الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيات المتقدمة
Ecole Nationale Supérieure des Technologies Avancées

Département : Génie des procédés

Master de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme

MASTER

Filière : **Génie des procédés**

Spécialité : **Traitement des eaux**

Thème :

Electrocoagulation : Avancées, défis et innovations technologiques

Réalisée par :

TINAKICHE Ihssene

Les membres de Jury :

Mme.ZEMMOURI Hassiba	ENSTA	Prof	Présidente
Mme.HANAFIA Amira	ENSTA	MCB	Examinatrice
Mme.CHEIKH Assira	ENSTA	MCB	Encadrante

Alger, le 26/06/2024

Année universitaire 2023/2024

Remerciements

Cette étude a été réalisée au Laboratoire de Génie des Procédés de l'École Nationale Supérieure des Technologies Avancées d'Alger.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire de fin d'étude.

Tout d'abord, je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers notre promotrice, Mme.CHEIKH Assira, Maitre de Conférence (B) à l'Ecole Nationale Supérieure des Technologies Avancés, pour avoir assurée l'encadrement scientifique de notre travail. Son soutien indéfectible, ses conseils éclairés et son expertise tout au long de ce projet. Sa guidance précieuse nous a permis d'appréhender pleinement les enjeux de notre recherche et d'atteindre avec succès les objectifs que nous nous étions fixés.

Je remercie la présidente du jury Mme.ZEMMOURI Hassiba, Profeseur à l'Ecole Nationale Supérieur des Technologies Avancées, pour avoir acceptée de présider le jury de soutenance de ce mémoire.

Je remercie vivement Mme.HANAFIA Amira, Maitre de Conférence (B) à l'Ecole Nationale Supérieur des Technologies Avancées, pour avoir accepter d'examiner le mémoire et pour le temps qu'elle a accordée à son évaluation. Je la remercie vivement pour s'être intéressée à ce travail et pour sa participation au jury.

Mes remerciements s'adressent aussi à notre Ingénieure du Laboratoire des Génies des Procédés Mme.NADI Souad pour sa disponibilitée et pour avoir mis à notre disposition le matériel nécessaire pour mener à bien notre travail.

Je remercie les responsables de la station d'épuration de Tizi-Ouzou pour nous avoir permis de prélever nos échantillons.

Je tiens également à remercier tous les camarades du Laboratoire de Génie des Procédés pour la bonne humeur et les bons moments passés ensemble.

Je tiens à témoigner mes infinis remerciements à ma famille qui m'ont accompagné, aidé, soutenu et encouragé tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Je remercie toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la concrétisation de ce projet. Merci pour vos précieux conseils et votre soutien.

Sans oublier de remercier le corps enseignant de l'Ecole Nationale Supérieure Des Technologies Avancées du " Département Génie des Procédés ", qui a contribué à notre formation avec compétence et dévouement.

Dédicace

Avant tout, je tiens à remercier DIEU le tout puissant qui m'a donné la force, la santé, la volonté, la patience et m'a guidé à réaliser ce travail malgré tous les obstacles.

De tout mon cœur, je dédie ce modeste travail à mes parents, qui m'ont toujours soutenu et encouragé dans mes études. Merci d'avoir cru en moi et de m'avoir donné les moyens de réussir.

Surtout à celle qui m'a comblé d'amour et de tendresse, à la bougie qui m'a éclairé le bon chemin ,ma chère mère dont le mérite, les sacrifices, les qualités humaines m'ont permis de vivre ce jour. J'ai enfin gradué et finalisé ce long cursus universitaire grâce à ses encouragements et ses prières quotidiennes dont elle me donnait de l'espoir, de la force d'avancer que dieu la procure la santé et la longue vie;

À mon frère « AYOUB », mes deux sœurs : « ASSMAA » et « IKRAM » ; pour les moments partagés, les conseils échangés, et cette complicité qui a toujours su alléger les moments les plus éprouvants.

Un grand merci à l'homme qui me donne la force, le courage et la détermination d'avancer dans ma vie « NOUNOU », ton amour et ton soutien inconditionnel ont été ma force motrice tout au long de la réalisation de ce travail et la rédaction de ce mémoire.

Ta présence a été ma source d'inspiration, ta patience mon soutien inébranlable.

Merci d'avoir été mon pilier, mon étoile, de me donner la force d'avancer, ma raison de me dépasser et de réussir, merci d'être toujours là à mes côtés.

À mes enseignant(e)s, qui m'ont transmis leur savoir et leur passion tout au long de mon parcours. Merci de m'avoir guidé et poussé à donner le meilleur de moi-même.

À toute ma famille, mes amis, qui ont partagé avec moi ces années riches en apprentissages et en émotions. Merci d'avoir été là dans les moments de doute et de m'avoir aidé à garder le moral.

A mon binôme « Chaima » et à toute sa famille.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à faire de moi la personne que je suis aujourd'hui et ont cru en moi, m'ont soutenu et m'ont encouragé à poursuivre mes rêves. Cette réalisation est autant la vôtre que la mienne.

Ce mémoire vous est dédié.

TINAKICHE Ihssene.

Résumé:

L'électrocoagulation est une technique de traitement des eaux usées et des effluents industriels qui gagne en importance ces dernières années. Cette méthode électrochimique permet d'éliminer une grande variété de polluants, des métaux lourds aux composés organiques, de manière efficace et écologique.

Ce mémoire de master a pour objectif d'explorer les avancées récentes, les défis actuels et les innovations technologiques dans le domaine de l'électrocoagulation en présentant les paramètres clés à optimiser de l'électrocoagulation, tels que le choix des matériaux d'électrodes, la densité de courant ou encore le pH, afin d'améliorer les rendements d'élimination des polluants et en présentant aussi les différentes unités électrolytiques (configuration mono-polaire et bipolaire) comprenant des électrodes solubles de fer (Fe) ou d'aluminium (Al), ainsi en identifiant les principaux leviers pour diminuer les coûts énergétiques et de consommables liés à l'électrocoagulation et les principales lois de l'électrolyse et en finissant par ses avantages et ses inconvénients.

Mots clés : électrocoagulation, électrodes, les polluants, les eaux usées.

Abstract :

Electrocoagulation is a technique for treating wastewater and industrial effluents that has been gaining importance in recent years. This electrochemical method can remove a wide variety of pollutants, from heavy metals to organic compounds, in an efficient and environmentally friendly manner.

This Master thesis aims to explore recent advances, current challenges and technological innovations in the field of electrocoagulation by presenting the key parameters to optimize in electrocoagulation, such as the choice of electrode materials, current density or even pH, in order to improve pollutant removal efficiencies and also presenting the different electrolytic units (mono-polar and bipolar configuration) comprising soluble iron (Fe) or aluminum (Al), thus identifying the main levers for reducing energy and consumable costs linked to electrocoagulation and the main laws of electrolysis and ending with its advantages and disadvantages.

Keywords: electrocoagulation, electrodes, pollutants, wastewater.

ملخص:

التخثير الكهربي هو تقنية لمعالجة مياه الصرف الصحي والنفايات السائلة الصناعية التي اكتسبت أهمية في السنوات الأخيرة. يمكن لهذه الطريقة الكهروكيميائية إزالة مجموعة واسعة من الملوثات، من المعادن الثقيلة إلى المركبات العضوية، بطريقة فعالة وصديقة للبيئة.

تهدف مذكرة الماستر هذه إلى استكشاف التطورات الحديثة والتحديات الحالية والابتكارات التكنولوجية في مجال التخثير الكهربي من خلال تقديم الإعدادات الأساسية لتحسين التخثير الكهربي، مثل اختيار مواد الإلكترود أو كثافة التيار أو حتى الرقم الهيدروجيني، من أجل تحسين كفاءة إزالة الملوثات. وكذلك عرض وحدات التحليل الكهربائي المختلفة (أحادية القطب وثنائية القطب) التي تشتمل على الحديد القابل للذوبان (Fe) أو الألومنيوم (Al)، وبالتالي تحديد الروافع الرئيسية لتقليل تكاليف الطاقة والمواد الاستهلاكية المرتبطة بالتخثير الكهربائي والقوانين الرئيسية للتحليل الكهربائية وانتهاءً بمزاياه وعيوبه.

الكلمات المفتاحية: التخثير الكهربي، الأقطاب الكهربائية، الملوثات، مياه الصرف الصحي.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE 1
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'ELECTROCOAGULATION 2
I. Introduction 3
II. Définition de l'électrocoagulation 3
III. Origine et évolution du procédé : 3
IV. Principe du procédé 5
V. Théorie de l'électrocoagulation 6
VI. Les matériaux utilisés pour les électrodes 8
VII. Electrodes en aluminium 9
VIII. Différents types de connexions électriques 11
A. Connexion mono-polaire en série 13
B. Connexion mono-polaire en parallèle 14
C. Connexion bipolaire 15
IX. Exemple d'application et mise en œuvre du procédé 16
X. Principales lois de l'électrolyse 16
A. Cinétique de transfert de charge ou loi de Buttler-Volmer 17
B. Loi de Faraday 17
C. Tension de la cellule 18
D. Rendement faradique Φc et rendement énergétique 20
XI. Paramètres influençant le processus d'électrocoagulation 21
A. Le pH : 21
B. La conductivité : 21
C. Intensité du courant : 22
D. La distance entre électrodes 22
XII. Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation 23
a) Avantages du procédé d'électrocoagulation : 23
b) Inconvénients du procédé d'électrocoagulation 24
CONCLUSION GENERALE 25
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 27

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Schéma du principe de l'électrocoagulation 7
Figure 2 .Diagramme de solubilité d'hydroxyde d'aluminium Al(OH) $_3$(s) en fonction du pH pour des espèces en aluminium mononucléaires (A.k. Gaid, 1984).....11
Figure 3 . Différents types de connexion.....12
Figure 4 .Les différents modes de connexions électriques pour une cellule d'électrocoagulation et les circuits électriques associés (M.F. POUET, 1994).....13
Figure 5 . Connexion en série d'électrodes monopolaires.....14
Figure 6. Connexion en parallèle d'électrodes mono-polaires.....14
Figure 7. Connexion des électrodes bipolaire.....15
Figure 8 . Les étapes de transfert de matière dans une cellule électrochimique 17
Figure 9. Décomposition de la tension de cellule électrochimique.....19

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Exemples d'applications du procédé d'électrocoagulation. 5
Tableau 2 : Matériaux des électrodes utilisées en électrocoagulation.....8
Tableau 3 : Exemples pour des électrodes utilisées avec leur composition et rendement. 9
Tableau 4 : Modes de connexion et valeurs des intensités et des tensions.....16

INTRODUCTION GENERALE

L'électrocoagulation (EC) est une technique innovante pour traiter les eaux usées. Elle s'avère particulièrement efficace pour éliminer les polluants solubles ou en suspension tels que rencontrés dans des rejets liquides, comme les métaux lourds, les émulsions et les particules en suspension. Ce procédé permet également de traiter l'eau contenant des nitrates, des fluorures ou du plomb, la rendant ainsi potable (M.Y.A. Mollah et al., 2001), (P.K. Holt et al., 2005).

Dans ce procédé électrochimique, le coagulant est généré directement dans la solution in situ, en utilisant la dissolution d'une anode sacrificielle. En appliquant un courant électrique, 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 dissolution conduit à la formation des hydroxydes métalliques, oxy-hydroxydes métalliques et des hydroxydes polymériques. Ces composés possèdent généralement une meilleure capacité de coagulation que les produits chimiques conventionnels. Ils permettent de déstabiliser les particules en suspension, d'adsorber, de neutraliser ou de précipiter les polluants dissous, facilitant ainsi leur élimination par précipitation, filtration ou flottaison.

Généralement, la flottation s'avère plus accessible que la filtration et la précipitation. Dans ce cas, l'électrocoagulation (EC) peut être assistée par l'injection d'air comprimé ou simplement effectuée grâce à l'hydrogène H_2 gazeux produit par la cathode. Les bulles de gaz ainsi créées en solution offrent de nombreux avantages, notamment celui de transporter, en particulier par flottation, les particules déstabilisées.

L'électrocoagulation, a été découverte au XIXème siècle Elle a rapidement disparu jugée trop peu efficace, pour renaître dans les années 90 (P.K. Holt et al., 2005). Cette méthode s'est avérée offrir de nombreux avantages : simplicité de mise en œuvre, efficacité éprouvée, compatibilité environnementale, sécurité d'utilisation, sélectivité des résultats, le tout à un coût relativement faible (Bayramoglu et coll., 2004) (Y.A. Mollah et coll, 2004), ,notamment lorsqu'elle est comparée aux traitements biologiques.

(Y.A. Mollah et coll, 2004) , ont identifié 6 modèles d'équipement couramment utilisés pour l'application industrielle de l'électrocoagulation, tout en soulignant leurs avantages. Néanmoins, la littérature existante ne comporte pas d'étude approfondie de la relation entre ces configurations et leur géométrie, ni de leur possibilité d'extrapolation à plus grande échelle(scale-up).

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'ELECTROCOAGULATION

I. Introduction

L'électricité présente l'avantage d'être une source d'énergie non polluante, et sa nature automatisable la rend particulièrement adaptée aux techniques de traitement électrochimique. Cela devrait favoriser une expansion significative de ces méthodes dans les années à venir. (F. Persin et M. Rumeau, 1989). De nombreuses techniques électriques, directes ou indirectes, ont déjà été développées, et des méthodes de laboratoire prometteuses sont actuellement étudiées et donnent des résultats pertinents dans le traitement environnemental, en particulier pour le traitement des eaux usées.

II. Définition de l'électrocoagulation

L'électrocoagulation (EC) est une méthode de purification de l'eau très performante pour traiter certains types de polluants dissous ou en suspension dans l'eau contaminée. Cette technique peut éliminer efficacement les métaux lourds, les émulsions et les particules en suspension. De plus, le procédé d'électrocoagulation permet de décontaminer l'eau contenant des nitrates, des fluorures et du plomb, la rendant ainsi potable (Mollah et al., 2001), (P.K. Holt et al., 2005).

Comme son nom l'indique, l'électrocoagulation est une combinaison des principes de l'électrochimie et de la coagulation. C'est une méthode physico-chimique, l'une des technologies développées pour le traitement des eaux usées. Cette approche se fonde sur l'utilisation d'électrodes solubles (sacrificielles) qui libèrent des ions dans l'effluent d'eau, permettant ainsi la production in situ de cations métalliques par dissolution électrochimique d'électrodes en fer ou en aluminium sous l'effet d'un courant électrique.

III. Origine et évolution du procédé :

L'électrocoagulation (EC) est une technique de purification de l'eau qui existe depuis bien avant le 20ème siècle. En 1889, une station pilote a été mise en place à Londres pour traiter l'eau de mer par l'électrolyse. Puis, en 1906, A.E. Dietrich a déposé une demande de brevet pour l'utilisation de cette technique dans le traitement des eaux usées industrielles.

En 1909, J.T. Harries reçut une licence des USA pour le traitement des eaux usées par des électrodes de fer et d'aluminium (M. Bennajah, 2007).

En 1912, Deux autres stations de traitement des eaux usées suivirent ce même concept, aux Etats-Unis, mais leur activité a été interrompue quelques années plus tard, en 1930, car leur coût de fonctionnement s'est avéré être deux fois plus élevé que celui d'un système classique. (C.H.A. Moreno et al., 2007).

Un procédé similaire a été développé en Grande Bretagne pour traiter les eaux de rivière par des électrodes de fer.

Bien que l'électrocoagulation (EC) a été utilisée pendant de nombreuses années, elle n'a pas vraiment connu de succès ni été adoptée par les populations et les industriels. Cependant, on observe ces dernières années un regain d'intérêt, avec une utilisation croissante de ce procédé pour le traitement des effluents par de nombreux industriels. La technologie a été optimisée afin de réduire la consommation énergétique et d'améliorer l'efficacité du traitement. Son efficacité a été démontrée sur différents types de polluants. Il est efficace dans le traitement des métaux lourds tels que Pb, Cd, Cr et As ; les métaux tels que Mn, Cu, Zn, Ni, Al, Fe, Sn, Mg, Se, Mo, Ca et Pt ; également des anions tels que CN-, PO43-, SO42-, NO3-, F- et Cl- ; les non métaux tels que le phosphore et des composés organiques, Hydrocarbures Totales de Pétrole (TPH), Toluène, Benzène et Xylène (TBX), (MTBE), DBO, MES, Minéraux, colorants organiques, huiles et graisses tous des effluents industriels variés (M.Tiaiba, 2019/2018).

L'électrocoagulation s'avère une méthode particulièrement efficace pour traiter diverses formes de pollution, surpassant souvent les autres techniques. Cette approche s'est ainsi imposée comme une solution de choix, notamment pour les indicateurs de pollution suivants :

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

Tableau 1 : Exemples d'applications du procédé d'électrocoagulation.

Effluents traités	Efficacité	Référence
Eaux riches en substances humiques.	Decoloration de l'ordre de 95%.	Vik et al (1984).
Eaux résiduaires urbaines.	Abattement de la turbidité de 89%, et de MES 60%.	Pouct et al (1992).
Suspension de kaolite et doetonite.	Abattement de la turbidité entre 20 et 60%.	Szynkarezuk et al (1994).
Huiles minérales	Abattement de DCO ≥ 80%.	Tanguy et al (2001).
Lixiviat	Abattement de DCO ≥ 80%.	Tanguy et al (2001).
Eaux encrées	Decoloration de l'ordre de 40%.	Tanguy et al (2001).
Bain photographique	Abattement de la DCO≥80% et coloration 30%.	Tanguy et al (2001).
Eaux phénolées	Abattement de DCO et COT≥30%	Tanguy et al (2001).
Effluents Cosmétiques	Abattement de DCO≥40%.	Tanguy et al (2001).
Effluents Pharmaceutiques	Abattement de DCO, COT, MES≥80%.	Tanguy et al (2001).
Eaux colorées et eaux de rivière.	Efficacite de l'ordre de 90% pour la décoloration.	Jiang et al (2002).
Effluent réel réactif de bain.	Décoloration de 20 à 100% et un DCO >75%.	Arslan-Alaton et al (2008)
Traitement de solution contenant des ions inidium (III)	Rendement d'elimination 78%	Chou et al (2009).

IV. Principe du procédé

Le procédé d'électrocoagulation (EC) est basé sur la coagulation chimique, qui utilise des produits chimiques pour faire coaguler les particules présentes dans l'eau. L'électrocoagulation s'appuie généralement sur le principe des anodes solubles. Un courant électrique est appliqué entre deux électrodes (en fer ou en aluminium) immergées dans un électrolyte contenu dans un réacteur pour générer, in situ, des ions (Fe^{2+} ou Al^{3+}) qui sont susceptibles de provoquer une coagulation et une floculation des polluants que l'on souhaite éliminer. L'électrolyse peut aussi coaguler les composés solubles qui peuvent être oxydés ou réduits dans l'effluent. (M. Bennajah, 2007).

L'action directe d'un champ électrique sur une eau résiduaire permet de créer des conditions d'une bonne coagulation-floculation (M.Y.A. Mollah et al., 2001). En effet, ce champ électrique permet de créer, d'une part, un gradient de vitesse affectant toutes les particules chargées notamment les ions et les colloïdes facilitant ainsi leur rencontre (M. Bennajah, 2007), Les polluants présents dans l'eau sont alors piégés par un processus de complexation et d'attraction électrostatique , d'autre part, en utilisant des anodes en fer et en aluminium, on peut libérer de manière contrôlée des ions métalliques qui aident à former des agrégats de taille suffisante. Le dégagement de microbulles d'hydrogène gazeux H_2 au niveau de la cathode entraîne ces agrégats à la surface, permettant ainsi leur élimination. Ce système permet donc de rassembler les matières en suspension sous forme de flocs qui peuvent ensuite être éliminés facilement par des procédés physiques classiques comme la décantation, la flottation ou la filtration (S. Zodi, 2012).

Pour ce principe on peut identifier trois catégories de mécanismes en électrocoagulation selon (P.K. Holt et al., 2002):

- Les phénomènes électrochimiques
- La coagulation et la floculation
- L'hydrodynamique

V. Théorie de l'électrocoagulation

L'électrocoagulation est un processus sophistiqué qui combine diverses actions complémentaires pour lutter contre la pollution (I. Zongo, 2009). Ce mécanisme fait intervenir de multiples phénomènes physiques et chimiques, où des électrodes commerciales (sacrificielles) libèrent des ions dans l'eau usée, permettant ainsi son traitement, donc (Mollah et al., 2001) résument la théorie de ce processus comme suite :

a) La formation des coagulants par l'oxydation électrolytique des métaux.

b) La déstabilisation des contaminants, des polluants, des matières en suspension et la cassure des émulsions.

c) L'agrégation des phases déstabilisées pour former les flocs.

Les contaminants, les particules en suspension et les émulsions sont déstabilisées et rupturées suivant le mécanisme qui se résume comme suit :

- Présence forte de la double couche diffuse autour des espèces chargées obtenues grâce aux interactions des ions métalliques provenant de la dissolution de l'anode sacrificielle ;
- Neutralisation des espèces ioniques présentes dans l'eau par les cations ;
- Formation de flocs comme résultat de l'agglomération des particules et des colloïdes autour des espèces coagulées, le floc formé crée des boues qui piègent et relient les particules colloïdales restant dans le milieu aqueux (W. Lemlikchi, 2012).

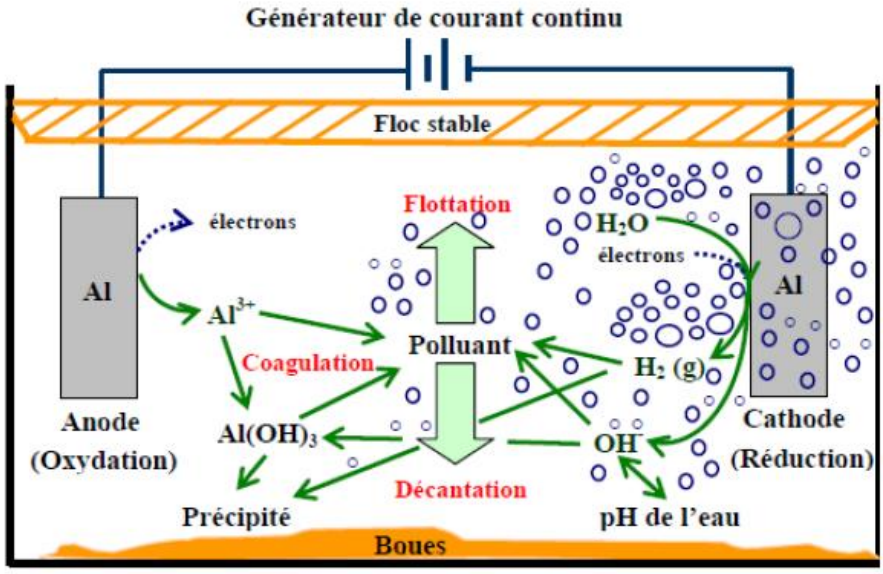


Figure 1. Schéma du principe de l'électrocoagulation

La figure.1 résume l'ensemble des interactions pouvant apparaître dans l'électrocoagulation avec des électrodes en aluminium et montre le caractère complexe et interdépendant, des processus mis en œuvre lors de l'électrocoagulation. Le coagulant et ses produits d'hydrolyse peuvent avoir de nombreuses interactions avec le polluant, ainsi qu'avec d'autres espèces ioniques et les bulles du gaz électrolytique.

VI. Les matériaux utilisés pour les électrodes

Les anodes et les cathodes utilisées peuvent adopter diverses formes, comme des plaques, des boules, des sphères à lit fluidisé, des fils, des tiges ou des tubes. Ces électrodes peuvent être fabriquées à partir de différents métaux, sélectionnés de façon à améliorer le procédé de traitement. Les deux métaux les plus couramment utilisés sont le fer et l'aluminium. (M. Kobya et al., 2007).

Tableau 2 : Matériaux des électrodes utilisées en électrocoagulation.

Electrodes utilisées	Références
Anode en plomb et cathode en acier inox	Vik et al. (1984)
Titane /Platine et Ti/Pt/Ir	Garrote et al. (1995)
Al et Mn	EDF GDF Services et partenaires (1995)
Fe/Fe	Ibanez et al. (1995), Ögütveren et Koparal (1997), Ibanez et al. (1998), Hansen et al. (2006), Lai et al. (2006), Mrozowski et al. (1983), Golder et al. (2005), Wilcock et al. (1996), Christoskova et al. (1988), Do et Chen (1994), Zaroual et al. (2006), Golder et Samanta (2006), Meneses et al. (2005), Ün et al. (2006), Daneshvaret al. (2006).
Fe/Al ou Al/Fe	Gao et al. (2005), Mollah et al. (2004), Holger (1995), Damien et al.(1992), Mrozowski et Zielinski (1983), Kobya et al. (2006), Can et al. (2006).
Ti/acier	Jordao et al. (1997).
Al/Al	Murell, Wilfried Anthony (1987), Donini et al. (1994), Groterud et Smoczynski (1992), Biotys (1995), Lu et al. (1999), Rubach et Saur (Octobre 1997), Michel (1996), Khemis et al. (2006), Kobya et al. (2006), Ögütveren et Koparal (1997), Lai et Lin (2006), Mrozowskiet Zielinski (1983), Do et Chen (1994).
Al/Cu et Fe/Cu	Tsai et al. (1997).
Al/Sn	Kliskic et al. (1998).
Zn/Ni	Roev et Gudin (1996).

Tableau 3 : Exemples pour des électrodes utilisées avec leur composition et rendement.

Electrodes utilisées	Composition	Types de polluants	Rendement	Références
Fe et Al	Effluents textiles	DCO, MES, COT,Turbidité	98% abattement de turbidité,77% DCO	Kobya et al. (2003)
Fe et Al	Effluent d'agroindustries	DCO, azote, germes pathogènes, turbidité	82 à 86% d'abattement de DCO	Drogui et al. (2007)
Al et Fe	Eaux usées phosphatées	phosphate	100% d'abattement de phosphate	Bebahani et al.2010
Fer	Eaux usées de manufacture de cigarettes, plus eaux domestiques	DBO, DCO, MES	56% d'abattement DCO, 84% DBO	Bejankiwar (2002)
Al	Rejets pétroliers	DCO; Turbidité	83,52% DCO ; 99,59% Turbidité	Gousmi et al.2016
Cu et Ti/IrO_2	Eaux usées domestiques	Phosphore; DCO ; $N\text{-}NH_4^+$.	99,46% Phosphore ; 56,11% DCO ; 58,37% $N\text{-}NH_4^+$	Seyf-Laye et al.2018

Dans ce modeste travail , le type des électrodes choisies est les électrodes en aluminium .

VII. Electrodes en aluminium

Le traitement des eaux usées par électrocoagulation en utilisant des électrodes en aluminium a été rapportée par plusieurs auteurs et entraîne la dissolution électrolytique de l'anode, produisant des espèces cationiques monomériques telles que le Al^{3+} et $Al(OH)^{2+}$ à des pH faibles. Ces espèces se transforment ensuite en $Al(OH)_3$ à des pH plus élevés, avant de polymériser pour former l'$Al_n(OH)_{3n}$.

Lorsqu'on applique un courant continu à des électrodes en aluminium, les principales réactions qui se produisent sont les suivantes :

- **A l'anode**, le métal est oxydé suivant la demi - réaction (F. Hanafi, 2009.), (I.Zongo, 2009)

$$Al \rightarrow Al^{3+}(aq) + 3\,e^{-} \quad \textbf{(Eq.1)}$$

L'auteur Catonne précise que, si la densité de courant est suffisante et si les conditions du milieu s'y prêtent, l'anode peut être également le siège d'une oxydation de l'eau:

$$2H_2O \rightarrow 4H^{+} + O_2 + 4e^{-} \quad \textbf{(Eq.2)}$$

- **A la cathode**, la principale réaction répertoriée dans la bibliographie conduit à la demi-réduction de l'eau (F. Hanafi, 2009.)

$$2H_2O + 2\,e^{-} \rightarrow 2OH^{-} + H_2(g) \quad \textbf{(Eq.3)}$$

La formation d'ions hydroxyde (OH^-) à la surface de la cathode entraîne une dissolution locale de cette dernière en raison de l'élévation du pH :

$$2Al + 6H_2O + 2OH^{-} \rightarrow 2Al(OH)_4^{-} + 3H_2(g) \quad \textbf{(Eq.4)}$$

L'ensemble des ions Al^{3+} et OH^- générés en solution réagissent pour former diverses espèces monomériques Comme $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_2^{+}$,$Al(OH)_4^{-}$, et polymériques comme $Al_2(OH)_2^{+}$, $Al_6(OH)_{15}^{3+}$,$Al_7(OH)_{17}^{4+}$,$Al_8(OH)_{20}^{4+}$,$Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$,$Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$, qui se transforment finalement en $Al(OH)_3(s)$ selon de complexes cinétiques de précipitation (I.Zongo, 2009) **:**

$$Al^{3+} + H_2O \rightarrow Al(OH)^{2+} + H^{+} \quad \textbf{(Eq.5)}$$

$$Al(OH)^{2+} + H_2O \rightarrow Al(OH)_2^{+} + H^{+} \quad \textbf{(Eq.6)}$$

$$Al(OH)_2^{+} + H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + H^{+} \quad \textbf{(Eq.7)}$$

$$Al(OH)_3 + H2O \rightarrow Al(OH)_4^{-} + H^{+} \quad \textbf{(Eq.8)}$$

Ces complexes agissent de manière analogue aux coagulants chimiques utilisés dans les procédés de traitement conventionnels. Ils se fixent sur les particules, neutralisant ainsi leurs charges colloïdales et entraînant leur déstabilisation.

La réduction de l'eau à la cathode produit des microbulles d'hydrogène d'environ **10-20 µm** de diamètre, qui s'adsorbent sur les flocs polymériques $\{Al_n(OH)_{3n}\}$ et entrainent ainsi

leur flottation. La prépondérance des espèces ioniques ou neutres dépend des conditions opératoires telles que la température, le pH et la présence d'autres substances chimiques. Cette prédominance est illustrée par un diagramme (Figure 2) qui montre l'évolution de la concentration, exprimée en log [Al(III)], en fonction du pH du milieu pour chacun des complexes formés.

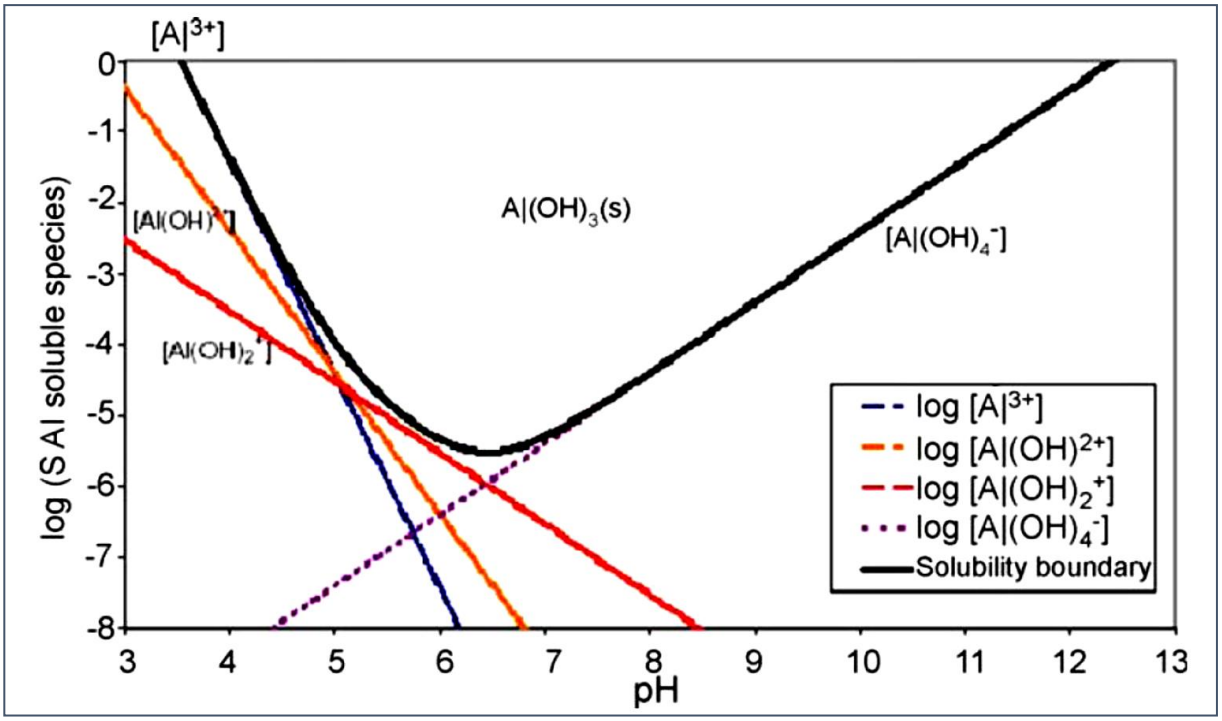


Figure 2 .Diagramme de solubilité d'hydroxyde d'aluminium $Al(OH)_3(s)$ en fonction du pH pour des espèces en aluminium mononucléaires (A.k. Gaid, 1984).

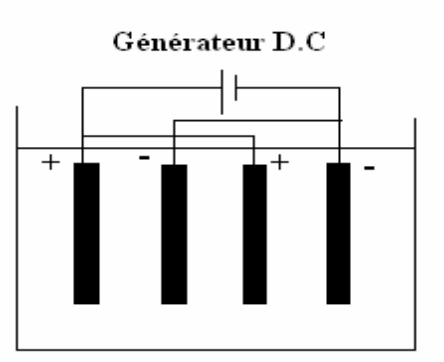
VIII. Différents types de connexions électriques

Trois types de connexions électriques peuvent être établis entre les électrodes dans les cellules électrochimiques. Ces dernières peuvent être connectées en série ou en parallèle, seules ou combinées avec d'autres procédés tels que des procédés biologiques, des filtres-presses, des décanteurs ou d'autres méthodes physiques dans le but d'améliorer les performances de l'EC à deux électrodes. Les trois modes de connexion possibles sont : le mode mono-polaire en série, le mode bipolaire en série et le mode mono-polaire en parallèle.

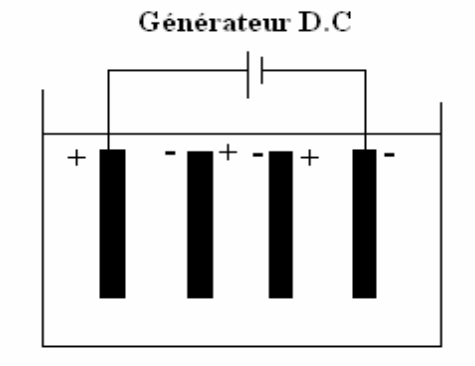
La distinction entre ces trois modes réside dans la façon dont les électrodes sont reliées, ce qui entraîne des différences dans l'expression des tensions et des intensités de courant au sein des cellules d'électrolyse selon la (Figure 3) : (M. Kobya et al, 2003).

Divers modes de connexions sont étudiés :

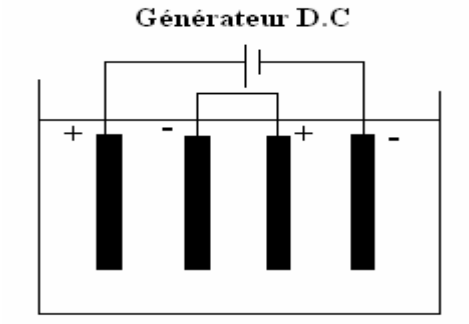
- Connexion mono polaire en série (M. Bayramoglu et al., 2007).
- Connexion mono polaire en parallèle (A.K. Golder et al., 2007).
- Connexion bipolaire en série (S. Ayhan et coll., 2009).



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



(b): Connexion bipolaire et équivalent électrique.



(c) : Connexion mono polaire en parallèle et équivalent électrique.

Figure 3 . Différents types de connexion

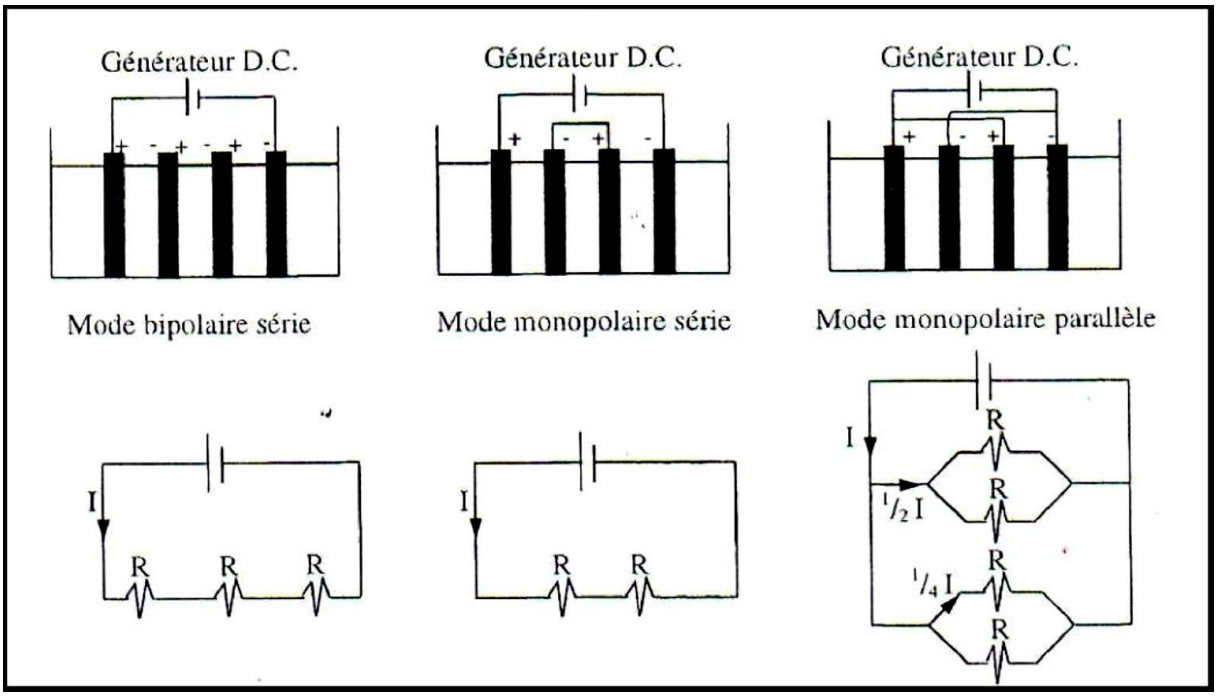


Figure 4 . Les différents modes de connexions électriques pour une cellule d'électrocoagulation et les circuits électriques associés **(M.F. POUET, 1994)**.

Alors on explique ces trois types avec :

A. Connexion mono-polaire en série

Comme le montre la figure (5), 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 (W. Lemlikchi, 2012).

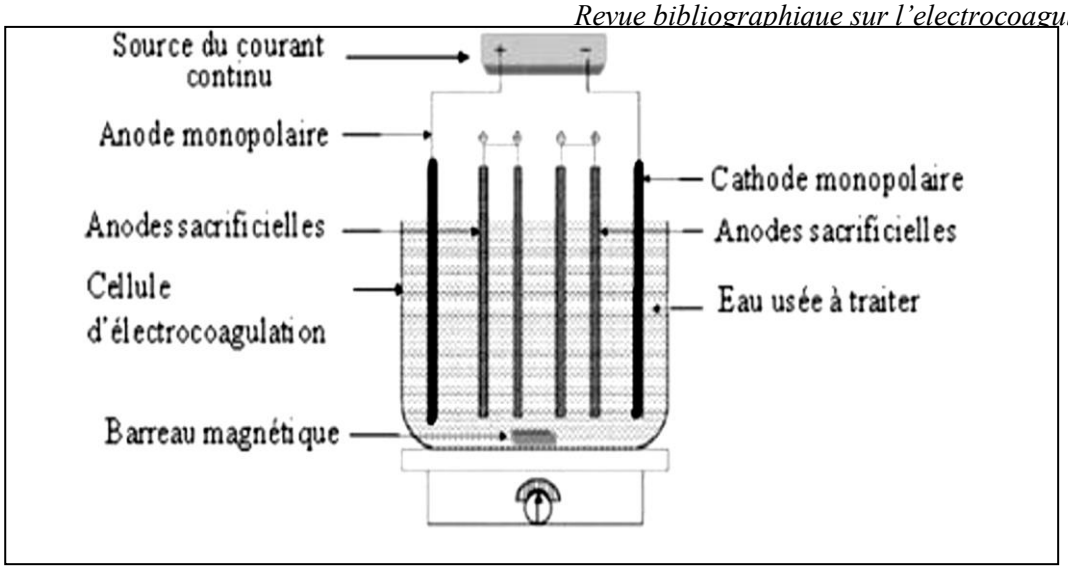


Figure 5 . Connexion en série d'électrodes monopolaires.

B. Connexion mono-polaire en parallèle

C'est la connexion la plus simple et la plus utilisée. Comme la figure (6) montre un dispositif simple de cellule d'EC avec une paire d'anodes et une paire de cathodes disposées en parallèle.

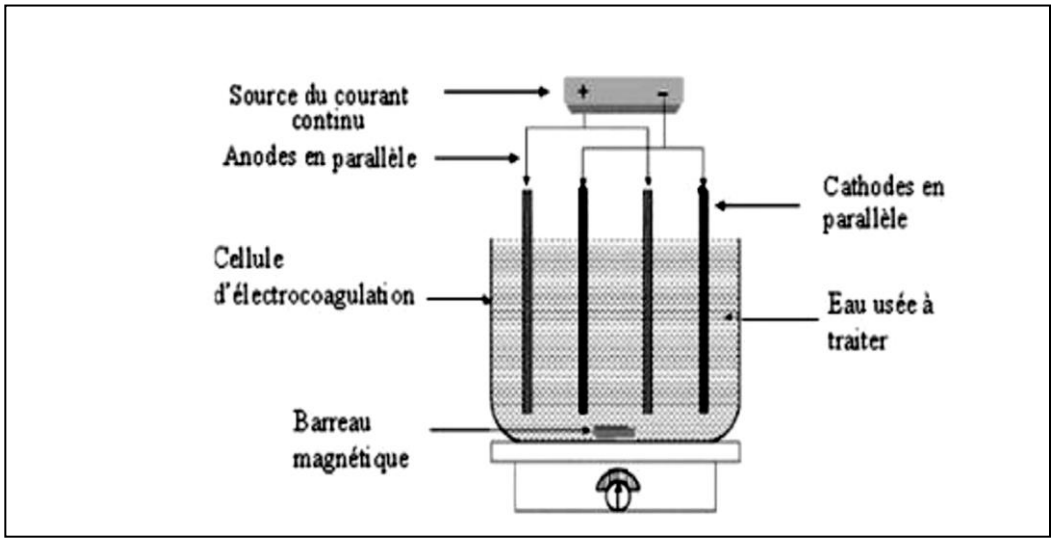


Figure 6. Connexion en parallèle d'électrodes mono-polaires.

Cette cellule EC comporte principalement des paires de plaques métalliques conductrices situées entre deux électrodes parallèles et une source de courant continu. Ces plaques métalliques conductrices sont généralement appelées « électrodes sacrificielles ». L'anode sacrificielle réduit le potentiel de dissolution de l'anode et minimise la passivation de

la cathode ; les électrodes sacrificielles peuvent être fabriquées avec les mêmes matériaux que l'anode ou avec d'autres matériaux ayant des propriétés différentes.

Dans une configuration mono-polaire, il y a une série d'électrodes positives et négatives connectées aux bornes correspondantes de la source d'alimentation. Par conséquent, chaque électrode reçoit la même tension et une partie du courant total.

C. Connexion bipolaire

Chaqu'une des deux électrodes mono-polaires est reliée indépendamment à la source de courant, sans aucune interconnexion entre les électrodes sacrificielles . Les différentes électrodes sont placées comme l'indique la figure (7).

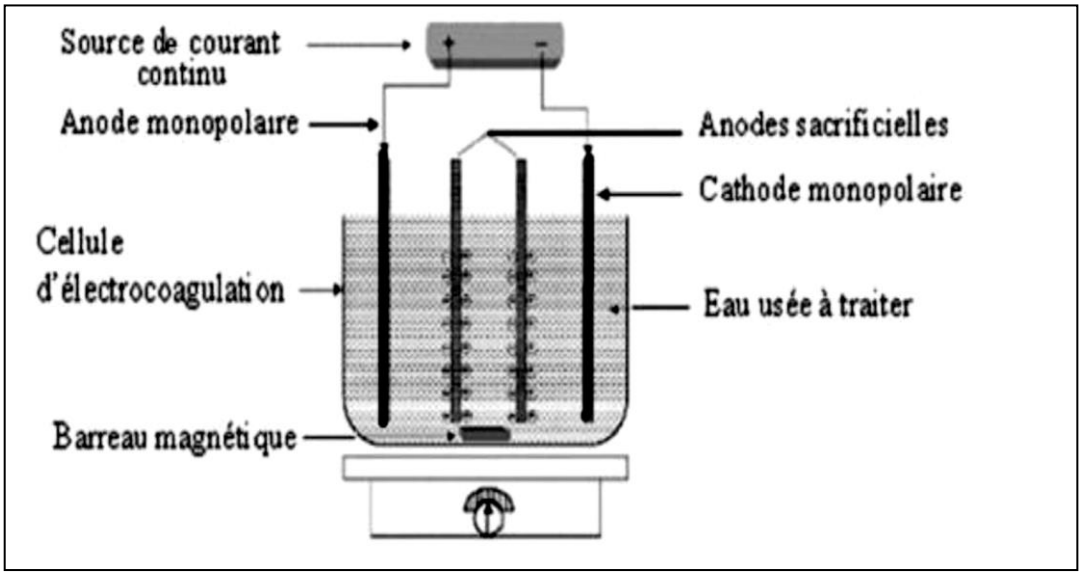


Figure 7. Connexion des électrodes bipolaire.

Cet arrangement facilite l'installation et la maintenance de l'appareil. Lorsque le courant électrique passe à travers les deux électrodes mono-polaires, les faces neutres des plaques conductrices deviennent chargées, avec une charge opposée à celle de la face adjacente. Ainsi, les électrodes sacrificielles sont désignées comme des électrodes bipolaires (W. Lemlikchi, 2012).

Le tableau (4), nous donne les différentes valeurs des tensions (U) et des intensités (I) pour les trois modes, avec n est le nombre de cellules :

Tableau 4 : Modes de connexion et valeurs des intensités et des tensions

(Merzouk et all., 2009)

Mode de connexion	Intensité par cellule	Tension par cellule
Mono-polaire série	I	U/2n
Mono-polaire parallèle	I/n-1	U
Bipolaire	I	U/n-1

IX. Exemple d'application et mise en œuvre du procédé

Les techniques d'électrocoagulation (EC) se sont révélées très polyvalentes dans le traitement des eaux et ont démontré leur efficacité pour éliminer divers types de polluants et de contaminations. L'EC a été appliquée avec succès dans le traitement de nombreux effluents, tels que les rejets de l'industrie textile, l'eau potable à déflorer, les eaux usées industrielles chargées en colorants, les émulsions huile-eau, les eaux huileuses, les suspensions aqueuses et les eaux de blanchisserie. De plus, l'EC s'est également avérée être un procédé performant pour l'élimination des espèces ioniques solubles, en particulier les métaux lourds, au cours des dernières décennies.

X. Principales lois de l'électrolyse

Le procédé d'électrocoagulation implique une combinaison complexe de processus, notamment des réactions chimiques inter-ioniques, des réactions électrochimiques d'oxydoréduction et des phénomènes physiques de transfert de charges à l'interface électrode-solution. La compréhension de tous ces phénomènes est essentielle pour la maîtrise et l'optimisation du procédé d'où la nécessité de maîtriser un certain nombre de lois par exemple:

- Cinétique de transfert de charge ou loi de Buttler-Volmer.
- La loi de Faraday.
- L'expression de la tension de cellule.
- Energie consommée et rendements d'électrolyse.

A. Cinétique de transfert de charge ou loi de Buttler-Volmer

La cinétique de transfert de charge et de matière qui se produit à l'interface électrode-solution régit les courbes courant-potentiel. On distingue essentiellement dans la réaction, le transfert de l'espèce A du sein de la solution vers la surface d'électrode, l'adsorption chimique ou physique de A selon sa nature à la surface de l'électrode, le transfert de charge entre la surface et l'espèce adsorbée conduisant à la formation de B, la désorption de l'espèce B et le transfert de l'espèce B depuis la surface vers l'électrolyte. La figure (8) illustre les étapes de transfert de matière dans une cellule électrochimique. (S.A. Boucenna, 2019/2020)

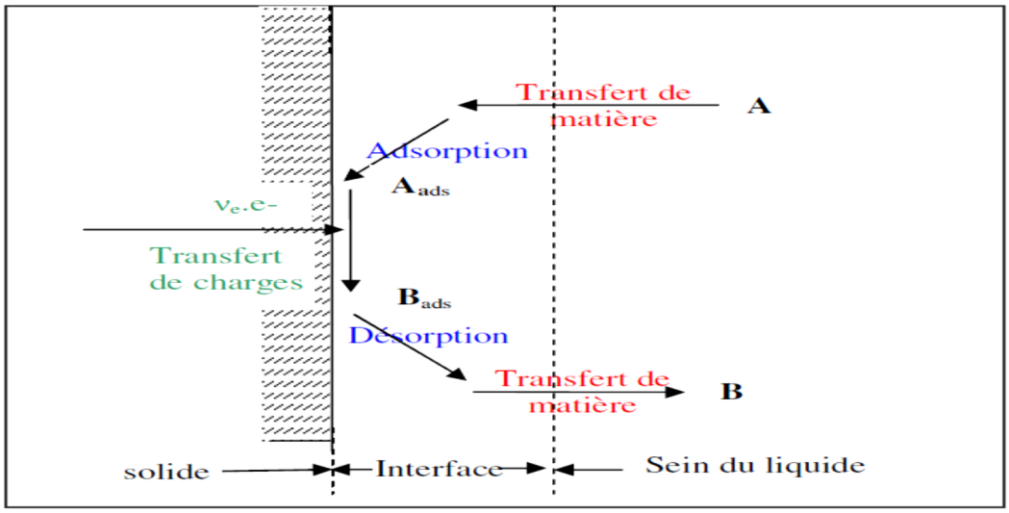


Figure 8 . Les étapes de transfert de matière dans une cellule électrochimique

B. 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 d'après la formule **(9)**

$$m = \frac{I\,t\,M}{n\,F} \qquad (9)$$

Avec :

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

I : intensité du courant imposé (A).

t: durée d'électrolyse (s).

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

F : constante de Faraday (96500 $C.mol^{-1}$).

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

Dans le cas où le modèle d'électrolyse comprend p électrodes, et est alimenté par un liquide ayant un débit Qe, d'après la formule **(10)** :

$$\mathbf{C = \frac{m.(p-1)}{Qe}} \qquad \mathbf{(10)}$$

Avec :

C : débit massique de métal dissous ($kg.h/m^3$).

Qe : débit d'alimentation de la cellule (m^3/h).

p : nombre d'électrodes.

m : quantité théorique de métal dissous (kg).

Si d'autres réactions chimiques ont lieu en même temps, le courant électrique utilisé lors de l'électrolyse n'est pas complètement consacré à la réaction d'oxydation (CHA071).

C. Tension de la cellule

Quand le courant circule dans une cellule électrochimique, il en résulte une augmentation de la tension qui se décompose en plusieurs éléments (Figure 9) :

- Le potentiel d'équilibre réversible de l'anode, $E_{0,a}$.

- La surtension d'activation à l'anode, $A_{a\eta}$, qui est fonction de la densité de courant.

- La surtension de diffusion à l'anode, ηD_a, 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 de diffusion à la cathode ηD_c, générée par le gradient de concentration au voisinage de la cathode.

- La surtension d'activation $A_{c\eta}$ de la réaction électrochimique se produisant à la cathode.

- Le potentiel d'équilibre réversible de la cathode, E_{0c}.

La tension appliquée est ainsi donnée par la formule (11):

$$U_c = E_a - E_c + \eta_{Aa} + \eta_{Da} + |\eta_{Dc}| + |\eta_{Ac}| + R_s . I \qquad (11)$$

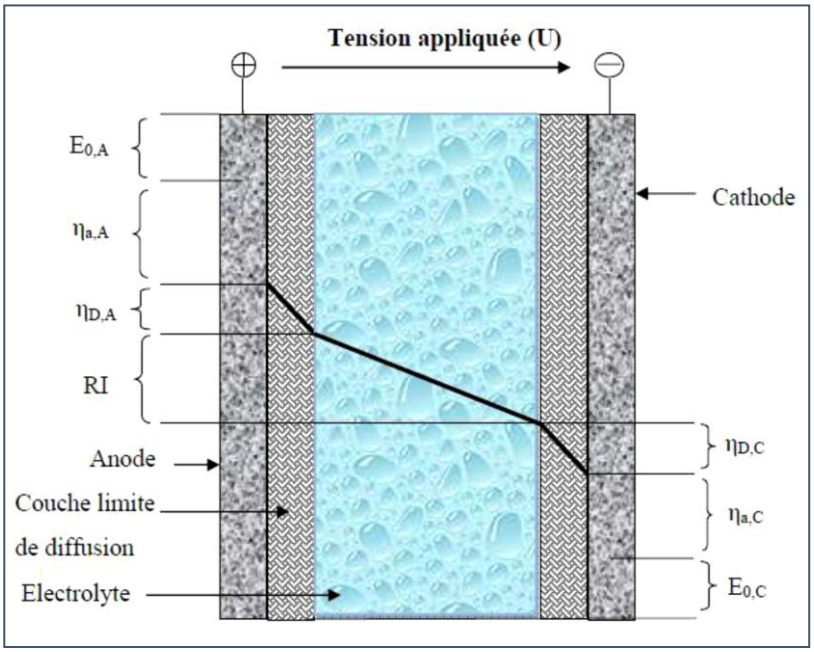


Figure 9. Décomposition de la tension de cellule électrochimique.

D. Rendement faradique Φc et rendement énergétique

Soit la réaction électrochimique :

$$\mathbf{A + n\ e^-} \rightleftharpoons \mathbf{\gamma_p\ P} \qquad \textbf{(Eq.12)}$$

Avec :

A : espèce oxydante.

P : espèce réductrice

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

γp : nombre de moles de P produites.

Si cette réaction est la seule à se produire, la loi de Faraday indique que la production de $\boldsymbol{\gamma_p}$ moles de P nécessite le passage de $\boldsymbol{\gamma_p}$ moles d'électrons, c'est-à-dire, la quantité d'électricité Q_0 telle que :

$$Q_0 = n\ .\ N\ .\ e_0 = nF \qquad \textbf{(Eq.13)}$$

Avec :

N : nombre d'Avogadro (6.022.1023 mol^{-1}).

F : constante de Faraday (96500 $C.mol^{-1}$).

e_0 : la charge élémentaire (1.602. 10-19C).

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

Le courant électrolytique est totalement consacré à cette réaction. Lorsque plusieurs réactions électrochimiques ont lieu simultanément, le rendement faradique est évalué par rapport à la réaction **(12).**

Différentes expressions du rendement peuvent être utilisées (M.F. POUET, 1994) :

- Le rendement en courant ou rendement faradique Φc :

$$\Phi C = \frac{\text{Quantité d'électricité nécessaire pour produire } \gamma P \textit{ moles de } P}{\text{Quantité d'électricité réellement consommée pendant l'électrolyse.}}$$

Soit :

$$\Phi C = \frac{I \text{ théorique } .t}{I \textit{ consommée } .t} \qquad \textbf{(14)}$$

- Le rendement énergétique RE défini par :

$$RE = \frac{\text{Energie minimale nécessaire pour produire } \gamma P moles\ de\ P}{\text{Energie réellement consommée pendant lélectrolyse.}}$$

Soit :

$$RE = \frac{I\ théorique\ .E_{Eq}}{I\ consommée\ .E_{App}} \qquad \textbf{(15)}$$

Avec :

E_{Eq} : potentiel d'équilibre ($E_{Eq} = E_O$(anode) – E_O**(**cathode)

où E_O sont les potentiels d'abandon des électrodes (i=0).

E_{App} : tension mesurée aux bornes de l'électrolyseur.

XI. Paramètres influençant le processus d'électrocoagulation

A. Le pH :

Le pH de la solution détermine la spécification des ions métalliques. Le pH influence l'état des espèces en solution et la solubilité des produits formés. Ainsi le pH de la solution affecte le rendement global et l'efficacité de l'électrocoagulation. Le pH de la solution peut être aisément change. Un pH optimal semble exister pour un polluant donné (I.Zongo, 2009).

B. La conductivité :

La conductivité de l'électrolyte a aussi un impact sur le procède d'EC; si elle est trop faible, la résistance de l'eau au passage de courant est forte, la consommation énergétique est très importante ; et sa température peut alors fortement augmenter. Pour ces différentes raisons, par analogie avec les exploitations d'installation d'électrocoagulation d'effluents industriels, l'ajout de chlorure de sodium est utilisé pour accroître la conductivité de la solution. L'ajout d'ions chlorure permet aussi d'éviter la passivation des électrodes. Le problème de conductivité constitue un inconvénient majeur au fonctionnement d'un procède d'électrocoagulation (CHATOU, 2005).

C. Intensité du courant :

Le courant électrique est un paramètre clé dans l'efficacité du procédé électrochimique (EC) pour éliminer les polluants des eaux usées. En effet, l'intensité du courant appliqué contrôle la cinétique de dissolution des électrodes anodiques et le dégagement de bulles d'hydrogène sur la cathode. L'intensité de courant appliquée dans un système d'EC détermine la quantité des ions Al^{3+} ou de Fe^{2+} libérée des électrodes. Un courant faible produit peu d'ions hydroxyde et d'hydrogène au niveau de la cathode, tandis qu'un courant élevé accélère la réaction, augmentant la consommation des électrodes et une dépense énergétique plus importante. L'efficacité du courant pour la dissolution des électrodes d'aluminium a été calculée selon la loi de Faraday (M. Asselin, 2007).

D. La distance entre électrodes

La distance entre les électrodes peut également affecter la qualité du traitement. Cette distance peut varier selon le type d'eau à traiter et notamment selon sa conductivité. De plus, la distance entre les électrodes doit également tenir compte d'une éventuelle contamination et de la facilité de nettoyage du système. Ce facteur est important lors de la mise à l'échelle industrielle d'une unité de traitement par électrocoagulation. La chute ohmique (liée à la résistance électrique) dans la solution électrolytique est directement liée à la distance qui sépare les électrodes et à la conductivité de la solution. Elle est en grande partie responsable de la baisse de rendement énergétique des procédés électrolytiques. Il est possible de la diminuer en augmentant la concentration en électrolyte ou en rapprochant les électrodes. Il en est de même pour d'autres facteurs tels que l'état de surface des électrodes (lisse ou rugueuse) et le degré du mélangé dans le réacteur d'électrolyse (agitation suffisante ou non) qui peuvent influencer la surtension de transfert ou d'activation. La surtension de transfert est un facteur déterminant dans l'appréciation des performances d'une électrode. Elle correspond en fait au travail nécessaire pour extraire (ou fixer) les électrons de la surface des électrodes (A.H. Essadki et al., 2009).

XII. Avantages et inconvénients de l'électrocoagulation

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

a) Avantages du procédé d'électrocoagulation :

1. Pas d'ajout de substances chimiques : même s'il semble nécessaire d'augmenter légèrement la salinité de l'effluent à traiter pour accroître la conductivité électrique de l'effluent, plusieurs études ont montré l'efficacité de l'EC sans aucune variation de Conductivité initiale du rejet à traiter, ce qui évite d'autres formes de traitement en aval. (A. Damien, 1992), (F. Persin, 1989).
2. Le procédé d'électrocoagulation (EC) s'avère très performant pour traiter des polluants colloïdaux très fins. Comparé à d'autres techniques telles que la coagulation chimique, l'EC nécessite des étapes de traitement plus rapides et des quantités de coagulant moins importantes (G. Poteaux, 1978), (M.Y.A. Mollah et al., 2001).
3. Les boues traitées par électrocoagulation deviennent plus compactes et moins hydrophiles. Cela facilite leur séparation de l'eau par décantation ou flottation, diminuant ainsi leur volume. Cette amélioration du traitement permet de réduire le temps et les coûts associés. (G. Patermarakis, 1990).
4. L'importance du champ électrique entre les électrodes qui conduit à la destruction de certaines souches de bactéries. En utilisant des électrodes en titane, des auteurs ont confirmé cet effet bactéricide sans la formation de dérivés hypochloreux ou d'autres dérivés du chlore. (I. Zongo et al., Traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie par électrocoagulation., 2011)
5. L'EC offre la possibilité de traiter des effluents par oxydation et réduction de plusieurs composés dissous tel que les nitrites, les sulfures , les cyanures, les sulfites, les chromates et les ions fluorures.
6. Le traitement des effluents par électrocoagulation rend ces derniers plus biodégradables. Cela s'explique par l'utilisation d'une forme d'aluminium non-toxique et par la faible salinité du milieu.
7. L'électrocoagulation (EC) offre l'avantage de raccourcir le temps de traitement et permet un grand gain grâce à sa conception compacte qui facilite l'automatisation des installations.

b) Inconvénients du procédé d'électrocoagulation

Quelques inconvénients de l'électrocoagulation peuvent également être énoncés :

1. L'utilisation de l'énergie électrique assez coûteuse et le prix coûteux des électrodes.
2. Il est parfois important d'ajouter du chlorure de sodium (NaCl) aux eaux usées afin d'augmenter la conductivité. Cela permet d'améliorer le traitement et la gestion de ces effluents.
3. L'EC ne permet pas de séparer des solutions parfaitement miscibles comme les mélanges eaux-benzène ou eau-solvants oxygénés (I.Zongo, 2009).
4. Selon Lais et Lin (2006), les boues formées lors du traitement des eaux de polissage contiennent près de 80% d'eau. La disposition de ces boues très humides entraîne des couts importants et différentes étapes de traitement doivent être utilisée au augmenter la siccité comme la filtration ou le conditionnement par congélation (J.F. Blais., 2004).
5. La présence des ions calcium et hydrogénocarbonates provoquent des dépôts de carbonates de calcium sur la cathode, ce qui augmente la résistance électrique de la cellule (Y.A. Mollah et coll, 2004) (Biochon-Lhermitte., 1991). Pour faire face à ce problème, la manière la plus simple est de réaliser une inversion périodique de la polarité (I. Zongo et al., Traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie par électrocoagulation., 2011).Il existe même un procédé électrochimique dont le but est de réaliser un détartrage de l'eau potable par dépôt du tartre sur la cathode (M. Bennajah, 2007).
6. La maintenance des installations, le nettoyage et le changement des électrodes impliquent une perte de temps dû à l'arrêt du procédé au cours de ces opérations (N. Gousmi, 2011).

CONCLUSION GENERALE

L’électrocoagulation est une technique de traitement des eaux polluées qui a montré son efficacité pour éliminer une grande variété de polluants, tels que les métaux lourds, les composés organiques, les phosphates, etc... Par rapport à la coagulation-floculation chimique, l'avantage est que les flocons formés sont plus compacts, réduisant ainsi la quantité de boues produites

Son principe repose sur la génération in situ de coagulants (Fe^{3+} / Fe^{2+} ou Al^{3+}) par dissolution électrochimique des électrodes, généralement en fer ou en aluminium, lors de l'application d'un courant électrique. Cela permet d'éviter l'ajout de produits chimiques et de réduire la production de boues.

L’EC se déroule habituellement dans un réacteur agité, et la récupération des flocons se fait après l'arrêt de l'électrolyse. La sédimentation des polluants sous forme de flocons est toutefois un processus relativement lent.

Les principaux paramètres opératoires qui influencent l'efficacité de l'EC sont le pH, l'intensité du courant, la distance inter-électrodes, la vitesse d'agitation et le temps de contact. L'optimisation de ces paramètres est essentielle pour maximiser l'abattement des polluants.

L'EC présente de nombreux avantages, comme sa simplicité de mise en œuvre, son efficacité élevée, sa compatibilité environnementale et son faible coût de fonctionnement. C'est pourquoi elle est considérée comme une technologie prometteuse pour le traitement des eaux.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A. Damien. (1992). *Electrocoagulation et électro floculation, Revue Générale de l'Electricité 3.*

A.H. Essadki et al. (2009). *Defluoridation of drinking water by electro coagulation/electro flotation in a stirred tank reactor with a comparative performance to an external-loop airlift reactor.*

A.k. Gaid, A. (1984). *puration biologique des eaux usées urbaines, tome I. édition : OPU. Ben Aknoun, Alger.* Algérie.

A.K. Golder et al. (2007). Trivalent chromium removal by electrocoagulation and characterization of the process sludge. *ournal of Chemical Technology & Biotechnology* .

A.W.Foulds, L. B. (1986). Separation oil from oil in water emulsions byelectroflocculation/ electroflotation. Filtr. Sep,. 366–370.

al., M. M. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazard. Mater., 114,* , 199–210.

Bayramoglu et coll. (2004). Treatment of the Textile Wastewater by Electrocoagulation Economical Evaluation. *Chemical Engineering Journal* , 155-161.

Biochon-Lhermitte., F. (1991). *Electrocoagulation et électrofloculation, Electrochimie et environnement, Journées d'études.* Ecole supérieure d'Electricité, Gif sur Yvette, 189-193.

C.H.A. Moreno et al. (2007). *Electrochemistry behind electro coagulation using iron electrodes, ECS Transactions,6.*

C.H.A. Moreno et al.,. (2007). *Electrochemistry behind electro coagulation using iron electrodes, ECS Transactions.*

CHATOU. (2005). *«Performance d'électrocoagulation pour l'épuration d'une émulsion d'huile de coupe».* MEFENSH.

E.M.Kaliniichuk et al. (1976). Int. Chem. Eng. 16 (3). 434–435.

F. Hanafi, N. S. (2009.). Traitement des margines par électrocoagulation avec des électrodes plates en aluminium/Revue des .sciences de l'eau. *Journal of Water Science, vol. 22, n° 4,* , p. 473-485.

F. Persin et M. Rumeau. (1989). Le traitement électrochimique des eaux et des effluents. *Chemistry* .

F. Persin, M. R. (1989). *le traitement électrochimique des eaux et des effluents. tribune de l'eau,42, 539, 45-56.*

G. Patermarakis, E. F. (1990). *Disinfection of water by electrochemical treatment, Water es.*

G. Poteaux. (1978). *Epuration des eaux résiduaires par électrolyse, Tec. Mod. 70.*

I. Zongo et al. (2011). Traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie par électrocoagulation. *European Journal of Scientific Research, Vol. 62 N02,* , 216-235.

I. Zongo et al. (2011). Traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie par électrocoagulation. *Européen Journal of Scientifique Résearch,Vol. 62 N02* , 216-235.

I. Zongo. (2009). *Etude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation: Application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie.* Burkina Faso: Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement de Ouagadougou.

I.Zongo. (2009). *Étude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation: Application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie, Thèse de Doctorat,.* Institut national polytechnique de Lorraine,.

J.F. Blais. (2004). *Cours Eau 454 Assainissement des eaux .Notes de cours, INRSETE,.* Canada: University du Québec, Québec, QC,.

M. Asselin. (2007). *Utilisation de l'électrocoagulation dans le traitement des eaux usées industrielle chargées en matière organique, Mémoire présente pour l'obtention du grade de maitre en sciences,.* université Québec.

M. Bayramoglu et al. (2007). Treatment of the Textile Wastewater by Electrocoagulation Economical Evaluation. *Chemical Engineering Journal* , 155-161.

M. Bennajah. (2007). *Traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation / électrolocation en réacteur air lift,thèse de doctorat.* L'institut national polytechnique de toulouse.

M. Kobya et al, .. (2003). reatment of textile wastewaters by electro coagulation using iron and aluminum electrodes. . *Journal of Hazard. Mater.,100* , 163– 178.

M. Kobya et al. (2007). Treatment of the Textile Wastewater by Electrocoagulation Economical Evaluation. *Chemical Engineering Journal* , 155-161.

M.F. POUET. (1994). *Traitements physico-chimiques associés à une microfiltration d'eau usée urbaine.Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier II, 163 p., N° ordre 44313.*

M.M. Emamjomeh et M. Sivakumar. (2009). Journal of Environmental Management 90. 1663–1679.

M.Tiaiba. (2019/2018). *«Traitement des eaux résiduaires d'industrie de textile par électrocoagulation en réacteur continu», thèse de doctorat.* Centre Universitaire Belhadj Bouchaib-Ain T'émouchent.

M.TIR. (2009). *Utilisation des techniques électrochimique dans le traitement Des émulsions Hydrocarbures/eau).Thèse de Doctorat.* Faculté des Hydrocarbures et de la chimie, Universités de M'hamed Bougara-Boumerdès.

M.Y.A. Mollah et al. (2001). Electro coagulation (EC)- Science and applications. *Journal of Hazardous Materials, B 84,* , 29-41.

Merzouk et all. (2009). Removal turbidity and separation of heavy metals using electrocoagulation-electroflotation technique, a case study. *Journal of Hazardous Materials 164* , 215-222.

Mollah et al. (2001). Electrocoagulation (EC) – Science and Applications. *Journal of Hazardous Materials* , 29-41.

N. Gousmi. (2011). *« Etude paramétrique du traitement de microémulsions d'huile decoupepar le procédé d'électrocoagulation » mémoire de magister,.* Université Houari- Boumediene-Alger.

P.K. Holt et al. (2002). A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 211* , 233-248.

P.K. Holt et al. (2005). The Future for Electrocoagulation as a Localised Water Treatment Technology. *Chemosphere* , 355-367.

S. Ayhan et coll. (2009). The decolorization of C.I. Reactive Black 5 in aqueous solution by electrocoagulation using sacrificial iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials 161* , 1369–1376.

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

S.A. Boucenna, M. (2019/2020). *Etude comparative de traitement de lixiviats par voie chimique et électrochimique, mémoire de master, .* université Mohamed Boudiaf - m'sila,.

W. Lemlikchi. (2012). *ELIMINATIONDELAPOLLUTIONDESEAUXINDUSTRIELLES PARDIFFERENTSPROCEDESD'OXYDATION ETDECO-PRECIPITATION.* Tizi-Ouzou: UNIVERSITEMOULOUDMAMMERITIZIOUZOU FACULTEDESSCIENCES DEPARTEMENTDECHIMIE.

X. Chen et al. (2000). eparation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology* , 65-76.

Y.A. Mollah et coll, .. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials* , 199-210.