °C	25

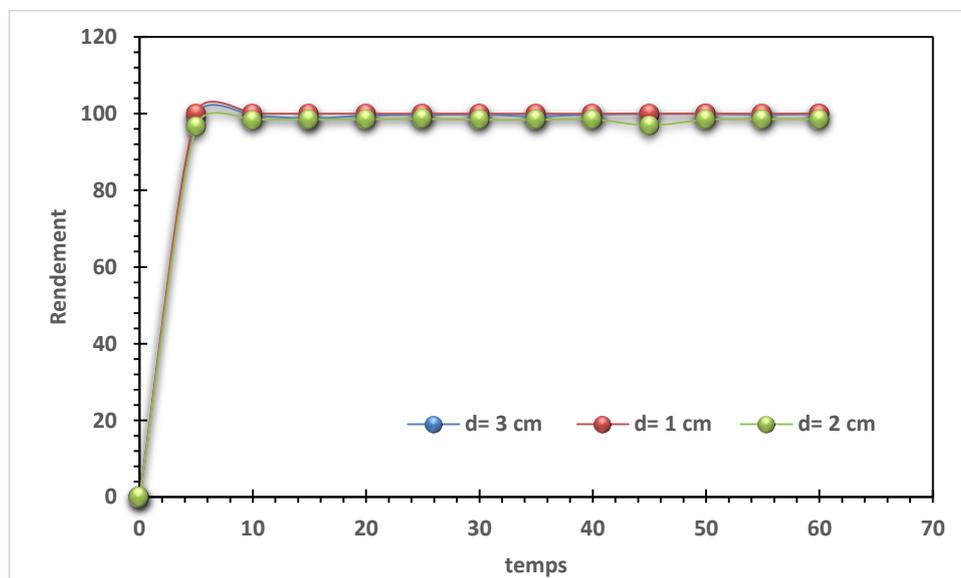


Figure III. 9: rendement de l'effet de la distance entre les électrodes.

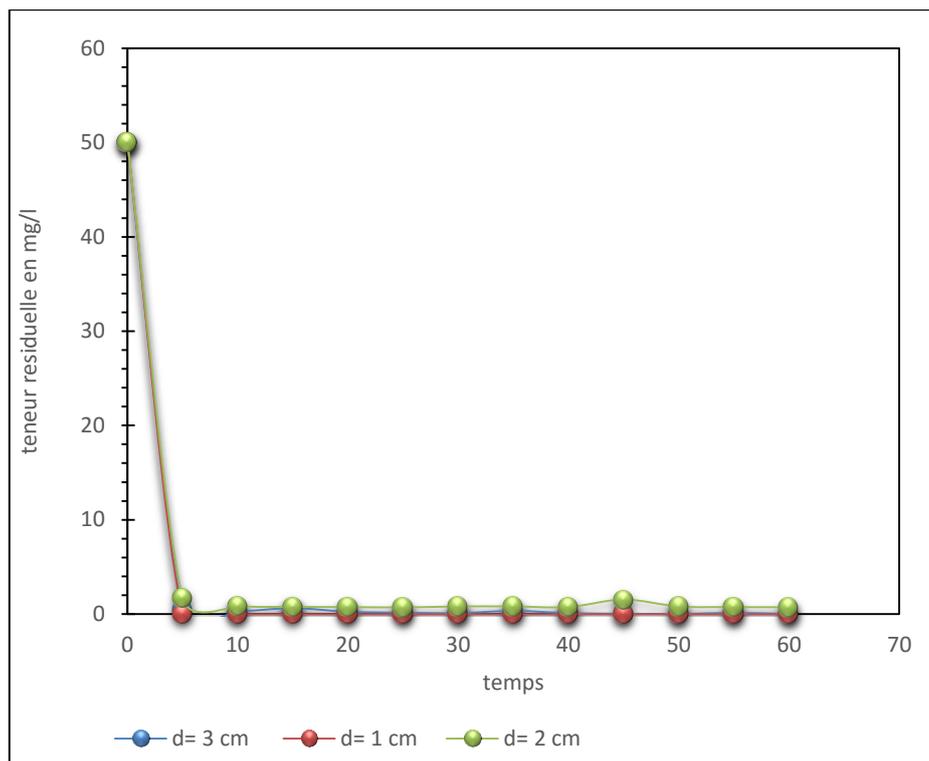


Figure III. 10: effet de la distance entre les électrode sur la dégradation de colorant BB par procédé électrocoagulation.

Dans tout procédé électrochimique, y compris l'EC, la distance inter électrodes est l'un des paramètres les plus déterminants

A la lecture des courbes obtenues après traitement, nous déduisons ce qui suit :

Plus l'espacement entre les électrodes est faible le traitement est effectué en un temps réduit.

Notons qu'après 5 minute de traitement seulement avec une distance de 1 cm, le taux d'abattement est beaucoup plus supérieur aux taux obtenus avec les autres valeurs (100%).

Une distance inter-électrodes trop petite est à éviter à cause des problèmes de courts circuits qui peuvent survenir.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le procédé d'électrocoagulation fait toujours l'objet d'une activité de recherche intensive en raison de ses divers avantages : il est simple, peu coûteux, écologique, polyvalent, efficace, et il s'agit également d'une technique non spécifique, capable d'éliminer presque tous les types de polluants. Ce procédé est valide soit à l'échelle laboratoire soit à l'échelle industriel. Cependant, des efforts de recherche supplémentaires sont nécessaires pour clarifier les conditions de fonctionnement qui peuvent être appliquées afin d'étendre ces méthodes au niveau industriel, même si ces paramètres dépendent de chaque type d'effluent spécifique.

Au cours de ce travail nous sommes intéressés à l'étude d'élimination de colorant brillant bleu par le procédé électrocoagulation en utilisant des plaques en aluminium comme électrodes une série d'expériences a été réalisée afin de trouver les effets des paramètres influençant le procédé.

Dans le but d'obtenir un rendement maximal de ce procédé de traitement, nous avons testé plusieurs paramètres qui ont une grande influence sur son efficacité tels que, l'intensité du courant électrique, la concentration initiale de colorant, le nombre de plaques, et la distance entre les plaques. Le choix de la valeur optimale de chaque paramètre étudié se base, sur la comparaison des rendements obtenus pour chaque essai appliqué.

Cette étude nous a permis de conclure que :

- Une concentration de colorant à 50 mg/l .
- L'intensité de courant : une tension électrique de 20 volts.
- Nombre d'électrode égale à 4.
- Une distance inter électrode de 1 cm.

Perspectives

1. La caractérisation et la valorisation des boues générées lors de l'application de l'électrocoagulation
2. La réalisation de ce procédé en mode continu.
3. Une étude technicoéconomique pour estimer la consommation énergétique et celle des électrodes utilisées.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Référence bibliographique

- [1] gouvernement de canada, Évaluation préalable-Groupe des triarylméthanes, article, canada, octobre 2020
- [2] <https://www.passeportsante.net/nutrition/additifs-alimentaires?doc=e133-faut-savoir-sur-colorant-bleu>
- [3] Sergi Garcia-Seguraa, Maria Maesia S.G. Eibanda, Jailson Vieira de Meloa, Carlos Alberto Martínez-Huitle, Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies, 801 (2017) 267–299
- [4] BOUAOUINE O.1, KHALIL F.1*, CHTIOUI H.1, ZAITAN H.2, HARRACH A, TRAITEMENT PAR ELECTROCOAGULATION DES LIXIVIATS DE LA DECHARGE PUBLIQUE CONTROLEE DE LA VILLE DE FES (MAROC), article, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès, Maroc, septembre 2015.
- [5] Slimane BESSIOUD, TRAITEMENT D'UNE EAU DE SURFACE PAR ELECTROCOAGULATION, mémoire de magister, universitee Guelma, 2010.
- [6] BELOUDAH Marwa, Etude des propriétés de l'électrocoagulation d'un acide organique, mémoire de master, universitee de Biskra, 2020.
- [7] Jean Nepo Hakizimana a,f , Bouchaib Gourich a, □, Mohammed Chafi a , Youssef Stiriba b , Christophe Vial c,d , Patrick Drogui e , Jamal Naja, Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches, Desalination 404 (2017) 1–21
- [8] Mohammad Y.A. Mollaha, Paul Morkovskyb, Jewel A.G. Gomesc, Mehmet Kesmezc, Jose Pargad, David L. Cockec, Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation, B114 (2004) 199–210
- [9] Adel Aitbara*, Sabir Hazourli, Soraya Boumaza, Soraya Touahria, Mouna Cherifi, Etude comparative d'efficacité de prétraitement des effluents d'une laiterie industrielle par coagulation-floculation et électrocoagulation en dynamique, 26 : 103 – 111 (2013)

Références bibliographiques

[10] Mounir BENNAJAH, traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation/électroflotation en réacteur airlift, these doctorat, L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, décembre 2007

[11] Malika Aoudjehane, Malika Rezzouk, Amara Kellil, Yves Aurelle et Christine Guigui, Étude comparative de l'électrocoagulation et de la coagulation floculation vis-à-vis de la déstabilisation d'une émulsion d'huile de coupe, article, universitee de Québec, 23, 2010.