

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté des Sciences et technologies

Département d'Electrotechnique



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN ELECTROTECHNIQUE

Spécialité : Commande Electrique

Par

DAHMANI AYOUB
AMINA MOHAMED NABIL

Thème :

TITRE : Etude de la vitesse d'écoulement de l'eau industrielle à traiter en fonction du courant appliqué et de la conductivité

Soutenue le 18/09/2024 devant le jury composé de :

Maamar Benyamina	MCB	Président
Abderrahmane Elezaar	MAB	Examineur
Hakima Mostefaoui	MAB	Examineur
Aicha Aissa Boukhtache	MCA	Encadreur
Maamar Latroch	MCA	Co-encadreur

Année Universitaire 2023-2024

Remerciements

Nous tenons à remercier Allah, le tout puissant de nous avoir donnés le courage, la volonté et la patience pour réaliser ce travail.

Nos sincères gratitudees à notre encadreur Dr A. AISSA BOKHTACHE pour la qualité de ses enseignements, ses orientations et ses conseils.

Nous désirons remercier Dr. M. Latroch pour ses bons conseils, son aide morale et sa disponibilité pour nous permettre de mener à bien ce travail.

Nous adressons aussi nos remerciements à tous les enseignants et le personnel du département d'Électrotechnique pour avoir enrichi nos connaissances scientifiques et techniques et en particulier notre spécialité commande électrique.

Nous tenons aussi à remercier chaleureusement les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptent d'évaluer notre projet.

Enfin, nos remerciements vont à nos familles, amis, toutes et à tous nos camarades de promotion 2023-2024, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce mémoire et notre parcours académique.

Ayoub et Nabil

Merci!

Dédicace

Je dédie ce mémoire a toutes les personnes qui n'ont soutenue

Durant sa réalisation sur tout a :

Mon père et ma mère qui m'ont encouragé à aller de l'avant, et qui m'ont donnée tous leurs soins pour continuer mes études.

A mes frères et mes sœurs.

Et toutes mes amis

Et à tous mes camarades de promotion 2023/2024

Ayoub & Nabil..

Résumé

Résumé :

Dans le cadre du traitement des eaux usées et contaminées, différentes techniques, tant traditionnelles et modernes, ont été mises en œuvre, parmi lesquelles l'électrocoagulation. Cette méthode se distingue par sa simplicité et son efficacité dans le traitement des eaux usées, en particulier celles chargées de composants organiques.

Dans notre projet, nous avons appliqué l'électrocoagulation pour traiter une solution de bleu de méthylène, en développant un prototype capable de traiter l'intégralité du volume d'eau polluée disponible.

Le système d'électrocoagulation a été conçu, ses composants essentiels identifiés et testés. Les résultats obtenus ont révélé une réduction de la couleur d'environ 80 %, à un coût modique et dans des conditions optimales pour cette technique.

Mots clés : électrocoagulation, électrodes, bleu de méthylène, l'anode, la cathode.

Les électrodes, prototype,

ملخص :

في إطار معالجة المياه العادمة والملوثة، تم تنفيذ تقنيات مختلفة، سواء التقليدية أو الحديثة، من بينها التآثر الكهربائي. تتميز هذه الطريقة ببساطتها وفعاليتها في معالجة المياه العادمة، وخاصة تلك المحملة بالمكونات العضوية.

في مشروعنا، قمنا بتطبيق التآثر الكهربائي لمعالجة محلول من الأزرق الميثيلين، من خلال تطوير نموذج أولي قادر على معالجة كامل حجم المياه الملوثة المتاحة.

تم تصميم نظام التآثر الكهربائي، وتم تحديد واختبار مكوناته الأساسية. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها تقليصاً في اللون بنحو 80%، بتكلفة منخفضة وفي ظروف مثالية لهذه التقنية.

الكلمات المفتاحية: التآثر الكهربائي، أزرق الميثيلين، قطب موجب، قطب سالب، أنود، كاثود اقطاب كهربائية، نموذج مصغر.

Abstract :

In the context of treating wastewater and contaminated water, various traditional and modern techniques have been implemented, including electrocoagulation. This method stands out for its simplicity and effectiveness in treating wastewater, especially those loaded with organic components.

In our project, we applied electrocoagulation to treat a methylene blue solution, developing a prototype capable of treating the entire available volume of polluted water.

The electrocoagulation system was designed, its essential components identified and tested. The results obtained revealed a color reduction of about 80%, at a modest cost and under optimal conditions for this technique.

Keywords : Electrocoagulation, electrodes, methylene blue, the anode, the cathode, prototype.

Table des matières

Introduction générale:	2
------------------------------	---

CHAPITRE I

« Analyse bibliographique »

I.1 Introduction :	5
I.2 Origine et évolution du procédé d'électrocoagulation (EC) :	5
I.3 Théorie de l'électrocoagulation (EC) :	6
I.4 Principe du procédé d'EC :	7
I.5 Les différents matériaux utilisés pour les électrodes :	8
I.6 Réactions aux électrodes	10
I.7 Différents modes de connexion :	12
A- Connexion mono polaire en série :	12
B -Connexion mono polaire en parallèle :	13
C- Electrodes bipolaires :	13
I.8 Paramètres influençant l'électrocoagulation :	14
I.8.1 Conductivité	14
I.8.2. Matériau d'électrodes :	14
I.8.3. Le pH de la solution	15
I.8.4. Passivation	15
I.8.5. Densité de courant	15
I.9 Principales lois d'électrolyse	15
1.9.1 Loi de Faraday	16
I.9.2 La tension de la cellule	17
I.9.3 Energie et rendement d'électrolyse :	18
I.9.4 Autres facteurs influençant l'électrocoagulation :	18
I.10 La source d'alimentation	19
I.11 Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation :	20
a) Les avantages :	20
b) Les inconvénients :	20
I.12 Conclusion :	21

CHAPITRE II

« Matériels et méthodes expérimentales »

II.1 Introduction :	23
---------------------------	----

II.2 Influence des paramètres de réaction.....	23
II.2.1 Influence du nombre d'électrodes :	23
II.2.2 Influence de la distance inter-électrode :	25
II.3 Produits et Équipements :	25
II.3.1 produits et réactifs :	25
II.3.2 Matériels :	26
II.4 Mode opératoire :	27
II .4.1 Préparation de la solution :	27
II .4.2 choix du débit d'eau :	27
II .4.2.1 L'effet du débit sur l'EC	30
II.5 Conclusion	31

CHAPITRE III

« Réalisation d'un prototype d'électrocoagulation »

III.1 Introduction :	33
III.2 Description du prototype :	33
III.3 Les étapes de réalisation du système :	35
III.3.1 la structure :	36
III.3.2 Les électrodes :	36
III.3.3 Système d'affichage de début d'eau :	39
III.3.3.1 Principe du fonctionnement débitmètre	39
III.3.3.2 Matériels nécessaire	40
III.3.3.3 définitions de ARDUINO UNO	40
III.3.3.4 Schéma du montage :	41
III.3.3.5 débitmètres Arduino code.....	42
III.3.4 Les réservoirs :	44
III.3.4.1 Le réservoir principal	44
III.3.4.2 Le Réservoir d'eau pure	45
III.3.4.3 Le Réservoir d'eau pollue à traiter.....	45
III.3.5 L'alimentation :	45
III.3.5.1 Le générateur contient	46
III.4 L'expérimentation :	47
III.4.1 Etape 1 :	47
III.4.2 Etape 2 :	48

III.4.3 Etape 3 :.....	49
III.4.4 Etape 4 :.....	50
III.4.5 Etape 5 :.....	50
III.5 Résultats et discussion :.....	51
III.6. Conclusion.....	52

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :.....	54
----------------------------	----

Liste des abréviations

EC : électrocoagulation

MB : méthyle bleu

COT : carbone organique totale

MES : métiers en supposition

TAC : taux alcalimétrique complet

TDS : taux de solide dissous

CC : coagulation-chimique

AC : Alternating current

DC : Direct current

PH : le potentiel d'hydrogène

UV : ultraviolet

CRAPC : centre de recherche scientifique et technique en analyses physico-chimiques

CNC : commande numérique de conception

DBO : demande biologique en oxygène

TPH : hydrocarbures totaux de pétrole

Liste des figures

Numéro	Titre de la figure	Page
Figure (I.1)	Schéma du principe de l'électrocoagulation.	08
Figure (I.2)	Connexion en série d'électrodes mono polaires.	12
Figure (I.3)	Connexion en parallèle d'électrodes mono polaires.	13
Figure (I.4)	Connexion des électrodes bipolaire.	14
Figure (I.5)	Décomposition de la tension de cellule.	17
Figure (II.1)	Temps nécessaire pour un rendement de 90% en fonction du nombre d'électrodes.	24
Figure (II.2)	Structure de bleu méthylène.	26
Figure (II.3)	Graphe de débit d'eau en 2.5 tours de robinet.	28
Figure (II.4)	Graphe de débit d'eau en 1.5 tours de robinet.	29
Figure (II.5)	Graphe de débit d'eau en une tour de robinet.	30
Figure (II.6)	Traitement fait en gros vitesse 2.5 tours de robinet.	30
Figure (III.1)	System de l'électrocoagulation désigne avec SolidWorks.	34
Figure (III.2)	System de l'électrocoagulation.	34
Figure (III.3)	System de l'électrocoagulation.	35
Figure (III.4)	La structure désigne avec SolidWorks.	36
Figure (III.5)	La structure réelle.	36
Figure (III.6)	La machine CNC.	37
Figure (III.7)	Entré le dessin technique dans le programme.	37
Figure (III.8)	Entré le dessin technique dans le programme.	38
Figure (III.9)	Les électrodes désignent avec SolidWorks.	38
Figure (III.10)	Les électrodes.	39
Figure (III.11)	Un capteur de débit d'eau YF-S201.	40
Figure (III.12)	Un Arduino Uno.	40
Figure (III.13)	Schéma de la carte Arduino.	41
Figure (III.14)	Des câbles de connexion pour relier le capteur et l'Arduino.	41
Figure (III.15)	Schéma du montage d'un Arduino avec water flow sensor.	41

Figure (III.16)	Programme Arduino de water flow sensor.	43
Figure (III.17)	Résultat du programme Arduino de water flow sensor.	44
Figure (III.18)	Le reservoir principal.	44
Figure (III.19)	Le reservoir principal.	45
Figure (III.20)	Reservoir de recyclage.	45
Figure (III.21)	L'alimentation -face1.	21
Figure (III.22)	L'alimentation- face2.	47
Figure (III.23)	Bassin rempli avec 18L d'eau. (Vue1)	48
Figure (III.24)	Bassin rempli avec 18L d'eau. (Vue 2)	48
Figure (III.25)	Réservoir rempli avec bleu méthylène.	49
Figure (III.26)	Bassin pleine en solution du bleu méthylène.	49
Figure (III.27)	La couche de la mousse.	50
Figure (III.28)	La couche de la mousse éjectée manuellement.	50
Figure (III.29)	L'eau après l'électrocoagulation.	51
Figure (III.30)	Les échantillons prélevés à des intervalles de temps spécifiques.	52

Liste des tableaux

Tableau (I.1)	Matériaux d'électrodes utilisés en EC.	08 / 09
Tableau (II.1)	Les principales caractéristiques du bleu méthylène.	26
Tableau (II.2)	Débit d'eau en fonction du temps de 2.5 tours de robinet.	27
Tableau (II.3)	Débit d'eau en fonction du temps de 1.5 tours de robinet.	28
Tableau (II.4)	Débit d'eau en fonction du temps d'une seul tour de robinet.	29

INTRODUCTION
GENERALE

Introduction générale :

Les eaux usées représentent un sous-produit inévitable de nos activités humaines, résultant des ménages, de l'industrie, de l'agriculture et d'autres sources. Elles contiennent divers contaminants, notamment des matières organiques, des produits chimiques, des métaux lourds et des micro-organismes. Si elles ne sont pas traitées correctement, leur impact sur l'environnement peut être considérable.

Les conséquences de l'évacuation d'eaux usées non traitées ou mal traitées sont multiples et peuvent gravement nuire à l'environnement. Leur rejet dans les rivières, lacs ou océans peut entraîner la pollution de l'eau et la dégradation des écosystèmes aquatiques. La matière organique présente dans ces eaux peut réduire la concentration d'oxygène dissous, menaçant ainsi la vie aquatique. De plus, les produits chimiques et métaux lourds peuvent s'accumuler dans les organismes vivants, perturbant les chaînes alimentaires.

Pour atténuer ces effets, plusieurs méthodes de traitement sont disponibles. Parmi les plus courantes figurent le traitement biologique, qui utilise des micro-organismes pour décomposer les contaminants organiques, le traitement physique, qui élimine les solides par des processus tels que la sédimentation et la filtration, et le traitement chimique, qui neutralise les contaminants à l'aide de réactifs chimiques. Enfin, la filtration permet de séparer les particules indésirables à l'aide de membranes, aussi le traitement par l'électrocoagulation.

L'électrocoagulation est une technique de traitement des eaux usées qui utilise des réactions électrochimiques pour éliminer les polluants. Ce processus repose sur des plaques d'électrodes, généralement en aluminium ou en fer, qui, lorsqu'un courant électrique est appliqué, produisent des ions métalliques. Ces ions jouent un rôle crucial en tant qu'agents de coagulation et de floculation, ce qui favorise l'agrégation des particules et leur séparation de l'eau.

L'efficacité de l'électrocoagulation est influencée par divers facteurs, notamment la nature et la concentration des contaminants dans les eaux usées, la conception du système d'électrocoagulation, ainsi que les paramètres opérationnels tels que l'intensité du courant et le pH de l'eau. Dans de nombreux cas, cette méthode s'avère efficace pour éliminer les matières en suspension, les métaux lourds, les matières organiques et les micro-organismes présents

dans les eaux usées.

Notre travail vise le procédé de l'électrocoagulation en générale et ses principes et tous qui est liées avec lui et de faire une petite réalisation pour applique le procédé dernier utilisant le colorant du bleu de méthylène comme influent, L'objectif est d'utiliser le procédé d'électrocoagulation pour traiter des solutions synthétiques contenant ces substances, dans le but d'évaluer son efficacité. Et vérifier l'effet de la vitesse d'écoulement de l'eau industrielle à traiter en fonction du courant appliqué.

Dans notre projet, nous avons structuré notre travail en trois chapitres, chacun ayant un objectif spécifique Le premier chapitre est consacré aux généralités et état de l'art sur l'électrocoagulation (EC). Ce chapitre vise à établir les bases théoriques nécessaires à la compréhension du procédé, en présentant les principes fondamentaux et les recherches antérieures dans ce domaine. Dans la partie théorique dans le deuxième chapitre se concentre sur le matériel utilisé pour l'élaboration des essais expérimentaux de notre procédé. Il détaille les équipements et les instruments nécessaires pour mettre en œuvre les expériences liées à l'électrocoagulation, ainsi que leur fonctionnement. Le troisième chapitre décrit la conception et la fabrication de l'appareil d'électrocoagulation. Nous y identifions clairement ses différentes sections et fournissons des explications détaillées pour chacune d'elles, afin de donner une vue d'ensemble complète du système développé.

Enfin, notre travail se conclut par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et les perspectives futures liées à l'électrocoagulation

CHAPITRE I

« *Etat d'art* »

I.1 Introduction :

Les eaux usées industrielles présentent une variété de composés organiques, tant dans leur nature que dans leur concentration, dont le rejet dans l'environnement est préjudiciable et contribue à la contamination des eaux de surface et souterraines. Afin de contrer cette pollution d'origine industrielle, les recherches actuelles se concentrent sur le développement de technologies simples et économiques.

Dans le domaine du traitement des eaux, plusieurs techniques et méthodes sont disponibles, telles que le traitement biologique, la filtration par membrane et le procédé de coagulation-floculation. Bien que ce dernier soit efficace pour éliminer les contaminants, il nécessite l'ajout de produits chimiques, contribuant ainsi à la pollution environnementale. De ce fait, les traitements électrochimiques gagnent en popularité dans le domaine des technologies environnementales en raison de leur efficacité dans le traitement et la purification des eaux.

Parmi ces techniques électrolytiques, l'électrocoagulation (EC) se distingue par son caractère non polluant, sa facilité d'automatisation et son potentiel de réduction de l'utilisation de réactifs chimiques. Elle est notamment utilisée pour éliminer divers contaminants tels que les matières organiques et minérales, les métaux lourds, les hydrocarbures, etc. L'EC a été largement appliquée avec succès tant aux eaux souterraines qu'aux eaux de surface, dans une multitude de contextes de traitement des eaux.

Ainsi, l'objectif principal de ce chapitre est de présenter en détail le procédé de l'électrocoagulation, en mettant en lumière ses différentes applications et ses avantages dans le domaine du traitement des eaux.

I.2 Origine et évolution du procédé d'électrocoagulation (EC) :

L'électrocoagulation est en train de connaître couramment une renaissance [1]. 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. La même année une station d'épuration fut construite sur la base de 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'aluminium. En 1912, deux autres stations de traitements des eaux usées furent construites sur ce principe,

aux Etats – Unis. Cependant, leur fonctionnement fut stoppé, quelques années plus tard (1930), en raison du coût qui était deux fois plus élevé que celui d'un traitement classique [2]. En 1940, Matteson et al [3] décrivait un « coagulateur électrique » qui consistait à faire dissoudre une anode en aluminium pour ensuite former avec les hydroxydes produits à la cathode, des hydroxydes d'aluminium qui flocculent et coagulent en entraînant les matières en suspensions et purifient l'eau. Un procédé similaire a été développé en Grand Bretagne pour traiter les eaux de rivière par des électrodes de fer [3]. L'EC a été utilisée pendant toutes ces années sans véritablement connaître un succès et sans qu'elle ne soit acceptée par les populations et les industriels. Cependant, ces dernières années, on constate un regain d'intérêt, et son utilisation s'est accrue et bon nombre d'industriels font appel à elle pour le traitement de leur effluent. La technologie a été optimisée pour minimiser la consommation énergétique et pour augmenter l'efficacité du traitement. Son efficacité a été démontrée sur divers polluants. Elle est efficace dans le traitement des métaux lourds tels que Pb, Cd, Cr et As ; les métaux tels que Mn, Cu, Zn, Ni, Al et Fe également des anions tel que CN^- , PO_4^{3-} , NO_3^- , F^- et Cl^- , les non métaux tels que le phosphore et des composés organiques, hydrocarbures totales de pétrole (TPH), DBO, benzène et xylème (TBX), colorants organiques, huiles et graisse tous des effluents industriels variés.

I.3 Théorie de l'électrocoagulation (EC) :

L'électrocoagulation (EC) est un processus complexe qui fait intervenir plusieurs phénomènes physiques et chimiques, utilisant des électrodes consommables (également appelées sacrificiables) pour libérer des ions dans l'effluent d'eau. Trois étapes principales se succèdent pendant le processus d'EC :

- Formation des coagulants par oxydation électrolytique de l'électrode sacrificielle.
- Déstabilisation des contaminants, suspension particulaire et rupture des émulsions.
- Agrégation des phases déstabilisées pour former les floccs.

Le processus de déstabilisation des contaminants, des suspensions de particules et la rupture des émulsions peut être résumé comme suit :

- Compression de la couche diffuse autour des espèces chargées par les interactions avec les ions générés par l'oxydation de l'anode sacrificielle.

- Neutralisation de la charge des espèces ioniques présentes dans le rejet aqueux à l'encontre des ions produits par dissolution électrochimique de l'anode sacrificielle.
- Ces ions réduisent la répulsion électrostatique entre les particules jusqu'à ce que les forces d'attraction de Van der Waals prédominent, causant ainsi la coagulation.
- Formation du floc : le floc formé suite à la coagulation crée les boues qui piègent et relie les particules colloïdales restant dans le milieu aqueux [4].

I.4 Principe du procédé d'EC :

Le procédé d'électrocoagulation repose sur le principe des anodes solubles. Il consiste à appliquer un courant (ou un potentiel) entre deux électrodes (en fer ou en aluminium) immergées dans un électrolyte contenu dans un réacteur, afin de générer in situ des ions (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+}), capables de produire un coagulant en solution et d'induire une coagulation-floculation des polluants à éliminer. L'électrolyse peut également coaguler les composés solubles oxydables ou réductibles présents dans l'effluent. Le champ électrique induit un mouvement d'ions et de particules chargées, favorisant ainsi l'agrégation des matières en suspension sous forme de floes, qui sont ensuite éliminés par un procédé physique classique (décantation, flottation, filtration). La figure (I.1) présente le principe du procédé avec des électrodes en aluminium. Les anodes et les cathodes utilisées peuvent avoir différentes configurations, telles que des plaques, des boules, des sphères à lit fluidisé, des fils, des tiges ou des tubes. Ces électrodes peuvent être constituées de divers métaux choisis pour optimiser le procédé de traitement, les deux métaux les plus couramment utilisés étant le fer et l'aluminium. [5]

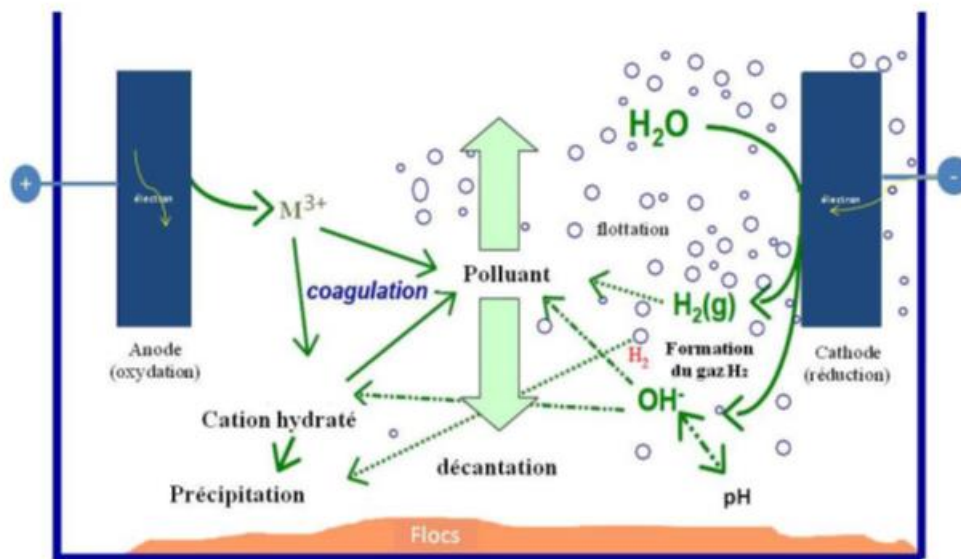


Figure (I.1) : Schéma du principe de l'électrocoagulation. [6]

La figure (I.1) synthétise toutes les interactions possibles dans le processus d'électrocoagulation utilisant des électrodes en aluminium, mettant en lumière la complexité et l'interdépendance des processus impliqués. Le coagulant et ses produits d'hydrolyse peuvent interagir de diverses manières avec les polluants, ainsi qu'avec d'autres espèces ioniques et les bulles de gaz électrolytique.

I.5 Les différents matériaux utilisés pour les électrodes :

Electrodes utilisées	Références
Anode en plomb et cathode en acier inox	Vik <i>et al.</i> (1984)
Titane /Platine et Ti/Pt/Ir	Garrote <i>et al.</i> (1995)

Al et Mn	EDF GDF Services et partenaires (1995)
Fe/Fe	Ibanez <i>et al.</i> (1995), Ögütveren and Koparal (1997), Ibanez <i>et al.</i> (1998), Hansen <i>et al.</i> (2006), Lai <i>et al.</i> (2006), Mrozowski <i>et al.</i> (1983), Golder <i>et al.</i> (2005), Wilcock <i>et al.</i> (1996), Christoskova <i>et al.</i> (1988), Do et Chen (1994), Zaroual <i>et al.</i> (2006), Golder et Samanta (2006), Meneses <i>et al.</i> (2005), Ün <i>et al.</i> (2006), Daneshvar <i>et al.</i> (2006).
Fe/Al ou Al/Fe	Gao <i>et al.</i> (2005), Mollah <i>et al.</i> (2004), Holger (1995), Damien <i>et al.</i> (1992), Mrozowski et Zielinski (1983), Kobya <i>et al.</i> (2006), Can <i>et al.</i> (2006).
Ti/acier	Jordao <i>et al.</i> (1997).
Comparaison Al et Fe	Golder <i>et al.</i> (2006), Kobya <i>et al.</i> (2006).
Al/Al	Murell, Wilfried Anthony (1987), Donini <i>et al.</i> (1994), Groterud et Smoczynski (1992), Biotys (1995), Lu <i>et al.</i> (1999), Rubach et Saur (Octobre 1997), Michel (1996), Khemis <i>et al.</i> (2006), Kobya <i>et al.</i> (2006), Ögütveren et Koparal (1997), Lai et Lin (2006), Mrozowski et Zielinski (1983), Do et Chen (1994).
Al/Cu et Fe/Cu	Tsai <i>et al.</i> (1997)
Al/Sn	Kliskic <i>et al.</i> (1998).
Zn/Ni	Roev et Gudin (1996)

Tableau (I.1) : Matériaux d'électrodes utilisés en EC. [7]

I.6 Réactions aux électrodes

Les électrodes les plus fréquemment employées dans le processus d'électrocoagulation sont généralement faites en aluminium ou en fer, en raison de leur présence d'ions trivalents [8]. Les réactions principales qui se déroulent au niveau de ces électrodes sont les suivantes :

A l'anode :

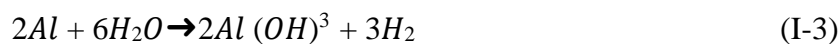
On a l'oxydation du métal qui va passer de l'état solide à l'état ionique selon la réaction :



L'aluminium se dissout suivant la réaction :



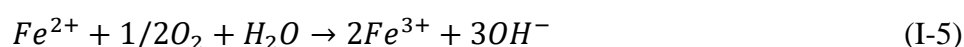
Du fait du potentiel standard très négatif du couple Al/Al³⁺, l'aluminium réagit avec l'eau en présence d'anions tels que les chlorures.



- Le fer : Dans le cas de l'utilisation des électrodes de fer, les ions Fe²⁺ est produit à l'anode lors de l'imposition du courant, suivi de la formation d'hydroxydes de fer en solution.
- Deux mécanismes sont retenus pour expliquer la formation de ces deux formes d'hydroxydes :



Les ions ferreux précipitent sous forme de Fe(OH)₂ à un pH supérieur à 6. Cependant, les ions ferreux sont instables dans un environnement contenant de l'oxygène comme en présence d'oxygène dissout dans l'eau.



Les ions ferriques à des niveaux variés d'hydratation forment dans l'effluent les hydroxydes ferriques qui sont responsables des floccs bruns qui précipitent. Même s'il est

souvent ressorti que les hydroxydes ferriques favorisent le traitement, plusieurs autres hydroxydes et oxydes sont souvent cités.

L'électrolyse de l'eau se produit à la cathode et à l'anode. Dans le cas d'un milieu acide, on a les réactions suivantes :

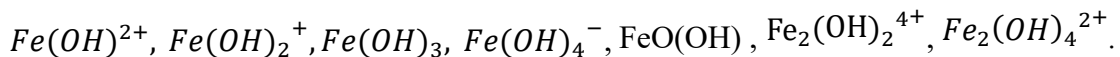


Les cations métalliques forment des complexes avec les ions hydroxydes. L'espèce majoritaire dépend du pH du milieu.

Dans le cas de l'aluminium, on trouve une multitude de complexes anioniques et cationiques :

- Les mono complexes : $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_2^+$, $Al(OH)_4^-$
- Les poly complexes : $Al_2(OH)_2^{4+}$, $Al_2(OH)_5^+$, $Al_6(OH)_{15}^{3+}$,
 $Al_6(OH)_{15}^{3+}$

- Les espèces amorphes et très peu solubles telles que :



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

A la cathode, la réduction de l'eau conduit à la formation d'hydrogène dont le dégagement permet la flottation des particules floculées. La taille des microbulles est assez faible et estimée entre 20 et 30 micromètres. Ces bulles empêchent ou réduisent la formation des dépôts sur la cathode et donc augmentent le rendement de l'EC quel que soit le type d'électrode utilisé.

Dans le cas des électrodes en fer, l'oxydation de l'eau à l'anode par la formation d'oxygène contribue à oxyder les ions ferreux en ferriques pour rendre efficace la flottation.

Le rendement faradique très supérieur à l'unité lorsque les électrodes d'aluminium sont utilisées peut s'expliquer par l'oxydation chimique de l'aluminium par les ions OH^- produits selon ou bien par la présence de Cl^- qui réduit la passivation de l'aluminium.

1.7 Différents modes de connexion :

A- Connexion mono polaire en série :

Comme le montre la figure (I.2), chaque paire d'électrodes sacrificielles est interconnectée l'une avec l'autre, et n'a donc pas d'interconnexions avec les électrodes externes. Cette disposition de cellules EC avec des électrodes mono polaires en série est similaire du point de vue électrique à une simple cellule avec plusieurs électrodes et des interconnexions. Dans un montage en série, une même intensité de courant traverse toutes les électrodes, la tension (différence de potentiel) nécessaire sera plus importante, puisque les résistances s'additionnent. Il faudrait un générateur permettant d'imposer des intensités relativement faibles et des tensions plus élevées.

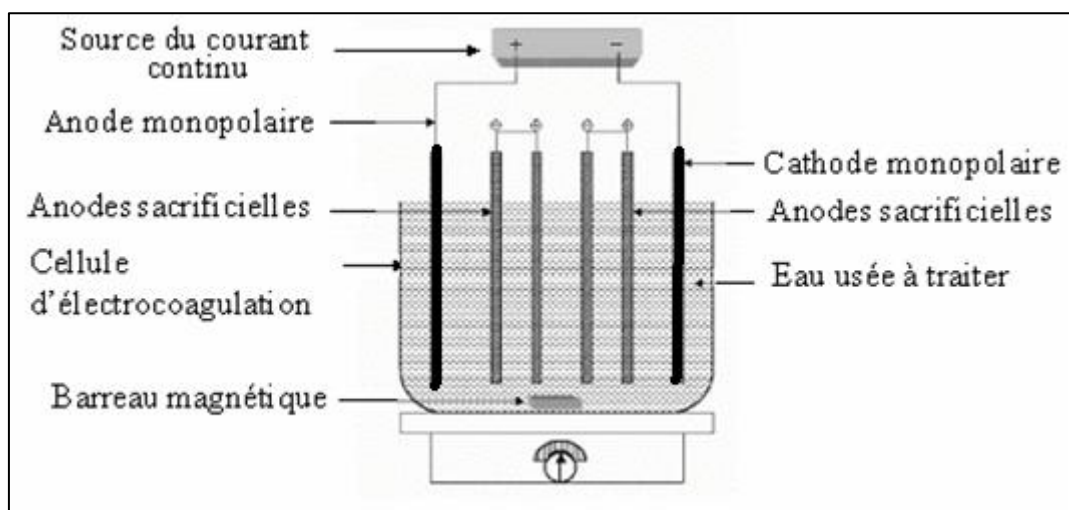


Figure (I.2) : Connexion en série d'électrodes mono polaires. [9]

B -Connexion mono polaire en parallèle :

C'est la connexion la plus simple et la plus utilisée. Comme la figure (I.3) montre un dispositif simple de cellule d'EC avec une paire d'anodes et une paire de cathodes disposées en parallèle.

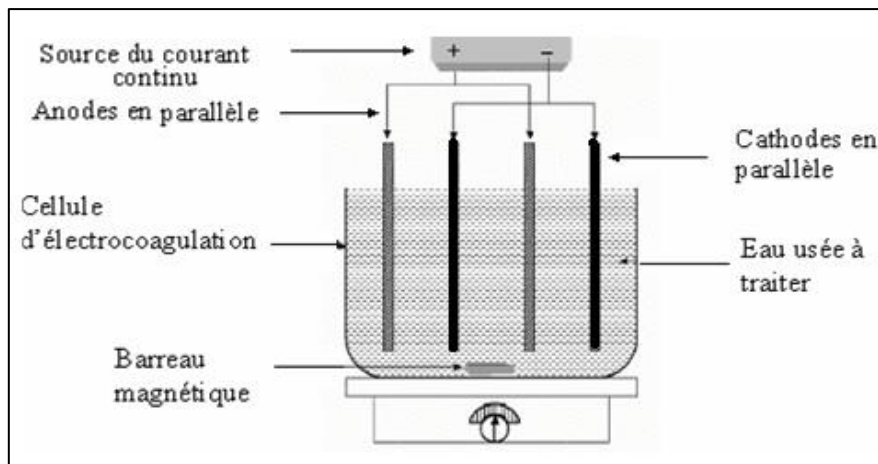


Figure (I.3) : Connexion en parallèle d'électrodes mono polaires. [9]

Cette cellule EC consiste essentiellement en paires de plaques de métal conducteur placées entre deux électrodes parallèles et une source de courant continu. Les plaques métalliques conductrices sont appelées communément « électrodes sacrificielles ». L'anode sacrificielle abaisse le potentiel de dissolution de l'anode et minimise la passivation de la cathode ; les électrodes sacrificielles peuvent être constituées des mêmes matériaux que l'anode ou de matières différentes [10].

C- Electrodes bipolaires :

Seules les deux électrodes monopolaires sont connectées à la source de courant sans aucune interconnexion entre les électrodes sacrificielles. Les différentes électrodes sont placées comme l'indique la figure (I.4)

Cet arrangement permet une installation plus simple, qui facilite la maintenance lors de l'utilisation. Quand le courant électrique traverse les deux électrodes monopolaires, les faces non chargées des plaques conductrices seront transformées en faces chargées, qui auront alors une charge opposée par rapport au côté parallèle qui lui est adjacent ; les électrodes sacrificielles sont alors dites électrodes bipolaires.

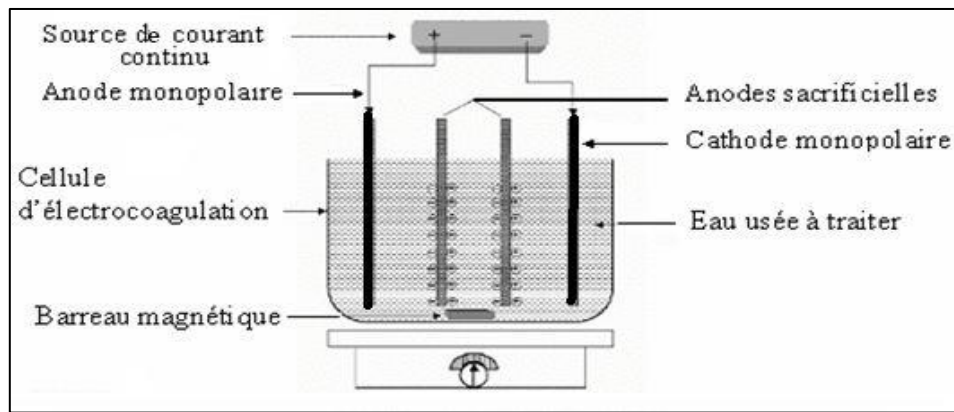


Figure (I.4) : Connexion des électrodes bipolaire. [9]

I.8 Paramètres influençant l'électrocoagulation :

I.8.1 Conductivité

Ce paramètre indique la capacité de l'eau à transporter le courant électrique ; sa valeur étant d'autant plus élevée que la teneur en ions de l'eau est forte [11]. Si elle est trop faible, la résistance au passage de courant est forte, la consommation énergétique est très importante et sa température peut alors fortement augmenter. Pour ces différentes raisons, le chlorure de sodium est souvent ajouté. Le problème de la conductivité constitue un inconvénient majeur au fonctionnement d'un procédé d'EC [12]. Le choix du chlorure de sodium découle du fait que les ions chlorures réduisent de manière significative les effets indésirables d'autres anions, tels que HCO_3^- et SO_4^{2-} .

Par exemple, en évitant la précipitation du carbonate de calcium contenu dans une eau calcaire, qui pourrait former une couche d'isolant sur la surface des électrodes et augmenter ainsi la résistance de la cellule électrochimique. [13]

I.8.2. Matériau d'électrodes :

Le matériau d'électrodes influence visiblement la performance du réacteur d'EC. Le matériau d'électrodes détermine le cation introduit en solution. Les électrodes les plus communes sont des plaques en fer ou aluminium, en raison de leur bas coût, disponibilité et efficacité prouvée [13].

I.8.3. Le pH de la solution

Le pH de la solution détermine la spécification d'ions métalliques. Il influence l'état d'autres espèces en solution et la solubilité de produits formés. Ainsi, le pH de la solution affecte le rendement global de l'efficacité d'EC [14].

I.8.4. Passivation

L'une des plus grandes questions opérationnelles avec l'EC est la passivation des électrodes qui sont en rapport avec la longévité du processus. Il existe diverses méthodes de contrôle de la passivation d'électrode :

- Changement de la polarité des électrodes.
- Nettoyage hydromécanique.
- Introduction d'agents inhibiteurs.

Selon les chercheurs, la plus rentable et fiable méthode de maintenance d'électrodes était de nettoyer mécaniquement l'électrode à certaines périodes [14].

I.8.5. Densité de courant

La densité de courant i est le courant délivré à l'électrode divisé par l'aire active S de l'électrode. Pour contrôler ce paramètre, il suffit donc de contrôler l'intensité du courant I . [15]

I.9 Principales lois d'électrolyse

Le procédé d'électrocoagulation implique divers phénomènes, notamment les réactions chimiques inter-ioniques, les réactions électrochimiques d'oxydoréduction, le transfert de charge à l'interface électrode-solution, ainsi que les adsorptions physiques ou chimiques entre hydroxydes et polluants, et entre ions métalliques et contaminants. Il englobe également des aspects hydrodynamiques dans l'espace entre les électrodes et les interactions entre gaz et liquide, en particulier entre les gaz générés et la solution. Pour maîtriser et optimiser ce procédé, il est crucial de comprendre ces phénomènes, ce qui nécessite la connaissance de plusieurs lois fondamentales, telles que :

- La loi de Faraday.
- L'expression de la tension de cellule.

- L'énergie consommée et les rendements d'électrolyse.

1.9.1 Loi de Faraday

Si l'on considère que les seules réactions chimiques qui se déroulent dans le réacteur d'électrocoagulation sont :

- A l'anode, l'oxydation du métal,
- A la cathode, la réduction de l'eau.

Il est possible de déterminer la masse de métal dissoute et d'hydrogène formé pendant une durée t d'électrolyse à un courant I , en utilisant la loi de Faraday :

$$m = \frac{ItM}{nF} \quad (\text{I-8})$$

Avec :

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

I : intensité du courant imposé (A).

M est la masse molaire du métal considéré ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$),

F est la constante de Faraday ($96500 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$).

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

t : durée d'électrolyse (s).

Où M est la masse molaire de l'espèce considérée. Cette relation suppose que les électrons échangés ont servi effectivement à la réaction considérée.

Une fraction de l'énergie appliquée peut être exploitée par des réactions secondaires, ce qui introduit le concept de rendement faradique. Ce rendement est calculé en comparant la quantité théorique d'électricité requise pour produire ou consommer une mole de B à la quantité d'électricité effectivement utilisée ou générée.[16]

Soit la réaction suivante :



Le rendement faradique est donné par :

$$\phi = \frac{veF m_B}{Q M_B} \quad (\text{I-10})$$

Avec, Q la charge électrique et m_b la masse de l'espèce B formée.

I.9.2 La tension de la cellule

Dans la figure (I.5) lorsque le courant traverse une cellule électrochimique, cela entraîne une élévation de la tension. Cette tension se divise en plusieurs composants : [17]

- Le potentiel d'équilibre réversible de l'anode, E_{0a}
- La surtension d'activation à l'anode, η_{Aa} , qui est fonction de la densité de courant
- La surtension de diffusion à l'anode, η_{Da} , résultant de la différence de concentration de l'espèce A entre l'anode et l'électrolyte, par la relative lenteur des phénomènes de diffusion-convection
- La chute ohmique dans la masse de la solution, qui transforme une partie de l'énergie électrique fournie en chaleur par effet Joule.
- La surtension d'activation η_{Ac} de la réaction électrochimique se produisant à la cathode

La tension appliquée est ainsi donnée par l'équation suivante :

$$U_c = E_a - E_c + \eta_{Aa} + \eta_{Da} + |\eta_{Da}| + |\eta_{Ac}| + R_s \cdot I \quad (\text{I-11})$$

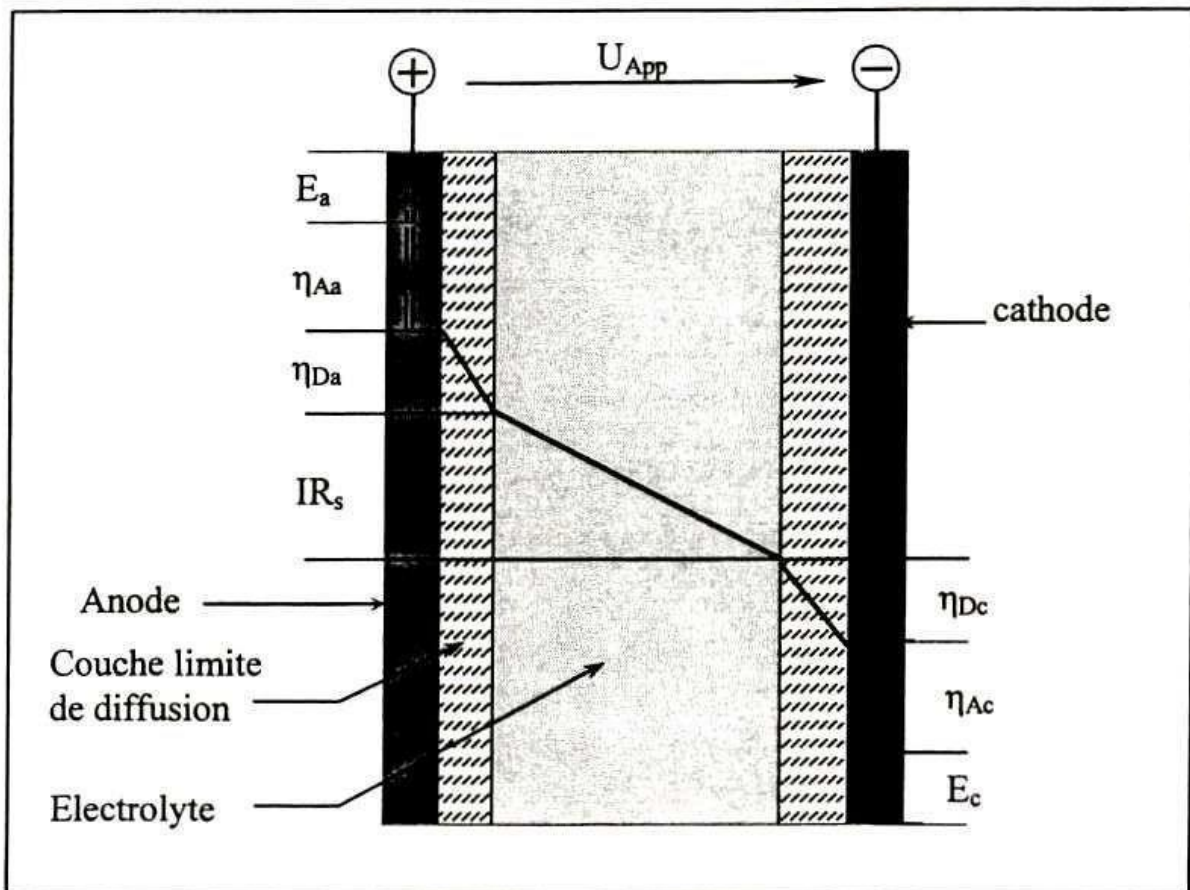


Figure (I.5) : Décomposition de la tension de cellule. [17]

R_s est la résistance ohmique de l'électrolyte. Dans notre dispositif où les électrodes planes sont placées en parallèle et vis-à-vis à une distance d l'une de l'autre, on a :

$$R_s = \frac{d}{A \cdot \kappa} \quad (\text{I-12})$$

Avec A qui représente la surface géométrique d'une face d'électrode et κ la conductivité de l'électrolyte.

I.9.3 Energie et rendement d'électrolyse :

En plus du rendement faradique, qui compare la quantité d'électricité effectivement utilisée à la quantité théorique, on peut définir un rendement énergétique pour une électrolyse. Ce rendement énergétique compare l'énergie théorique nécessaire à la formation d'une mole de produit B et l'énergie réellement consommée pendant l'électrolyse. Le rendement énergétique peut se simplifier à : [17]

$$\phi_E = \phi \frac{U_0^0}{U_C} \quad (\text{I-13})$$

Avec ϕ le rendement faradique, U_0^0 la différence de potentiel standard de la réaction anodique ou cathodique et U_0^0 la tension réelle de la cellule.

La différence de potentiel est proportionnelle à l'opposé de la somme des variations d'enthalpie libre des processus anodiques et cathodiques ce qui donne la relation suivante du rendement d'électrolyse :

$$\phi_E = \frac{-\Delta G}{\nu F \cdot U_C} \quad (\text{I-14})$$

Le facteur $\left\{ \frac{-\Delta G}{\nu F \cdot U_C} \right\}$ correspond à un rendement en tension $\left\{ \frac{U_0^0}{U_C} \right\}$

L'énergie électrique consommée, exprimée en Watt heure ou en Joule, s'exprime en fonction de la tension réelle U_c , de l'intensité I et de la période considérée Δt :

$$W = U_c \cdot I \cdot \Delta t \quad (\text{I-15})$$

I.9.4 Autres facteurs influençant l'électrocoagulation :

Outre les paramètres de qualité de l'eau comme la conductivité et le pH, plusieurs autres éléments peuvent avoir un impact sur l'efficacité du traitement des eaux par électrocoagulation :

➤ Composition chimique de l'effluent

La composition de l'eau à traiter joue un rôle crucial. Les différents composés organiques et inorganiques réagissent de manière variable au courant électrique, ce qui peut entraîner des variations significatives dans les résultats. Des substances comme les huiles, pigments et autres doivent être prises en compte lors de l'analyse.

➤ Temps de traitement

En laboratoire, le taux d'épuration augmente avec le temps d'électrolyse, mais atteint un plateau après 30 à 100 minutes selon l'intensité du courant. Un temps prolongé entraîne une consommation d'énergie élevée, il faut donc l'optimiser.

➤ Température

La température de l'effluent influence le potentiel de réduction et les constantes de solubilité des précipités métalliques. Comme les valeurs de référence sont à 25°C, la plupart maintiennent la température entre 20 et 25°C. Une température trop haute peut avoir des effets défavorables comme des changements à l'interface gaz-liquide et une production excessive de chaleur.

➤ Autres paramètres

L'état de surface des électrodes, le degré de mélange, le temps de rétention hydraulique et la trajectoire de l'effluent sont aussi importants. Leur optimisation permet d'améliorer l'efficacité globale du traitement dans le réacteur électrolytique en favorisant une réduction efficace des contaminants. En résumé, la composition chimique de l'effluent, le temps de traitement, la température, l'état des électrodes et le mélange sont essentiels à prendre en compte pour optimiser l'électrocoagulation. Leur ajustement permet d'optimiser les conditions de réaction et de favoriser une épuration efficace.

I.10 La source d'alimentation

Utilisation de courant alternatif (AC) vs courant continu (DC) en électrocoagulation :

Certains auteurs considèrent l'utilisation d'une source d'alimentation en courant alternatif (AC) préférable à celle en courant continu (DC) pour entraîner le fonctionnement d'un montage d'électrocoagulation. En effet, la formation d'une couche imperméable à la cathode et la passivation de l'anode surviennent inévitablement lorsqu'une source d'alimentation en courant direct est utilisée. Grâce à l'inversion cyclique de la direction du flux électrique (anode-cathode) en courant alternatif, ces désagréments sont retardés. Pour pallier aux difficultés encourues lors de l'usage d'une source d'alimentation en courant direct DC, deux solutions sont envisageables :

1. L'utilisation additionnelle d'électrodes sacrificielles placées en parallèle dans la configuration du bloc d'électrodes peut retarder les effets négatifs.
2. L'utilisation d'un inverseur de polarité, relié au bloc d'alimentation, peut aussi retarder la dégradation des électrodes et leur assurer ainsi une plus grande longévité. Cet appareil est fréquemment employé afin de renverser périodiquement le sens du courant, en intervertissant le rôle des électrodes. [18]

I.11 Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation :

a) Les avantages :

- L'EC présente un équipement simple et facile à utiliser, capable de résoudre la plupart des problèmes liés à la pollution des eaux.
- L'EC donne une eau agréable au goût, claire, sans couleur et inodore.
- Les ions produits électrochimiquement sont des bons coagulants.
- L'EC est une technique produisant moins de boues qui sont stables et faciles à sécher, car ces boues composées principalement d'oxydes/hydroxydes métalliques.
- Le procédé d'EC a l'avantage d'éliminer les plus petites particules colloïdales, en appliquant un champ électrique les place dans un mouvement plus rapide, facilitant de ce fait la coagulation.
- Vis-à-vis de la coagulation, l'EC évite l'utilisation des produits chimiques, de ce fait aucune possibilité de pollution secondaire provoquée par ces produits ajoutés à des concentrations élevées.
- Les bulles de gaz produites pendant l'électrolyse peuvent porter les floccs au-dessus de la solution où ils peuvent être concentrés, rassemblés et enlevés.
- Les processus électrolytiques dans la cellule d'EC sont commandés électriquement sans les pièces mobiles, de ce fait exigeant moins d'entretien.[19]

b) Les inconvénients :

- Les électrodes sacrificielles (solubles) ont besoin d'être régulièrement remplacées
- L'EC n'est appropriée pour les solutions présentant une conductivité faible. L'utilisation de l'électricité peut être chère voire difficile dans certaines régions
- Une conséquence d'oxydation et nécessitent d'être régulièrement remplacées.
- Un imperméable film d'oxyde peut être formé sur la cathode causant une perte
- La technique d'EC ne nécessite que la suspension d'eau usée traitée soit à une

conductivité élevée.

- L'usage d'électricité peut être coûteux en certains endroits [19]

I.12 Conclusion :

D'après l'étude bibliographique, l'électrocoagulation monopolaire a été appliquée dans divers secteurs tels que l'industrie des colorants, le textile et le traitement de surface, permettant l'élimination de plusieurs composés nuisibles à l'environnement. Bien que la production de boues soit inévitable, elle est considérablement inférieure à celle générée par les méthodes classiques de coagulation. Ce chapitre a mis en lumière plusieurs aspects peu explorés dans la littérature, mais essentiels.

La seule source d'énergie mentionnée dans les études est l'électricité, utilisant une connexion monopolaire à deux électrodes. Nous allons explorer cette problématique en utilisant l'électrocoagulation dans un réacteur continu et alternatif, afin d'évaluer l'efficacité de l'élimination de certains types de polluants tout en minimisant la consommation d'énergie électrique.

CHAPITRE II

« Matériels et méthodes expérimentales »

II.1 Introduction :

Les effluents liquides issus des industries textiles sont généralement traités par des méthodes classiques de coagulation-floculation, mais avec un succès limité. En effet, ces procédés peinent à atteindre une décoloration complète des eaux usées. De plus, ces techniques génèrent des volumes significatifs de boues, posant des défis en matière de gestion et d'élimination de ces déchets, qui peuvent avoir un impact environnemental non négligeable. Pour remédier à ces limitations, cette étude explore l'utilisation de l'électrocoagulation (EC) comme méthode alternative pour éliminer un colorant azoïque hydrosoluble. Ce procédé électrochimique présente l'avantage d'utiliser très peu de produits chimiques, ce qui réduit les coûts et l'impact sur l'environnement. Il nécessite un équipement simple et un mode opératoire facile à mettre en œuvre. L'électrocoagulation se distingue également par des coûts d'exploitation réduits, un temps de traitement court et un volume de boues (flocs) beaucoup plus faible par rapport aux traitements chimiques conventionnels. Cela facilite grandement la gestion et l'élimination des déchets générés par le traitement des effluents textiles.

En résumé, l'électrocoagulation apparaît comme une technique prometteuse pour remplacer avantageusement les méthodes classiques de coagulation-floculation, offrant de meilleures performances épuratoires tout en réduisant l'impact environnemental et les coûts liés au traitement des effluents textiles.

II.2 Influence des paramètres de réaction

II.2.1 Influence du nombre d'électrodes :

Dans cette partie de l'étude, nous avons cherché à améliorer davantage l'efficacité du traitement électrocoagulation en augmentant le nombre d'électrodes. L'objectif était de réduire la consommation d'électricité tout en maintenant une performance élevée du procédé. Nous avons effectué des expériences en utilisant un nombre croissant d'électrodes dans le réacteur d'électrocoagulation.

Nous avons étudié l'influence de ce paramètre sur l'efficacité du traitement en mesurant différents indicateurs de performance telle que l'abattement de la demande chimique en oxygène (DCO), la réduction de la turbidité ou l'élimination des contaminants spécifiques. Les résultats obtenus nous ont permis d'évaluer l'effet du nombre d'électrodes sur l'efficacité du traitement.

Nous avons pu déterminer le nombre optimal d'électrodes qui permet d'obtenir les meilleures performances tout en minimisant la consommation d'électricité. Ces résultats sont présentés en détail dans cette partie de l'étude, avec des graphiques ou des tableaux illustrant les variations de performance en fonction du nombre d'électrodes utilisées.

Les conclusions tirées de cette analyse nous ont permis de mieux comprendre l'influence de ce paramètre sur le processus d'électrocoagulation et d'optimiser les conditions opératoires pour obtenir les meilleurs résultats figure (II.1)

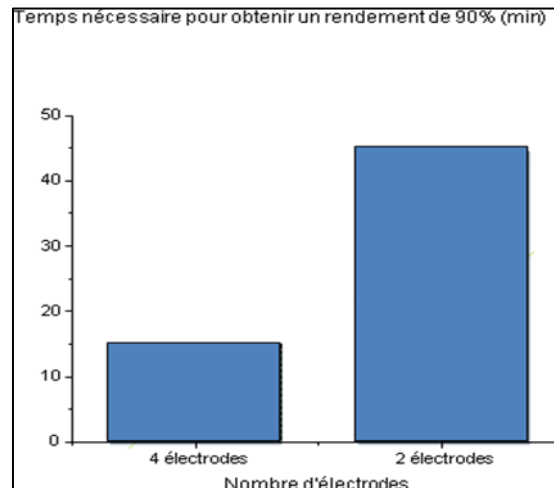


Figure (II.1) : Temps nécessaire pour un rendement de 90% en fonction du nombre d'électrodes.

À la lumière de ces résultats, il est évident que l'augmentation du nombre d'électrodes entraîne une accélération du processus de décoloration. Par exemple, pour atteindre une élimination de 90 % du bleu méthyle, il a fallu seulement 15 minutes avec 4 plaques, contre plus de 40 minutes avec 2 plaques, tout en maintenant les mêmes conditions opératoires et la même intensité de courant appliquée.

Ces observations s'alignent avec le principe de l'électrocoagulation, qui stipule qu'un nombre accru d'électrodes augmente la surface de réaction disponible. Cela favorise une interaction plus intense entre les particules polluantes et les électrodes, ce qui accélère les processus de coagulation et de décoloration.

En multipliant le nombre d'électrodes, on expose une plus grande surface aux particules polluantes, ce qui facilite leur adsorption et leur coagulation. En conséquence, la cinétique de décoloration s'accélère, permettant une élimination plus rapide du bleu méthyle.

Ces résultats mettent en lumière l'importance de sélectionner judicieusement le nombre d'électrodes dans le cadre du processus d'électrocoagulation afin d'optimiser l'efficacité du traitement. Augmenter le nombre d'électrodes peut améliorer les performances en termes de rapidité de réaction et d'élimination des polluants, ce qui est bénéfique pour l'efficacité du traitement et la réduction du temps nécessaire à celui-ci. N'hésitez pas à demander d'autres modifications ou reformulations si nécessaire. [23]

II.2.2 Influence de la distance inter-électrode :

On peut voir que la distance inter-électrodes a une relation inverse entre distance et rendement, puisque ce dernier augmente lorsque la distance inter-électrodes diminue. Plus la distance est courte, meilleure est le rendement.

Une valeur de 2 cm est la plus couramment utilisée et restera constante dans notre travail.

II.3 Produits et Équipements :

II.3.1 produits et réactifs :

Le polluant analysé dans cette étude est le colorant anionique connu sous le nom de bleu de méthylène, ou chlorure de méthylthioninium. Ce composé, dérivé de la phénothiazine, est utilisé à la fois comme médicament et comme colorant, et son action repose sur ses propriétés redox. Il a été synthétisé pour la première fois par Heinrich Caro en 1876. Sous forme solide, le bleu de méthylène est un cristal inodore qui se dissout facilement dans l'eau et, dans une moindre mesure, dans l'éthanol. À l'état pur, il apparaît comme une poudre vert foncé, mais il est également commercialisé sous forme de sel double avec le chlorure de zinc, ce qui lui confère une couleur brune.

En tant que colorant, il possède de nombreuses applications, notamment en raison de la dépendance de sa couleur à son état redox : il est incolore lorsqu'il est réduit et prend une teinte bleue lorsqu'il est oxydé. Ces caractéristiques font du bleu de méthylène un sujet d'étude pertinent dans le cadre de la recherche sur la pollution des eaux. Dans tableau II.1

Formule brute	C ₁₆ H ₁₈ ClN ₃ S
Masse molaire	319,85 g/mol
Solubilité dans l'eau	40 g/l à 20 °C
Solubilité dans l'éthanol	0,3 g/l à 20 °C
Émanations dangereuses	Vapeurs toxiques d'oxydes d'azote, d'oxydes de soufre, de monoxyde de carbone, chlorure d'hydrogène.
Apparence et odeur	Solide poudre, bleu foncé, inodore
Point de fusion	180°C

Tableau (II.1) : Les principales caractéristiques du bleu méthylène. [20]

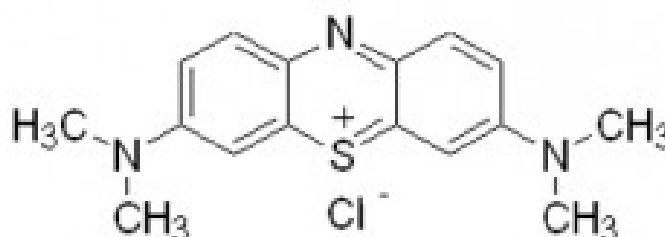


Figure (II.2) : Structure de bleu méthylène. [20]

II.3.2 Matériels :

La liste du matériel utilisé lors des essais expérimentaux est :

➤ Verreries et instruments :

- Réacteur chimique en verre 250 ml ;
- Une seringue
- Des électrodes en fer ;
- Chronomètre ;
- Entonnoir ;
- Fiole jaugée de 100 ml en verre
- Tubes de teste

➤ Appareillage

- Des fils électriques de connexion ;
- Générateur du courant contenu ;

II.4 Mode opératoire :

II .4.1 Préparation de la solution :

On met 60 ml de bleu de méthylène liquide et on le met dans un Fliale jaugée d'une contenance de 100 ml, puis on verse de l'eau jusqu'à ce que la solution atteigne une contenance de 100 ml, et on mélange bien, puis on verse la solution obtenue dans un réservoir de 20 L.

II .4.2 choix du débit d'eau :

On a un réservoir de 20L et un robinet de trois tours en fer en a essayer de choisir le débit pour notre expérience, on a essayé de faire trois test est dans notre prototype à vide seulement avec l'eau on a marqué les résultats dans les tableau suivants :

➤ 2.5 tours de robinet :

	20litres-15litres	15litres-10litres	10litres-05litres	05litres-02litres
Temps (mins)	1.18	1.35	2	2.02
Débit (L/H)	200	168	104	88
Débit (L/mins)	3.33	2.8	1.73	1.46

Tableau (II.2) : Débit d'eau en fonction du temps de 2.5 tours de robinet.

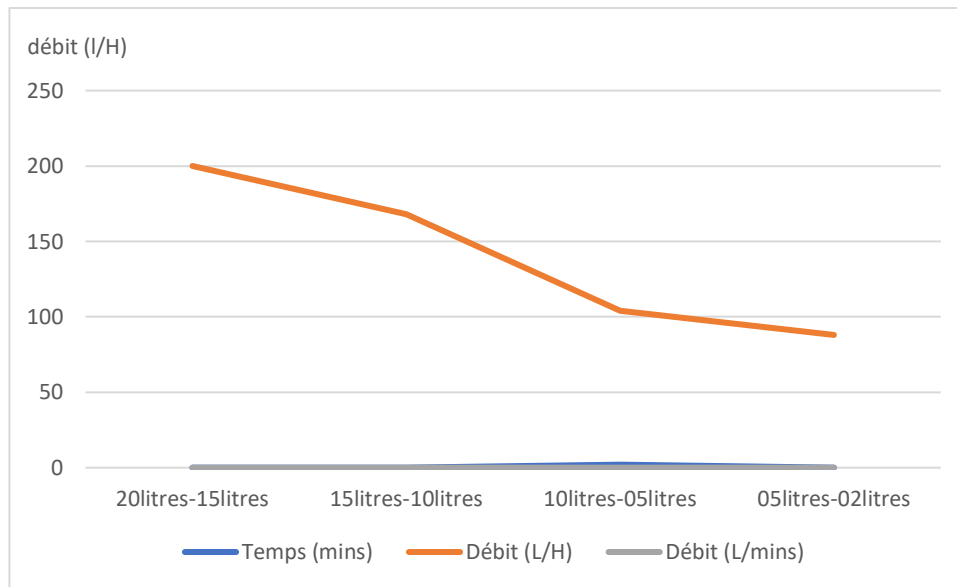


Figure (II.3) : Graphe de débit d'eau en 2.5 tours de robinet.

Interprétation :

On a le graphe figure (II.3) représente le débit d'eau lorsque le robinet est complètement ouvert (2,5 tours), l'écoulement est rapide, ce qui compromet l'efficacité du traitement.

➤ 1.5 tours de robinet :

	20litres-15litres	15litres-10litres	10litres-05litres	05litres-02litres
Temps (mins)	1.32	1.41	2.05	2.07
Débit (L/H)	190	176	136	32
Débit (L/mins)	3.16	2.93	2.26	0.53

Tableau (II.3) : Débit d'eau en fonction du temps de 1.5 tours de robinet.

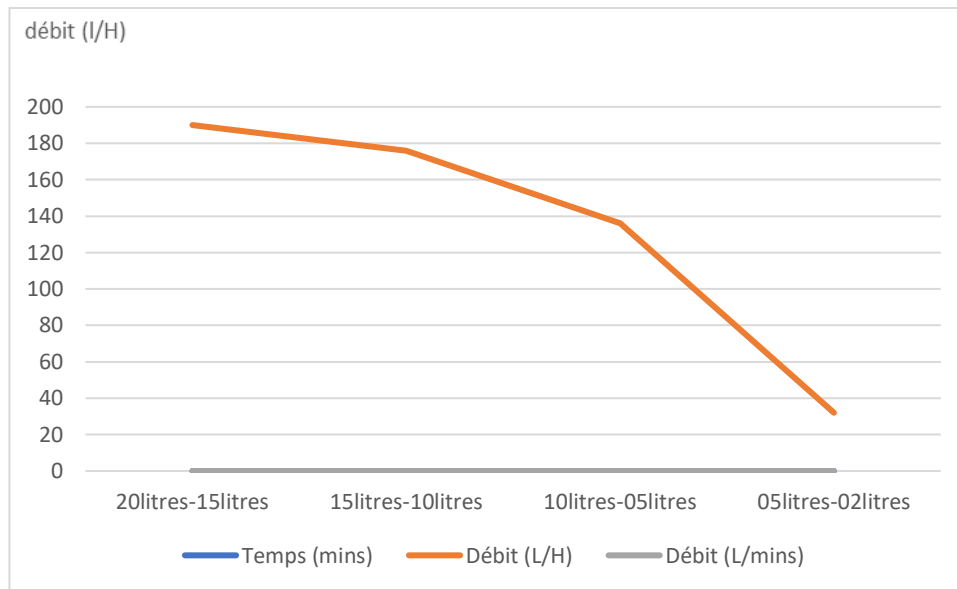


Figure (II.4) : Graphe de débit d'eau en 1.5 tours de robinet.

Interprétation :

On a le graphe figure (II.4) représente le débit d'eau lorsque le robinet est complètement ouvert (1,5 tours), l'écoulement est moyenne, ce qui facilite l'efficacité du traitement.

➤ 1. tour de robinet :

	20litres-15litres	15litres-10litres	10litres-05litres	05litres-02litres
Temps (mins)	2.01	2.15	3	3.15
Débit (L/H)	160	128	72	48
Débit (L/mins)	2.66	2.13	1.2	0.8

Tableau (II.4) : Débit d'eau en fonction du temps d'une seul tour de robinet.

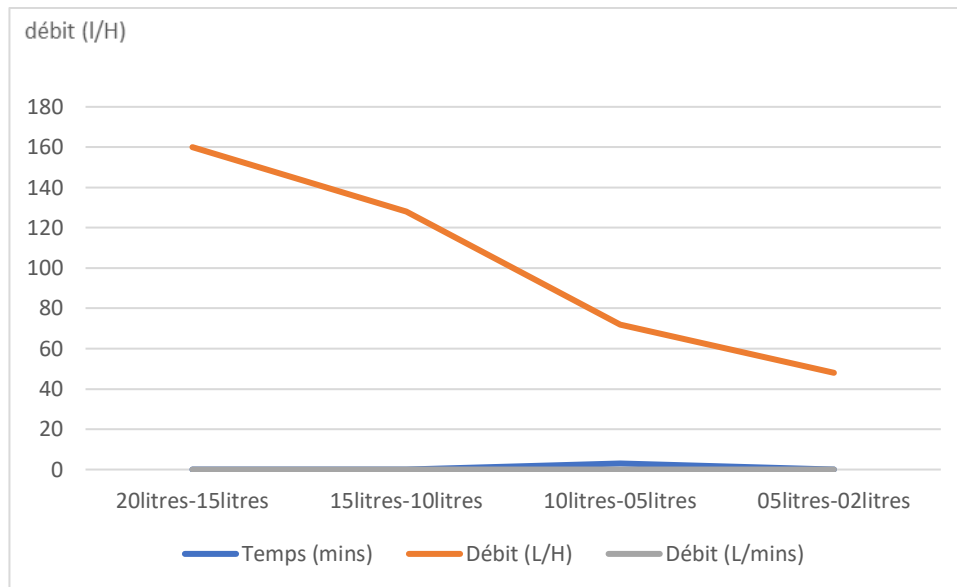


Figure (II.5) : Graphe de débit d'eau en une tour de robinet.

Interprétation :

On a le graphe figure (II.5) représente le débit d'eau lorsque le robinet est complètement ouvert (1,5 tours), l'écoulement est moyenne , ce qui facilite l'efficacité du traitement.

II .4.2.1 L'effet du débit sur l'EC

L'efficacité de l'électrocoagulation varie en fonction de la vitesse d'écoulement, comme nous l'avons observé lors de nos essais. comme figure (II.6) Lorsque le robinet est complètement ouvert (2,5 tours), l'écoulement est rapide, ce qui compromet l'efficacité du traitement. En revanche, avec une ouverture limitée à 1 tour, l'eau circule plus lentement à travers les chambres, permettant un meilleur traitement. Nous avons donc décidé d'essayer une ouverture intermédiaire de 1,5 tour pour trouver un équilibre de vitesse optimal.

Voici la photo qui montre les résultats obtenus après l'ouverture complète du robinet (2,5 tours).



Figure (II.6) : Traitement fait en gros vitesse 2.5 tours de robinet.

II.5 Conclusion

L'électrocoagulation (EC) est reconnue comme une méthode efficace pour éliminer les polluants organiques et présente de nombreux avantages pour la production d'eau potable. Les expériences menées ont démontré que l'EC offre des résultats visuels satisfaisants, et que le processus de décontamination ainsi que l'installation sont relativement simples. Lors des essais d'électrocoagulation utilisant une électrode en fer, il a été observé que le débit d'écoulement de l'eau influence sur l'efficacité du processus. En augmentant le nombre des électrodes en ligne et en le met en petit distances, des résultats améliorés dans l'élimination du bleu de méthylène ont été obtenus.

Cela souligne l'importance du rôle d'écoulement d'eau densité dans le processus d'électrocoagulation. En ajustant ces paramètres correctement, il est possible d'optimiser l'efficacité du traitement et d'améliorer les résultats en matière d'élimination des polluants.

Il est également important de noter que les résultats peuvent varier selon la nature des polluants, les conditions expérimentales et les caractéristiques de l'eau traitée. Ainsi, des études expérimentales approfondies sont nécessaires pour optimiser les paramètres de l'électrocoagulation en fonction des conditions spécifiques de chaque cas.

En résumé, l'électrocoagulation offre des effets visuels positifs et un processus de décontamination simple. Les expériences ont montré que le des paramètres de réaction peut accroître l'efficacité du traitement et améliorer les résultats. Toutefois, il est crucial de prendre en compte les caractéristiques spécifiques de chaque situation pour atteindre des résultats optimaux.

CHAPITRE III

« Réalisation d'un prototype d'électrocoagulation »

III.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré à la conception et à la réalisation d'un prototype expérimental d'un système d'électrocoagulation destiné au traitement des effluents. Cela nous a conduits à mener plusieurs expériences approfondies afin de mieux comprendre les facteurs fondamentaux qui contrôlent le phénomène complexe de l'électrocoagulation.

Nous allons mettre l'accent sur les différentes contraintes techniques, physico-chimiques et opérationnelles qui influencent le processus d'électrocoagulation, afin de mieux développer notre prototype fonctionnel. Pour ce faire, nous nous baserons sur une sélection judicieuse des composants utilisés pour la réalisation de notre système d'électrocoagulation à l'échelle pilote. L'objectif est de permettre à ce dernier d'obtenir de hautes performances épuratoires, c'est-à-dire de séparer efficacement les polluants dissous et en suspension de l'eau traitée et d'assurer la production d'une eau clarifiée et dépolluée, réutilisable ou compatible avec un rejet au milieu naturel.

Quel est donc ce système d'électrocoagulation que nous proposons de développer ? Et quelles sont les différentes étapes techniques à suivre pour le concevoir, le réaliser et l'optimiser ?

Afin de faciliter le processus de conception et de fabrication du prototype et de réduire au maximum le taux d'erreur avant chaque opération, nous avons effectué des simulations numériques à l'aide du logiciel de SolidWorks. Cela nous a permis de mieux comprendre le fonctionnement théorique du système, d'anticiper les éventuelles difficultés de conception et d'éviter les erreurs coûteuses lors de la réalisation effective du pilote d'électrocoagulation.

III.2 Description du prototype :

Le principe de son fonctionnement est le suivant :

- On ajoute l'eau à traiter dans le réservoir principal manuellement,
- L'eau se déplace de celui-ci vers le bassin, où elle est soumise à un processus électrocoagulation
- L'eau passe du bas vers la deuxième chambre où elle a soumise la procédure, Lorsqu'elle atteint une certaine hauteur, l'eau tombe dans la troisième chambre, sous forme sinusoïdale ;
- Après l'eau passe les 20 chambres l'eau passe et sort, une couche sédimentaire s'accumule et permet à l'eau propre de monter puis de tomber dans le réservoir d'eau propre.

Avant de passer à la réalisation nous avons fait recours au logiciel SolidWorks, qui nous a permis d'avoir une idée sur l'aspect (ou la forme) final(e) du système figure (III.1)

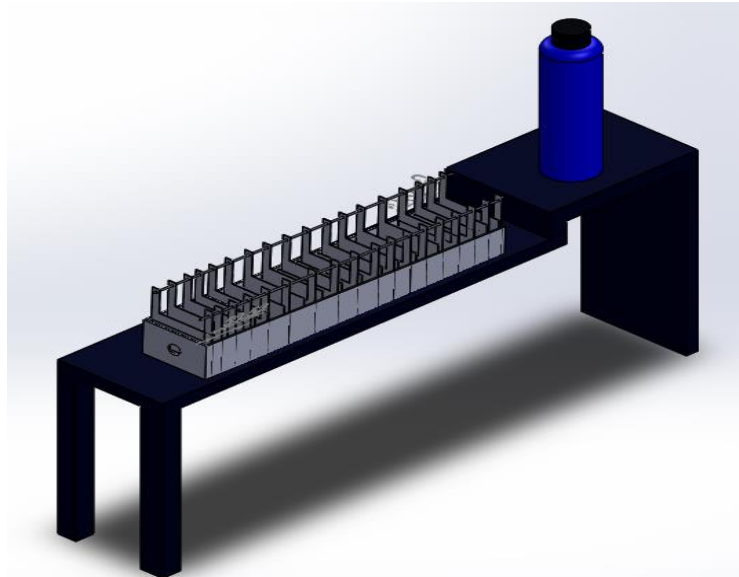


Figure (III.1) : System de l'électrocoagulation désigné avec SolidWorks.



Figure (III.2) : System de l'électrocoagulation.

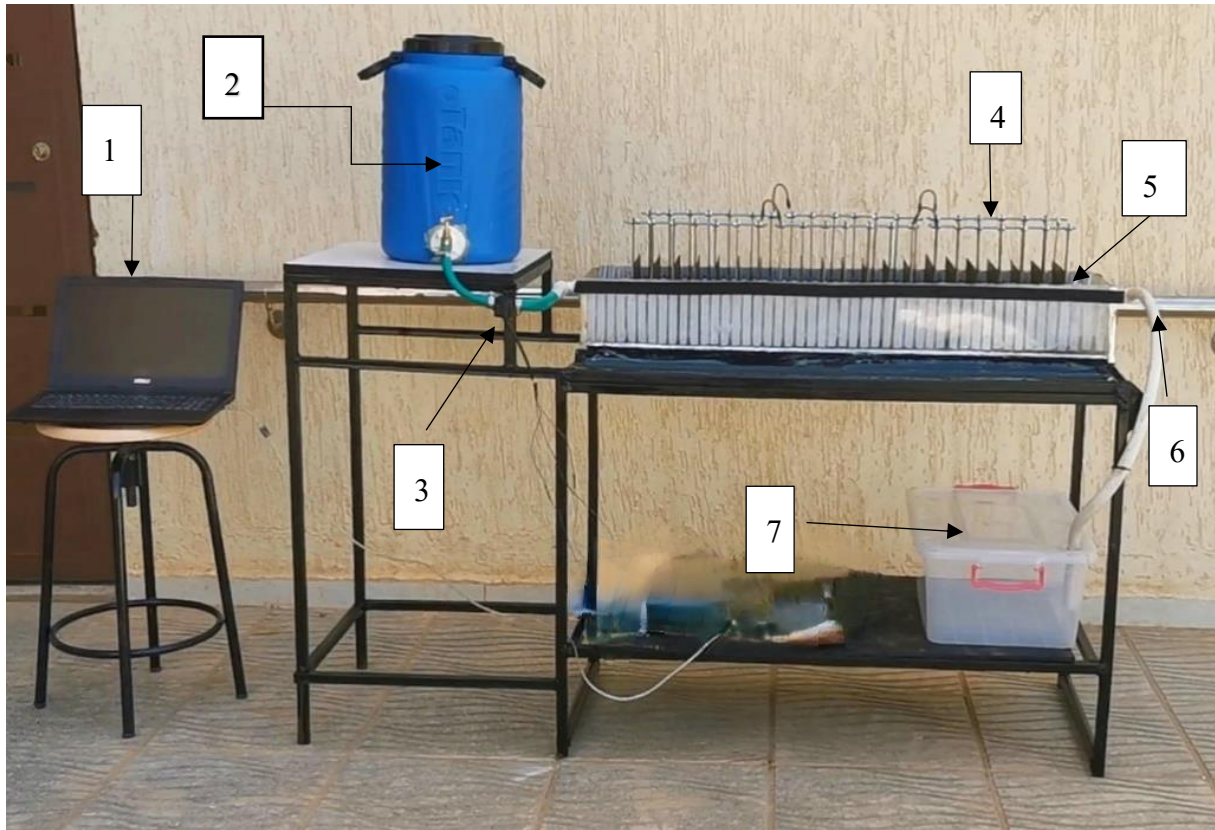


Figure (III.3) : System de l'électrocoagulation.

1. Software Arduino
2. Le réservoir principal
3. Capteur de débit d'eau
4. Les électrodes
5. Bassin d'eau
6. La sortie de l'eau pure
7. Le réservoir de l'eau pure

III.3 Les étapes de réalisation du système :

Pour la création de ce prototype, nous avons choisi un matériau plastique transparent, ce qui facilite l'observation du phénomène permettant de filtrer les eaux usées. Cela contribue à diminuer le taux de pollution généré par ces eaux et à les rendre réutilisables

Ce prototype se compose de cinq sections :

- La structure
- Électrodes

- Système d'affichage de débit d'eau
- Le réservoir
- Générateur de courant continu

III.3.1 la structure :

Cette bassin a une mètre de longueur et de 20 cm de largeur et de 15 cm de hauteur en forme série comme la photo suivante, il a une entre et une sortie d'eau comme la figure suivante :

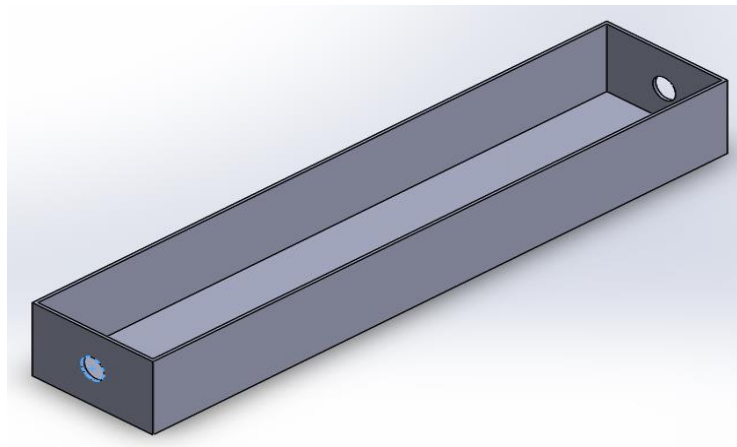


Figure (III.4) : La structure désigne avec SolidWorks.



Figure (III.5) : La structure réelle.

III.3.2 Les électrodes :

Comme l'espace disponible est l'un des éléments clés influençant le procédé d'électrocoagulation, nous avons conçu des plaques qui occupent une grande surface de la cuve. Pour ce faire, nous avons pris une tôle d'acier de 200 mm de long, 100 mm de large et 1,8 mm d'épaisseur, puis nous l'avons découpée à l'aide d'une machine à commande numérique (CNC).



Figure (III.6) : La machine CNC.

Après avoir introduit son dessin technique dans logiciel comme l'indique la figure (III.7)

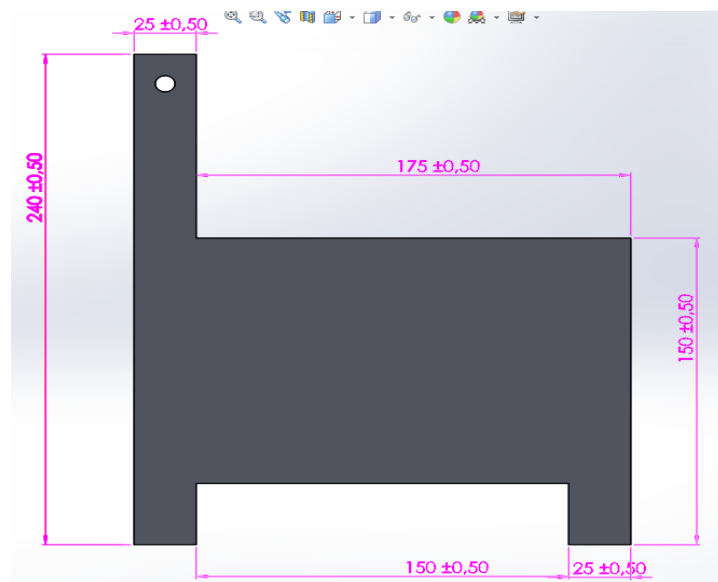


Figure (III.7) : Entré le dessin technique dans le programme.

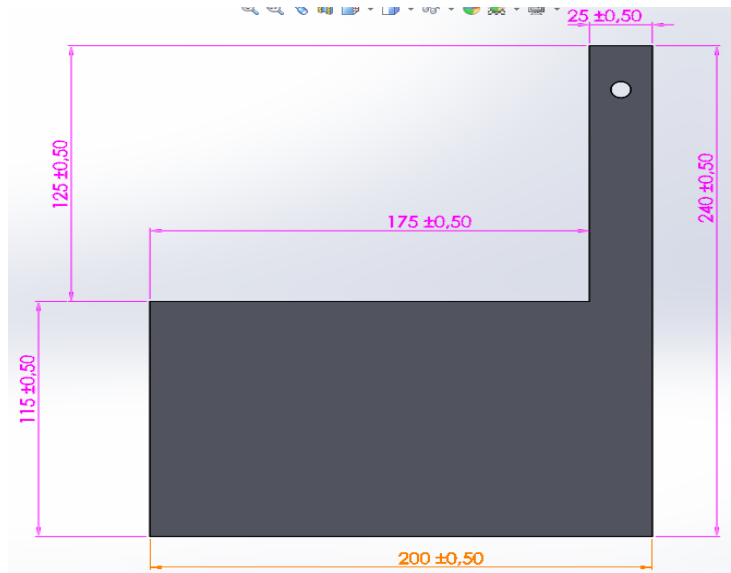


Figure (III.8) : Entré le dessin technique dans le programme.

Après l'avoir coupé, nous avons formé deux rangées de plaques :

- La première rangée représente l'électrode positive et contient 7 plaques,
- La deuxième rangée représente l'électrode négative et contient également 7 plaques.
- Dans chaque rangée, les plaques sont reliées par Tige filetée et un écrou afin d'assurer la transmission de l'électricité, et entre chaque plaque et l'autre une certaine distance est estimée à 20 mm

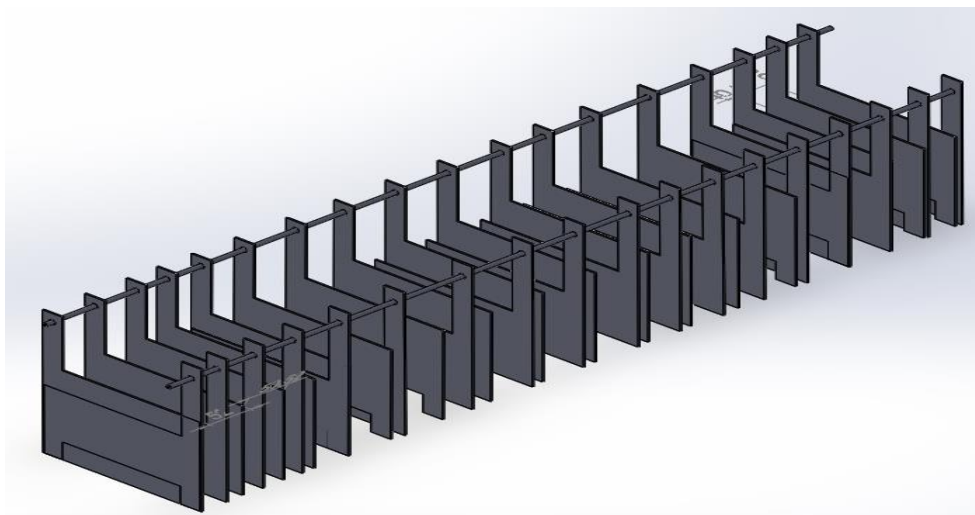


Figure (III.9) : Les électrodes désignent avec SolidWorks.

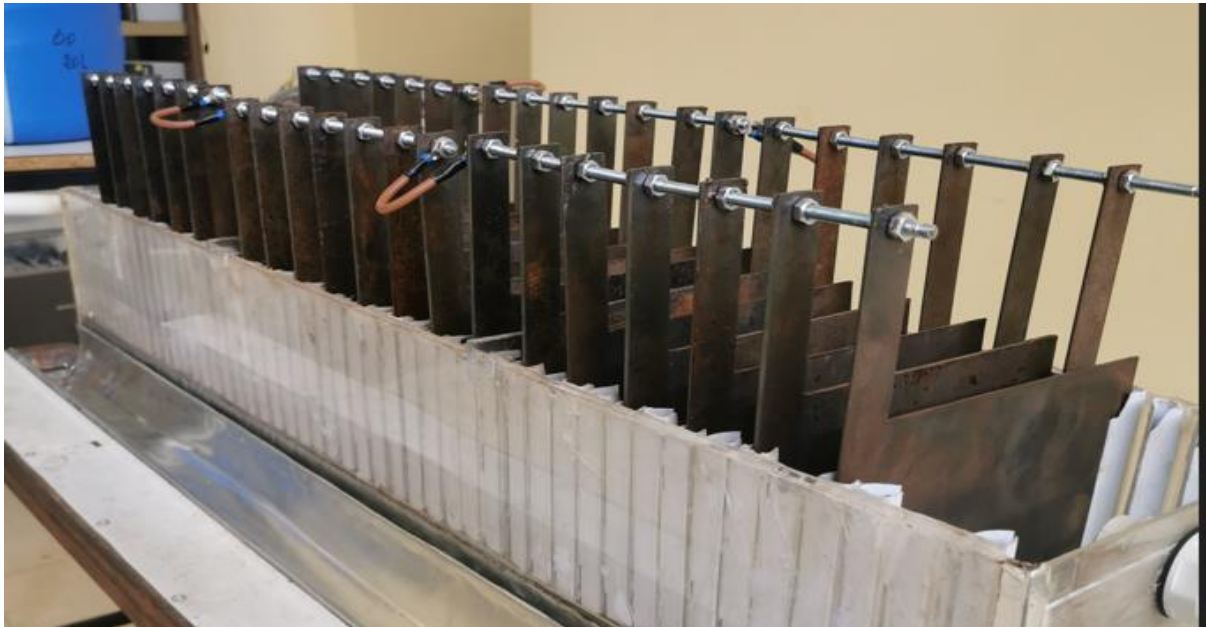


Figure (III.10) : Les électrodes.

III.3.3 Système d'affichage de débit d'eau :

Les capteurs de débit d'eau sont des dispositifs essentiels utilisés pour mesurer et surveiller le flux d'eau dans divers systèmes, allant des installations domestiques aux applications industrielles. En détectant le mouvement de l'eau à travers des tuyaux, ces capteurs fournissent des données précises qui permettent d'optimiser l'utilisation des ressources en eau, de détecter les fuites et d'améliorer l'efficacité des systèmes de gestion de l'eau. Grâce à leurs différentes technologies, tels que les capteurs à turbine, ultrasoniques et électromagnétiques, ils jouent un rôle crucial dans la durabilité et la gestion des ressources hydriques.

Dans notre projet on a utilisé un capteur de débit d'eau Yf-S201 pour l'indication de débit.

III.3.3.1 Principe du fonctionnement débitmètre

Le capteur de débit d'eau est composé d'une roue de turbine qui tourne lorsque l'eau passe à travers elle. La vitesse de rotation de la roue de turbine est directement liée à la vitesse de l'écoulement d'eau. Un capteur à effet Hall produit également une impulsion à chaque rotation complète de la roue de turbine, et le nombre d'impulsions est proportionnel à la vitesse de rotation de la roue de turbine. [21]



Figure (III.11) : Un capteur de débit d'eau YF-S201.

III.3.3.2 Matériels nécessaire

Pour utiliser le YF-S201 avec un Arduino, vous aurez besoin des éléments suivants :

- Un capteur de débit d'eau YF-S201
- Un Arduino (par exemple, un Arduino Uno)
- Des câbles de connexion pour relier le capteur et l'Arduino

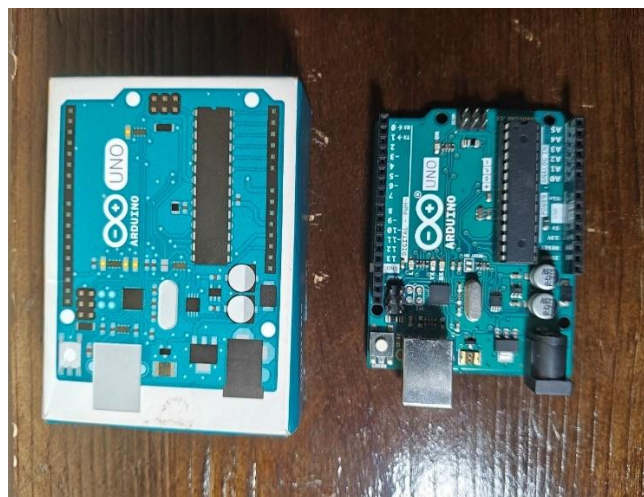


Figure (III.12) : Un Arduino Uno.

III.3.3.3 définitions de ARDUINO UNO

La carte arduino Uno : Arduino est une plate-forme open-source utilisée pour les projets de construction électronique. Arduino se compose à la fois d'une carte de circuit programmable physique (Souvent appelée microcontrôleur) et d'un logiciel, ou IDE (Intégrates Développent Environnement) qui fonctionne sur notre ordinateur,

utilisé pour écrire et télécharger du code. [22]

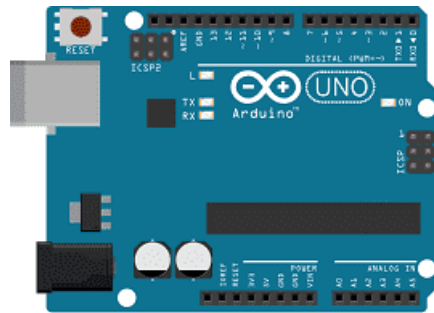


Figure (III.13) : Schéma de la carte arduino.

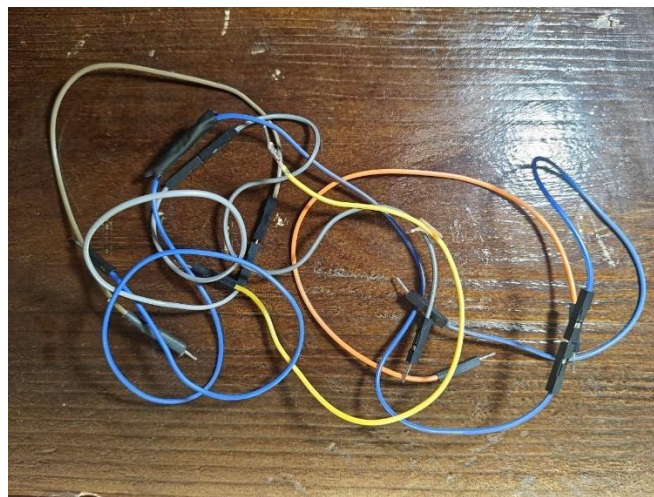


Figure (III.14) : Des câbles de connexion pour relier le capteur et l'Arduino.

III.3.3.4 Schéma du montage :

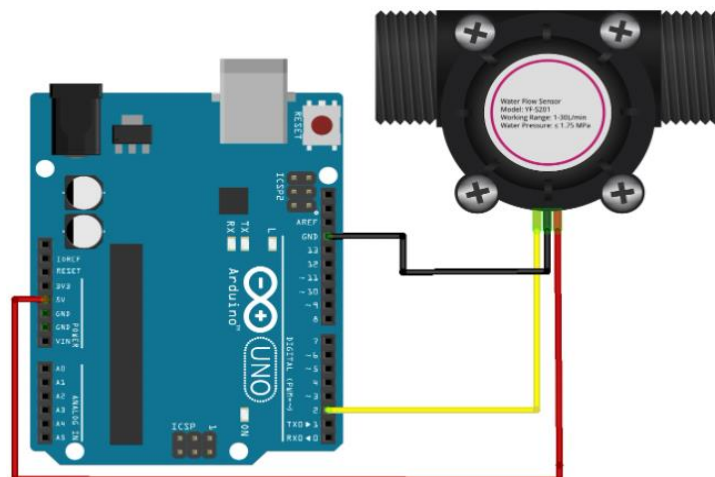


Figure (III.15) : Schéma du montage d'un Arduino avec capteur de débit d'eau.

Pour connecter le capteur de débit d'eau YF-S201 à l'Arduino, vous devez connecter les broches du capteur aux broches appropriées de l'Arduino. Voici les étapes à suivre pour connecter le capteur YF-S201 à l'Arduino :

- Connectez la broche VCC du capteur YF-S201 à la broche d'alimentation 5V de l'Arduino.
- Connectez la broche GND du capteur YF-S201 à la broche de masse (GND) de l'Arduino.
- Connectez la broche OUT du capteur YF-S201 à un port d'entrée numérique (par exemple, la broche 2) de l'Arduino.

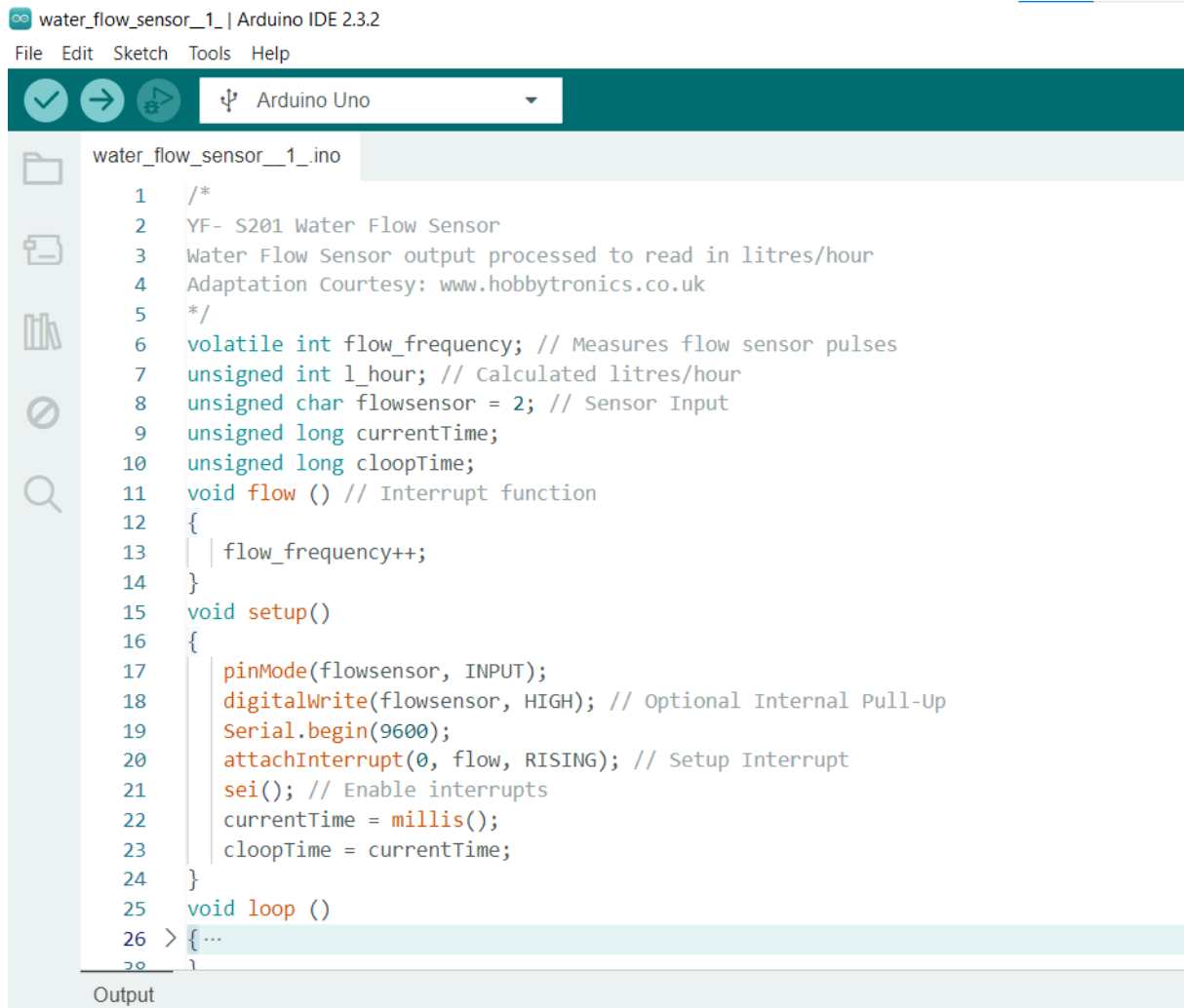
III.3.3.5 débitmètres Arduino code

```

/*
YF- S201 Water Flow Sensor
Water Flow Sensor output processed to read in litres/hour
Adaptation Courtesy: www.hobbytronics.co.uk
*/
volatile int flow_frequency; // Measures flow sensor pulses
unsigned int l_hour; // Calculated litres/hour
unsigned char flowsensor = 2; // Sensor Input
unsigned long currentTime;
unsigned long cloopTime;
void flow () // Interrupt function
{
    flow_frequency++;
}
void setup()
{
    pinMode(flowsensor, INPUT);
    digitalWrite(flowsensor, HIGH); // Optional Internal Pull-Up
    Serial.begin(9600);
    attachInterrupt(0, flow, RISING); // Setup Interrupt
    sei(); // Enable interrupts
    currentTime = millis();
    cloopTime = currentTime;
}
void loop ()
{
    currentTime = millis();
    // Every second, calculate and print litres/hour
    if(currentTime >= (cloopTime + 1000))
    {
        cloopTime = currentTime; // Updates cloopTime
        // Pulse frequency (Hz) = 7.5Q, Q is flow rate in L/min.
        l_hour = (flow_frequency * 60 / 7.5); // (Pulse frequency x 60 min) / 7.5Q = flowrate in
L/hour

```

```
    flow_frequency = 0; // Reset Counter
    Serial.print(l_hour, DEC); // Print litres/hour
    Serial.println(" L/hour");
  }
}
```



```
water_flow_sensor__1_ | Arduino IDE 2.3.2
File Edit Sketch Tools Help
Arduino Uno
water_flow_sensor__1_.ino
1  /*
2  YF- S201 Water Flow Sensor
3  Water Flow Sensor output processed to read in litres/hour
4  Adaptation Courtesy: www.hobbytronics.co.uk
5  */
6  volatile int flow_frequency; // Measures flow sensor pulses
7  unsigned int l_hour; // Calculated litres/hour
8  unsigned char flowsensor = 2; // Sensor Input
9  unsigned long currentTime;
10 unsigned long cloopTime;
11 void flow () // Interrupt function
12 {
13   | flow_frequency++;
14 }
15 void setup()
16 {
17   | pinMode(flowsensor, INPUT);
18   | digitalWrite(flowsensor, HIGH); // Optional Internal Pull-Up
19   | Serial.begin(9600);
20   | attachInterrupt(0, flow, RISING); // Setup Interrupt
21   | sei(); // Enable interrupts
22   | currentTime = millis();
23   | cloopTime = currentTime;
24 }
25 void loop ()
26 > { ...
27 }
Output
```

Figure (III.16) : Programme Arduino de water flow sensor.

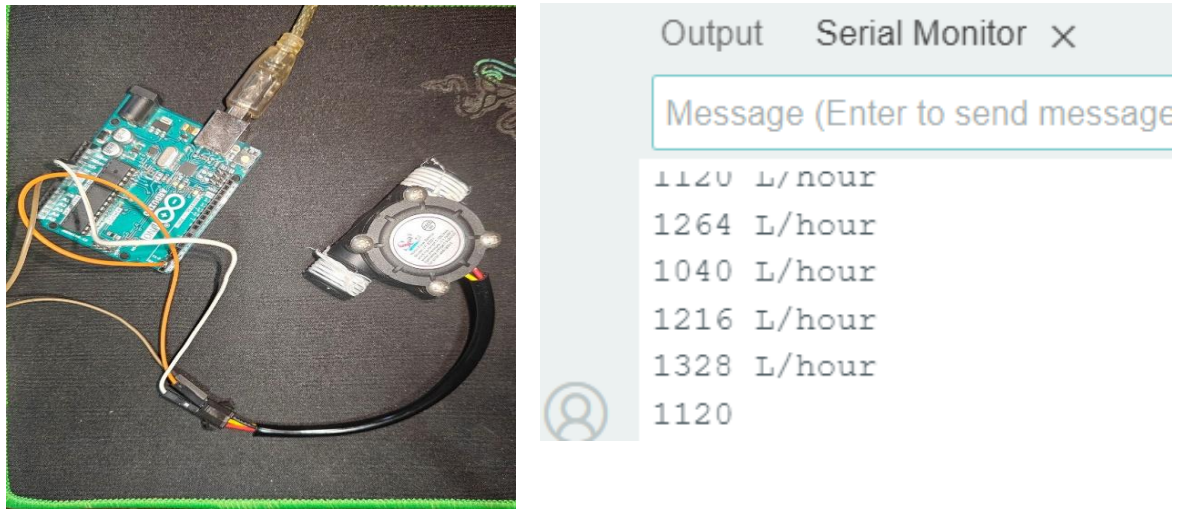


Figure (III.17) : Résultat du programme Arduino de water flow sensor.

III.3.4 Les réservoirs :

Dans notre système on a deux réservoirs

III.3.4.1 Le réservoir principal

Est celui qui contient l'eau à traiter, et celui qui la fait passer à la chambre du bassin



Figure (III.18) : Le réservoir principal.

III.3.4.2 Le Réservoir d'eau pure

C'est le réservoir dans lequel on verse l'eau traitée et utilisable.



Figure (III.19) : Le réservoir principal.

III.3.4.3 Le Réservoir d'eau polluée à traiter

C'est lui qui retourne l'eau polluée vers le réservoir principale pour recyclage.



Figure (III.20) : Réservoir de recyclage.

III.3.5 L'alimentation :

D'après les expériences que nous avons menées, nous avons conclu que le courant continu est le plus efficace dans le processus électrocoagulation, car il limite le temps du processus, similaire au courant alternatif.

La sélection d'une source de courant continu s'est avérée primordiale pour assurer le bon fonctionnement du système d'électrocoagulation dans le traitement des eaux usées. À travers des essais rigoureux, il a été démontré que le courant continu joue un rôle central dans le processus d'électrocoagulation, indépendamment de la valeur de tension.

De plus le courant continu offre des avantages significatifs par rapport au courant alternatif. Il permet un contrôle précis et une régulation stable des réactions chimiques et de l'oxydation, améliorant ainsi l'efficacité globale de l'élimination des polluants.

Les avantages du courant continu comprennent un réglage fin du processus de traitement, une meilleure séparation des ions métalliques et des particules solides, ainsi qu'une stabilité et une régulation précise de la puissance fournie. En choisissant une source de courant continu, on garantit un traitement fiable, reproductible et optimal des eaux usées, cette alimentation est une alimentation à découpage.

Nous avons donc utilisé un générateur de courant continu, qui débite (délivre) un courant continu d'une valeur de 200 A. [23]

III.3.5.1 Le générateur contient

- Un bouton marche et arrêt
- Un bouton pour changer la valeur de l'intensité du courant continu
- Ecran qui permet de visualiser les valeurs du courant électrique ;
- Il contient aussi trois voyants :
 - Le premier voyant vert, indiquant que le générateur fonctionne bien,
 - Le deuxième de couleur jaune, indiquant qu'il y a un problème avec le générateur,
 - Le troisième de couleur rouge Indication de panne du système.[23]

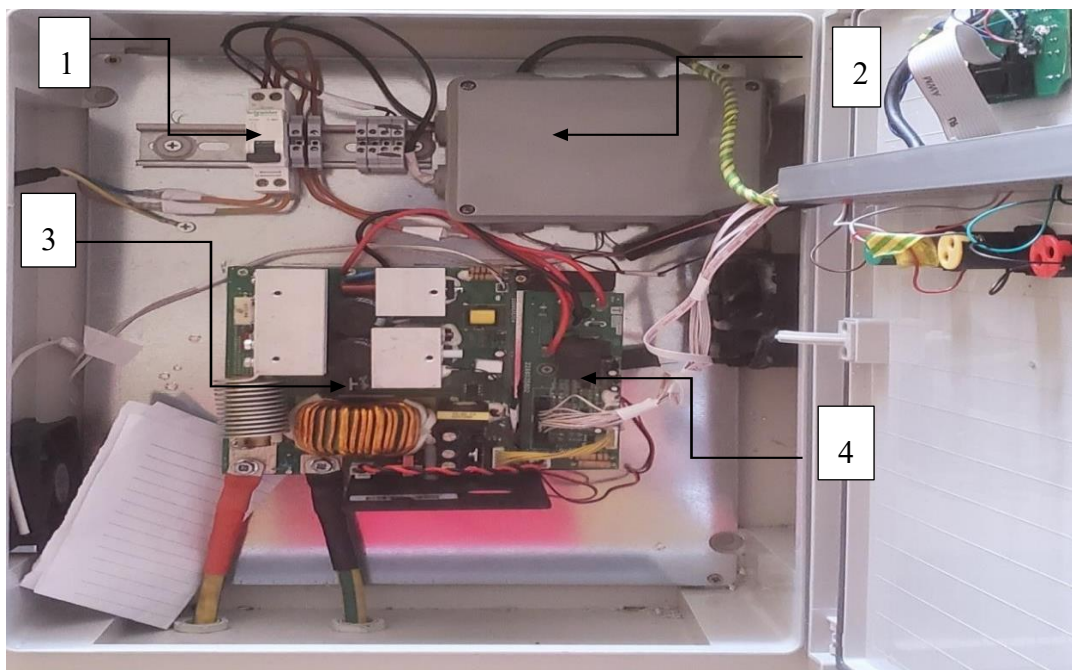


Figure (III.21) : L'alimentation -face1.

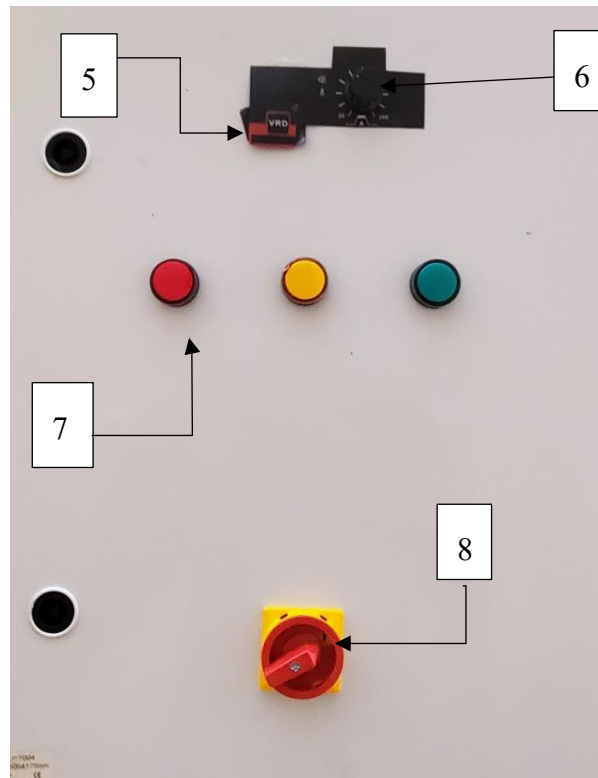


Figure (III.22) : L'alimentation- face2 [23]

- 1 : disjoncteur différentiel
- 2 : le circuit des voyants
- 3 : la carte de découpage
- 4 : la carte d'alimentation
- 5 : l'afficheur
- 6 : Un bouton de changer la valeur
- 7 : les voyants
- 8 : bouton marche et arrêt

III.4 L'expérimentation :

D'après les essais on a choisi d'ouvrir le robinet pour 1.5 tours pour voir un débit compatible avec notre réservoir qui a pris 6 mn jusqu'à la fin d'opération.

III.4.1 Etape 1 :

On a ouvert notre robinet avec 1.5 tours pour avoir le débit nécessaire pour remplir notre bassin qui a besoin d'un volume de solution de 18 litres.



Figure (III.23) : Bassin rempli avec 18L d'eau. (Vue1)



Figure (III.24) : Bassin rempli avec 18L d'eau. (Vue 2)

III.4.2 Etape 2 :

On verse la solution préparée de bleu méthylène dans notre réservoir et le bassin se remplit

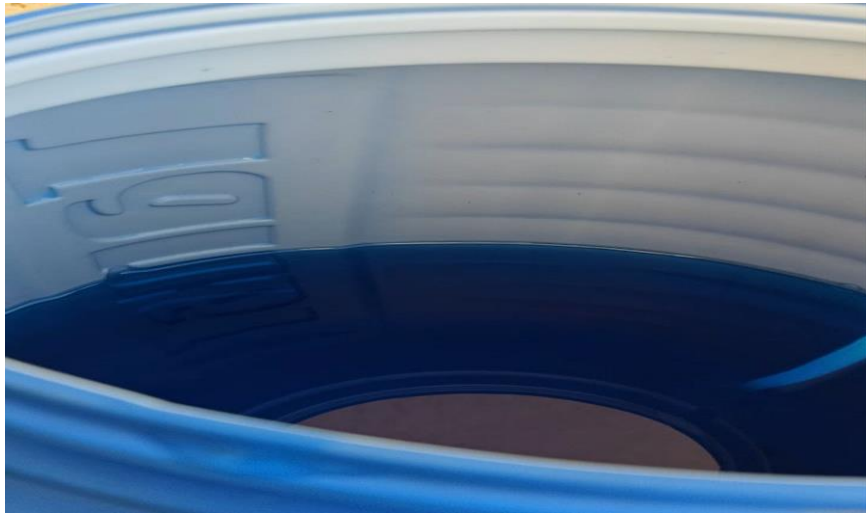


Figure (III.25) : Réservoir rempli avec bleu méthylène.

III.4.3 Etape 3 :

En connectant le générateur de courant aux électrodes (anode et cathode), ce dernier délivre un courant continu de 29A, initiant ainsi le processus de traitement dans la 1^{ère} chambre.



Figure (III.26) : Bassin pleine en solution du bleu méthylène.

1 : pole négative du générateur

2 : pole positive du générateur

III.4.4 Etape 4 :

Au début, Après 3 mins de fonctionnement, nous avons remarqué le début de la réaction de l'électrocoagulation entre les électrodes de fer et la solution utilisée. Ensuite, une couche de mousse brune d'une épaisseur de 3 cm est formée, l'éjection de cette mousse sera manuellement par une raclette chaque 5 mn, comme indiqué sur la figure (III.27)



Figure (III.27) : La couche de la mousse.



Figure (III.28) : La couche de la mousse éjectée manuellement.

III.4.5 Etape 5 :

Après 10 minutes de traitement de notre colorant, le bleu de méthylène (MB), nous avons observé une transformation significative de l'eau. Au début de l'expérience, l'eau était teintée d'un bleu intense, mais après le processus d'électrocoagulation, elle est devenue totalement claire. Ce changement indique que le colorant a été efficacement dégradé ou précipité, ce qui prouve l'efficacité du traitement. La clarté de l'eau après seulement 10 minutes montre que les

réactions entre les électrodes et le colorant se sont déroulées de manière optimale, aboutissant à une purification réussie. Le résultat final, visiblement illustré par la photo jointe, témoigne du succès du procédé. Cette observation valide également le choix des paramètres opératoires utilisés, renforçant ainsi l'efficacité de l'électrocoagulation dans le traitement des eaux colorées par des polluants comme le bleu de méthylène.



Figure (III.29) : L'eau après l'électrocoagulation.

III.5 Résultats et discussion :

Nous avons réalisé une expérience d'électrocoagulation en utilisant des anodes en fer, au cours de laquelle une petite quantité de solution a été prélevée toutes les 2 minutes à l'aide d'une seringue. Ni l'intensité du courant ni la concentration initiale du polluant n'ont été prises en compte dans cette phase de l'étude. Cependant, les résultats obtenus apportent des informations précieuses sur l'efficacité de l'électrocoagulation dans l'élimination du bleu de méthylène. De plus, ils permettent de mieux comprendre l'influence des paramètres opératoires, tels que la vitesse d'écoulement et le débit, sur les performances globales du procédé.

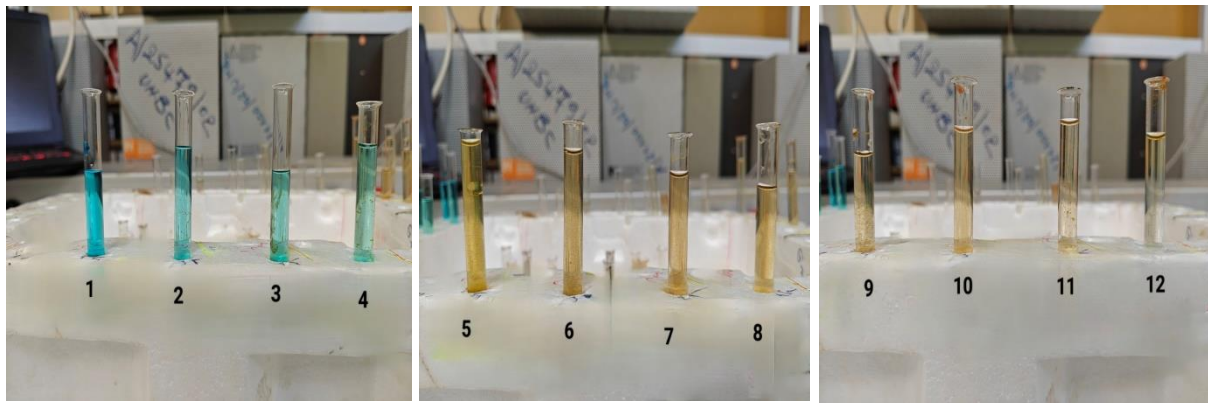


Figure (III.30) : Les échantillons prélevés à des intervalles de temps spécifiques.

L'électrocoagulation est un procédé efficace pour éliminer divers polluants, comme les colorants, les métaux lourds et les matières en suspension. Elle permet une dégradation rapide des contaminants, souvent en quelques minutes, avec une faible consommation d'énergie. Le processus forme des floccs solides qui emprisonnent les polluants, facilitant leur séparation par décantation ou filtration. Les résidus (floccs) sont généralement non toxiques et peuvent parfois être valorisés, tout en produisant moins de boues comparées à d'autres méthodes de traitement des eaux.

III.6. Conclusion

La vitesse d'écoulement et le débit de la solution à traiter jouent un rôle crucial dans l'efficacité du procédé d'électrocoagulation. Une vitesse d'écoulement trop élevée, comme observé lors de nos essais avec un robinet complètement ouvert (2,5 tours), a entraîné un passage trop rapide de la solution à travers les chambres, limitant ainsi le temps d'interaction entre les électrodes et la solution. Cela a diminué l'efficacité du traitement.

En revanche, une vitesse d'écoulement plus faible (1 tour de robinet) a permis une meilleure interaction entre les électrodes et la solution, améliorant ainsi la qualité du traitement. Cependant, un débit trop lent peut également ralentir le processus global. En choisissant un débit intermédiaire (1,5 tour de robinet), nous avons trouvé un équilibre optimal entre la vitesse de traitement et l'efficacité de l'électrocoagulation.

En conclusion, le débit et la vitesse d'écoulement influencent directement l'efficacité du procédé d'électrocoagulation. Un débit modéré assure un temps de résidence adéquat de la solution dans les chambres de traitement, favorisant ainsi la coagulation et l'élimination optimale des polluants.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Pour conclure, l'électrocoagulation s'est montrée être une technique intéressante et performante pour le traitement des eaux usées et l'atténuation de leur impact sur l'environnement. Cette approche, basée sur des processus électrochimiques et la production de coagulants, a démontré son efficacité pour capter et séparer les polluants présents dans les eaux usées.

L'étude approfondie de l'électrocoagulation a permis de comprendre les principes fondamentaux qui régissent son fonctionnement, ainsi que l'influence des facteurs de contrôle tels que la vitesse d'écoulement de l'eau, la durée de traitement et la géométrie des électrodes sur son efficacité. Les expérimentations réalisées ont confirmé l'importance de ces facteurs et ont permis de déterminer les conditions optimales pour maximiser les performances du processus.

Les résultats expérimentaux sur des substances cibles telles que les colorants artificiels montrent que l'électrocoagulation peut éliminer efficacement ces contaminants, améliorant ainsi la qualité de l'eau traitée. Capable de gérer un large éventail de contaminants. Cela en fait une option intéressante pour résoudre les problèmes environnementaux liés aux eaux usées.

Il convient de noter que l'efficacité de l'électrocoagulation peut varier en fonction de divers facteurs, tels que la composition chimique des eaux usées, la conception de la machine d'électrocoagulation, les paramètres de fonctionnement choisis, etc. Par conséquent, il est important de mener des études plus approfondies pour évaluer les performances de l'électrocoagulation dans des conditions spécifiques et optimiser les paramètres pour obtenir les meilleurs résultats.

Grâce à une recherche et à une expérimentation continue, nous contribuons à la recherche sur les technologies de traitement des eaux usées et résolvons le problème de l'impact des eaux usées sur l'environnement. Cela peut avoir un impact positif sur la protection des ressources en eau, la protection de la vie aquatique et la promotion du développement durable. En résumé, l'électrocoagulation présente de nombreux avantages comme méthode de traitement des eaux usées. Il peut éliminer efficacement divers contaminants tels que les particules solides, les ions métalliques, les substances organiques.

De plus, la technologie se distingue par sa facilité d'utilisation, sa flexibilité dans les paramètres de fonctionnement et sa capacité d'adaptation aux différentes sources de contamination.

Cependant, des recherches et des optimisations supplémentaires sont nécessaires pour garantir des performances optimales dans différentes conditions.

Il est important de continuer à explorer et à améliorer cette technologie afin de répondre aux besoins spécifiques des diverses applications et de promouvoir une gestion plus efficace et durable des eaux usées.

Cette étude approfondie sur l'électrocoagulation (chapitre I) a permis d'identifier les facteurs clés influençant son efficacité, tels que la composition du liquide traité, le type et la disposition des électrodes, les paramètres de vitesse d'écoulement et la durée du traitement. Des expériences ont été menées en manipulant ces paramètres afin d'observer leur impact sur le processus d'électrocoagulation et l'élimination des contaminants dans les marges dans le chapitre II.

L'état d'art et la discussion des résultats (chapitre II et III) ont permis de tirer des conclusions sur l'efficacité de l'électrocoagulation, d'identifier les configurations et les paramètres optimaux pour un traitement optimal, et d'aborder les éventuelles limites ou problèmes rencontrés.

Source bibliographique

- [1] Hamma Samia, Kebti Nadjia ; électrocoagulation de l'eau du barrage en continu assisté par un champ magnétique, Projet de fin d'étude , USD Blida, 2006-2007.
- [2] Mounir BENNAJAH, Traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation/électroflotation en réacteur airlift, Thèse de doctorat, 2007
- [3] Jalila BENS Aid, contribution a la pollution des eaux usées par électrocoagulation et par adsorption sur des hydroxydes d'aluminium. Thèse doctorat, université de Rabat 2009.
- [4] Mollah M.Y.A., Schennach R., Parga J.R., Cocke D.L.. Electrocoagulation (EC) science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 2001, 29-41
- [5] Holt P.K., Barton G.W., Mitchell C.A. The future of electrocoagulation as a localized water treatment technology. *Chemosphere*, 2005, 355-367.
- [6] Feng F., Xu Z., Li X., You W. and Zhen Y., Advanced treatment of dyeing wastewatertowards reuse by the combined Fenton oxidation and membrane bioreactor process *Journal of Environmental Sciences* 22(2010) pp 1657-1665
- [7] Zongo I., Étude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation: Application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie, Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine, (2009).
- [8] SALIM ZODI, Étude de l'épuration d'effluents de composition complexe par Électrocoagulation et des couplages intervenants entre le traitement électrochimique et l'étape de séparation : application à l'industrie textile et papetière, Thèse de doctorat, université de Lorraine, 2012.
- [9] P. Blazy, J. C. Samama, C. R. Acad. Sci. Paris, série 333 (2001) 271-276.
- [10] J. L. Lacout, *Ann. Chim. Sci Mat.*, 26 (6) (2001)1-3
- [11] : « Revitalisation fluviale et protection des eaux souterraines », p.15, Eawag news.
- [12] : A. Saiba.S.Kourdali : « Electrocoagulation de l'eau de barrage Ghrib en batch et en continue utilisant des électrodes en Fe et Al » mémoire de fin d'études. Université Saad Dahleb de BLIDA.(2005).

[13]: N.EL HANAFI; K.BENSADOK. « Effet de la nature et de la concentration de l'électrolyte sur le traitement électrochimique d'émulsions de lait ». Université Saad Dahleb de BLIDA.

[14] : A. Saiba.S.Kourdali « Electrocoagulation de l'eau de barrage Ghrib en batch et en continue utilisant des électrodes en Fe et Al » mémoire de fin d'études. Université Saad Dahleb de BLIDA.(2005).

[15] : A.HEBBICHE, M.DJOUBAR.« Prétraitement des eaux de mer par électrocoagulation ». Université Saad Dahleb de BLIDA. (2009).

[16] B. R. Stanmore, P. Gilot, Fuel Processing Technology (2005)

[17] Khemis M., Etude théorique et expérimentale du procédé d'électrocoagulation: Application au traitement des effluents liquides hautement chargés en impuretés organiques et minérales, Thèse de doctorat INPL, Nancy, (2005).

[18] M.Y.A. Mollah et al. / J. Hazard. Mater., B114 (2004) 199–210.

[19] : Guediri A., Etude de l'épuration par électrocoagulation des eaux usées urbaines, ENSH, p63, (2008).

[20] Youssef Benjelloun https://www.researchgate.net/figure/Tableau-1-Quelques-caracteristiques-du-bleu-de-methylene_tbl1_297047569

[21] <https://www.moussasoft.com/yf-s201-capteur-de-debit-deau-avec-arduino/> visité le 05-09-2024

[22] : <https://www.robotique.tech/tutoriel/commander-un-moteur-pas-a-pas-28byj-48-par-arduino/> visité le 05-09-2024

[23] : ELAKREDAR.A Etude des procédés et phase d'une centrale de la purification des eaux par processus d'électrocoagulations