RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي – برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie de l'Environnement

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

FILIÉRE : Génie des Procédés

Spécialité : Gestion des changements environnementaux en Méditerranée

Par

-Khelifi Ahmed Ikram **- Mimoune Ouarda**

Intitulé

Elimination du colorant bleu de méthylène par électrocoagulation, traitement et optimisation

Soutenu publiquement, le 21 / 06 /2026
Devant le jury composé de :

Mme Faid Hayette	MCA	**Univ-BBA**	Président
Mme Zouaoui Hanane	MCB	**Univ-BBA**	Examinateur
Mme Maghraoui Nadjah	MCB	**Univ-BBA**	Encadrant
M Ben Makhlouf Abdelfattah	MCA	**Univ-BBA**	Co-Encadrant

Année Universitaire 2025/2026

Remerciements

Nous commençons tout d'abord par remercier le dieu pour nous avoir donné la force et le courage et de nous avoir doté de toute la bonne volonté nécessaire et de nous avoir gardé en bonne santé jusqu'à avoir mené à terme ce travail.

Nous tenons également à nous remercier mutuellement pour notre collaboration notre persévérance et notre esprit d’équipe. Ce travail témoigne de nos efforts et de notre détermination à relever les défis rencontrés durant ce parcours.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre encadrante Mme Maghraoui pour son aide et ses conseils dans la réalisation de cette thèse.

Nous remercions également les enseignants du département de génie d'environnement tout au long de notre parcours académique Parmi eux chef département Mr H. Karec et Mr A. ben makhlouf, Mr. Khalil, Mr.R. Ayache, Mme Faid Hayette, et Mme Zouaoui Hanane.

Enfin, nous remercions nos familles et nos proches pour leur soutien moral leur encouragement et leur patience durant toute la période de ce travail.

Dédicace1

Ya Allah bénis mes efforts et fais que mon succès vienne de ton aide et de ta volonté.

<u>À mon père</u>

Que Dieu lui accorde sa miséricorde bien qu'il nous ait quittés, il reste à jamais présent dans mon cœur à ses valeurs, ses sacrifices et son amour inconditionnel continuent de me guider chaque jour sur le chemin de la vie.

<u>À ma mère</u>

Pour sa présence constante sa douceur et son grand cœur à ses prières et son soutien infatigable, qu'Allah la protège la comble de santé et prolonge sa vie dans le bien.

<u>À mes sœurs et à leurs petits bouts de chou</u>

Une pensée spéciale pour mes sœurs et mes neveux/nièces, merci d'apporter tant de joie et de rires dans la famille je vous embrasse tous très fort que dieu vous protège et vous garde en bonne santé qu'il illumine votre vie de bonheur de réussite et de paix.

KHELIFI AHMED IKRAM

Dédicace2

Je remercie Dieu de m'avoir permis de mener à bien ce projet et de réaliser mon rêve.

À mes chers parents, que Dieu les protège. À ma mère adorée, dont les prières ont été le secret de ma réussite, et à mon cher père, qui m'a enseigné la patience et la persévérance.

À mes frères et sœurs, Islam, waheba, Youssef et le petit Abdul Rahim, vous êtes mes partenaires dans cette réussite, et ma joie serait incomplète sans vous. Je prie Dieu de vous garder comme une bénédiction dans ma vie et de vous accorder bien plus de bonheur que vous n'en souhaitez pour moi.

À toute ma famille et à tous ceux qui m'aiment sincèrement et me veulent du bien.

À mon ami Ikram, merci pour tout ce que tu a apporté, et je te souhaite un avenir rempli de succès et de prospérité.

Je vous dédie cette remise de diplôme avec fierté et gratitude ; je vous adresse tout mon amour et mon respect. 🌹🎓✨

MIMOUNE OUARDA

Résumé

Dans cette étude, nous nous intéressons à l'optimisation de l'élimination du Bleu méthylène par électrocoagulation en utilisant le fer et l'aluminium comme matériau d'électrode. L'étude expérimentale examine l'influence de plusieurs variables clés, le courant, la concentration du sel support, Na_2SO_4 et le temps de traitement, Les résultats obtenus ont permis d'obtenir des taux de dégradation du colorant pouvant atteindre 97,06%, pour une concentration de 0,1g/l de Na_2SO_4, un temps d'électrolyse Correspondant à 45 minutes, un courant imposé égal à 0, 3A dans le cas de l'électrode de fer et 4,07% dans le cas de l'Aluminium, pour une concentration de (Na_2SO_4) 0,05 g/l, un temps d'électrolyse 30min , un courant imposé de 0,3A avec une distance inter-électrodes de 1 cm, pour atteindre une grande amélioration de décoloration.

Mots clés: électrocoagulation, bleu de méthylène, traitement, optimisation, fer et aluminium.

Abstract

In this study, we focus on optimizing the removal of methylene blue via electrocoagulation using iron and aluminum as electrode materials. The experimental study examines the influence of several key variables: current, the concentration of the support salt (Na_2SO_4), and treatment time. The results obtained showed dye degradation rates up to 97,06 % for a concentration of 0,1g/l, an electrolysis time of 45 minutes , and an applied current of 0, 3A in the case of the iron electrode, and 4,07% in the case of the aluminum electrode, for a (Na_2SO_4) concentration of 0,05 g/l , an electrolysis time of 30 min, and applied current of 0,3A with an inter-electrode distance of 1 cm, resulting in a significant improvement in decolorization.

Keywords: electrocoagulation, methylene blue, treatment, optimization, iron, and aluminum.

ملخص

في هذه الدراسة، نركز على تحسين عملية ازالة صبغة الميثيلين الازرق عن طريق التخثر الكهربائي باستخدام الحديد والالومنيوم كمواد للأقطاب الكهربائية. تبحث الدراسة التجريبية تأثير عدة متغيرات رئيسية، وهي التيار، وتركيز الملح الحامل ووقت المعالجة. وقد سمحت النتائج التي تم الحصول عليها بتحقيق معدلات تحلل للصبغة تصل الى 97,06٪ ،لتركيز يبلغ 0,1 غ/لتر، ووقت تحليل كهربائي يبلغ 45 دقيقة ،وتيار مفروض يساوي 0,3 امبير في حالة قطب الحديد و4,07% في حالة الالومنيوم بتركيز0,05 غ/لتر، ومدة تحليل30 دقيقة بتطبيق تيار كهربائي بقوة 0,3 امبير مع مسافة بين الاقطاب الكهربائية تبلغ 1 سم ، مما ادى الى تحسن ملحوظ في عملية ازالة اللون .

الكلمات المفتاحية: التخثر الكهربائي، أزرق الميثيلين، المعالجة، التحسين، الحديد والألومنيوم

Table des matières

Listes des tableaux et figures

liste des abréviations

Introduction

CHAPITRE I: Etude bibliographique

Partie I.1: Pollution de l'eau 1

I.1.1. Définition : 1

I.1.2. Classification de pollution: 1

I.1.3. Principaux types de pollution des eaux: 1

I.1.3.1. Pollution physique: 1

I.1.3.2. Pollution thermique: 2

I.1.3.3. Pollution radioactive: 2

I.1.3.4. La pollution chimique: 2

I.1.3.5. La pollution organique : 2

I.1.3.6. Pollution microbiologique: 2

I.1.4. Origines de la pollution des eaux: 2

I.1.4.1. Pollution d'origine naturelle: 2

I.1.4.2. Pollution d'origine industrielle: 3

I.1.4.3. Pollution d'origine agricole : 3

I.1.5. Types de polluants: 3

Partie I.2: Généralités sur les colorants 4

I.2.1.Définition des colorants : 4

I.2.2. Origine des colorants: 4

I.2.3. Historique des colorants : 5

I.2.4. Classification des colorants : 5

I.2.4.1. Classification technologique (appellation usuelle) : 5

I.2.4.2. Classification technique : 6

I.2.4.2.1. Colorants naturels : 6

I.2.4.2.2. Colorants synthétiques : 7

I.2.4.3.Classification chimique : 7

I.2.4.3.1.Les colorants azoïques : 7

I.2.4.3. 2. Les colorants triphénylméthanes : 8
I.2.4.3. 3. Les colorants xanthènes : 8
I.2.4.3. 4. Les colorants anthraquinoniques : 9
I.2.4.3. 5. Les phtalocyanines : 9
I.2.4.3. 6. Les colorants nitrés et nitrosés : 9
I.2.5. Application des colorants: 10
I.2.6. Impact des colorants sur l'environnement et la santé : 10
Partie I.3: Techniques de traitement des eaux colorées 10
I.3.1.Définition du traitement des eaux colorées : 10
I.3.2.Procédés de traitement des eaux usées de l'industrie textile: 11
I.3.2.1.Traitement primaire : 12
I.3.2.2.Traitement secondaire (Traitement biologique) : 12
I.3.2.3. Traitements tertiaires : 12
Partie I.4: Electrocoagulation 13
I.4.1. Définition d'Electrocoagulation: 13
I.4.2. Historique du procédé : 14
I.4.3. Principe du procédé d'électrocoagulation : 15
I.4.4. Types d'électrodes : 17
I.4.5. Différents types de connexion : 17
I.4.6. Principales lois d'électrolyse : 18
I.4.7. Avantages et inconvénients du procédé EC : 20
CHAPITRE II : Matériels ET Méthodes
II.1.Introduction : 22
II.2. Matériels et produits chimiques utilisés : 22
II.3.Produits chimiques : 24
II.4. Étapes de l'Expérience: 25
II.4.1.Caractéristique de la solution avant traitement: 25
II.4.1.1.La courbe d'étalonnage: 26
II.4.2. La cellule d'électrocoagulation: 27
II.5.Les réactions aux électrodes : 28
II.6.Role de sel support : 29
CHAPITRE III: Résultats et discussions
III.5..Modélisation et optimisation par la méthode de Box Benkhen : 29

III.5.1.2.Modélisation dans le cas d'électrodes en fer :..... 29
III.5.1.3. Evaluation de l'adéquation du modèle statistique..... 30
III.5.1.4.Justification du modèle est signification des facteurs 32
III.5.1.5. Diagrammes des effets principaux 33
III.5.1.6. Diagrammes des effets d'interactions des facteurs de élctrocuagulation 34
III.5.1.7. Graphiques de surfaces et des contours..... 35
III.5.1.8.Optimisation..... 37
III.5.1.9Validation du modèle 38
III.6.Modélisation dans le cas d'électrodes en l'aluminium 39
III.6.1.3Evaluation de l'adéquation du modèle statistique 41
III.6.1.4Justification du modèle est signification des facteurs..... 42
III.6.1.5 Diagrammes des effets principaux..... 43
III.6.1.6. Diagrammes des effets d'interactions des facteurs de élctrocuagulation 44
III.6.1.7.Graphiques de surfaces et des contours 46
III.6.1.8.Optimisation..... 47
Conclusion générale 52

Liste des figures

Figure I.1: pollution de l'eau ..... **Error! Bookmark not defined.**
Figure I.2: Nila bleu 4
Figure I.3: Colorants naturels dans aliments 7
Figure I.4: Poudre de peinture 7
Figure I.5: Les colorant azoïque 8
Figure I.6: exemple de colorants triphénylméthanes. Le Méthyl violet 6B 9
Figure I.7: Exemple de colorant xanthènes.9H-xanthène 9
Figure I.8: La molécule anthraquinone 9
Figure I.9: La molécule anthraquinone :Structure moléculaire d'un colorant phtalocyanine de cuivre 10
Figure I.10: Structure moléculaire d'un colorant phtalocyanine de cuivre : Structure moléculaire d'un colorant nitré et nitrosé nitrophenol or 4-hydroxynitrobenzene 10
Figure I.11: Eau colorée 13
Figure I.12: Les catégories d'interaction observées dans la méthode d'EC 15
Figure I.13: Le principe de fonctionnement d'électrocoagulation 17
Figure I.14: Différents types de connexion 19

Figure II.1: Générateur 22
Figure II.2: Spectrophotomètre UV visible Thermo Fisher Scientific (UviLine 9400C)..... 23
Figure II.3: Turbidimètre 24
Figure II.4: Solution mére et filles**…… …..**25
Figure II.5 : Courbe d'étalonnage de bleu méthylène.……..…….26
Figure II.6 : Dispositif expérimental. ……27
Figure II.7 : Aspect de la solution après l'électrocoagulation dans le cas des électrodes de fer……..28
Figure II. 8 : Aspect de la solution après l'électrocoagulation dans le cas des électrodes d'aluminium……..28
Figure II.9 : Décontamination des floc formés lors du traitement d'électrocualgulation……30

Figure III.1 : Effet des facteurs principaux et leurs interactions …….…..30

Figure III.2 : Dépendance de la réponse réelle en fonction de la réponse prédite…….....31

Figure III.3 : Diagramme de dispersion des résidus……..31
Figure III.4 : Diagramme de Pareto des effets normalisés ……..…….32

Figure III.5 : Diagramme des effets principaux pour l'électrocoagulation dans le cas d'électrode en Fer ……...33

Figure III.6 : Diagramme des effets principaux pour l'électrocoagulation dans le cas d'électrode en Fer …….....34

Figure III. 7 : Diagrammes de surfaces pour l'électrocoagulation dans le cas d'électrode en fer …….....36
Figure III.8 : Valeurs correspondant au meilleur résultat…….....38

Figure III.9 : Effet des facteurs principaux et leurs interactions……...40

Figure III.10 : Dépendance de la réponse réelle en fonction de la réponse prédite……...41

Figure III.11 : Diagramme de dispersion des résidus……41

Figure III.12 : Diagramme de Pareto des effets normalisés …….……42

Figure III.13 : Diagramme des effets principaux pour l'électrocoagulation dans le cas d'électrode en aluminium……. ……...43

Figure III.14 : Diagramme des effets principaux pour l'électrocoagulation dans le cas d'électrode en aluminium ……...44

Figure III.15 : Diagrammes de surfaces pour l'électrocoagulation dans le cas d'électrode en aluminium ……...46

Figure III.16: meilleur résultat…….....48

Liste des abréviations

EC : Electrocoagulation

BM : Bleu de méthylène

Al : Aluminium

Fe : Fer

I : Courant

t : Temps

Liste des tableaux

Tableau I.2. 1 : Principaux groupes chromophores et auxochromes, classés par intensité croissante 5
Tableau I.4.2: Types d'électrodes 17

Tableau II. 1 : résume les principales caractéristiques physico-chimiques de ce colorant 25
Tableau II .2 : Les paramètres physico-chimiques de l'échantillon avant le traitement par la technique de l'électrocoagulation..... 26

Tableau III. 1 : Facteurs choisis pour l'expérience 28
Tableau III .2 : Essais et réponses du plan box-Behnken..... 29
Tableau III .3 : ANOVA pour validation du modèle 32
Tableau III .4 : Valeurs correspondant au meilleur résultat. 37
Tableau III .5 : Valeurs optimale 38
Tableau III .6 : Essais et réponses du plan box-Behnken..... 39
Tableau III .7 : ANOVA pour validation du modèle 42
Tableau III .8 : Valeur correspondant au meilleur résultat..... 47

Introduction générale

Nous vivons dans un monde où tout est coloré, nos vêtements, nos aliments nos produits cosmétiques, pharmaceutiques, etc. Ces colorants sont de plus en plus des colorants de synthèse, en raison de leur facilité de synthèse, de leur rapidité de production et de leur grande variété de couleurs si on les compare aux colorants naturels. Aujourd'hui, les colorants de synthèse constituent une véritable industrie et un capital de la chimie moderne. Ces colorants sont pour la plupart synthétiques et représentent aujourd'hui un large groupe de composés chimiques[1]. Les colorants organiques tels que le bleu de méthylène représentent l'un des polluants les plus fréquents dans les eaux usées industrielles, en raison de leur stabilité chimique et de leur résistance à la dégradation, ce qui constitue un danger majeur pour l'environnement et la santé humaine [2]. La production mondiale de ces colorants de synthèse est évaluée à 800 000 t•an-1. Les industries textiles, et plus particulièrement les phases de teinture et d'ennoblissement, utilisent principalement des produits chimiques, nuisibles pour la santé, comme certains colorants azoïques cancérogènes, et engendrent une pollution des eaux de surface et des nappes phréatiques. Leur présence dans l'eau altère non seulement la qualité esthétique, mais réduit également la pénétration de la lumière, perturbant ainsi les écosystèmes aquatiques[1].

Face à ces enjeux environnementaux, le développement de techniques efficaces pour le traitement des eaux colorées devient indispensable. Parmi les différentes méthodes disponibles (physiques, chimiques et biologiques), l'électrocoagulation apparaît comme une technologie prometteuse en raison de sa simplicité de mise en œuvre, de son efficacité élevée et de son faible impact environnemental. Ce procédé repose sur la dissolution anodique d'électrodes métalliques, généralement en aluminium ou en fer, sous l'effet d'un courant électrique, générant ainsi des espèces coagulantes capables d'éliminer les polluants dissous et colloïdaux[3].

L'objectif de ce travail est d'étudier l'élimination d'un colorant bleu de méthylène par électrocoagulation, en évaluant les performances du procédé en termes de rendement d'élimination. Une attention particulière sera accordée à l'influence des paramètres opératoires tels que l'intensité du courant, le temps de traitement, la concentration du sel support et la nature de l'électrode. Par ailleurs, une démarche d'optimisation sera entreprise afin de déterminer les conditions expérimentales optimales permettant d'améliorer l'efficacité du traitement tout en minimisant la consommation énergétique et la production de boues

Cette recherche s'aligne sur cette tendance d'amélioration et a pour objectif d'examiner l'élimination du colorant BM par ce procédé. Cette recherche ne se limite pas à l'examen des performances de décoloration, elle vise également à explorer les mécanismes de traitement utilisés et à affiner méticuleusement les conditions expérimentales. L'objectif est de fournir une approche technique qui soit à la fois efficace, rentable et durable pour la sauvegarde des écosystèmes aquatiques.

Ce travail est divisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre est déstiné à l'étude bibliographique dans laquelle nous avons abordé la pollution de l'eau, généralités sur les colorants, les techniques de traitement des eaux colorées et l'électrocoagulation.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude expérimentale d'élimination de bleu méthylène par électrocoagulation et à la description du matériel ainsi que le mode opératoire utilisé.
- Le troisième chapitre, comprend la réalisation des essais expérimentaux, plan d'expériences suivi, la modélisation et l'optimisation du procédé, ainsi que l'interprétation des résultats obtenus afin d'évaluer l'efficacité du traitement.

Enfin, nous avons terminé ce mémoire par une conclusion générale relatant les principaux résultats de cette étude.

CHAPITRE I

Etude bibliographique

Partie I.1: Pollution de l'eau

I.1.1. Définition :

La pollution est définit comme étant toute transformation de la composition de l'eau ayant un caractère gênant ou nuisible pour les usages humains, la faune ou la flore[4].



Figure I. 1.1 : pollution de l'eau [5]

I.1.2. Classification de pollution:

La pollution peut être classée de différentes manières [1]:

-Les classifications se basent sur l'origine de la pollution (naturelle ou anthropique).

-Elles se basent aussi sur la nature des polluants (chimique, biologique, physique).

-Selon la durée (temporaire permanente).

I.1.3. Principaux types de pollution des eaux:

I.1.3.1. Pollution physique:

Est une conversion que l'on peut qualifier thermique et mécanique, causé par de températures élevées qui entraînent une diminution de la teneur en oxygène dissous et une diminution de la solubilité des gaz, produisant ainsi des particules et des matières qui rendent l'aspect de l'eau très trouble[6].

I.1.3.2. Pollution thermique:

Elle se rencontre dans l'ndustrie des pâtes et du papier et dans le secteur chimique et pétrolier. La chaleur résiduelle générée pendant la production est directement déversée dans les eaux de surface à courant d'eau (1-15°C), ce qui est plus chaud que l'environnement ambiant[4].

I.1.3.3. Pollution radioactive:

C'est la pollution générée par toute activité radioactive artificielle dont l'origine est l'utilisation de l'énergie nucléaire sous toutes ses formes (par exemple, les centrales d'exploitation des mines d'uranium, le traitement des déchets radioactifs) [7],[8].

I.1.3.4. La pollution chimique:

Elle est due à la présence de substances chimique dissoutes dans l'eau. Cette pollution est causée essentiellement au déversement de polluants organiques et des sels de métaux lourds qui sont les plus menaçants rejetés souvent par les unités industrielles[9].

I.1.3.5. La pollution organique :

C'est l'ensemble des effluents de matières organiques fermentescibles (biodégradables), provenant des secteurs de l'alimentation et l'agroalimentaire (laiteries, abattoirs, sucreries.). Ils entraînent une consommation d'oxygène dissous dans ces eaux, en entraînant la mort des poissons par asphyxie et le développement (dépôts de matières organiques au fonds des rivières) de fermentation anaérobie (putréfaction) génératrices de nuisances olfactives[10].

I.1.3.6. Pollution microbiologique:

La contamination microbiologique de l'eau peut être directe ou indirecte par les excrétas humain ou d'animaux et surtout de la contamination fécale résultent de cette pollution es bactéries, les protozoaires et les virus[11] .

I.1.4. Origines de la pollution des eaux:

I.1.4.1. Pollution d'origine naturelle:

Les eaux usées urbaines peuvent être définies comme les eaux qui sont dégradées par les activités des hommes. Elles sont chargées de diverses matières organiques azotées et de germes

fécaux. L'eau résultante des activités domestiques (entretenir garage automobile, les magasins, les marchés...) des établissements et les installations collectives (les hôpitaux, les écoles, les hôtels, les restaurants, université, secteur sanitaires...) [12]. On estime que la pollution journalière produite par une personne consomment 200 litres d'eau est évaluée comme suit: 70 à 90 g de matières en suspension, 60 à 70 g de matières organiques, 15 à 17 g de matières azotées, 4 g de phosphore, plusieurs milliards de germes pour 100 ml[13], [9] :

I.1.4.2. Pollution d'origine industrielle:

Les eaux usées issues de l'industrie présentent généralement une composition particulière qui correspond directement au type d'industrie envisagée. Bien ue les polluants soient organiques ou inorganiques, biodégradables ou non biodégradables, ils peuvent présenter des caractéristiques de toxicité spécifiques liées aux substances chimiques transportées [14]. Les émissions industrielles pourraient suivre trois trajectoires distinctes de purification [2]:

-Ils sont éliminés directement dans le réseau domestique.

- Ils sont gérés en amont avant d'être dirigés vers le réseau domestique [15].

I.1.4.3. Pollution d'origine agricole :

L'agriculture est une racine de pollution des eaux non négligeable car elle donne les engrais et les pesticides. Elle est la cause essentielle des Pollutions répandues. Les eaux agricoles issues de terres cultivées chargées d'engrais nitratés et phosphatés, sous une forme ionique ou en quantité telle qu'ils ne seraient pas finalement retenus par le sol et intégrés par les plantes, conduisent par ruissellement à un enrichissement en matières azotées ou phosphatées des nappes les plus superficielles et des eaux des cours d'eau ou des retenues[16] [15].

I.1.5. Types de polluants:

Les polluants naissants ont des contaminants persistants et toxiques dont la présence dans l'environnement, sont :[8]

- Métaux lourds
- Produits pharmaceutiques
- Fluorure
- Arsenic
- Polluants émergents

- Les colorants

Partie I.2: Généralités sur les colorants

I.2.1.Définition des colorants :

On appelle colorant toute substance colorée ou non qui, mise au contact de façon appropriée avec un support (se fixe ou se dissout dans ce dernier de façon durable, en lui conférant une nouvelle propriété : la couleur)[17] .Les matières colorantes se caractérisent par leur capacité à absorber les rayonnements lumineux dans le spectre visible (de 380 à 750 nm). La transformation de la lumière blanche en lumière colorée par réflexion sur un corps, ou par transmission ou diffusion, résulte de l'absorption sélective d'énergie par certains groupes d'atomes appelés chromophore [18].



Figure I. 2.2 : Nila bleu [19]

I.2.2. Origine des colorants:

L'origine des couleurs réside dans un mélange fascinant entre la physique de la lumière et la chimie de la matière ; tout ce que nous voyons autour de nous provient de la lumière blanche, qui renferme en son sein le spectre complet des couleurs, et les objets ne sont que des supports qui absorbent certaines ondes de cette lumière et nous renvoient d'autres ondes que nous percevons comme des couleurs spécifiques. Les sources de ces couleurs dans la nature varient entre des sources organiques (comme la chlorophylle dans les plantes et la mélanine chez les êtres vivants) et minérales (comme les oxydes de terre et les roches), jusqu'à la révolution industrielle qui a permis à l'homme de créer des pigments chimiques de laboratoire dont la diversité a surpassé celle des sources naturelles. Les couleurs sont donc finalement des messages visuels que notre cerveau interprète en fonction de la manière dont la matière interagit avec la lumière qui la frappe [20].

I.2.3. Historique des colorants :

L'industrie des colorants synthétiques est émergée en 1856 lorsque le chimiste anglais W. H. Perkin, dans une tentative de synthèse de la quinine artificielle pour soigner le Paludisme, a obtenu la première matière colorante synthétique qu'il a nommé "mauve" (aniline, colorant basique). Perkin a breveté son invention et a mis en place une chaîne de production. De nouveaux colorants synthétiques ont ainsi fait leur apparition sur le marché, ce processus étant encouragé par la découverte de la structure moléculaire du benzène en 1865 par Kekulé. En conséquence, au début du XXème siècle, les colorants synthétiques avaient presque totalement remplacés les colorants naturels [21].La production mondiale des colorants synthétiques était estimée à 700 000 tonnes/an en 1991 (aucune donnée récente n'est disponible)[22].On estime qu'il existe environ 8000 colorants synthétiques chimiquement différents, répertoriés dans le Colleur Index sous 40000 dénominations commerciales. Chaque colorant y est classé sous un nom [23]

Tableau I.2. 1 : Principaux groupes chromophores et auxochromes, classés par intensité croissante [24]

Groupements chromophores	**Groupements auxochromes**
Azo (-N=N-)	Amine primaire (-NH2)
Nitroso (-N=O)	Amine secondaire (-NHR)
Carbonyl (=C=O)	Amine tertiaire (-NR2)
Vinyl (-CH=CH-)	Hydroxyl (-OH)
Nitro (-NO2)	Alkoxyl (-OR)
Sulphure (>C=S)	Donneures d'électrons (-CL)

I.2.4. Classification des colorants :

Il existe deux grandes classes de colorants, en l'occurrence les colorants naturels et les colorants synthétiques.

I.2.4.1. Classification technologique (appellation usuelle) :

Les classifications techniques permettent aux utilisateurs de comprendre comment les colorants sont appliqués, leurs domaines d'utilisation et leurs propriétés (telles que la solubilité, l'affinité pour certains types de fibres ou de matériaux et les propriétés de fixation, etc.). Il est souvent

difficile de connaître la composition chimique d'un colorant car elle est souvent tenue secrète. Cette classification comprend trois éléments :

1. Nom commun de la classe d'application
2. Couleur
3. Le numéro chronologique enregistré dans le "Collor Index"[25].

I.2.4.2. Classification technique :

Les colorants couramment utilisés dans l'industrie textile, contiennent généralement des groupes acides sulfoniques, ce qui leur confèrent une hydrosolubilité appropriée et leur permet de se lier ioniquement aux sites chargés du réseau polymérique du tissu[26]. Les colorants peuvent être classer en deux catégories suivant leur origine et synthèse :[25]

I.2.4.2.1. Colorants naturels :

Ils sont largement répandus, principalement dans les plantes (bois, racines, graines, fleurs et fruits), ainsi que dans les micro-organismes et le corps des animaux. Les colorants naturels peuvent être présents à l'état libre ou liés à des glucides ou des protéines, par exemple : la garance, la cochenille, l'indigo, et le pourpre qui sont couramment utilisés.

Toutefois, leur importance économique dans l'industrie a considérablement diminué en raison de leur coût élevé. Ils ne sont utilisés que dans l'industrie textile, du cuir et du papier que pour des traitements spéciaux. Ils restent, en revanche très utilisés dans les produits alimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques et sont soumis à des réglementations plus strictes[27] .



Figure I. 2.3 : Colorants naturels dans les aliments[28]

I.2.4.2.2. Colorants synthétiques :

Les colorants synthétiques dominent aujourd'hui le marché, en raison de leur capacité à adapter précisément leurs propriétés à leur utilisation. Ces colorants sont principalement synthétisés à partir des produits pétroliers, notamment du benzène et de ses dérivés (toluène, naphtalène, xylène et anthracène)[29]. Leur utilisation est de plus en plus répandue dans les industries de la coloration et des textiles en raison de leur synthèse aisée, de leur production rapide et de la diversité de leurs couleurs par rapport aux colorants naturels [30].

Ainsi, chaque colorant est désigné par sa couleur, sa marque commerciale et un code permettant d'indiquer une nuance (par exemple : R=red ; Y = yellow ; G = green ; B= Blue ; 2B = more Blue) ou une qualité (L = résistant à la lumière) [31].



Figure I. 2.4 : Poudre de peinture[32]

I.2.4.3.Classification chimique :

Cette classification se repose sur la nature de la structure et des groupements chromophores :

I.2.4.3.1.Les colorants azoïques :

Les colorants azoïques se différencient par la présence au sein de la molécule d'un groupement azoïque (-N=N-) reliant deux noyaux benzéniques. Cette catégorie de colorants est la plus utilisée, puisqu'ils représentent plus de 50% de la production mondiale de matières colorantes. Les colorants azoïques se divisent en plusieurs types: les colorants basiques, acides, directs et réactifs solubles dans l'eau, et les azoïques dispersés et à mordant nonioniques insolubles dans l'eau. Il est estimé que 10-15 % des quantités initiales sont perdues durant les procédures de teinture et sont évacuées sans traitement préalable dans les effluents. Or ces composés organiques cancérigènes sont réfractaires aux procédés de traitements habituellement mis en œuvre et sont très résistants à la biodégradation[33].

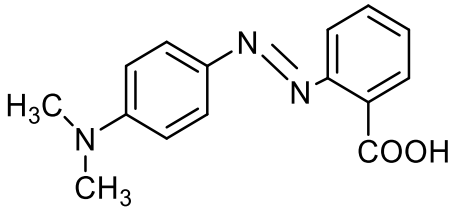


Figure I. 2.5 : Les colorant azoïque [34]

I.2.4.3. 2. Les colorants triphénylméthanes :

Les colorants triphénylméthanes dérivent du triphénylméthane, qui est un hydrocarbure possédant trois cycles phényle liés à un carbone central. On retrouve cette structure de base dans des composés organiques colorés. Les colorants triphénylméthanes et leurs dérivés hétérocycliques constituent la plus ancienne classe de colorants synthétiques. Actuellement bien moins importants que les colorants azoïques et anthraquinoniques, ils ont conservé un certain coût, car ils permettent de couvrir la totalité de la gamme de nuances. Les triphénylméthanes sont utilisés régulièrement dans les industries papetières et textiles teindre le nylon, la laine, la soie et le coton. Leur utilité ne se limite pas à l'industrie. Ce sont des marqueurs biologiques et des agents antifongiques chez les poissons et la volaille[33].

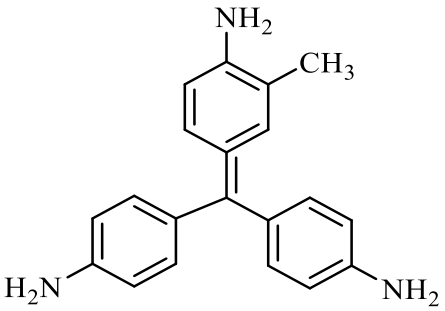


Figure I.2. 6 : exemple de colorants triphénylméthanes. Le Méthyl violet 6B [35]

I.2.4.3. 3. Les colorants xanthènes :

Les colorants xanthènes sont des composés qui constituent les dérivés de la fluorescéine halogénée. Ils sont dotés d'une intense fluorescence. Ils sont aussi utilisés comme colorant

en alimentaire, cosmétique, textile et impression[33].

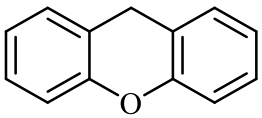


Figure I.2. 7 : Exemple de colorant xanthènes.9H-xanthène [33]

I.2.4.3. 4. Les colorants anthraquinoniques :

Les colorants anthraquinoniques sont commercialement, 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. Ces produits sont utilisés pour la coloration des fibres polyester, acétate et tri acétate de cellulose[33].

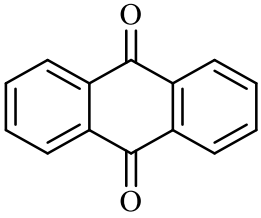


Figure I. 2.8 : La molécule anthraquinone [36]
(9,10-dihydro-9,10-dioxoanthracéne, dérivé de l'anthtracéne)

I.2.4.3. 5. Les phtalocyanines :

Les phtalocyanines ont une structure complexe possédant un atome métallique central. Les colorants de ce groupe sont obtenus par réaction du dicyanobenzène en présence d'un halogénure métallique (Cu, Ni, Co, Pt, etc.)[33].

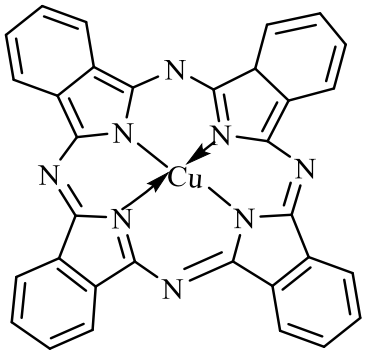


Figure I. 2.9 : La molécule anthraquinone :Structure moléculaire d'un colorant phtalocyanine de cuivre [37]

I.2.4.3. 6. Les colorants nitrés et nitrosés :

Les colorants nitrés et nitrosés forment une classe de colorants limitée en nombre et ancienne. Ils sont actuellement encore utiles, du fait de leurs bas prix très lié à la simplicité de leur structure moléculaire caractérisée par un groupe nitro ($-NO_2$) en position ortho d'un groupement électro-donneur (hydroxyle ou groupes aminés) [23].

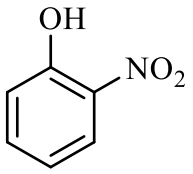


Figure I.2. 10 : Structure moléculaire d'un colorant phtalocyanine de cuivre : Structure moléculaire d'un colorant nitré et nitrosé nitrophenol or 4-hydroxynitrobenzene [23]

I.2.5. Application des colorants:

Les colorants présentent de nombreuses applications dans différents domaines, dont voici quelques-unes essentielles :

- Pigments (industrie des matières plastiques)
- Encre, papier (imprimerie)
- Colorants alimentaires (industrie agro-alimentaire)
- Pigments des peintures, matériaux de construction, céramiques (industrie du bâtiment)
- Colorants capillaires (industrie des cosmétiques)
- Colorants et conservateurs (industrie pharmaceutique)
- Carburants et huiles (industrie automobile etc....)
- Colorants textiles à usage vestimentaire, de décoration, du bâtiment, du transport,colorants textiles à usage médical etc[38].

I.2.6. Impact des colorants sur l'environnement et la santé :

Les colorants peuvent provoquer plusieurs effets indésirables : [39][40].

- Perturbation des écosystèmes et de la chaîne alimentaire.
- Coloration des eaux et dégradation de leur qualité esthétique.
- Toxicité pour les organismes aquatiques.
- Perturbation des écosystèmes et de la chaîne alimentaire.
- Risques mutagènes et cancérigènes pour certains colorants synthétiques.

Partie I.3: Techniques de traitement des eaux colorées

I.3.1.Définition du traitement des eaux colorées :

Le secteur textile fait partie des six branches d'activités générant la moitié des flux industriels de pollution. Les effluents issus de ce secteur peuvent être très colorés et complexes à traiter. La coloration de ces eaux usées est de plus en plus perçue comme une nuisance importante. La

plus grande part des effluents est caractérisée par le processus d'ennoblissement qui inclut les prétraitements. (Désencollage, blanchissement), la teinture ou l'impression et les opérations qui confèrent aux fibres textiles des propriétés particulières. La plupart de ces traitements sont des grands consommateurs d'eau (200 L $.kg^{-1}$ en moyenne).

Effectivement, les colorants se fixent sur les fibres textiles par des liaisons de type Van der Waals, hydrogène et interaction hydrophobe. La fixation du colorant dépend de la nature du colorant et de sa composition chimique. Le lien très fort fibre - colorant au sein du complexe est renforcé par une interaction électrostatique additionnelle quand le colorant et la fibre présentent des charges opposées [22][1].

Les taux de fixation varient selon les colorants textiles. Plus la fixation est faible, plus l'élimination dans l'eau est importante, ce qui amplifie la pollution. Les colorants réactifs sont ceux qui polluent le plus, alors que les colorants basiques sont ceux qui polluent le moins.



Figure I. 3.11 : Eau colorée

I.3.2. Procédés de traitement des eaux usées de l'industrie textile:

Le traitement des rejets de l'industrie textile, compte tenu de leur hétérogénéité de composition, conduira toujours à la conception d'une chaîne de traitement qui garantit l'élimination des différents polluants à travers une série d'étapes successives. La première étape consiste à éliminer la pollution insoluble par l'intermédiaire du prétraitement (dégrillage, dessablage, déshuilage) et des traitements physiques ou physico-chimiques assurant une séparation solide/liquide [41]. On adapte des techniques de dépollution pour traiter ces eaux et éliminer toute matière toxique et polluante. Plusieurs techniques sont actuellement bien maîtrisées à

l'échelle du laboratoire [42]. Certains chercheurs [43] , grâce à leurs recherches ont prouvé l'efficacité de divers systèmes technologiques dans l'élimination des polluants organiques tels que les colorants. Ces techniques sont devisées en trois types [44]

I.3.2.1.Traitement primaire :

Après les prétraitements, il reste dans l'eau une charge polluante dissoute que ce traitement va permettre d'éliminer en partie, cette étape gravitaire permet d'isoler par décantation les particules décantables. Les eaux vont traverser les bassins décanteurs à faible vitesse pour que les matières en suspension puissent sédimenter, le traitement "primaire" fait appel à des procédés physiques, avec filtration et décantation plus ou moins aboutie, éventuellement assortie de procédés physico-chimiques, tels que la coagulation- floculation, Décantation, et Filtration [8].

I.3.2.2.Traitement secondaire (Traitement biologique) :

Ce traitement vise à dégrader la matière organique contenue dans l'eau à traiter ; des microorganismes mis en contact avec l'eau polluée assimilant la matière organique qui leur sert de substrat de croissance et les boues biologiques contenues dans des bassins de traitement biologique. En règle générale, l'élimination complète de la pollution organique de ces bassins se déroule dans des conditions aérées ; le taux de conversion de la matière organique en biomasse est variable selon la biodégradabilité et la quantité d'oxygène disponible.

Les phases classiques de développement des populations bactériennes sont observées :

- Phase de latence (adaptation).
- Phase de croissance exponentielle (diminution rapide de la DBO5).
- Phase de ralentissement des synthèses cellulaires.
- Phase stationnaire.
- Phase décroissance[8].

I.3.2.3. Traitements tertiaires :

Ce traitement vise à améliorer la qualité de l'eau après les traitements primaire et secondaire en éliminant les polluants résiduels tels que les nutriments, les matières en suspension fines, les micro-organismes et certains micropolluants comme les colorants et les métaux lourds. Parmi les techniques utilisées on trouve la filtration, la désinfection et l'adsorption sur charbon actif,

permettant d'obtenir une eau conforme aux normes environnementales. Cependant pour les effluents industriels fortement chargés notamment les eaux textiles contenant des colorants ces procédés peuvent être insuffisant, ce qui conduit au recours à des techniques plus avancées comme l'électrocoagulation[8].

Partie I.4: Electrocoagulation

I.4.1. Définition d'Electrocoagulation:

L'Electrocoagulation (EC) est une technique électrochimique utilisée pour l'élimination de nombreux polluants de l'eau (métaux, contaminants organiques, colorants et pigments, solides et particules colloïdales, polluants inorganiques solubles). Ainsi ; l'eau comportant des nitrates, des fluorures, du plomb,… peut être potabilisée par ce procédé [45]. 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 H_2 au voisinage de la cathode. Les métaux aluminium et fer sont généralement utilisés comme anode. Leur désintégration entraîne la création 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 flocs facilement extractibles par précipitation, filtration ou flottation. Généralement, la flottation est plus facile à réaliser que la filtration et la précipitation[46].

Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la coopération des trois technologies maj eures : l'électrochimie, la coagulation et la flottation.
On peut donc identifier trois sortes de processus dans l'électrocoagulation : Les phénomènes électrochimiques, la coagulation et l'hydrodynamique[3].

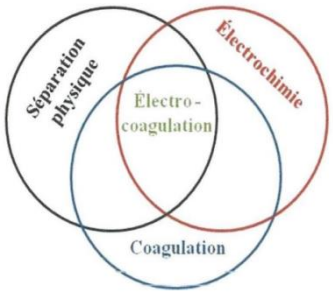


Figure I. 4.12 : Les catégories d'interaction observées dans la méthode d'EC [3]

I.4.2. Historique du procédé :

Le premier document rapportant l'utilisation de l'EC pour le traitement des effluents est un brevet américain déposé en 1880 par Webster qui utilisait des électrodes en fer. Cette même année, une station d'épuration a été établie en se basant sur ce brevet à Salford (Grande-Bretagne) pour traiter les eaux polluées urbaines. En 1909, Harries dépose un nouveau brevet sur ce procédé : les anodes étaient alors constituées par des plaques de fer et d'Al [47].

Deux autres usines de traitement des eaux usées ont été édifiées en 1912 en suivant ce même principe, aux Etats-Unis ; toutefois, leur opération a été interrompue quelques années par la suite (1930), en raison du coût qui étaient deux fois plus élevé que celui d'un traitement classique. En 1946, Stuart étudie plus précisément le procédé avec un réacteur équipé d'électrodes en aluminium. Comparant le procédé de coagulation physico-chimique et le procédé électrochimique, il observe que le phénomène de coagulation semble plus rapide avec la méthode électrochimique. Bollina (1947), se base sur les résultats de Stuart et réalise une comparaison économique des deux procédés , il estime que pour les installations de petites tailles, l'électrocoagulation peut s'avérer plus compétitive que les procédés classiques [48]. Les recherches se sont poursuivies sur les effluents de caractéristiques très différentes : Holden (1956) s'intéresse à la possibilité de traiter les eaux de surface pour la production d'eau potable [49] alors que Sadek (1970) propose un traitement des eaux usées en éliminant les phosphates par EC[50].Back et coll. (1974) emploient le procédé pour le traitement des effluents issus des industries agro-alimentaires [51]. En 1975, Strokach en URSS, évoque divers « électro coagulateurs » permettant le traitement et le recyclage des eaux usées pour une éventuelle réutilisation en agriculture[52]. En 1980, de nombreux travaux ont été présentés par des chercheurs russes sur l'électrocoagulation comme moyen de traitement efficace des eaux usées.

Finalement, en 1984, Vik effectue une étude significative démontrant la faisabilité de générer de l'eau potable via le processus d'électrocoagulation à partir des eaux norvégiennes naturelles riches en substances humiques [53].

I.4.3. Principe du procédé d'électrocoagulation :

La technologie électrochimique de l'électrocoagulation consiste à utiliser une cellule électrochimique pour traiter l'eau et les eaux usées (colorée). Dans son principe le plus simple, cela implique d'appliquer une tension continue aux électrodes, généralement fabriquées en aluminium ou en fer. La dissolution électrochimique d'un métal sacrificiel permet de produire des coagulants in situ et en continu, sans avoir besoin d'ajouter de sels métalliques et/ou de polymères synthétiques dans le milieu. Cette méthode repose sur la formation de flocs d'hydroxydes métalliques dans les eaux usées ou colorée en dissolvant des anodes solubles au niveau de l'électrode[3]. L'utilisation de l'EC nécessite peu de réactifs et aide à diminuer le volume des boues produit par rapport à la méthode traditionnelle. Cette méthode consiste à établir un courant électrique entre deux électrodes immergées dans un liquide électrolytique présent au sein d'un réacteur pour produire les cations in situ (Fe^{2+} ou Al^{3+}). L'existence de microbulles d'hydrogène gazeux H_2 autour de la cathode entraîne le flottement des substances supprimées en se déplaçant à la surface de la solution [48].

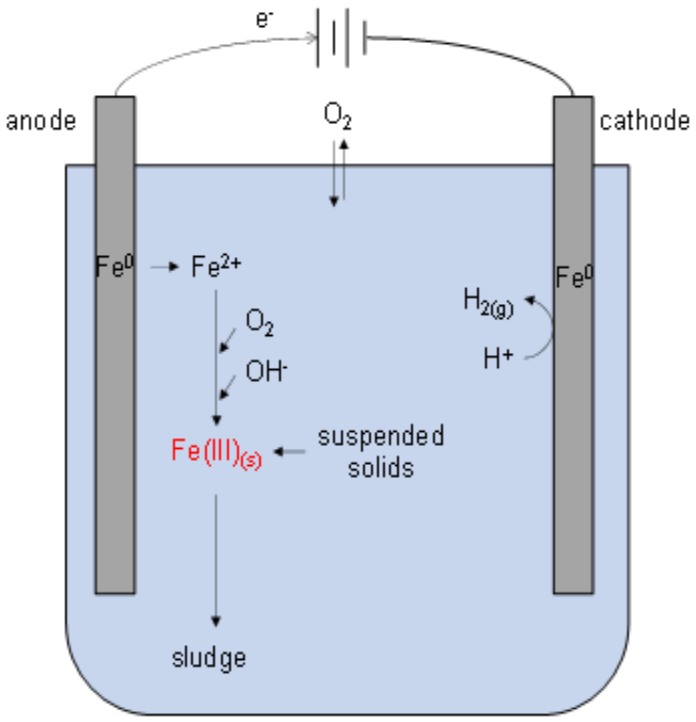


Figure I. 4.13 : Le principe de fonctionnement d'électrocoagulation [54]

I.4.4. Types d'électrodes :

Les différents types d'électrodes utilisées dans le procédé d'électrocoagulation sont données dans le tableau suivant.

Tableau I.4.2: Types d'électrodes [3], [55], [56]

Type d'électrode	Nature	Réaction anodique (+)	Réaction cathodique (−)	Produits formés dans l'eau	Avantages	Inconvénients
Aluminium (Al)	Sacrificielle	$Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	$Al(OH)_3$ (flocs gélatineux)	Très efficace pour colorants et turbidité	Consommation rapide
Fer (Fe)	Sacrificielle	$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^- \rightarrow Fe^{3+}$	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	$Fe(OH)_2$, $Fe(OH)_3$	Moins cher, bon pour phosphates	Boues plus abondantes
Aluminium + Fer (hybride)	Sacrificielle	$Al + Fe \rightarrow$ ions mixtes	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	Hydroxydes mixtes	Meilleure performance globale	Contrôle plus complexe
Titane (Ti/DSA)	Inerte	$2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	$O_2 + OH^-$	Très durable	Pas de coagulant formé
Graphite (C)	Inerte	$2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	$O_2 + OH^-$	Résistant à la corrosion	Moins efficace seul
Zinc (Zn)	Sacrificielle	$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	$Zn(OH)_2$	Bon pouvoir coagulant	Toxicité possible
Cuivre (Cu)	Sacrificielle	$Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2e^-$	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	$Cu(OH)_2$	Activité antibactérienne	Pollution secondaire
Acier inoxydable	Semi-inerte	Oxydation faible	$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	Peu de coagulant	Durable	Peu efficace seul

I.4.5. Différents types de connexion :

On distingue trois modes de connexion électriques: le mode mono polaire en série, le mode bipolaire série et le mode mono-polaire en parallèle. L'écart entre les trois modes réside dans

la liaison des électrodes. qui entraîne une différence des expressions des tensions et des intensités de courant dans les cellules[57] .[58].

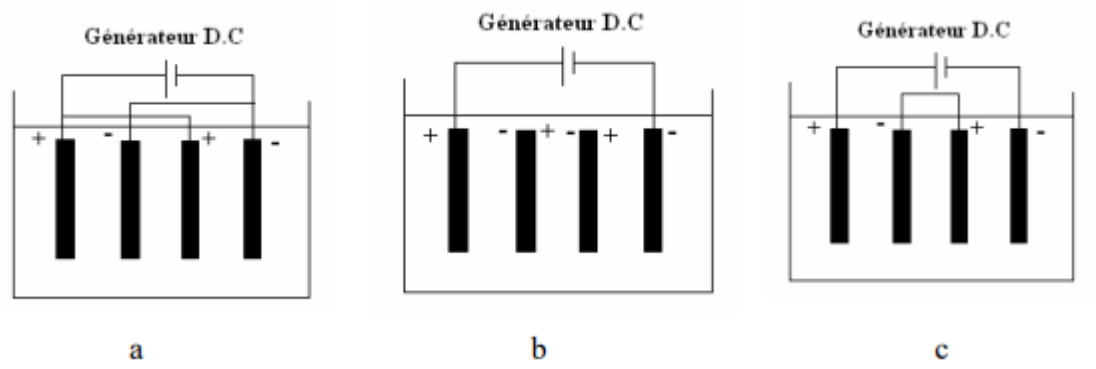


Figure I. 4.14 : Différents types de connexion.

(a) : Connexion mono polaire en série et équivalent électrique.

(b): Connexion bipolaire et équivalent électrique.

(c) : Connexion mono polaire en parallèle et équivalent électrique.[58] .[59]

I.4.6. Principales lois d'électrolyse :

L'électrolyse met en jeu deux couples redox. Il les fait réagir dans le sens contraire de la réaction naturelle au moyen d'un courant électrique qui apporte l'énergie nécessaire à la réaction. Un électrolyseur est un dispositif consistant en un récipient contenant une solution ionique dans la quelle plongent deux électrodes. Les électrodes se polarisent dès que le courant passe [60]. L'anode est l'électrode par laquelle le courant arrive dans le système. les électrons en sortent donc. Il y a oxydation du réducteur. Elle est reliée au pôle + du générateur. La cathode est l'électrode par laquelle sort le courant c'est à dire par laquelle entrent les électrons. Il s'y produit une réduction. Elle est reliée au pôle - du générateur. Contrairement aux piles, le dispositif d'électrolyse n'est pas polarisé par les couples redox mais bien par le générateur branché à ses bornes. L'électrolyte est le milieu conducteur, la solution ionique dans laquelle baignent les anions et les cations, les anions de l'électrolyte migrent vers l'électrode reliée au pôle + (l'anode) et y subissent parfois une réaction d'oxydation. les cations de l'électrolyte migrent vers l'électrode reliée au pôle - (la cathode) où ils peuvent subir une réduction [60]. Une réaction électrochimique est ainsi une réaction d'oxydation ou de réduction effectuée au moyen d'une électrode. L'une des électrodes va jouer le rôle de la cathode (réduction) et l'autre va jouer le

rôle d'anode (oxydation). les réactions électrochimiques correspondent toujours à une oxydation anodique et une réduction cathodique [60] [61].

La quantité de matière produite ou consommée lors d'une réaction électrochimique se calcule par la loi de Faraday et est fonction de la durée de traitement et de l'intensité de courant I [57].

$$\boldsymbol{m = \frac{M \times I \times t}{z \times F}}$$

Où

M : la masse moléculaire de l'espèce considérée (g.mol-1)

I : intensité de courant imposée (A)

F : constante de Faraday (96487 Colomb. mol-1)

Z : la valence de l'ion formé

M : masse de métal dissoute à l'anode par seconde

T : le temps

L'énergie consommée en KWh.m-3 est donnée par :

$$\boldsymbol{E = \frac{U.I.t}{V}}$$

Où

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

V : volume de la soultion traitée en m^3

Une partie de l'énergie imposée peut être utilisée par des réactions secondaires, d'où la notion de rendement faradique. Il se détermine par le rapport de la quantité théorique d'électricité nécessaire pour produire ou consommer une mole de B (espèce formée expérimentalement) sur la quantité d'électricité réellement consommée ou produite. Soit la réaction suivante :[61]

$$A + n\bar{e} \rightarrow A$$

Le rendement faradique est donné par :

$$\boldsymbol{\Phi} = \frac{\boldsymbol{z.F.mb}}{\boldsymbol{Q.MB}}$$

Avec :

Φ : rendement faradique

Q : la charge électrique (Q=I×t)

$\mathbf{m_b}$: la masse de l'espèce B formée expérimentalement.

Z : la valence de l'ion formé

F : constante de Faraday (96487 Colomb. mol-1)[61].

M_b : masse molaire

I.4.7. Avantages et inconvénients du procédé EC :

Ce procédé présente plusieurs avantages :[62]

- Aucun ajout supplémentaire de produits chimiques
- Moins de production de boues
- Dépenses d'investissement et dépenses d'exploitation inférieurs par rapport au prétraitement physico-chimique classique
- Équipement simple sans éléments mobiles
- Traitement incolore et inodore
- Faible consommation d'énergie
- Séparation des boues par simple décantation
- Faible encombrement

Les inconvénients principaux d'EC : [63]

- Entreposage des boues. Certains auteurs pensent que les couts d'opération d'entreposage sont concurrentiels
- Les électrodes sacrificielles sont dissoutes dans l'eau usée par effet d'oxydation, ce qui nécessite le remplacement régulier de ces électrodes
- L'utilisation de l'électricité peut devenir couteuse voire difficile dans certaines régions

CHAPITRE II

Matériels et Méthodes

II.1.Introduction :

Dans ce travail on s'est intéressé à la décoloration du milieu par électrocoagulation par deux électrodes : le fer et l'aluminium, A la fin de ce chapitre on a comparé l'efficacité de décoloration.

II.2. Matériels et produits chimiques utilisés :

Pour cette étude, les équipements suivants ont été utilisés:

- Agitateur magnétique
- PH-mètre
- Conductimètre
- Balance

1 .Générateur de courant :

Est un dispositif électrique capable de fournir un courant électrique à un circuit en maintenant une intensité déterminée. Il transforme différentes formes d'énergie en énergie électrique afin d'alimenter les systèmes électriques et les procédés électrochimiques[64] .

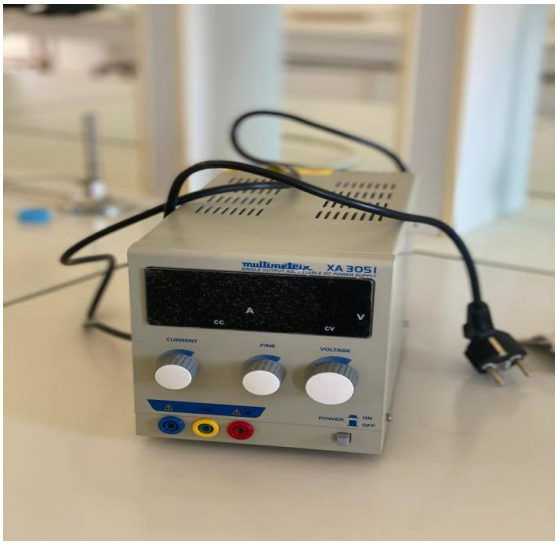


Figure II. 1 : Générateur

2. Spectrophotomètre :

Pour le dosage des différentes solutions, un spectrophotomètre UV-Visible de marque Thermo Fisher Scientific, modèle UviLine 9400C, a été utilisé. La spectrophotométrie d'absorption

repose sur la mesure de l'atténuation de la lumière traversant un échantillon, afin de déterminer la concentration des espèces adsorbants. La gamme spectrale UV-visible est couramment utilisée pour les analyses quantitatives. Dans notre étude, cette méthode a permis de mesurer la concentration des solutions de bleu de méthylène (659nm), avant et après traitement.



Figure II. 2 : Spectrophotomètre UV visible Thermo Fisher Scientific (UviLine 9400C)

-Le pourcentage d'élimination (R%) des colorants par les différents adsorbants est décrit par l'équation suivante :[65]

$$\mathbf{R}\% = \frac{(\mathbf{C0}-\mathbf{Ct})}{\mathbf{C0}}$$ ou **C0** et **Ct** Concentration avant et après traitement

3. Turbidimètre:

La turbidité est définie par la norme NF EN ISO 7027 comme « la réduction de la transparence d'un liquide due aux matières non dissoutes » c'est-à-dire colloïdales et ou en suspension. Elle dépend donc de la concentration en MES de l'échantillon mais également des caractéristiques optiques et géométriques des particules. [66].

On mesure la turbidité par turbidimètre , son fonctionnement repose sur le passage d'un faisceau lumineux à travers l'échantillon. Les particules présentes diffusent la lumière dans différentes directions, et un détecteur à 90° mesure l'intensité de cette lumière diffusée. Plus la quantité de particules est importante, plus la turbidité est élevée. Les résultats sont exprimés en NTU (Nephelometric Turbidity Unit) [67].



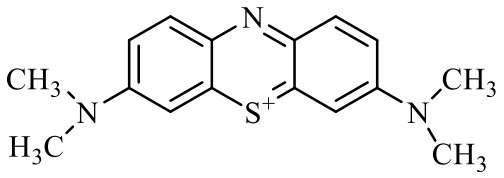
Figure II. 3 : Turbidimètre

II.3.Produits chimiques :

- **Le sulfate de sodium (Na_2SO_4)**
- **Bleu de méthylène:**

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'élimination d'un colorant bleu de méthylène (BM) qui est une substance fortement colorée et qui interagisse avec le milieu dans lequel elle est introduite, et le colore en se dissolvant et en se dispersant. Il est couramment utilisé comme modèle de contaminant organique en raison de sa structure moléculaire stable. le BM se transforme en leuco méthylène incolore, due à la perte du doublet libre de l'azote et introduction d'un atome d'hydrogène [68].

Tableau II.1 : résume les principales caractéristiques physico-chimiques de ce colorant

Caractéristiques	Bleu de methylene
Nom Commerciale	$C_{16}H_{18}C_1N_3S$
Appellation chimique	Chlorure de 3,7- bis (diméthylamino) phénazathionium
Structure chimique	
Masse molaire (g/mole)	319.85
λ max (nm)	665
Famille	Colorant cationique
pH	6
Point de fusion (°C)	>360

II.4. protocol expérimental:

La solution mère est préparé par la dissolution de 1g de bleu méthylène dans un litre d'eau distille à partir de laquelle, les solutions filles ont été préparées par dillution.

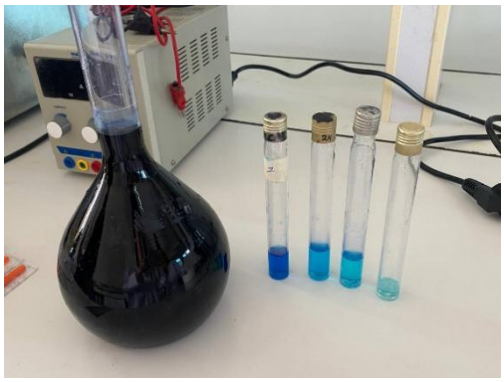


Figure II. 4 : Solutions mère et filles

II.4.1.Caractéristique de la solution avant traitement:

Les caractéristiques initiales de la solution étudiée, avant traitement, sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau II. 2 : Les paramètres physico-chimiques de l'échantillon avant le traitement par la technique de l'électrocoagulation**.**

pH	5,4
Conductivité	1128 µs/cm
Turbidité	97,6 NTU
Absorbance	3,536

II.4.1.1.La courbe d'étalonnage:

Pour tracer la courbe d'étalonnage caractéristique du colorant bleu de méthylène, nous avons préparé des solutions filles par dilutions successives à partir d'une solution mère de concentration 0,1g/l en raison de 1ml de solution mère est ajoutée à 9ml d'eau distillée. Ensuite on a mesuré l'absorbance de chaque solution à l'aide d'un spectrophotomètre. Les valeurs obtenues sont utilisées pour tracer la courbe d'étalonnage.

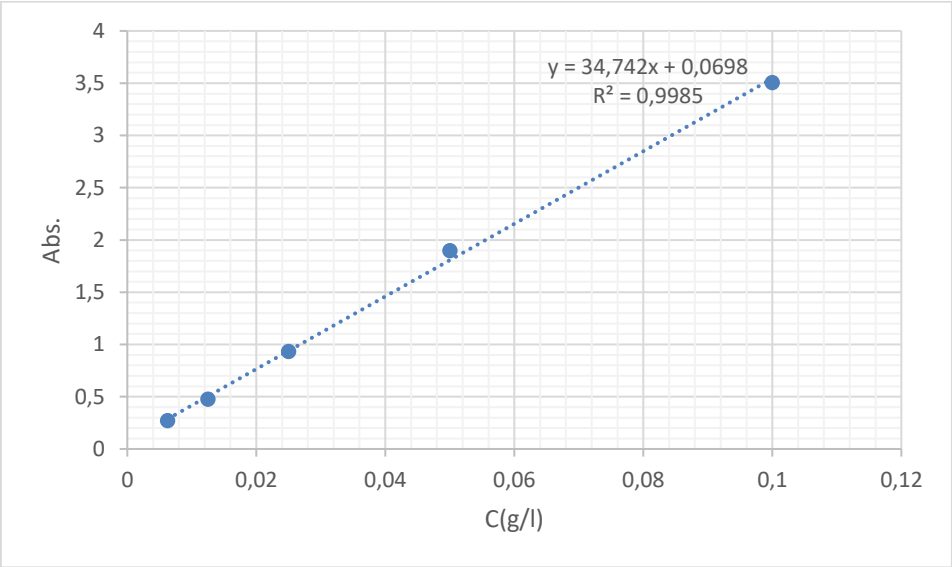


Figure II. 5 : Courbe d'étalonnage de bleu méthylène.

Domaine de pH :

Le pH est un paramètre essentiel qui influence l'efficacité du procédé d'électrocoagulation. Dans cette étude, le domaine expérimental du pH est compris entre 5 et 10.

II.4.2. La cellule d'électrocoagulation:

Le montage expérimental utilisé pour la réalisation des expériences est composé d'un générateur de courant et une cellule en verre munie de deux électrodes en fer ou aluminium, sous forme de plaques planes identiques d'une largeur de 5 cm, une longueur de 10 cm et d'une épaisseur de 0.5cm. L'anode et la cathode sont placées parallèlement en position verticale plongées dans l'eau colorée immergées à une profondeur de 2.5 cm.

Avant chaque expérience, le sel support (Na_2SO_4) a été ajoute en premier lieu avec une concentration déterminée, la turbidité initiale de l'eau à traiter, le pH, la conductivité et l'absorbance ont été mesurées. Les électrodes sont ensuite installées sur leur support et connectées au générateur de courant. La continuité du courant a été testée pour s'assurer que tout est correctement relié avec des fils électriques.

Les prélèvements d'échantillons de la solution électrolysée sont effectués après la décantation des flocs à l'aide d'une pipette et mesurées tous les paramètres précédents.

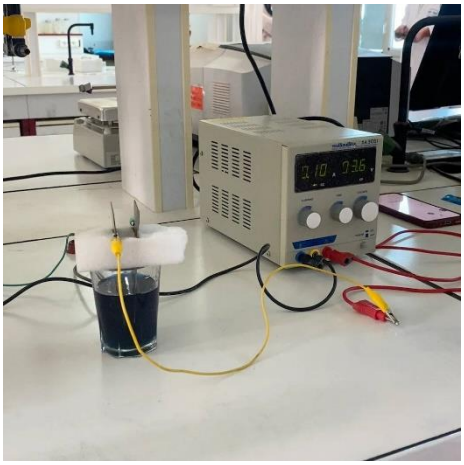


Figure II. 6 : Dispositif expérimental.

Lors de l'utilisation des électrodes en fer dans le procédé d'électrocoagulation (EC), des ions Fe^{2+} et Fe^{3+} sont produits à l'anode et ont réagi avec l'eau en formant des hydroxydes de fer, tels que $Fe(OH)_2$ et $Fe(OH)_3$ de couleur brun-rougeâtre.

L'augmentation de la concentration du fer suffisamment dans la solution, a conduit à leurs réactions avec les ions hydroxyde (OH^-) et la formation des complexes de couleur verte, tels que $Fe(OH)_2$.



Figure II.7 : Aspect de la solution après l'électrocoagulation dans le cas des électrodes de fer

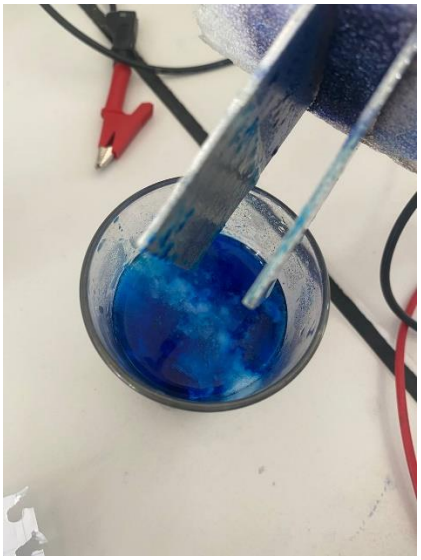


Figure II. 8 : Aspect de la solution après l'électrocoagulation dans le cas des électrodes d'aluminium

II.5. .Les réactions aux électrodes :

En générale les principales réactions qui se déroulent avec les électrodes sont :

- Cas d'une électrode en fer :

a) A l'anode:

$$Fe(s) \leftrightarrow Fe^{2+} + 2\,\bar{e} \qquad (III.1)$$

b) A la cathode :

$$8H^{+}\,(aq) + 8\,\bar{e} \leftrightarrow 4H_2\,(g) \qquad (III.2)$$

c) Réaction au sein de la solution :

$$4\,Fe^{2+} + 10H_2O + O_2 \leftrightarrow 4Fe\,(OH)_3 + 8H^{+} \quad (III.3)$$

- Cas d'une électrode en aluminium :

a) A l'anode :

$$Al(s) \leftrightarrow Al^{3+}\,(aq) + 3\,\bar{e} \qquad (III.4)$$

b) A la cathode :

$$2H_2O\,(l) + 2\,\bar{e} \leftrightarrow H_2(g) + 2OH^{-} \quad (III.5)$$

c) Réaction au sein de la solution :

$$Al^{3+}\,(aq) + 3H_2O \leftrightarrow Al(OH)_3 + 3H^{+}(aq) \qquad (III.6)$$

II.6. Role de sel support :

Lorsque le Na_2SO_4 est ajouté au processus, il se dissocie en ions sodium (Na^{+}) et ions sulfate (SO_4^{2-}). Les ions sodium peuvent augmenter la conductivité électrique de l'eau, ce qui peut avoir un effet sur la vitesse de formation des flocs. Les ions sulfate peuvent interagir avec les ions métalliques générés par les électrodes. Ces interactions peuvent modifier les caractéristiques des flocs formés, conduisant à un élargissement légèrement plus important des flocs. Les ions sulfate ont la capacité de créer des complexes avec les ions métalliques, ce qui peut influencer la cinétique de croissance des flocs et la stabilité des agrégats formés.



Figure II.9 : Décontamination des floc formés lors du traitement d'électrocualgulation

CHAPITRE III

Résultats et discussions

Afin d'optimiser le procédé d'électrocoagulation dans le traitement des eaux colorées, plusieurs expériences préliminaires ont été réalisées on variant 3 paramètres opératoires : le courant, la concentration du sel support, Na_2SO_4 et le temps de traitement, nous avons adopter un plan d'expériences de type Box Benkhen qui est une méthode statistique de plus en plus utilisée dans l'industrie et dans les laboratoires de recherche. Il permet en effet de modéliser au mieux un phénomène aléatoire, le plus souvent complexe, à l'aide d'un minimum d'essais. Il s'inscrive donc dans la démarche constante d'amélioration de la qualité ou de la productivité. [69]

- **Choix des facteurs**

Notre objectif sert à étudier l'optimisation de bleu de méthylène par électrocoagulation. Afin d'optimiser les paramètres de notre étude, nous avons utilisé le modèle d'expérience à trois facteurs dans 15 expériences d'électrocoagulation en utilisant deux électrodes de fer et d'aluminium..

Nous avons pris comme facteurs d'entrée, les facteurs suivants qui sont groupés dans le tableau suivant :

Tableau III .1 : Facteurs choisis pour l'expérience

	Facteurs	**valeurs**		
x_1	Le temps (t) [min]	15	30	45
x_2	Le courant (I) [A]	0.02	0.1	0.3
x_3	La concentration C	0.005	0.01	0.1

III.5..Modélisation et optimisation par la méthode de Box Benkhen :

III.5.1.2.Modélisation dans le cas d'électrodes en fer :

Nous avons choisi le plan d'expériences à trois facteurs, notre modèle comporte 15 résultats expérimentaux.

Tableau III. 2 : Essais et réponses du plan box-Behnken

Essai N°	F1 (t)	F2 (I)	F3 (C)	R_{fr}
1	15	0,02	0,010	36,0000
2	45	0,02	0,010	62,4426
3	15	0,3	0,010	84,2807
4	45	0,3	0,010	88,8919
5	15	0,1	0,005	75,0135
6	45	0,1	0,005	93,1744
7	15	0,1	0,100	70,0677
8	45	0,1	0,100	91,0076
9	30	0,02	0,005	52,6259
10	30	0,3	0,005	87,8155
11	30	0,02	0,100	71,4436
12	30	0,3	0,100	97,3236
13	30	0,1	0,010	76,3415
14	30	0,1	0,010	80,8045
15	30	0,1	0,010	73,7953

Nous avons utilisé deux logiciels de calcul, Excel et Minitab pour déterminer les coefficients du modèle ainsi que les autres paramètres statistiques, pour trouver le modèle de l'équation on a recours à la résolution du système matriciel sous la forme :

$$X\,A = Y \qquad \text{(III- 7)}$$

En remplaçant les différents coefficients dans l'équation du modèle appliqué, nous avons obtenu l'équation mathématique (III- 8) suivante :

$R_{Fe} = 142{,}4 + 0{,}96\,t - 1065\,I - 1209\,C + 0{,}0005\,t^2 + 2899\,I^2 + 11099\,C^2 - 2{,}20\,t*I - 0{,}62\,t*C + 673\,I*C$	**(III- 8)**

La représentation des coefficients et leurs interactions obtenues, sont rapportées sur la Figure III.1

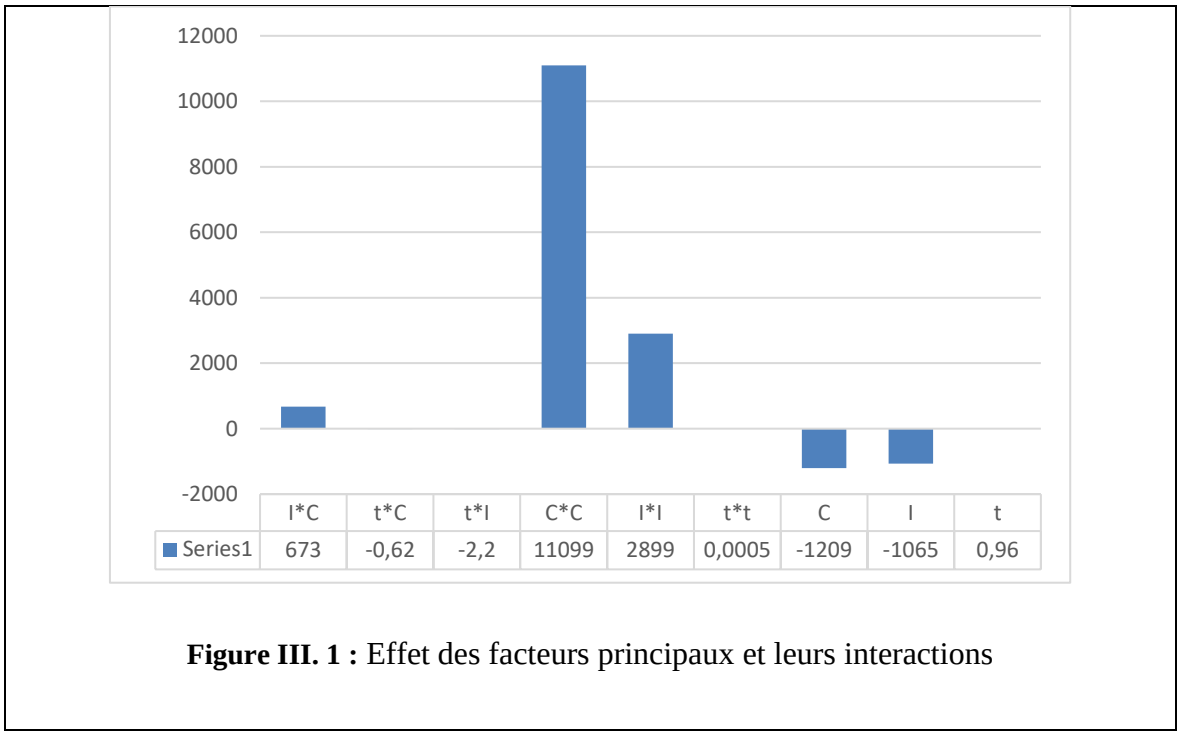


Figure III. 1 : Effet des facteurs principaux et leurs interactions

La Figure III.1 nous permet d'observer l'effet des facteurs étudiés sur la réponse. Les résultats obtenus montrent que les facteurs qui influent positivement sur la réponse sont principalement l'effet quadratique de la concentration ***(C²)***, suivi par l'effet quadratique du courant ***(I²)*** ainsi que l'interaction ***I*C***. L'effet de ***C²*** influe d'une manière très importante sur la réponse avec un coefficient d'environ **11099**, suivi par ***I²*** avec un facteur de **2899**.

D'autre part, la concentration ***(C)*** influe négativement sur la réponse avec un coefficient de ***1209***, suivie par le courant ***(I)*** avec un facteur de ***-1065***. Les interactions ***t*I*** et ***t*C*** présentent également un effet négatif mais faible. Les autres facteurs ont une faible influence sur la réponse, soit positivement soit négativement, et cette influence peut être considérée comme négligeable.

III.5.1.3. Evaluation de l'adéquation du modèle statistique

Pour faire une comparaison entre le modèle généré et les valeurs de l'expérience, nous avons tracé les résultats obtenus par l'expérimentation en abscisse et les résultats du modèle sur

l'ordonné, le graphique de la Figure III- 2 montre cette dépendance où on voit une distribution des points très bien allongée sur une droite. Un coefficient de détermination ***R2*** égale à ***0.93*** explique une très grande relation linéaire entre les résultats expérimentaux et les valeurs du modèle, cette tendance donne une bonne interprétation pour une justification du modèle trouvé malgré la présence de quelques points qui sont faiblement éloignés de la droite de régression linéaire.

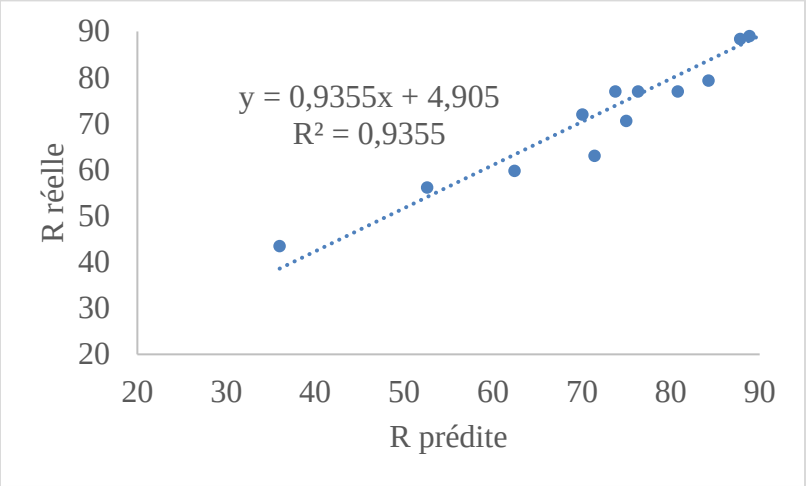


Figure III.2 : Dépendance de la réponse réelle en fonction de la réponse prédite

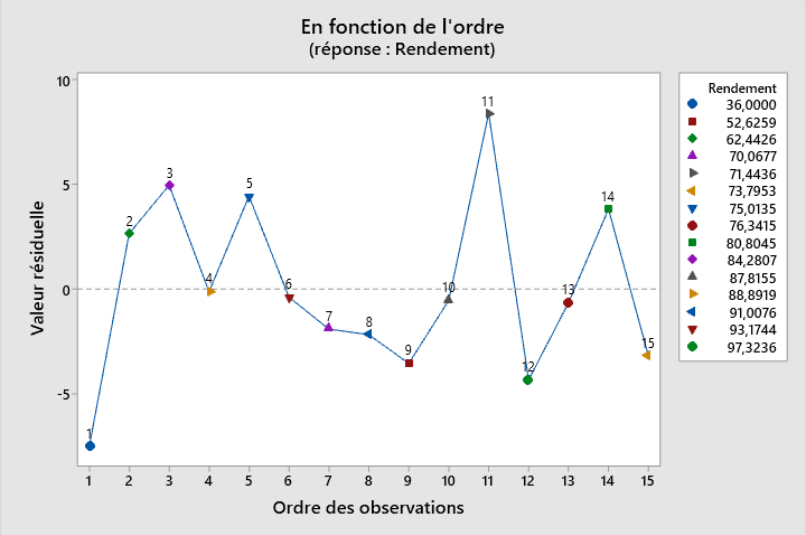


Figure III. 3 : Diagramme de dispersion des résidus

Aussi, le diagramme de la dispersion des résidus (Figure III.3), montre que presque la totalité des points sont proches de la ligne zéro, la majorité des erreurs sont acceptables sauf les expériences ***1*** et ***11*** on données des erreurs remarquables. Ces erreurs sont dues généralement à la procédure expérimentale.

III.5.1.4.Justification du modèle est signification des facteurs

On première étape, le modèle de régression peut être justifié par le coefficient de détermination R2, si sa valeur est proche de l'unité (1) le modèle d'ajustement est justifié, dans notre cas d'étude ***R2*** égale ***0.93***, il est proche de 1 cela justifie une validation du modèle. L'autre méthode est l'utilisation de l'ANOVA, cette dernière se résume dans ce tableau suivant

Tableau III .3 : ANOVA pour validation du modèle

Source de variation	**SC**	**DDl**	**CM**	**F0**	**Falpha**
modèle	3521,4	9	391,27	8,0536	4,7725
résiduel	242,91	5	48,583		
total	3764,3	14			

Dans notre étude, on a utilisé un niveau de signification $\boldsymbol{\alpha = 5\%}$**.** Et comme $\boldsymbol{F_0 = 8.05 > F_\alpha = 4.77}$, on accepte alors l'hypothèse qui signifie qu'il y a une dépendance entre la variable d'entrée (les facteurs) et la réponse (R_{fr}) et par conséquence, le modèle est valide.

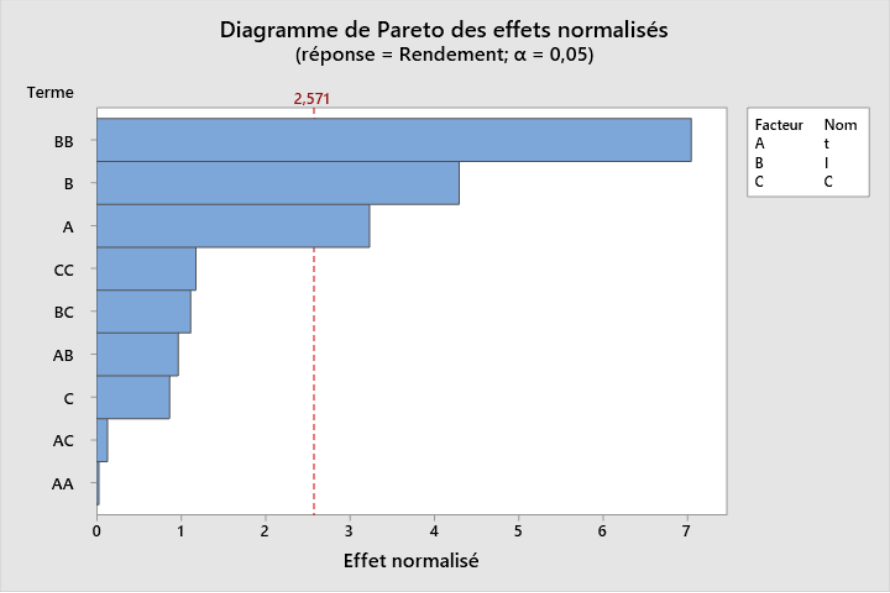


Figure III. 4 : Diagramme de Pareto des effets normalisés

Tandis que pour la signification des facteurs, on va utiliser le diagramme de Pareto des effets normalisés. Les termes significatifs sont ceux qui ont une valeur supérieure ou égale à ***2.57*** (figure III-4), il est claire qu'il y a trois termes qui sont significatifs, le premier terme et l'effet quadratique du courant suivi par l'influence du courant et le temps.

III.5.1.5. Diagrammes des effets principaux

Le diagramme des effets principaux nous renseigne sur l'influence simultanée de tous les facteurs sur optimisations

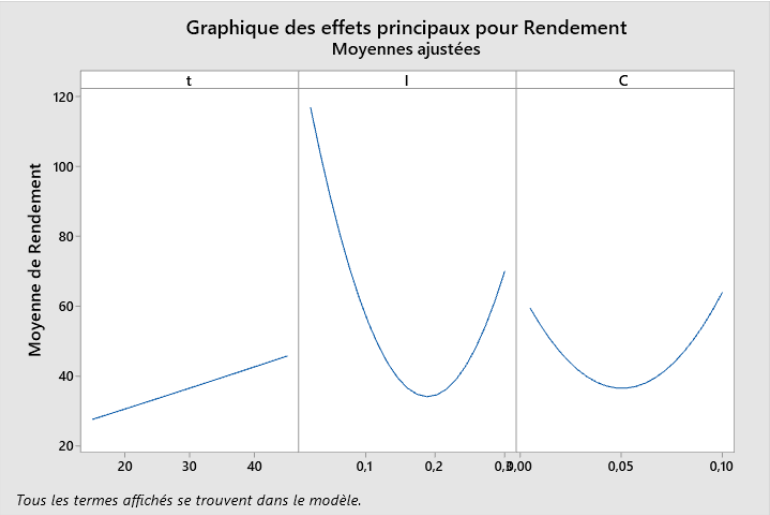


Figure III.5 : Diagramme des effets principaux pour l'électrocoagulation dans le cas d'électrode en Fer

D'après la figure **III- 5** on a :

- Pour le temps (t) : La courbe est une droite ascendante d'où on voit que pour un temps t égale à ***15 min***, le rendement est au plus bas, puis il monte régulièrement jusqu'à environ ***46 %*** pour une période de temps ***45 min***.
- Et pour le courant (I) : La courbe forme un (U). À la valeur minimale de ***0 .1 A***, le point est au plus haut, Quand le courant augmente vers ***0.2A***, le rendement chute brutalement vers son minimum avant de remonter pour la valeur ***0.3A***.
- En ce qui concerne la concentration C: On observe la même forme en U. Le rendement commence à environ ***60 %*** pour la concentration ***0.005***, diminue jusqu'à un point bas, puis remonte pour la concentration maximale de ***0.1***.

III.5.1.6. Diagrammes des effets d'interactions des facteurs de élctrocuagulation :

Les diagrammes des interactions (**Figure III-6**) sont généralement utilisés pour visualiser les interactions pendant une opération ANOVA, dans laquelle l'effet d'un facteur dépend du niveau d'un autre facteur.

On remarque que les diagrammes montrent que plus la différence de pente est grande entre les lignes, plus le degré d'interaction est élevé et si les courbes sont parallèles indiquent l'absence d'interactions.

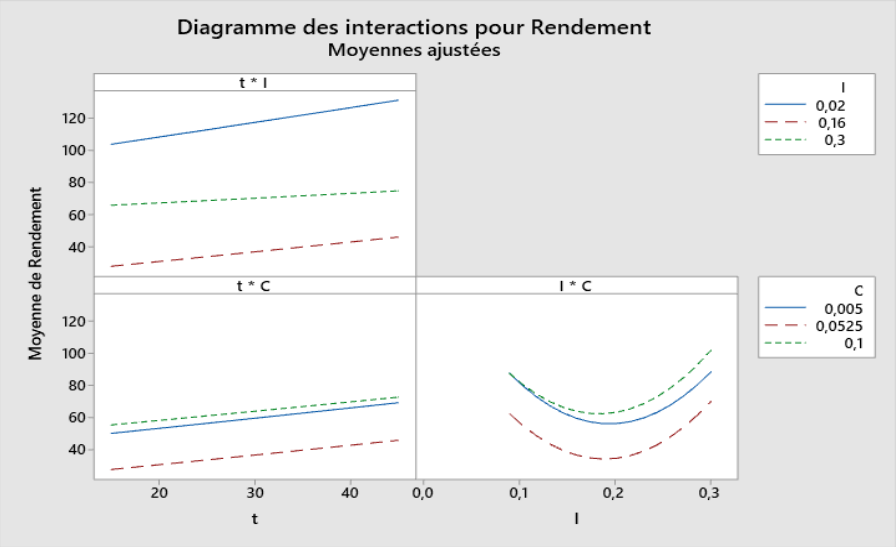


Figure III. 6 : Diagramme des effets principaux pour électrocuagulation dans le cas d'électrode en Fer

III.5.1.6.1. Interprétation de l'interaction entre t et I :

Lorsque le temps t augmente, le rendement augmente également pour toutes les valeurs de courant ***I***. On remarque que le rendement maximal est obtenu pour ***0.02A***, tandis que le rendement minimal correspond ***0.1A***. Cela montre que la variation de ***I*** influence le rendement, les petites valeurs de ***I*** favorisant de meilleures performances par rapport aux valeurs plus élevées.

III.5.1.6.2. Interprétation de l'interaction entre t et C :

En étudiant l'influence de le temps t sur le rendement, on constate que celui-ci augmente à mesure que la valeur de ***t*** augmente, et ce pour toutes les valeurs de concentration ***C***. On

observe également que le rendement maximal est atteint pour une concentration de ***0.1***, tandis que le rendement minimal est observé ***0.005***. Cela montre que la variation de la valeur de concentration ***C*** a un effet évident sur le niveau de rendement, les valeurs les plus élevées de concentration conduisant à une amélioration des performances par rapport aux valeurs les plus faibles.

III.5.1.6.3. Interprétation de l'interaction entre I et C :

On observe que le rendement maximal est obtenu pour les valeurs ***0.1*** et ***0.3***, tandis que le rendement minimal correspond à ***0.2***. Cela montre qu'il existe une interaction importante entre le courant ***I*** et la concentration ***C***, car la variation de ces paramètres influence directement les performances du rendement.

III.5.1.7. Graphiques de surfaces et des contours

A partir du modèle mathématique validé et à l'aide du logiciel, on réalise les diagrammes de surfaces en ***3D*** et les graphiques des contours ***2D***. Ces graphiques permettent de rechercher des solutions optimales plus désirables avec une meilleure précision possible. Cela nous permet d'examiner les résultats plus nettement. Les courbes de contour sont générées à l'aide du logiciel MINITAB 19 par la combinaison des trois facteurs induits. Nous avons choisi à chaque fois deux facteurs représentés sur les axes X et Y. La valeur de la réponse est représentée par une région ombragée dans la courbe de contour ***2D***.

Ces graphiques sont rassemblés dans la figure III-7 dessous. Les graphiques à droite, représentent les diagrammes de surfaces en trois dimensions pour chaque couple de facteur et les figures à gauches sont les diagrammes de contours ; ils présentent la projection de graphiques de surfaces sur le plan réalisé par les facteurs à titre d'exemple.

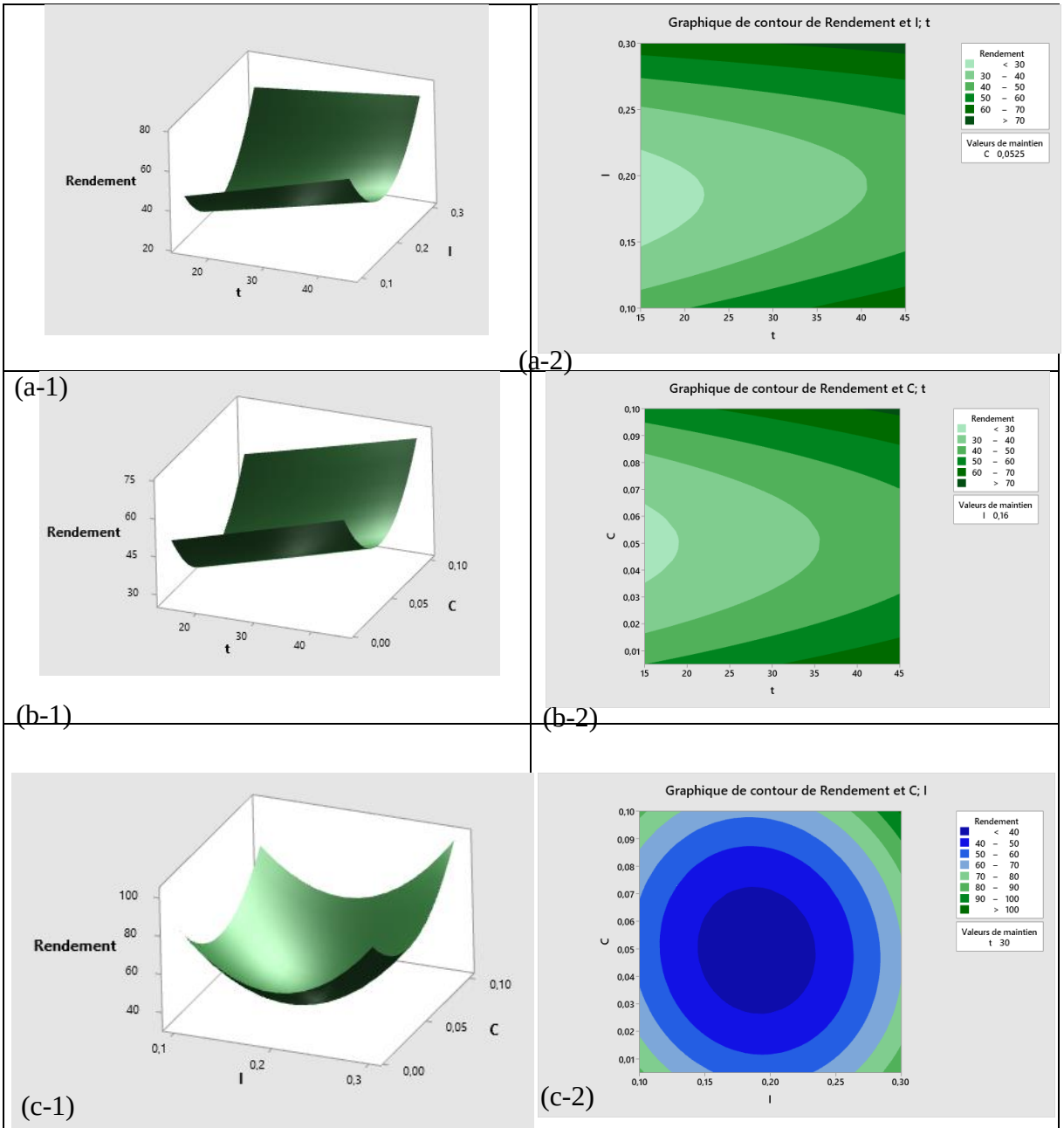


Figure III.7 : Diagrammes de surfaces pour l'électrocoagulation dans le cas d'électrode en fer

- **Diagramme de surface t, I (figure a-1, a-2) :**

Dans ce diagramme, les rendements les plus élevés sont obtenus pour les valeurs extrêmes du courant (0,1 et 0,3 A, correspondant aux niveaux(-1 et +1) associées au temps

maximal de 45 min (+1). En revanche, les rendements les plus faibles sont observés dans la zone centrale du domaine expérimental. Ces résultats montrent que l'augmentation du temps d'électrolyse et de l'intensité du courant favorise une amélioration de l'efficacité du procédé.

- **Diagramme de surface t, C (b-1, b-2) :**

Dans ce cas de figure, on atteint des rendements maximaux pour une concentration de ***0,1*** (+1) et pour un temps ***45min*** (+1), On observe qu'il y a un couleur claire ou milieu donc il y a des valeurs faibles de rendement.

- **Diagramme de surface I, C (c-1, c-2) :**

Dans ce diagramme, les valeurs minimales du rendement sont localisées au centre de la surface, correspondant à une valeur moyenne du courant (I égale 0,2 A) et à une concentration moyenne. À l'inverse, les rendements les plus élevés sont obtenus aux niveaux extrêmes des deux facteurs, soit les combinaisons (+1, -1), (-1, +1), (+1, +1) et (-1, -1). Ces résultats indiquent que les valeurs extrêmes du courant et de la concentration favorisent l'amélioration du rendement du procédé.

III.5.1.8.Optimisation:

Dans cette expérience, les valeurs de R2 ajusté sont très proches de la valeur R2 correspondante, elles confirment également que le modèle est fortement significatif.

Les conditions optimales pour avoir un taux d'élimination, sont représenté dans le tableau suivant:

Tableau III .4 : Valeurs correspondant au meilleur résultat**.**

Numéro d'expérience	**F1 (t)min**	**F2 (I)A**	**F3 (C)g/l**	**pH avant**	**Turbidité avant**	**pH après**	**Turbidité après**	**R_{Fe}**
12	30	0,3	0,1	5,3	4,74	11,9	2,71	97,32
6	45	0,1	0,005	4,7	2,77	9,2	2,23	93,17

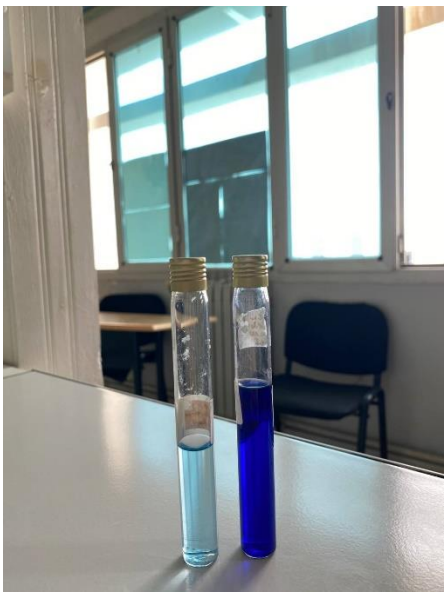


Figure III.8 : Valeurs correspondant au meilleur résultat

III.5.1.9Validation du modèle:

Pour justifier notre modèle on a refait une nouvelle expérience avec les mêmes conditions optimales obtenues précédemment.

Les résultats obtenus en termes de rendement étaient presque similaires.

Tableau III .5 : Valeurs optimale

Numéro d'expérience	**F1 (t)**	**F2 (I)**	**F3 (C)**	**Ph après**	**Turbidité après**	**R_{Fe}** Expérimentale	**R_{Fe}** Théorique
16	45	0,3	0,1	11,7	1,19	97,05	100
17	30	0,3	0,1	10,5	1,65	96,74	97,74

.

III.6. Modélisation dans le cas d'électrodes en l'aluminium

Nous avons choisi le plan d'expériences à trois facteurs, notre modèle comporte 15 résultats expérimentaux.

Tableau III. 6: Essais et réponses du plan box-Behnken

Essai N°	F1 (t)	F2 (I)	F3 (C)	R_{Al}
1	15	0,02	0,010	0,16295
2	45	0,02	0,010	1,19000
3	15	0,3	0,010	1,35465
4	45	0,3	0,010	3,28000
5	15	0,1	0,005	0,81169
6	45	0,1	0,005	1,51229
7	15	0,1	0,100	1,38137
8	45	0,1	0,100	1,11111
9	30	0,02	0,005	1,48000
10	30	0,3	0,005	4,07000
11	30	0,02	0,100	1,40237
12	30	0,3	0,100	2,42915
13	30	0,1	0,010	1,45200
14	30	0,1	0,010	1,45200
15	30	0,1	0,010	1,45200

Nous avons utilisé deux logiciels de calcul, Excel et Minitab pour déterminer les coefficients du modèle ainsi que les autres paramètres statistiques, pour trouver le modèle de l'équation on a recours à la résolution du système matriciel sous la forme :

$$X\,A = Y \qquad \textbf{(III- 9)}$$

En remplaçant les différents coefficients dans l'équation du modèle appliqué, nous avons obtenu l'équation mathématique (III- 7) suivante :

$$R_{Al} = 1{,}274 + 0{,}2115\,t - 36{,}57\,I - 92{,}0\,C - 0{,}003509\,t^2 + 99{,}7\,I^2 + 1053\,C^2 + 0{,}2112\,t*I - 0{,}313\,t*C - 75{,}7\,I*C \qquad \textbf{(III- 10)}$$

La représentation des coefficients et leurs interactions obtenues, sont rapportées sur la Figure III.9

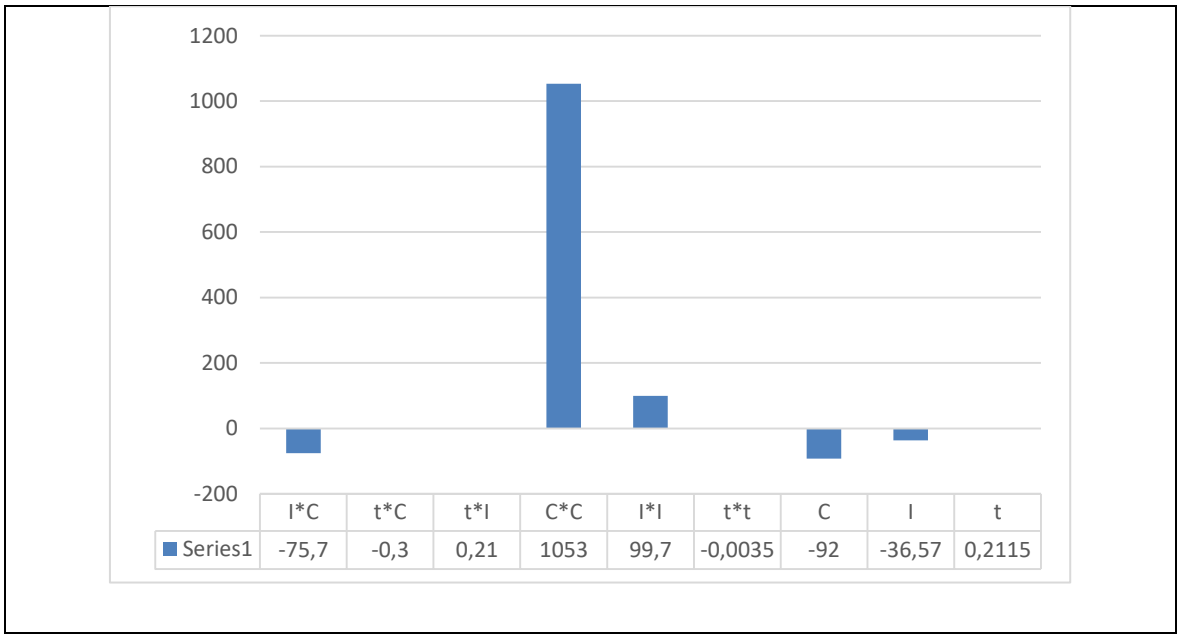


Figure III.9 : Effet des facteurs principaux et leurs interactions

La Figure III.9, nous permet d'observer l'effet des facteurs étudiés sur la réponse. Les résultats obtenus montrent que les facteurs qui influent positivement sur la réponse sont principalement l'effet quadratique de la concentration ***(C²)***, suivi par l'effet quadratique du courant ***(I²)*** ainsi que l'interaction ***t*I***. L'effet de C² influe d'une manière très importante sur la réponse avec un coefficient d'environ ***1053***, suivi par ***I²*** avec un facteur de ***99,7***.

D'autre part, la concentration ***(C)*** influe négativement sur la réponse avec un coefficient de ***-92***, suivie par le courant ***(I)*** avec un facteur de ***-36,57***. Les interactions ***I*C*** présentent également un effet négatif mais faible. Les autres facteurs ont une faible influence sur la

réponse, soit positivement soit négativement, et cette influence peut être considérée comme négligeable.

III.6.1.3Evaluation de l'adéquation du modèle statistique

Pour faire une comparaison entre le modèle généré et les valeurs de l'expérience, nous avons tracé les résultats obtenus par l'expérimentation en abscisse et les résultats du modèle sur l'ordonné, le graphique de la Figure III- 10 montre cette dépendance où on voit une distribution des points très bien allongée sur une droite. Un coefficient de détermination ***R2*** égale ***0.97*** explique une très grande relation linéaire entre les résultats expérimentaux et les valeurs du modèle, cette tendance donne une bonne interprétation pour une justification du modèle trouvé malgré la présence de quelques points qui sont faiblement éloignés de la droite de régression linéaire.

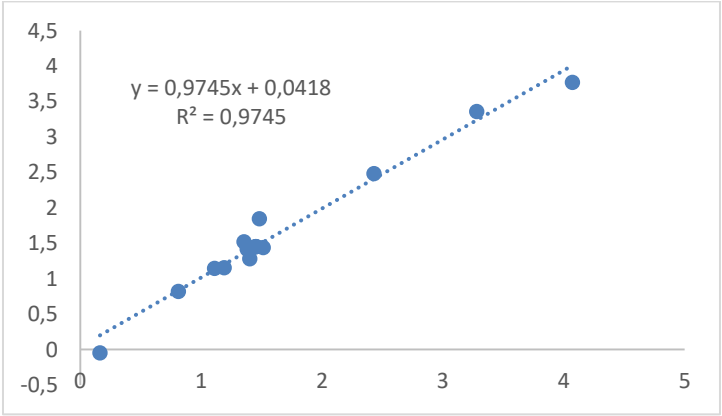


Figure III. 10 : Dépendance de la réponse réelle en fonction de la réponse prédite

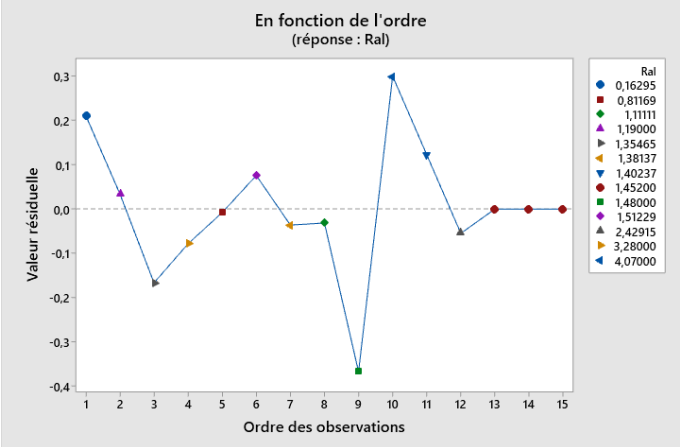


Figure III. 11 : Diagramme de dispersion des résidus

Aussi, le diagramme de la dispersion des résidus (Figure III. 11), montre que presque la totalité des points sont proches de la ligne zéro, la majorité des erreurs sont acceptables sauf les expériences ***9*** et ***10*** on données des erreurs remarquables. Ces erreurs sont dues généralement à la procédure expérimentale.

III.6.1.4. Justification du modèle est signification des facteurs

On première étape, le modèle de régression peut être justifié par le coefficient de détermination R2, si sa valeur est proche de l'unité (1) le modèle d'ajustement est justifié, dans notre cas d'étude ***R2*** égale ***0.97***, il est proche de 1 cela justifie une validation du modèle. L'autre méthode est l'utilisation de l'ANOVA, cette dernière se résume dans ce tableau :

Tableau III.7 : ANOVA pour validation du modèle

Source de variation	SC	DDl	CM	F0	Falpha
modèle	11,665	9	1,2961	5,1672	4,7725
résiduel	1,2542	5	0,2508		
total	12,919	14			

Dans notre étude, on a utilisé un niveau de signification$\alpha = 5\%$. Et comme $F_0 = 5.16 > F_\alpha = 4.77$, on accepte alors l'hypothèse qui signifie qu'il y a une dépendance entre la variable d'entrée (les facteurs) et la réponse (R_{Al}) et par conséquence, le modèle est valide.

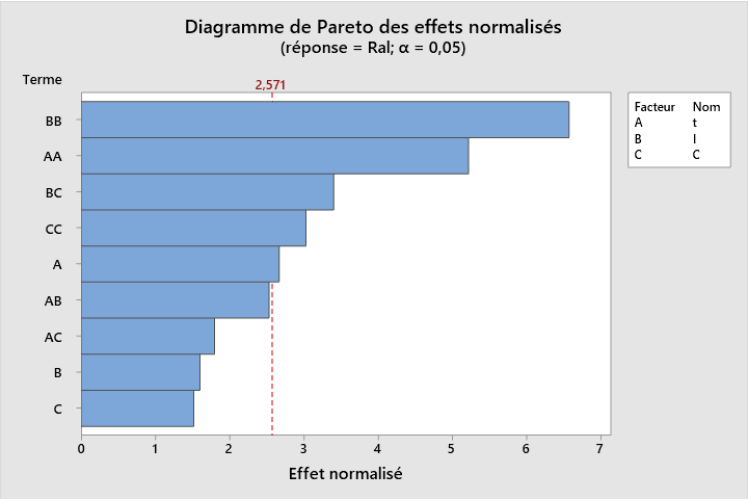


Figure III. 12 : Diagramme de Pareto des effets normalisés

Tandis que pour la signification des facteurs, on va utiliser le diagramme de Pareto des effets normalisés. Les termes significatifs sont ceux qui ont une valeur supérieure ou égale à ***2.57***

(figure III-13), il est claire qu'il y a plusieurs termes qui sont significatifs, les premiers termes sont l'effet quadratique du courant et celui quadratique du temps, suivi par l'interaction ***I/C*** et l'influence quadratique de la concentration.

III.6.1.5 Diagrammes des effets principaux

Le diagramme des effets principaux nous renseigne sur l'influence simultanée de tous les facteurs sur optimisations

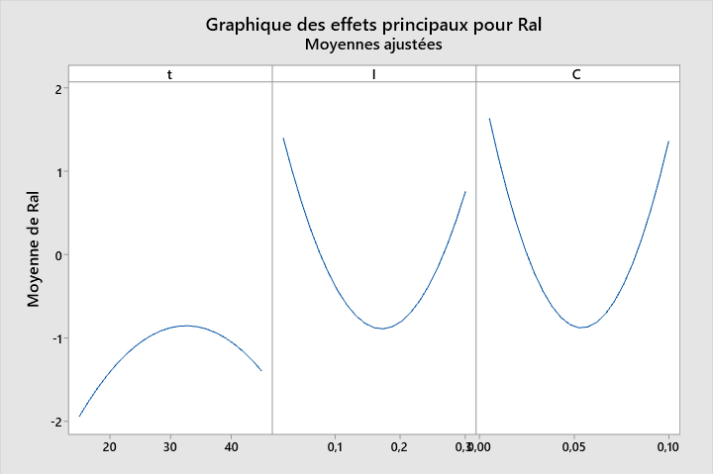


Figure III. 13 : Diagramme des effets principaux pour l'électrocoagulation dans le cas d'électrode en aluminium

D'après la figure **III- 13** on a :

- Le temps (t) présente par une courbe de forme (U). On voit que pour un temps de 0min, le rendement est au plus bas, et il monte en ***30min,*** diminue encore fois en ***45min***, On voit que pour un temps de ***15 min***, le rendement est au plus bas, et il monte régulièrement jusqu'à environ ***46 %*** en ***45 min***.
- Concernant le courant (I) : La courbe forme de (U). À la valeur minimale de ***0.1 A***, le point est au plus haut, Quand le courant augmente vers ***0.2A***, le rendement chute brutalement vers son minimum avant de remonter pour la valeur ***0.3A***.
- Pour la concentration C: On observe la même forme, Le rendement commence à la concentration ***0.001*** maximale, Et à ***0.05*** diminue jusqu'à un point bas, puis remonte pour la concentration maximale de ***0.1***.

III.6.1.6. Diagrammes des effets d'interactions des facteurs de élctrocuagulation :

Les diagrammes des interactions (Figure III.14) sont généralement utilisés pour visualiser les interactions pendant une opération ANOVA, dans laquelle l'effet d'un facteur dépend du niveau d'un autre facteur.

On remarque que les diagrammes montrent que plus la différence de pente est grande entre les lignes, plus le degré d'interaction est élevé et si les courbes sont parallèles indiquent l'absence d'interactions.

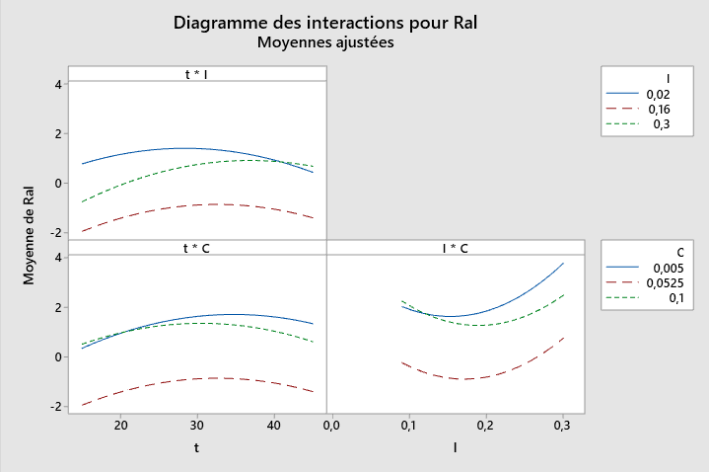


Figure III. 14 : Diagramme des effets principaux pour l'électrocoagulation dans le cas d'électrode en aluminium

III.6.1.6.1 Interprétation de l'interaction entre t et I :

On observe que pour un courant ***I*** de ***0.02 A***, le rendement de l'élimination du colorant dans le cas d'électrode en Aluminium est le plus élevé et atteint sa valeur maximale, tandis que un courant ***I*** égale à ***0.16*** donne les valeurs les plus faibles du rendement. Cela indique qu'il existe une faible interaction entre le temps ***(t)*** et le courant ***(I)***, puisque l'effet de la temps reste presque identique quelle que soit la valeur de ***I***.

III.6.1.6.2 Interprétation de l'interaction entre t et C :

On observe que les parties latérales présentent un déficit de rendement aux niveaux ***20*** et ***40***, tandis qu'au milieu le rendement atteint sa valeur maximale. La réponse augmente puis diminue légèrement au cours du temps ***t***. De plus, le niveau C égale ***0.0525*** semble produire

les valeurs de rendement les plus faibles. Cela traduit une interaction modérée à faible entre ***t*** et ***C***, puisque l'effet de la temps varie légèrement selon la valeur de ***C***.

III.6.1.6.3.Interprétation de l'interaction entre I et C :

On observe que les valeurs ***0.1*** et ***0.3*** donnent le rendement maximal, tandis que ***I*** de ***0.2 A*** correspond au rendement minimal. La déclivité varie en fonction du niveau de concentration ***C***, ce qui montre que l'évolution du rendement dépend des différentes valeurs de ce paramètre. Pour certaines valeurs de ***C***, une augmentation du rendement est observée lorsque le courant ***I*** augmente. Ainsi, l'effet de ***I*** dépend clairement de concentration ***C***, ce qui met en évidence une interaction importante entre ces deux facteurs

III.6.1.7.Graphiques de surfaces et des contours

Ces graphiques sont rassemblés dans la figure III-15 dessus. Les graphiques à droite, représentent les diagrammes de surfaces en trois dimensions pour chaque couple de facteur et les figures à gauches sont les diagrammes de contours ; ils présentent la projection de graphiques de surfaces sur le plan réalisé par les facteurs. A titre d'exemple, La figure (a-2)

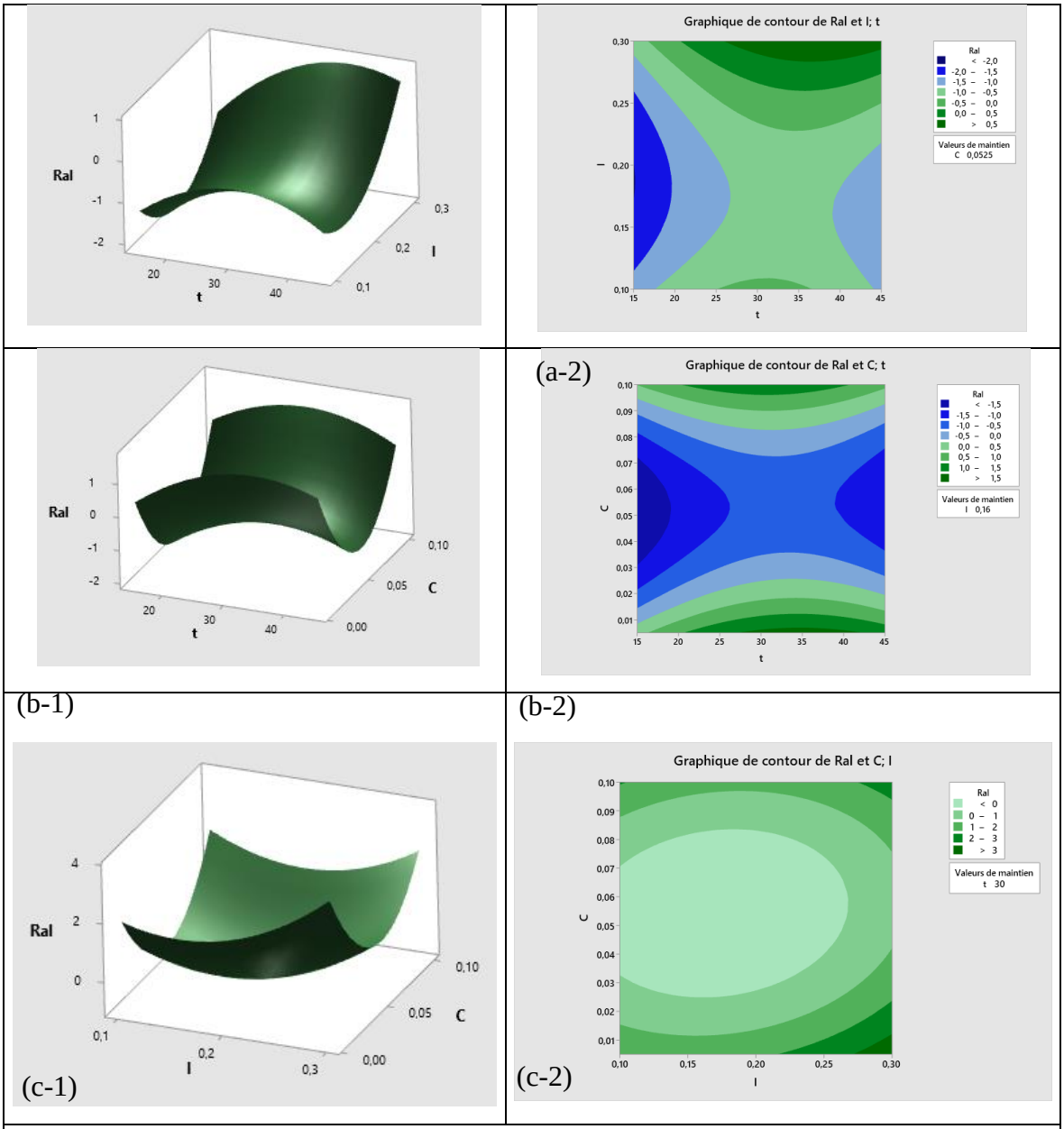


Figure III. 15 : Diagrammes de surfaces pour l'électrocoagulation dans le cas d'électrode en aluminium

- **Diagramme de surface t, I (a-1, a-2) :**

En ce qui concerne la couleur bleue à la valeur ***-2*** et le temps à (+1, -1), l'efficacité est très faible, Plus la teinte du vert ***t(0)*** et ***I*** (+1, -1) s'intensifie, plus l'efficacité augmente.

- **Diagramme de surface t, C (b-1, b-2):**

En ce qui concerne la couleur bleue correspondante aux valeurs négatives du rendement de traitement dans le cas de d'électrode d'aluminium AL (jusqu'à $-1,5$) et au temps t compris entre **15 min** et ***20min*** , l'efficacité est très faible, surtout pour des valeurs de ***C*** autour de ***0.05 M***, Plus la teinte verte devient intense t(0), notamment pour ***t*** compris entre ***30 min*** et ***40 min*** et des valeurs de ***C*** proches de ***0.01*** ou ***0.1*** plus l'efficacité augmente et atteint ses valeurs maximales.

- **Diagramme de surface I, C (b-1, c-2) :**

Lorsque le courant (***I***) et la concentration (***C***) est tous deux à (***0)***, le rendement est faible. Pour les emplacements ***I***(1) et ***C*** (-1,+1), le rendement est très élevé et la meilleure condition correspond à la plus grande valeur du rendement.

III.6.1.8.Optimisation:

Les valeurs correspondantes au meilleur résultat après optimisation sont regroupées dans le tableau suivant

Tableau III.8: Valeurs correspondant au meilleur résultat.

Numéro d'expérience	**F1 (t)min**	**F2 (I)A**	**F3 (C)g/l**	**pH après**	**Turbidité après**	**R_{Al}**
10	30	0,3	0,005	8,6	3,02	4,07

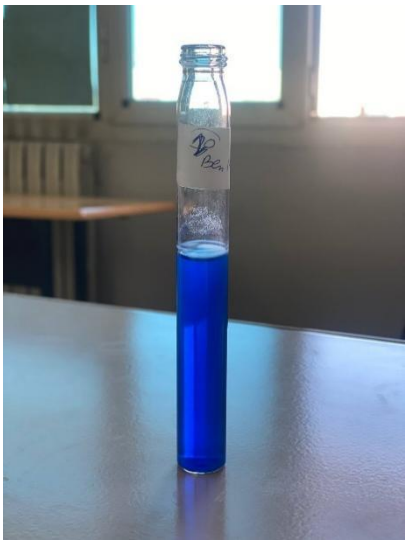


Figure III. 16 : meilleur résultat

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale:

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une étude environnementale visant à développer une méthode efficace de traitement des eaux colorées par Electrocoagulation. Cette méthode offre une alternative efficace et économique aux méthodes conventionnelles de coagulation et de clarification. En contribuant à la préservation d'une eau plus propre s'inscrivant dans la mise en œuvre des solutions durables pour le traitement des eaux contaminées en particulier par les colorants synthétiques.

L'objectif principal était l'optimisation du procédé d'électrocoagulation (EC) pour l'élimination du bleu de méthylène. Une étude comparative a également été réalisée entre les électrodes de fer et d'aluminium afin d'identifier l'électrode offrant la meilleure efficacité d'élimination.

L'application du plan d'expérience de Box-Behnken a permis de trouver les conditions optimales pour les trois variables étudiés : le temps de traitement (t), le courant (I), la concentration du sel support, (Na_2SO_4) dans le but d'optimiser le procédé.

Grâce aux expériences et aux modèles mathématiques, on a prouvé que le rendement d'élimination a atteint 94,06% avec les électrodes de fer et 4,07%, dans le cas des électrodes d'aluminium, ce qui confirme la meilleure performance de fer dans les conditions expérimentales étudiées :

- une concentration de 0,1g/l.
- un temps de 45 minutes.
- un courant de 0, 3A

En conclusion, les essais que nous avons menés ont montré que nous pouvons obtenir une décoloration presque totale de la solution, une diminution significative de la turbidité après le traitement traduisant une amélioration significative de la qualité de l'eau. l'optimisation des procédés d'électrocoagulation offre des opportunités significatives pour améliorer le traitement de l'eau car elle nous a permis de trouver le meilleur compromis entre un rendement d'élimination élevé et d'autres facteurs. par conséquent, l'électrocoagulation s'avère être une technologie d'épuration très efficace, rapide et respectueuse de l'environnement.

Références bibliographiques

[1] H. Mansour, O. Boughzala, D. Dridi, D. Barillier, L. Chekir-Ghedira, et R. Mosrati, « Les colorants textiles sources de contamination de l'eau : CRIBLAGE de la toxicité et des méthodes de traitement », 2011 Rev. Sci. L'eau J. Water Sci.

[2] ZAHRA_SAMAH, « Couplage électrocoagulation-adsorption dans l'élimination des colorants synthétiques », juill. 2025. Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra

[3] S. Hamidoud, « Optimisation multi-objectifs du traitement des eaux usées par électrocoagulation », 2025. These de doctorat, université de galma.

[4] Eaufrance. (s.d.)« Les impacts de la pollution de l'eau »,Disponible sur: https://www.eaufrance.fr/les-impacts-de-la-pollution-de-leau

[5] « La Pollution de l'Eau : Un Défi Mondial à Surmonter – Iso Gourde ». Disponible sur: https://iso-gourde.com/blogs/articles-gourdes/la-pollution-de-leau-un-defi-mondial-a-surmonter?srsltid=AfmBOormfNxVJqTHBYIsXP9v5rhhKtlfK-d1kMT1ecpfCMgLL8z8tky1

[6] Xaltis, « Les différents types de pollution, physique biologique et chimique », Article en ligne, 2025.

[7] H. Zhang, G. Chen, et D. W. Bahnemann, Environmental Photo (electro)catalysis: Fundamental Principles and Applied Catalysts. New York, NY: Springer, 2010.

[8] MEZHOUD, D., BEN REDOUANE, A., & RAHMANI, M. (2024). (Mémoire de master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arréridj).

[9] S. Oumelkhir et F. Khair, « Modélisation de l'adsorption : Application à la dépollution des eaux », chimie, juin 2019.

[10] Touati, L. Cours de pollution des eaux (Master 1 Écologie fondamentale et appliquée). Université Frères Mentouri Constantine 1, Département de Biologie et Écologie Végétale, (2020).

[11] HAICHOUR, Nora. Etude des effets biologiques de la résine de pin. 2021. Thèse de doctorat..

[12] « Généralité sur la pollution des eaux ». Université 20 Août 1955 – Skikda .

[13] Dr belabed-zediri h. «La pollution et ses origine » Université d'Annaba

[14] A. Diagnostics, « La Pollution industrielle / La Pollution agricole > ALCOR Diagnostics Sols », 11 décembre 2021.

[15] Geneviève Massard-Guilbaud « Pollution industrielle », Wikipédia. 28 avril 2026. Disponible sur:

https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Pollution_industrielle&oldid=235678760

[16] Institution Adour. Pollution diffuse d'origine agricole : programmes d'actions et bilans (2009).

[17] A. Medekhel, « Adsorption du bleu de méthylène par charbon actif », Université D'EL-OUED 05 juin 2018

[18] Houri, R., Kebaili, M., & Mogdad, S. (2020). «Élaboration d'un biofiltre pour la dépollution des eaux contaminées par des colorants», Université Kasdi Merbah Ouargla.
[19] « Nila bleu indigo », Esprit Oriental Disponible sur: https://www.espritoriental.fr/soins-du-corps/nila-bleu-indigo

[20] P. P. Urone et R. Hinrichs, Chapter 24 Glossary – College Physics 2e. OpenStax. (2022). Disponible sur:https://openstax.org/books/college-physics-2e/pages/24-glossary

[21] M. A. du texte Moyret, Traité de teinture des soies : précédé de l'histoire chimique de la soie et de l'histoire de la teinture de la soie / par Marius Moyret1877

[22] H. Mansour, O. Boughzala, D. Dridi, D. Barillier, L. Chekir-Ghedira, et R. Mosrati, « Les colorants textiles sources de contamination de l'eau : CRIBLAGE de la toxicité et des méthodes de traitement

[23] Djebar, R. «Étude de la décoloration du (BM) en milieu hétérogène et homogène » Mémoire de master, Université Badji Mokhtar–Annaba. (2019).

[24] M. B. Djellouli, « Elimination des colorants cationiques par des charbons actifs synthétisés à partir des résidus de l'agriculture. ». Université sétif

[25] Zhaolifu « Classification et exemples de colorants directs - Groupe Skychem », Skychem Group.Disponible sur: https://skychemi.com/fr/direct-dyes-classification-

examples/

[26] GlobalSpec « CLASSIFICATION OF COLORANTS | GlobalSpec ». Disponible sur: https://www.globalspec.com/reference/56355/203279/classification-of-colorants

[27] V. Balan, L. Grosu, et I.-C. Alexa, « LES COLORANTS NATURELS : UN SAVOIR-FAIRE ANCIEN POUR UN AVENIR DURABLE », Sci. Study Res. Chem. Chem. Eng. Biotechnol. Food Ind., déc. 2025.

[28] « Colorants naturels dans notre alimentation », Floralux. Disponible sur: https://www.matelma.com/fr/informations-sur-le-jardin/potager/recettes-de-notre-propre-jardin/colorants-naturels-dans-notre-alimentation/

[29] K. Loucif et K. Ghazi, Étude de l'adsorption du bleu de méthylène par un adsorbant naturel – Tiges de dattes, Mémoire de Master Université 8 Mai 1945 Guelma, Guelma, Algérie, juin 2018.

[30] R. B. Griffiths, « Consistent histories and the interpretation of quantum mechanics », J. Stat. Phys, juill. 1984

[31] « Zollinger, H. (1987) Color Chemistry Syntheses, Properties and Applications of Organic Dyes and Pigments. 1st Edition, Weinheim, New York. - References - Scientific Research Publishing ». Disponible sur: https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1110213

[32] M. N. Diffusion JLL, « Pigments Synthétiques ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.materiaux-naturels.fr/produit-liste/418-pigments-synthetiques

[33] NOURELHOUDA, B., & KHADIDJA, L. (2022). ETUDE CINETIQUE ET ISOTHERME D'ADSORPTION D'UN COLORANT SUR DES CHARBONS A BASE NATUREL *(*Doctoral dissertation, faculté des sciences et de la technologie univ bba).

[34] « Forel et le Léman Aux sources de la limnologie. - broché - François Alphonse Forel - Achat Livre | fnac ». Disponible sur: https://www.fnac.com/a4253549/Francois-Alphonse-Forel-Forel-et-le-Leman

[35] Khedda Aicha, Maziri Karima. "Etude de la cinétique et isotherme d'adsorption de bleu de méthylène sur les nanotubes d'halloysites." (2019).

[36] « Colorants anthraquinoniques - Connaissances - Sinoever International Co., Ltd ». Disponible sur: https://fr.sulphurblackcn.com/info/anthraquinone-dyes-38623699.html

[37] Influence of codeposition on the performance of CuPc–C60 heterojunction photovoltaic devices, P. Sullivan et al., Appl. Phys. Lett., 84, 1210 (2004).

[38] M. Hedayatullah, *Les colorants synthétiques*. FeniXX, 1976.

[39] « etude Comparative De La Dégradation Photochimique Et Photocatalytique De Quatre Colorants: Impact De La Structure Chimique Et Corrélation Entre L'adsorption Et L'activité Photocatalytique De Tio2 ». Disponible sur: https://theses-algerie.com/7192071245321989/these-de-doctorat/universite-freres-mentouri---constantine-1/-etude-comparative-de-la-d%C3%A9gradation-photochimique-et-photocatalytique-de-quatre-colorants-impact-de-la-structure-chimique-et-corr%C3%A9lation-entre-l-adsorption-et-l-activit%C3%A9-photocatalytique-de-tio2-

[40] nozha Boudjerda, « Evaluation Des Risques Toxiques Des Colorants Alimentataires: Étude Bibliographique ».Disponible sur: https://www.theses-algerie.com

[41] V. K. Gupta et Suhas, « Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review », Journal of Environmental Management.

[42] JMDesign, « Traitement et réutilisation des eaux usées textiles », Sigmadaf. Disponible sur: https://sigmadafclarifiers.com/fr/tratamiento-y-reutilizacion-de-aguas-residuales-industria-textil/

[43] NAIDJA, LAMRI. Elimination du colorant orange II en solution aqueuse, par voie photochimique et par adsorption. Universite Mentouri de Constantine, 2010.

[44] GOUDJIL, Sarah. Possibilité d'élimination des colorants par coagulation-floculation. Effet des paramètres réactionnels. 2023. Thèse de doctorat. Faculté des Sciences et de la technologie.

[45] DUBRAWSKI, Kristian L. et MOHSENI, Madjid. Standardizing electrocoagulation reactor design: iron electrodes for NOM removal. Chemosphere, 2013,

[46] C. Barrera-Díaz, B. Bilyeu, G. Roa, et L. Bernal-Martinez, « Physicochemical Aspects of Electrocoagulation », *Separation & Purification Reviews*, févr. 2011,

[47] C. Y. Hu, « Electrocoagulation for wastewater treatment: a review», Environmental Engineering Reviews, Article 2010.

[48] C. Bonilla. » Possibilities of the Electronic Coagulator for Water Treatment». Water and Sewage, vol. 85, pp. 21-22, 1947

[49] W. S. Holden, » Electrolytic dosing of chemicals, » Proceedings of the Society of Water Treatment and Examination, vol. 5, pp. 120–128, 1956.

[50] S. E. Sadek, An Electrochemical Method for Removal of Phosphates from Waste Waters, Water Pollution Control Research Series, Advanced Waste Treatment Research Laboratory, Federal Water Quality Administration, U.S. Department of the Interior, Cincinnati, 1970

[51] E. C. Beck, A. P. Giannini and E. R. Ramirez, "Electrocoagulation clarifies food wastewater," Food Technology, vol. 28, pp. 18–19, 1974

[52] P. P. Strokach, Electrochem. Ind. Process. Biol., vol. 55, p. 375, 1975.

[53] E. A. Vik, D. A. Carlson, A. S. Eikum and E. T. Gjessing, "Electrocoagulation of potable water," Water Research, vol. 18, no. 11, pp. 1355–1360, 1984

[54] J. N. Hakizimana et al., « Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches », Desalination, Disponible sur: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916416315971

[55] Dr Atmani ép Merabet. G Université Constantine3- Faculté de Médecine- Département de Médecine Dentaire- 1 ère AnnéeTD de Chimie Les réactions d'oxydo réduction - 2025/2026.

[56] E. Duquesne *et al.*, « Etude par électrogravimétrie des propriétés d'un hydroxyde double lamellaire Ni/Fe synthétisé par voies chimique ou électrochimique », in Journées des doctorants du BRGM, Orléans (45), France, avr. 2018. Disponible sur: https://hal.science/hal-04028147

[57] ZONGO, Inoussa. Etude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation: application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie. Thèsede Doctorat En Génie Des Procédés Et De Produit. Institut National Polytechnique. Lorraine, 2009.

[58] Slimani, « Etude de deux méthodes de la coagulation floculation : la biocoagulation et l'électrocoagulation ». Disponible sur: https://dspace.ummto.dz/items/7eb6319e-9b7a-4663-a81e-ea714a13d590

[59] M. Bennajah, « Traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation/électroflottation en réacteur airlift », Theses, Institut National Polytechnique (Toulouse), 2007. Disponible sur: https://hal.science/tel-04595625

[60] Y. Boukarkour, « Étude de systèmes électro-catalytiques pour l'amélioration des performances de véhicules à moteurs thermiques », phdthesis, Université de Bordeaux, 2024. Disponible sur: https://theses.hal.science/tel-04682317

[61] BeClood.com, « Traitement de l'eau – Électrolyse principes de base – définitions ». Disponible sur: https://www.suezwaterhandbook.fr/Eau-et-generalites/Processus-elementaires-du-genie-physico-chimique-en-traitement-de-l-eau/Electrolyse/principes-de-base-definitions

[62] SAIB, Mr Faouzi. EN: CHIMIE. 2019. « Electrocoagulation ». Disponible sur: https://www.lenntech.fr/processes/electrocoagulation.htm#2

[63] BARRO, Mariam. Épidémiologie des maladies majeures et structuration des microbiomes racinaires: étude comparative entre rizicultures irriguée et de bas fond au Burkina Faso. 2021. Thèse de doctorat. Université Montpellier; Université Nazi Boni (Bobo-Dioulasso, Burkina Faso).

[64] BENTE, Nicolas, FLOREZ, David, DIEZ, Rafael, *et al*. Générateur de Courant impulsionnel à Stockage Capacitif pour Décharges à Barrière Diélectrique. In : Symposium de Génie Électrique SGE 2025. 2025.

[65] SAMAH, Dadache et IKRAM, Selahdja. Etude de l'adsorption du Bleu de méthylène et de l'Orange méthyle en milieu aqueux par un biocomposite Chitosane/Argile. 2025. Thèse de doctorat. Faculté des sciences et de la technologie.

[66] A. Hannouche, « Analyse du transport solide en réseau d'assainissement unitaire par temps de pluie : exploitation de données acquises par les observatoires franc cais en hydrologie urbaine », PhD thesis Université Paris-Est, 2012. 2012.

[67] Turbidité | Hach | Présentation des paramètres de qualité de l'eau ». Disponible sur: https://fr.hach.com/industries/drinking-water/turbidity

[68] G. Sbai, K. Oukili, et M. Loukili, « Etude de la dégradation des colorants de textile application sur le Bleu de Méthylène ». International Journal of Innovation and Applied Studies, 2016.

[69] W. Tinsson, Plans d'expérience: constructions et analyses statistiques. Springer Science & Business Media, 2010.