



UNIVERSITE DE KARA

Numéro :

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

MEMOIRE

**En vue de l'obtention du
MASTER DE RECHERCHE**

Domaine : Sciences et Technologies

Mention : Chimie

Spécialité : Chimie de l'Environnement

OPTIMISATION DU TRAITEMENT DU PHOSPHORE DES EAUX USEES PAR ELECTROCOAGULATION

Présenté et soutenu par

Oussama ISHAKA

Le 29 Janvier 2019

Structure de recherche

Laboratoire d'Hydrologie Appliquée et Environnement

Directeur de Mémoire

Gbandi DJANEYE-BOUNDJOU, Professeur Titulaire, Université de Lomé

Codirecteur de Mémoire

Seyf-Laye ALFA-SIKA MANDE, Maître Assistant, Université de Kara

Jury

Président : Daouda MAMA, Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi

Directeur: Gbandi DJANEYE-BOUNDJOU, Professeur Titulaire, Université de Lomé

Codirecteur : Seyf-Laye ALFA-SIKA MANDE, Maître Assistant, Université de Kara

Examineur : Tomkouani KODOM, Maître de Conférences, Université de Lomé

Année académique

2018-2019

DEDICACE

Je dédie ce travail à :

ALLAH, le tout puissant, le Miséricordieux, le Clément pour nous avoir permis de réaliser ce modeste travail, de m'avoir donné la faculté, la capacité physique et morale d'exercer ce métier avec responsabilité dans la mesure du possible .Accorde nous surtout Ta Grâce, Ton Amour et Ton Pardon.

- ✚ Au prophète MOHAMED (SWS) que la bénédiction et le salut de Dieu soient sur Lui
- ✚ A mes parents : Abdou Razak ISSA ISHAKA, FOUSSENI Ilham, IBRAHIM Hadjara.
Merci pour tout ce que vous avez fait pour moi et pour toute la famille,
Que DIEU vous protège et vous donne longue vie à nos côtés
- ✚ Aux familles KOURPARA, ISHAKA, ISSA, FOUSSENI, IBRAHIM...
- ✚ Mes frères et sœurs : Anane, Zakya, Weida, Oumou-hani, Mohamed, Anass, Khalide, Faouzia, sultone, Mouanz, Abdoul Mouhsine, Abdoul Chakour, Abdoul Gafare, Aymane, Aïcha, Djamiou... Le lien de sang est sacré, qu'il dure autant que notre vie.
Trouvez ici l'expression de mes sentiments dévoués.
- ✚ A mes oncles et tantes...
- ✚ A toute la communauté musulmane

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, j'ai le devoir d'exprimer ma gratitude à tous ceux qui de loin ou de près m'ont aidé à le réaliser.

- Je rends grâce à DIEU, maître des circonstances et des temps, en qui nous avons la vie et l'espérance.
- Je remercie profondément le Professeur **SANDA Komla** président de l'université de KARA, le Professeur **BABA Gnon** ex Doyen de la Faculté des Sciences et Techniques (FaST) de l'Université de Kara, le Professeur **AMOUZOU Kou'santa Sabiba** Doyen de la Faculté des Sciences et Techniques (FaST) de l'Université de Kara et toute son équipe
- Je remercie profondément Professeur **DJANEYE-BOUNDJOU Gbandi**, de l'Université de Lomé ; Docteur **ALFA-SIKA MANDE Seyf-Laye**, vice Doyen de la FaST à l'Université de Kara, responsable du Master Eau et Assainissement ; respectivement directeur et codirecteur de mémoire ; pour avoir accepté de diriger ce mémoire, pour l'intérêt constant qu'ils ont porté à ce sujet de recherche, pour leur disponibilité, écoute et l'importance qu'ils attachent à ma formation. Je leur témoigne ici mes sincères reconnaissances pour tous les conseils et les remarques objectives qu'ils m'ont apportées et pour m'avoir permis de faire un premier pas vers la recherche dans l'enseignement supérieur.
- Je remercie sincèrement le Docteur **Kwamivi N. SEBGEAYA (Maître-assistant)** à l'Université de Kara, responsable du Master Chimie de l'Environnement.à l'Université de Kara
- Je remercie le Docteur **Ogouvidé AKPAKI (Assistant)** et **Batcha OUADJA (Ingénieur des Travaux)** à l'Université de Kara pour leurs conseils et mots d'encouragements.
- Je remercie les Docteurs **TCHAKALA Ibrahim (Maître- Assistant)**, **KODOM Tonkouani (Maître de conférences)**, **SIMALOU Odjaninyobi** de l'Université de Lomé
- Je ne saurais terminer ces remerciements sans y associer ma famille, mes professeurs mes camarades en master et amis qui m'ont toujours apporté tout leur soutien et leur appui afin d'arriver au terme de cette première aventure, et tous ceux rencontrés durant cette période sans le soutien desquels je n'aurais pu entreprendre ces études. A toutes et à tous je leur dis un grand merci.

RESUME

L'électrocoagulation est une technique de traitement des eaux usées basée sur le principe des anodes solubles. Elle consiste à générer directement in situ les ions nécessaires par une oxydation d'une électrode (anode) dite sacrificielle à partir d'un courant électrique imposé. L'objectif de ce présent travail est d'optimiser l'élimination du phosphore des eaux usées domestiques par la méthode d'électrocoagulation. En effet les paramètres opératoires tels que : le pH, l'intensité du courant, le temps de contact, la concentration initiale, la distance inter électrode et l'effet de NaCl ont été étudiés en utilisant les lames d'électrodes de fer, d'aluminium et du cuivre. Les expériences ont été réalisées dans un réacteur en batch. Les résultats obtenus avec les lames d'électrodes de fer ont démontré que l'élimination est maximale aux pH [5-7] après un temps de 30 minutes. Le seuil d'élimination du phosphore est obtenu à partir de l'intensité 0,3A (100%). Pendant que la concentration est augmentée de 15 à 30 mg P/L, le taux d'élimination a diminué de 100 à 96,75% après une durée de 40 minutes. La distance inter-électrode également est inversement proportionnelle au taux d'élimination. Dans le but d'étudier l'influence du passage du courant électrique, une investigation sur la présence de NaCl a été également menée. Les résultats ont démontré que le taux d'élimination augmente et atteint 100 % en présence de NaCl, alors qu'en son absence, le taux d'abattement du phosphore diminue et atteint 83,41 % après un temps de contact de 60 minutes. Dans le souci d'étudier la performance des différentes électrodes sur l'élimination du phosphore, les électrodes de fer, d'aluminium et de cuivre ont été choisies. Les résultats de ces expériences ont montrés que l'aluminium est plus efficace avec un abattement du phosphore de 100 %, suivie du fer (96,75%) et du cuivre (88,91%).

Mots clés : Electrocoagulation, eaux usées, phosphore, électrodes, NaCl, intensité de courant.

ABSTRACT

Electrocoagulation consists of waste water treatment based on soluble anode principle. It consists of maintaining directly within the necessary ions for an anode oxidation called sacrificial through electric power imposed. The objective of this paper is to contain phosphorus elimination from household waste water by electrocoagulation method. Therefore operational parameters such as: pH, power intensity, duration of contact, initial concentration, inter-electrodes distance, and the effect of NaCl had been studied using blades electrodes of iron, aluminum and silver. Experiences have been realized in batch reactor. The results obtained with blades electrodes of iron had shown that the maximum elimination to pH [5-7] after a time of 30min. The threshold of phosphorus elimination is obtained from power intensity 0.3A (100%). While the concentration is increased from 15 to 30 mg P/L, the rate of elimination has decreased from 100 to 96.75% after 40min. Inter-electrode distance is also proportional to the elimination rate on the contrary. In the process to study electric power flow influence, an investigation on the NaCl presence has also been conducted. The results shown that the elimination rate increase and reach 100 % in presence of NaCl, while without it the elimination rate of phosphorus increases and reaches 83.41 % after a time of 60 min in contact. For the sake to study the performances of different electrodes on the elimination of phosphorus, electrodes of iron, aluminum, and silver had been chosen. The results of these experiences had shown that aluminum is the more efficient with phosphorus elimination of 100% followed by the iron (96.75%) and silver (88.91%).

Keywords : electrocoagulation, waste water, phosphorus, electrodes, NaCl, current intensity.

TABLES DES MATIERES

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS.....	ii
RESUME.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TABLES DES MATIERES.....	v
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
SIGLES ET ABREVIATIONS.....	x
INTRODUCTION GENERALE.....	2
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	5
I - GENERALITES SUR LES EAUX USEES.....	5
1- Origines des eaux usées.....	5
2- L'impact des eaux usées sur l'environnement et la santé.....	5
2-1- L'impact des eaux usées sur l'environnement.....	5
2-3- L'impact des eaux usées sur l'homme.....	6
2-4- L'impact des eaux usées sur les animaux.....	6
II - GENERALITE SUR L'ELECTROCOAGULATION.....	8
1- Origine et évolution.....	8
2- Principe du procédé.....	9
3- Les électrodes.....	10
3-1- Différents types de connexion.....	11
3-2-Réactions aux électrodes.....	12
4- Principales lois d'électrolyse.....	13
4-1- Loi de Faraday.....	13
4-2- Rendement faradique.....	14
4-3- Tension à appliquer aux bornes d'une cellule électrochimique.....	15

4-4- Les étapes de la réaction électrochimiques.....	15
5- Avantages et inconvénients du procédé	16
6- Comparaison entre l'EC et la coagulation-floculation chimique.....	16
7- Les espèces en solution	17
7-1- Chimie du fer	17
7-2- Les différents complexes de fer	18
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES	20
1- Configuration du réacteur	22
1-1- Le réacteur électrochimique.....	22
1-2- Les électrodes utilisées	23
2- Description expérimentale.....	23
2-1- Préparation des solutions.....	24
2-2- Mise en œuvre expérimentale.....	24
3- Protocole d'analyse	25
3-1- Choix de la longueur d'onde d'absorption	25
3-2- Etablissement de la courbe d'étalonnage du phosphore.....	25
3-3- Calcul du pourcentage d'élimination	26
CHAPITRE III : TRAITEMENT DU PHOSPHORE PAR ELECTRPCOAGULATION	29
1- Effet du pH.....	29
2- Effet de l'intensité de courant	32
3- Effet de concentration initiale en Phosphore.....	34
4- La distance inter électrode	36
5- Effet de NaCl.....	37
6- Effet du temps de contact	39
7- Effet de la nature des électrodes	39
CONCLUSION GENERALE	42

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 43

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma du principe de l'électrocoagulation (Salim Zodi, 2012).	10
Figure 2 : différents types de connexion. (Mounir Bennajah, 2007)	12
Figure 3: Réacteur électrochimique	22
Figure 4: Dispositif d'électrocoagulation	22
Figure 5: Variation de l'absorbance en fonction de la longueur d'onde.	25
Figure 6: Courbe d'étalonnage du phosphore	26
Figure 7: Effet de pH sur l'élimination du phosphore en fonction du temps avec les électrodes de fer	30
Figure 8: Variation du pourcentage d'élimination du phosphore en fonction du pH initial	31
Figure 9: Variation du pH en fonction du pH initial	32
Figure 10: Effet de l'intensité du courant sur l'élimination du phosphore en fonction du temps avec les électrodes de fer	33
Figure 11: Variation des taux d'élimination de phosphore en fonction de l'intensité de courant avec les électrodes de fer	34
Figure 12: Effet de la concentration initiale sur l'élimination du phosphore en fonction du temps avec les électrodes de fer	35
Figure 13: Effet de la distance inter-électrode sur l'élimination du phosphore en fonction du temps avec les électrodes de fer	37
Figure 14: Effet de NaCl sur l'élimination du phosphore en fonction du temps	38
Figure 15: Effet de la nature des électrodes sur l'élimination du phosphore en fonction du temps.	40

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1:Exemples d'électrodes	11
Tableau 2:Produits et Matériels.....	20
Tableau 3:Tableau de la courbe d'étalonnage du phosphore	26
Tableau 4 : Effet de pH sur l'élimination du phosphore en fonction du temps	30
Tableau 5 : Effet de l'intensité du courant sur l'élimination du phosphore en fonction du temps.....	33
Tableau 6 :Effet de la concentration initiale sur l'élimination du phosphore en fonction du temps	35
Tableau 7 : Effet de la distance inter-électrode sur l'élimination du phosphore en fonction du temps	36
Tableau 8 : Effet de NaCl sur l'élimination du phosphore en fonction du temps.....	38
Tableau 9 :Effet de la nature des électrodes sur l'élimination du phosphore en fonction du temps	40

SIGLES ET ABREVIATIONS

EC : Electrocoagulation

(g/L) : Gramme par litre

(mg P /L) : Milligramme de phosphore par litre

(Cm) : Centimètre

d : distance inter-électrode

NHE: Electrode Standard d'hydrogène

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est un élément indispensable à toute vie sur terre. C'est aussi l'élément incontournable dans la transformation de plusieurs productions. Elle a un caractère aussi bien nutritionnel que socio-économique. Cependant son utilisation entraîne la détérioration de sa qualité. La dégradation de l'eau provient de son rôle joué dans plusieurs domaines de la vie. Par ailleurs, les domaines de la santé, l'agroalimentaire, l'agriculture, le secteur industriel, restent des domaines de grande consommation d'eau. Ces domaines produisent ainsi d'importants rejets liquides. Ce qui conduit à la pollution assez importante de l'environnement. Ces effluents comportent des facteurs polluants nuisibles à l'environnement et à la santé humaine, notamment une importante charge bactérienne. La pollution de l'eau est presque toujours due aux activités humaines, même si cette pollution est parfois accidentelle.

Au Togo tout comme dans la plupart des pays en voie de développement, beaucoup d'efforts restent à entreprendre dans les domaines de l'eau et de l'assainissement. Les eaux usées sont déversées directement dans l'environnement sans aucun prétraitement. Les effluents urbains sont dégagés à ciel ouvert; par conséquent ils provoquent une dégradation physico-chimique et biologique de l'écosystème aquatique. Les eaux de retenue des barrages, les rivières, les lacs et les nappes phréatiques sont de plus en plus pollués (Fent, 1996). Une des solutions la plus envisageable est le traitement en vue de la réutilisation de ces eaux usées traitées.

Le problème de santé dû à l'eau devient un des grands défis de notre société actuelle. La plupart de maladies sont liés à l'eau. En effet, selon les statistiques en Afrique, 80% des eaux usées sont rejetées sans traitement (EIN-Mars 2009). Il est donc nécessaire pour réduire ces risques de traiter ces eaux afin de rejeter des eaux plus ou moins épurées. En effet, la ville de Kara dispose d'une station de traitement qui ne prend pas en compte l'ensemble de la ville.

Aujourd'hui beaucoup de recherches ont été faites pour palier à ce problème (Rahmani et al., 2010, Naim et al., 2010). Ces recherches font objet de plusieurs types de traitement (traitements chimiques, biologiques, physiques) permettant de réduire les quantités de polluants que contiennent ces eaux usées avant leurs rejets. Il s'agit notamment de la coagulation chimique, de l'électrocoagulation, de l'adsorption, du traitement chimique, biologique... L'électrocoagulation (EC) fera l'objet de nos travaux. Cette technique est réputée pour son efficacité même sur des effluents très chargés en pollution.

L'électrocoagulation est une technique de traitement très efficace (Mollah et al., 2001). C'est un procédé basé sur le principe des anodes solubles (exception faite par certains éléments comme le titane). Il consiste à générer directement in situ les ions nécessaires par une

oxydation d'une électrode (anode) dite sacrificielle à partir d'un courant électrique imposé (Gousmi, 2016). C'est un procédé particulièrement intéressant pour les effluents très fortement chargés en pollution organique, jusqu'à 200 g/L, les effluents colorés et ceux contenant des métaux lourds (Zongo, 2009).

Les eaux usées rejetées dans la ville de Kara sont essentiellement de types industriel (cas de la brasserie BB Kara) et domestique. L'objectif de ce travail est d'optimiser les paramètres clés du traitement du phosphore dans les eaux par électrocoagulation.

Ce mémoire s'organise en trois chapitres :

- ✚ **Le Chapitre I**, concerne la synthèse bibliographique qui porte sur la généralité sur les eaux usées ; la méthode d'EC, ses principes et mécanisme.
- ✚ **Le Chapitre II** qui concerne les matériels et la méthodologie suivis.
- ✚ **Le Chapitre III**, partie optimisation des paramètres, sont présentés les résultats expérimentaux obtenus discutés et interprétés; Enfin on termine par des perspectives et une conclusion générale, résumant l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus au cours de ce travail.

CHAPITRE I :

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I - GENERALITES SUR LES EAUX USEES

L'assainissement de notre milieu de vie et l'accès à l'eau potable sont des préoccupations d'ordre mondial. Cependant, l'une des conséquences de l'utilisation des eaux est la production d'eaux usées dont la composition dépend de leur origine (leur nature). Ces eaux engendrent d'énormes problèmes tant sur leur gestion que sur l'environnement et la santé humaine surtout lorsqu'elles sont rejetées sans traitement préalable. Dans ce présent chapitre afin de montrer l'intérêt de leur épuration, nous avons présenté d'une part, les origines et d'autre part leurs impacts sur l'environnement et la santé.

1- Origines des eaux usées

On distingue quatre principaux types d'eaux usées selon leurs origines: (Yao Akpo, 2006)

- les eaux usées domestiques ;
- les eaux usées industrielles ;
- les eaux usées agricoles ;
- les eaux de pluie et de ruissellement.

2- L'impact des eaux usées sur l'environnement et la santé

2-1- L'impact des eaux usées sur l'environnement

Les eaux usées domestiques sont soumises à des processus de dégradation liés à des réactions biologiques et physico-chimiques complexes. En contact des déchets de l'environnement, l'eau s'y infiltre et produit des lixiviats et du biogaz chargés en substances organiques ou minérales. Cela en relation avec la biodégradation naturelle des déchets confinés libère de nombreuses substances toxiques dans le milieu naturel. Sur les sites où les eaux grises sont déversées, on rencontre essentiellement trois types de pollution : pollution par les matières ou polluants organiques et minérales, pollution par les métaux lourds et pollution par les microorganismes (Kehila et *al.*,2007). On observe la dégradation esthétique des voies, des plans d'eau et des caniveaux. Les zones dites sensibles comme les marécages sont des milieux sans infrastructures sanitaires adéquates pouvant permettre aux populations d'avoir un lieu fixe pour les eaux vannes (EV) et Grises (EG). Ces eaux sont ainsi rejetées dans le milieu naturel sans traitement (PNE, 2009). Ce qui conduit à l'encombrement des plans d'eau par des plantes aquatiques affectant ainsi le caractère esthétique de ces milieux. Aussi les responsables éprouvent-ils une grande difficulté pour traiter les eaux usées domestiques à cause de l'absence de stations d'épuration due au coût élevé de leur installation. Selon Ayraud

(2005), l'apport excédentaire des nitrates provenant des activités agricoles est souvent lessivé vers les nappes souterraines. Pendant que la production de l'eau augmente avec la poussée démographique, 82,50% des concessions des zones déshéritées déversent les eaux usées domestiques dans la nature (PNE, 2009 ; Tchibozo et *al.*, 2012). Ceci fragilise d'avantage la qualité des ressources en eau, contribue à la mauvaise gestion de l'espace et constitue un véritable problème pour l'assainissement de l'environnement. Le manque de sensibilisation de la population sur les méthodes de traitement des eaux grises et l'occupation spatiale de façon anarchique, échappant au contrôle des pouvoirs publics, favorisent le déversement direct des eaux usées dans le milieu naturel d'une façon précaire et sans traitement préalable (Tchibozo et *al.*, 2012). Cet acte conduit à un déséquilibre de l'écosystème et à une production des éléments responsables de la pollution de l'environnement (Makhoukh et *al.*, 2011).

2-3- L'impact des eaux usées sur l'homme

Dans ces activités quotidiennes, l'homme utilise un grand volume d'eau et produit en retour des eaux grises. Ces eaux usées domestiques sont des nids de plusieurs espèces pathogènes (coliformes, des virus, des bactéries, les helminthes, etc....) (Makoutodé et *al.*, 1999). Leur mauvaise gestion affecte la population, particulièrement les petits enfants qui sont sujets à des maladies hydriques, à savoir : la diarrhée, le choléra, la dysenterie, l'hépatite A, les gastroentérites, etc...(Vandermeersch, 2006). Les polluants des eaux grises causent les maladies d'hypertension et de cancer chez les adultes (Scheen et *al.*, 2012). L'utilisation des eaux grises des marécages ou des collecteurs comme eau de baignade contribue à des infections cutanées (N'Diaye et *al.*, 2011).

2-4- L'impact des eaux usées sur les animaux

Le rejet des eaux usées dans la nature entraîne la multiplication rapide et abondante des moustiques qui pour leur développement consomment les éléments nutritifs des eaux grises (Yovo, 2017). Les animaux (le bétail, le gibier, le canard, la poule, les moutons, les bœufs, les cochons etc.) qui s'abreuvent au niveau des eaux de surfaces polluées consomment de cette façon les polluants de ces eaux et sont sujets au dysfonctionnement au niveau de leur organisme (Cisneros et *al.*, 2011). On remarque parfois des intoxications et des malformations dues aux substances toxiques ingérées par ces animaux (Khateeb, 2003). Les substances non désirables modifient des hormones des animaux domestiques et bloquent leur système de reproduction. Au niveau de la pêche, les poissons sont plus exposés aux contaminations par les métaux lourds. On remarque la disparition de certaines espèces aquatiques au fil du temps (Dedjiho et *al.*, 2013). Ainsi, la pisciculture comporte aujourd'hui de grands risques du fait

que les eaux de surfaces sont les réceptacles d'eaux grises donc de polluants (Bakary et *al.*, 2015). De plus, certaines molécules des eaux grises (ex : résidus d'hormones, prions, certains métaux...) males dégradées, peuvent alors passer dans la chaîne alimentaire ou s'accumuler dans le sol (Suanon, 2016 ; Yovo,2017).

II - GENERALITE SUR L'ELECTROCOAGULATION

Différentes méthodes de traitement exigent un certain coût plus ou moins élevé. Aussi d'autres comme la méthode chimique contribue à la pollution de l'environnement par l'utilisation des produits chimiques.

Cependant l'électrocoagulation en raison de sa simplicité et de sa facilité d'automatisation offre un rendement assez important. C'est ainsi que l'EC est utilisé dans l'élimination des matières organiques comme minérales, les métaux lourds, les hydrocarbures... L'EC a la capacité d'éliminer un large spectre de polluants (Ricordel et al.2010). Elle présente des avantages tels que la faible production des boues et des composés chimiques (Ameziane et al. 2013). En plus elle permet la production de l'agent in-situ et comme il n'y a pas d'ajout de produits chimiques, il n'y a pas d'impact sur l'environnement.

1- Origine et évolution

Le premier document rapportant l'utilisation de l'EC pour le traitement des effluents est un brevet américain déposé en 1880 par Webster (Picard 2000) 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 (Holt 2002). En 1912, aux Etats-Unis, deux autres stations de traitement des eaux usées furent construites sur ce principe. Cependant, leur fonctionnement fut arrêté, quelques années plus tard (1930), en raison du coût qui était deux fois plus élevé que celui d'un traitement biologique (Bennajah 2007). Au cours des années 1940, Stuart (1946) et Bonilla (1947) ont publié des études sur les processus électrochimiques du traitement de l'eau, mais leur publication ne semble pas avoir été motrice à cette époque. Ce n'est que plus tard, dans les années 1970 et 1980, que les recherches sur l'application de l'électrocoagulation pour le traitement de différents types d'eaux ont généré un intérêt notable. Le développement industriel du procédé d'électrocoagulation a cependant été freiné par le coût jugé trop élevé de l'investissement nécessaire et par la concurrence des procédés de traitement chimique, sans pour autant que son utilisation soit totalement écartée. L'électrocoagulation a commencé à regagner de l'importance à la fin du XXe siècle avec les progrès des procédés électrochimiques et la réglementation sur les rejets de plus en plus stricte (Khemis 2005), imposant d'étendre le spectre des solutions de traitement. Son utilisation s'est accrue et bon nombre d'industriels utilisent maintenant l'électrocoagulation pour le traitement de leurs effluents. La technologie a été optimisée pour minimiser la consommation énergétique et pour

augmenter l'efficacité du traitement. Celle-ci a été démontrée sur divers polluants (Daneshvar et al. 2007, Petsriprasit et al. 2010, ...). Plusieurs applications du procédé ont été réalisées sur différents types d'effluents et montrent une efficacité très élevée et un coût de traitement compétitif par rapport aux procédés classiques. L'électrocoagulation est efficace dans le traitement des métaux lourds tels que Cr, As, Pb et Cd, mais aussi des éléments non métalliques tels que le phosphore et les composés organiques. Ce procédé a pu convaincre par son rendement d'épuration supérieur à celui des méthodes classiques pour la diminution de la Demande Chimique en Oxygène (DCO), du Carbone Organique Total (COT), des Matières En Suspension (MES), des minéraux, des colorants organiques, des huiles et graisses ; beaucoup d'autres effluents industriels variés ont été épurés avec succès (Moreno et al. 2007). Ce nouvel essor de l'électrocoagulation est dû en partie aux coûts d'investissement et d'exploitation relativement moins élevés que pour les autres procédés (Yilmaz et al. 2007).

2- Principe du procédé

Le procédé d'électrocoagulation est basé sur le principe des anodes solubles dites anodes sacrificielles. Il s'agit, d'imposer un courant (ou potentiel) entre deux électrodes (fer ou aluminium) immergées dans un électrolyte contenu dans un réacteur pour générer, in situ, des ions (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+}), susceptibles de produire un coagulant en solution et de provoquer une coagulation floculation des polluants que l'on souhaite éliminer. L'électrolyse peut également coaguler les composés solubles oxydables ou réductibles contenus dans l'effluent (Mounir Bennajah, 2007). L'action directe d'un champ électrique sur une eau résiduaire permet de créer des conditions d'une bonne coagulation-floculation (Rovel, 1947). En effet, Le champ électrique crée un mouvement d'ions et de particules chargées. Cette action permet de rassembler les matières en suspension sous forme de floes qu'on élimine ensuite par un procédé physique classique (décantation, flottation, filtration) (Mohammad et coll., 2005 ; Mounir Bennajah, 2007).

Mollah *et al.* (2001) résumant ce processus comme suit:

- a) La formation des coagulants par l'oxydation électrolytique de métaux sacrificiels
- 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 floes.

Le procédé d'électrocoagulation peut être utilisé seul ou en série avec d'autres procédés dans une chaîne de traitement des eaux, (Zongo, 2009)

La figure suivante présente le principe du procédé avec des électrodes d'aluminium.

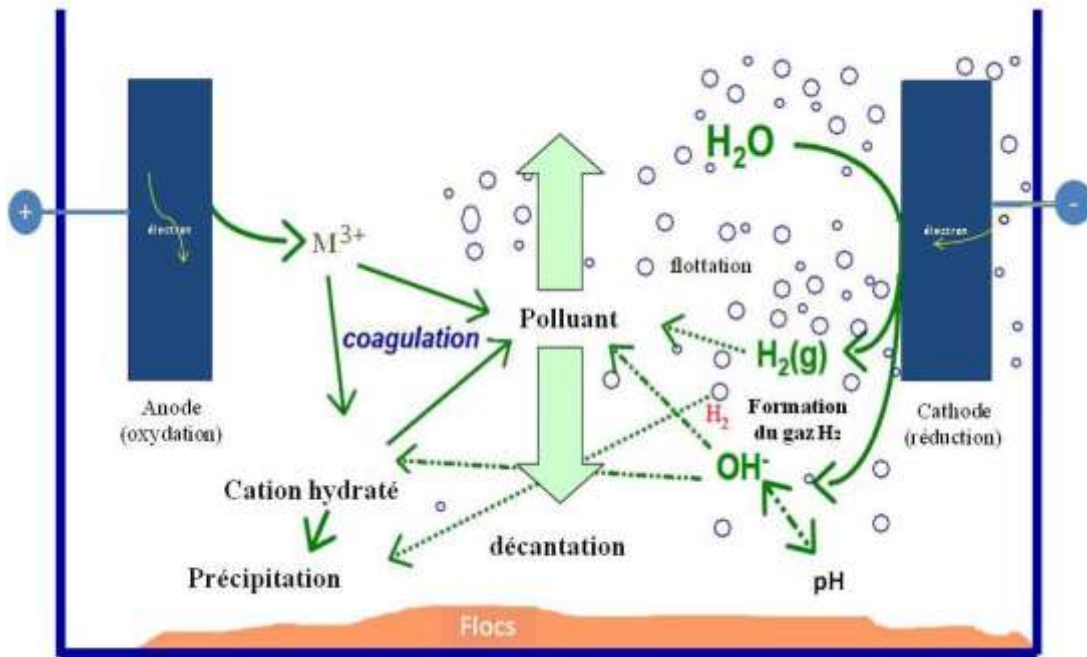


Figure 1 : Schéma du principe de l'électrocoagulation (Salim Zodi, 2012).

La *figure 1* 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 (Salim Zodi, 2012).

3- Les électrodes

Plusieurs électrodes ont été utilisées pour ce procédé. Il s'agit des électrodes en fer, aluminium, titane, plomb, acier inox, zinc, nickel...cependant les électrodes les plus couramment utilisés restent le fer et l'aluminium en raison de leurs résultats plus ou moins satisfaisants. Quelques exemples d'électrodes :

Tableau 1:Exemples d'électrodes

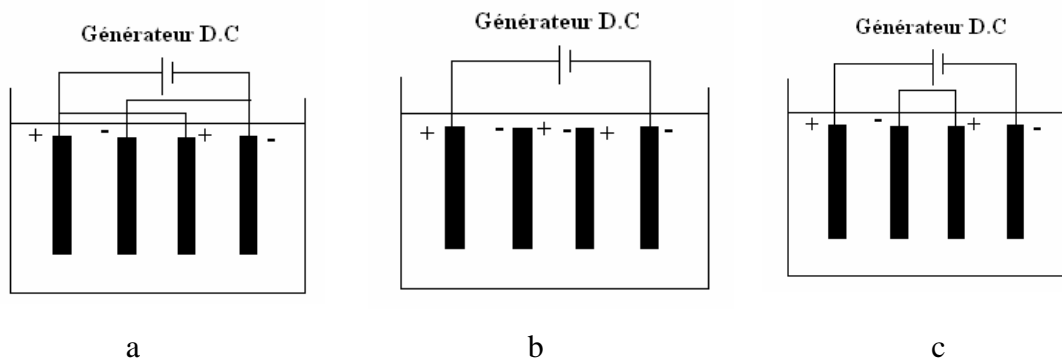
Electrodes utilisées	Références	Composition	Rendement	Types de polluants
Fe et Al	Kobyia <i>et al.</i> (2003)	Effluents textiles	98% abattement de turbidité, 77% DCO	DCO, MES, COT, Turbidité
Fe et Al	Drogui <i>et al.</i> (2007)	Effluent d'agro-industries	82 à 86% d'abattement de DCO	DCO, azote, germes pathogènes, turbidité
Al et Fe	Bebahani et al.2010	Eaux usées phosphatées	100% d'abattement de phosphate	phosphate
Fer	Bejankiwar (2002)	Eaux usées de manufacture de cigarettes, plus eaux domestiques	56% d'abattement DCO, 84% DBO	DBO, DCO, MES
Al	Gousmi et al.2016	Rejets pétroliers	83,52% DCO ; 99,59% Turbidité	DCO; Turbidité
Cu et Ti/IrO ₂	Seyf-Laye et al.2018	Eaux usées domestiques	99,46% Phosphore ; 56,11% DCO ; 58,37% N-NH ₄ ⁺	Phosphore; DCO ; N-NH ₄ ⁺ .

Les électrodes peuvent se présenter sous plusieurs formes planes, cylindriques, de boules, de sphères à lit fluidisé, de fil, de tige ou de tube. Cependant, les électrodes planes offrent un montage et un nettoyage faciles des plaques surtout lorsque la dimension du réacteur atteint une certaine taille. (Zongo, 2009).

3-1- Différents types de connexion.

Il existe trois types de connexions électriques entre les électrodes. Les cellules électrochimiques peuvent être montées en série ou en parallèle seules ou associées à d'autres

types de procédés tels que les méthodes biologiques, les filtres presses, des décanteurs ou d'autres méthodes physiques de traitement. On distingue trois modes de connexion électriques: le mode mono polaire en série, le mode bipolaire série et le mode mono-polaire en parallèle. La différence entre les trois modes se trouve dans la connexion entre les électrodes qui entraîne une différence des expressions des tensions et des intensités de courant dans les cellules (Zongo, 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 2 : différents types de connexion. (Mounir Bennajah, 2007)

3-2-Réactions aux électrodes

L'application de courant ou champ est indispensable au déclenchement d'une réaction électrochimique. Les électrodes les plus couramment utilisées en électrocoagulation, sont en aluminium ou en fer car ils possèdent des formes ioniques trivalentes. Il se produit plusieurs réactions à différentes électrodes. Les principales réactions qui se déroulent aux électrodes sont : (cas de l'aluminium, du fer et du cuivre)

- A l'anode :

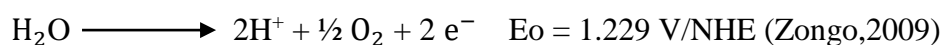
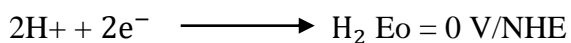
- L'oxydation du métal : $\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3 e^{-}$; $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2e^{-}$, et $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2e^{-}$,

- La formation de l'hydrogène : $2\text{Al} + 3\text{OH}^{-} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3/2 \text{H}_2 + 3 e^{-}$

- A la cathode

-la réduction de l'eau suivant l'équation : $\text{H}_2\text{O} + e^{-} \rightarrow 1/2 \text{H}_2 + \text{OH}^{-}$

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. Dans le cas de l'aluminium, on trouve une multitude de complexes anioniques et cationiques (Yilmaz et al. 2005). On peut distinguer:

Les mono complexes tel que $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$

Les poly complexes tel que $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Al}_2(\text{OH})^{5+}$, $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$.

Les espèces amorphes et très peu solubles telles que $\text{Al}(\text{OH})_3$, Al_2O_3

Les polymères (Can et al. 2006).

4- Principales lois d'électrolyse

4-1- 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 :

$$m = \frac{I t M}{nF}$$

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 ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$).

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

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

Si le modèle d'électrolyse comprend p électrodes, et est alimenté par un liquide ayant un débit Q_e , alors :

$$C = \frac{m(p - 1)}{Q_e}$$

Avec :

C : débit massique de métal dissous ($\text{kg}\cdot\text{h}/\text{m}^3$).

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

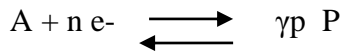
p : nombre d'électrodes.

m : quantité théorique de métal dissous (kg).

Si d'autres réactions électrochimiques se déroulent simultanément, le courant d'électrolyse n'est pas entièrement utilisé par la réaction d'oxydation.

4-2- Rendement faradique

Soit la réaction électrochimique :



Avec :

A : espèce oxydante.

P : espèce réductrice

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

γ_P : nombre de moles de P produites.

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

$$Q_0 = n \cdot N \cdot e_0 = nF$$

Avec :

N : nombre d'Avogadro ($6.022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$).

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

e_0 : la charge élémentaire ($1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

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

Le courant d'électrolyse est alors entièrement utilisé par cette réaction. Dans le cas où plusieurs réactions électrochimiques se produisent en même temps.

Différentes expressions du rendement peuvent être utilisées (Pouet, 1994) :

- Le rendement en courant ou rendement faradique φ_C

$$\varphi_C = \frac{\text{Quantité d'électricité nécessaire pour produire } \gamma_P \text{ moles de P}}{\text{quantité d'électricité réellement consommée pendant l'électrolyse}}$$

Soit

$$\varphi_C = \frac{I_{\text{théorique}} \cdot t}{I_{\text{consommée}} \cdot t}$$

- Le rendement énergétique RE défini par :

$$RE = \frac{\text{Energie minimale nécessaire pour produire } \gamma p \text{ moles de P}}{\text{Energie réellement consommée pendant l'électrolyse}}$$

Soit

$$RE = \frac{I_{\text{théorique}} \cdot E_{\text{Eq}}}{I_{\text{consommée}} \cdot E_{\text{App}}}$$

Avec :

E_{Eq} : Potentiel d'équilibre ($E_{\text{Eq}} = E_o(\text{anode}) - E_o(\text{cathode})$)

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

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

Le rapport $E_{\text{Eq}}/ E_{\text{App}}$ représentant le rendement des tensions RT, on peut aussi écrire le rendement énergétique comme $RE = \varphi_c \cdot RT$

4-3- Tension à appliquer aux bornes d'une cellule électrochimique

Lors d'une électrolyse, la différence de potentiel E_{app} qu'il faut réellement appliquer aux bornes de la cellule est constituée par la somme de plusieurs termes. La relation entre les différentes composantes de l'équation a été décrite de diverses manières par de nombreux auteurs (Chen et coll., 2002, Bard et Faulkner, 1983, Mouedhen et coll., 2007).

La tension de cellule U se décompose en différentes contributions:

1. Le potentiel d'équilibre réversible de l'anode, E_o, a .
2. La surtension d'activation à l'anode, ηA_a , qui est fonction de la densité de courant.
3. La surtension de diffusion à l'anode ηD_a , est le résultat de la différence de concentration de l'espèce A entre l'anode et l'électrolyte, due à la lenteur relative des phénomènes de diffusion convection.
4. La chute ohmique dans la masse de la solution, qui transforme une partie de l'énergie électrique fournie en chaleur, par effet joule.
5. La surtension de diffusion à la cathode ηD_c , générée par le gradient de concentration au voisinage de la cathode.
6. La surtension d'activation, ηE_c , de la réaction électrochimique se produisant à la cathode
7. Le potentiel d'équilibre réversible de la cathode, E_o, c

4-4- Les étapes de la réaction électrochimiques

Pour qu'une réaction soit thermodynamiquement possible, il faut :

- ✓ Dans le cas d'une oxydation, que le potentiel E_a soit supérieur à E_{AEQ} , potentiel d'équilibre électrochimique du couple redox considéré.
- ✓ Dans le cas d'une réduction, que le potentiel E_c soit inférieur à $E_{Céqu}$, potentiel d'équilibre électrochimique du couple redox considéré.

Cependant, si ces conditions sont nécessaires, elles ne sont pas suffisantes puisque les valeurs des potentiels n'apportent aucune indication concernant, en particulier, les cinétiques des réactions. Pour rendre compte de ces vitesses de réactions, il faut considérer les différentes étapes qui interviennent lors d'une réaction électrochimique.

La vitesse d'une réaction électrochimique est principalement fonction des processus de transfert de matière, de transfert électronique à la surface de l'électrode, des réactions chimiques qui précèdent ou suivent le transfert électronique et des autres réactions telles que l'adsorption et la désorption à la surface de l'électrode (Brett et coll., 1993, Bard et Faulkner, 1983, Vargel, 1999) par Bennajah.

5- Avantages et inconvénients du procédé

La technique de traitement la plus utilisée dans ces dernières années est l'EC. Elle présente des avantages et peu d'inconvénients. Quelques avantages du procédé sont :

- L'EC ne demande pas d'ajout de substances chimiques et donc pas d'impacts importants sur l'environnement,
- la quantité de boues et des composés chimiques produite reste faible
- le temps de traitement est réduit,
- L'EC permet l'élimination de certains composés tels que le chrome (Zongo et al. 2009 ;Heidmann et al. 2007), les nitrites, les sulfures, les cyanures, les sulfites (Muruganathan et al. 2004), et les ions fluor (Zuo et al. 2008) cité par Zongo, 2009

Cependant il présente aussi des inconvénients :

- Nécessité d'ajout d'électrolyte NaCl plus souvent, pour des effluents de faible conductivité ;
- L'utilisation de l'énergie électrique assez coûteuse et le prix coûteux des électrodes.
- L'EC ne permet pas de séparer des solutions parfaitement miscibles comme les mélanges eau-benzène ou eau-solvants oxygénés (Zongo, 2009).

6- Comparaison entre l'EC et la coagulation-floculation chimique

- L'EC se base sur une production in situ de cations métalliques par la dissolution d'électrodes sous l'effet d'un courant électrique.

- La coagulation chimique (CC) consiste à ajouter des sels de métaux trivalents ou d'autres substances chimiques dans les dispersions aqueuses afin d'assembler en agrégats plus gros les particules dispersés dans l'effluent.
- La coagulation chimique a des boues plus hydrophiles et moins denses qu'en EC.
- Le temps de traitement semble être plus contrôlable et réduit en EC qu'en CC.
- Une autre de leur ressemblance est que les deux méthodes ont des efficacités équivalentes au même pH (Canizarès et al.2008, 2009).
- Par ailleurs, l'EC et la CC ne permettent pas de séparer des solutions parfaitement miscibles comme les mélanges eaux-benzène ou eau-solvants oxygénés (Zongo, 2009).

7- Les espèces en solution

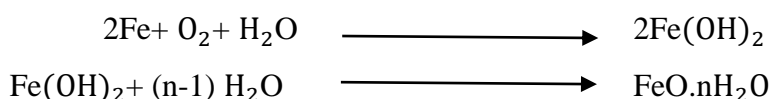
7-1- Chimie du fer

La plupart des formes de fer utilisées sont des alliages de fer obtenus par coulage ou trempe, ce qui leur confèrent une dureté conséquente par la présence d'une certaine quantité de carbone.

Selon les différents stades d'oxydation, le fer présente des couleurs différentes (Moreno *et al.* 2007) :

- L'oxyde ferreux hydraté ou l'hydroxyde ferreux

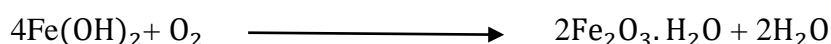
Ce composé consiste en une oxydation de fer en présence d'eau pour former dans un premier temps l'hydroxyde ferreux puis ensuite la réaction se poursuit en présence d'eau toujours pour donner l'oxyde ferreux hydraté. Les réactions sont les suivantes :



Les sels ferreux ont une couleur verte mais du fait de la présence de l'oxygène, l'oxyde prend une couleur verte très sombre.

- l'oxyde ferrique hydraté ou l'hydroxyde ferrique

A la surface extérieure soumise aussi à la corrosion, l'exposition à l'air par la présence d'oxygène convertit l'oxyde ferreux en oxyde ferrique selon la réaction suivante :

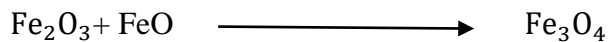


Cet oxyde est de couleur orange à tendance rouge-brune pouvant être très sombre. Il existe plusieurs formes d'oxydes ferriques, non magnétique $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ou magnétique $\delta\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

La forme α - possède une énergie libre de formation négative.

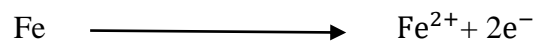
- L'oxyde magnétique hydraté ferreux-ferrique (magnétite)

La magnétite de fer est une forme intermédiaire des oxydes ferreux et ferrique qui forme une couche protectrice de couleur noire. La réaction est la suivante :



En électrocoagulation nous avons les réactions suivantes :

- Génération des ions métalliques
- A l'anode :

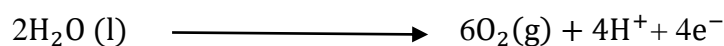


- Hydrolyse des ions métalliques et générations des hydroxydes métalliques et des polyhydroxydes. Cela a été souvent étudié et expliqué dans la coagulation dans le traitement des eaux. Les réactions sont les suivantes :

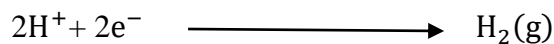


- Electrolyse de l'eau : l'électrolyse de l'eau se déroule en parallèle à l'anode et à la cathode, ce qui est à l'origine de la flottation des polluants par les bulles de gaz.

A l'anode:



A la cathode:



On pourrait penser que le dégagement d'oxygène à l'anode est responsable de l'oxydation du fer en magnétite et maghémite. Cette supposition est erronée. La formation de ces oxydes provient de la déshydratation des hydroxydes de fer et la formation de la rouille se passe à la surface de la boue en flottation. La formation de l'oxygène n'a pas été clairement mise en évidence durant l'électrocoagulation.

7-2-Les différents complexes de fer

Dans le cas du fer, on a les complexes tels que FeOH^{2+} ; $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^+$; $\text{Fe}(\text{OH})_2$; $\text{Fe}(\text{OH})_3$; $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$; $\text{FeO}(\text{OH})$; $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}$; $\text{Fe}_2(\text{OH})_4^{2+}$; (Solak et al. 2009). Ces espèces complexes jouent le rôle de coagulant. Ils s'adsorbent sur les particules et annulent ainsi les charges colloïdales ce qui conduit à déstabiliser l'émulsion et à la formation de précipités, puis de floccs facilement éliminables.

CHAPITRE II :


MATERIEL ET METHODES




CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

Ce chapitre présente le matériel et les méthodes utilisés pour réaliser l'étude du procédé d'électrocoagulation (EC). Le chapitre présentera aussi une description des méthodes d'analyses et des outils utilisés pour l'évaluation des performances du procédé. L'objectif de ce chapitre est d'étudier les paramètres influençant le fonctionnement de l'EC, tels que, le pH ; intensité de courant, le temps de traitement, la distance inter électrodes et la concentration de NaCl en étudiant l'élimination du phosphore.

Le **Tableau 2** résume les produits et matériels utilisés

Tableau 2:Produits et Matériels

Balance électronique	
-Générateur de courant continu (LODESTAR lp3005d)	
-Spectrophotomètre (GENESYS 10S UV-Vis)	
Electrode en fer	

<p>- Seringue en plastique</p>	
<p>- Cellule électrochimique</p>	
<p>-KH_2PO_4 -NaCl</p>	
<p>-Balance électronique (FA2004B)</p>	

1-Configuration du réacteur

1-1-Le réacteur électrochimique

C'est l'enceinte dans laquelle se déroulent les réactions électrochimiques concourant au traitement. Deux électrodes planes y sont placées entre lesquelles circule l'effluent à traiter. Les électrodes sont toutes de dimensions égales avec une longueur de 150 mm et une largeur de 47 mm. Plusieurs géométries de cellule existent dans la littérature mais cette configuration est la plus répandue dans l'industrie. En effet, cette géométrie d'électrodes permet d'avoir une mise en œuvre facile et est d'utilisation moins complexe de par sa facilité de nettoyage et de remplacement. L'épaisseur des plaques est négligeable.

Les électrodes sont placées dans un carter en plexiglas (*figure 4*) avec une distance inter électrode de 3 cm choisie faible pour limiter non seulement la chute ohmique mais suffisamment large pour éviter le colmatage. En plus cela a permis d'avoir une dissolution uniforme du métal. La connexion électrique est assurée par des vis filetées enfoncées dans chaque électrode. Comme le montre le schéma, les électrodes sont placées verticalement.

Pour cette étude, la cellule d'électrocoagulation (*figure 3*), composé de deux électrodes de fer (fer ordinaire) de forme plates de mêmes dimensions (150 mm × 47mm) plongées dans un volume de 350 mL, comporte deux électrodes, l'une servant de cathode et l'autre d'anode. La distance inter électrode varie de 1 à 3 cm. Cette cellule peut contenir quatre électrodes. Un courant continu est appliqué aux électrodes par un générateur (LODESTAR Ip3005d) de courant (5 A, 30 V).



Figure 3: Réacteur électrochimique



Figure 4: Dispositif d'électrocoagulation

1-2-Les électrodes utilisées

Les électrodes utilisées (fer, aluminium et cuivre) sont toutes de dimensions égales avec une longueur de 150 mm et une largeur de 47 mm. Le métal des électrodes peut être obtenu par récupération des déchets de fer, ce qui rend leur coût supportable pour un procédé de dépollution.

Les deux plaques parallèles et rectangulaires de fer, ont été préalablement traitées avec un papier abrasif au niveau de leur surface, dans le but d'homogénéiser celles-ci et d'éliminer les impuretés et les dépôts qui peuvent les contaminer. Les électrodes sont extraites du réacteur, après chaque manipulation d'électrocoagulation dans le but de les examiner, et de les nettoyer, étant donné que les résidus de décomposition des polluants peuvent se déposer sur leur surface.

Le nettoyage s'effectue avec une solution d'acide sulfurique de 0.1 N, permettant ainsi d'éliminer les dépôts des polluants pouvant former une couche résistante sur la surface.

Les électrodes d'aluminium et de cuivre ont été également utilisées, de même dimensions que celle du fer.

2- Description expérimentale

Le dispositif expérimental d'électrocoagulation est composé de deux électrodes de fer de formes plates de mêmes dimensions (150 mm × 47mm) plongées dans un réacteur de 450 mL. Le volume de liquide traité est de 350 mL. La surface immergée de chaque électrode est de 59,69 cm² et la distance (d) les séparant est de 3 cm. Ces deux paramètres seront maintenus constants durant les expérimentations jusqu'à la variation de la distance où d varie de 1, 2, 3 cm. Ces électrodes sont branchées aux bornes d'une alimentation en courant continu (générateur) dont la tension et l'intensité de courant maximales sont respectivement de 30V et 5 A.

Chaque manipulation dure 1h. Les prélèvements sont effectués à 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60 min, de même que les mesures de pH. Ceci permet de suivre l'évolution du traitement par le suivi de la quantité de polluants dans les différents prélèvements effectués au cours du temps et de s'assurer de la continuité du traitement par la tension et le pH. Ces échantillons sont ramenés à un pH convenable, par l'ajout d'une solution de H₂SO₄ dilué (1N), pour la précipitation des hydroxydes métalliques avec les impuretés adsorbées, responsables du traitement.

L'échantillonnage est réalisé en cours de manipulation à l'aide d'une seringue dans la zone clarifiée du milieu réactionnel. Le volume des échantillons est de 20 mL. Avant d'effectuer les analyses, ces échantillons sont filtrés afin d'éliminer les floccs non décantés.

Dans le but d'optimiser le traitement, le pH, l'intensité de courant, la concentration, la distance inter électrode et la conductivité sont les paramètres étudiés.

L'effet de pH a été étudié en variant le pH de la solution synthétique de 2, 4, 6, 8 et 10. La concentration initiale de cette solution est de 10 mg P /L. L'intensité de courant de même que la conductivité sont maintenues constantes ; 0,1 A et 0,5 g/L NaCl respectivement. Ces deux paramètres seront maintenus constants durant les expérimentations sauf dans le cas de l'effet de NaCl où l'expérience a été faite sans ajout de NaCl.

L'intensité de courant est variée de 0,1 ; 0,2 ; 0,25 ; 0,3 ; 0,35 A. Et la concentration initiale de la solution est de 15 mg P/L.

En vue d'optimiser le traitement, les concentrations initiales de la solution ont été variées de 15, 20 et 30 mg P /L. En suivant le même traitement que précédemment pour chaque concentration.

L'effet de la distance inter électrode a également été étudié. Les distances évaluées sont : 1 ; 2 et 3 cm.

Ce travail nous a permis de connaître l'effet de l'intensité de courant sur l'abattement du phosphore. Chaque prélèvement effectué donne l'évolution des différents paramètres. Cela permet également d'observer le comportement des électrodes.

La masse des électrodes est évaluée au début et à la fin de chaque expérience. Enfin chaque échantillon est ensuite analysé au spectromètre (Genesys 10s Uv-Vis).

2-1-Préparation des solutions

Une solution de stock de 50 mg P /L a été préparé en dissolvant dans une fiole de 100mL une masse de **219,7 mg** du dihydrogénophosphate (KH_2PO_4). Les différentes solutions sont ensuite préparées à partir de la solution de stock (10, 15, 20, 25 et 30 mg P /L) et ce, au début de chaque manipulation;

2-2-Mise en œuvre expérimentale

A partir de la solution du phosphore de concentration désirée, on prélève un volume de 350 mL dont on mesure le pH initial. A cette solution on ajoute 0,175g de NaCl ; l'ensemble est ensuite versé dans le réacteur. On installe les électrodes sur leur support et on teste la continuité du courant. On plonge les électrodes séparées entre elles d'une distance (1 ; 2 ; 3 cm) dans le réacteur, on déclenche simultanément le générateur de courant et le chronomètre.

Des prélèvements d'échantillons de la solution électrolysée sont effectués à des intervalles de temps réguliers et les pH finaux mesurés. (pH-mètre sartorius PB-10)

3-Protocole d'analyse

3-1-Choix de la longueur d'onde d'absorption

Les mesures de l'absorbance ont été effectuées à l'aide d'un spectrophotomètre (Genesys 10s Uv-Vis) avec des cuves en verre de 1 cm de trajet optique contenant la solution à analyser.

La longueur d'onde d'absorption optimale λ_{max} des orthophosphates est déterminée en réalisant un balayage entre 650 nm et 780 nm. Elle est obtenue à 700 nm. Les résultats sont consignés sur la *figure 5*.

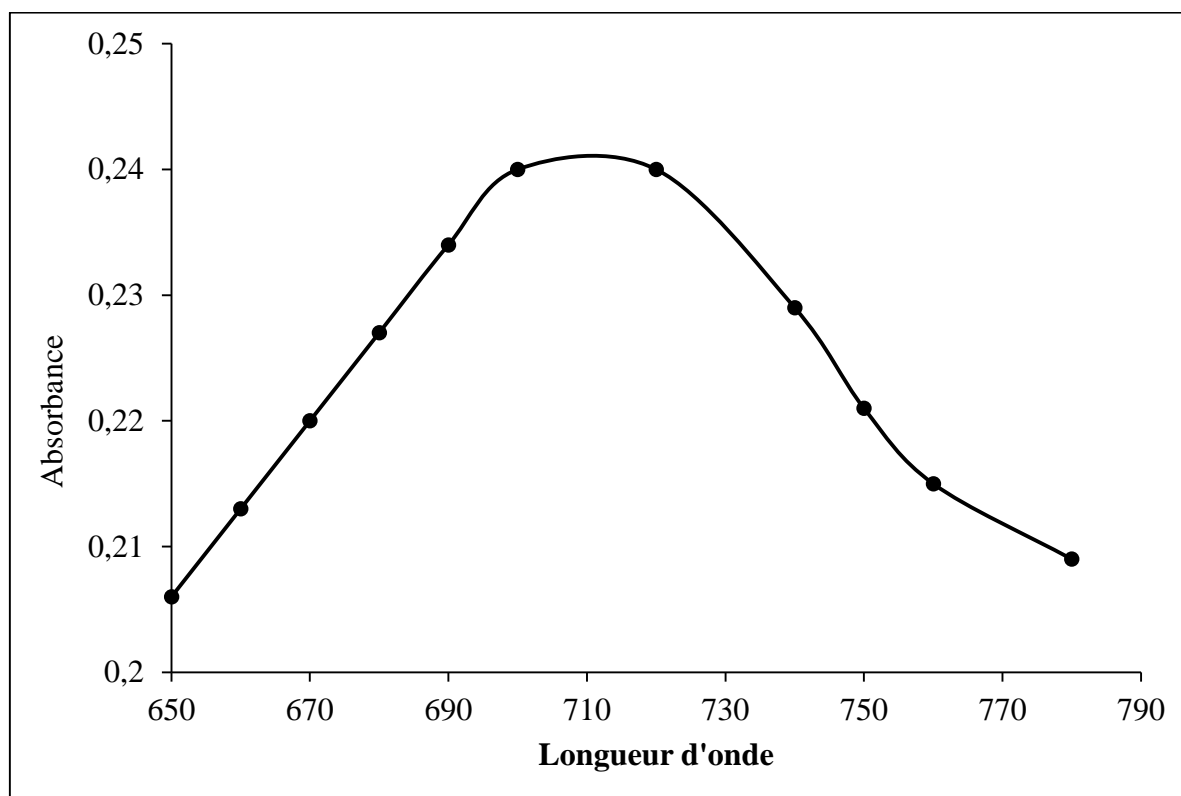


Figure 5: Variation de l'absorbance en fonction de la longueur d'onde

3-2-Etablissement de la courbe d'étalonnage du phosphore

Pour le tracé de la courbe d'étalonnage, nous avons mesuré l'absorbance des solutions de concentration allant de 0 à 1 mg/L P à $\lambda_{max} = 700$ nm. La figure III.4 ci-dessous donne l'absorbance (Abs) en fonction de la concentration (C) de la solution en phosphore.

La méthode utilisée pour analyser le phosphore est la méthode spectrométrique. Le principe est basé sur la réduction des ortho phosphates en complexe phosphomolybdique par l'acide ascorbique en milieu acide et en présence de molybdate d'ammonium. Il se développe une

coloration bleue susceptible d'un dosage spectrométrique. Certaines formes organiques pouvant être hydrolysées au cours de l'établissement de la coloration et donner des ortho phosphates, le développement de la coloration est accélérée par l'utilisation d'un catalyseur, le tartrate double d'antimoine et de potassium. Le *tableau 3* résume les différents étalons utilisés. La lecture s'effectue à la longueur d'onde de 700 nm (Rodier 2009).

Tableau 3: Tableau de la courbe d'étalonnage du phosphore

Numéro des fioles	T	I	II	III	IV	V
Solution étalon de phosphore à 1 mg/L (mL)	0	1	5	10	15	20
Eau déionisée (mL)	20	19	15	10	5	0
Correspondance en milligrammes de phosphore	0	0,05	0,25	0,5	0,75	1

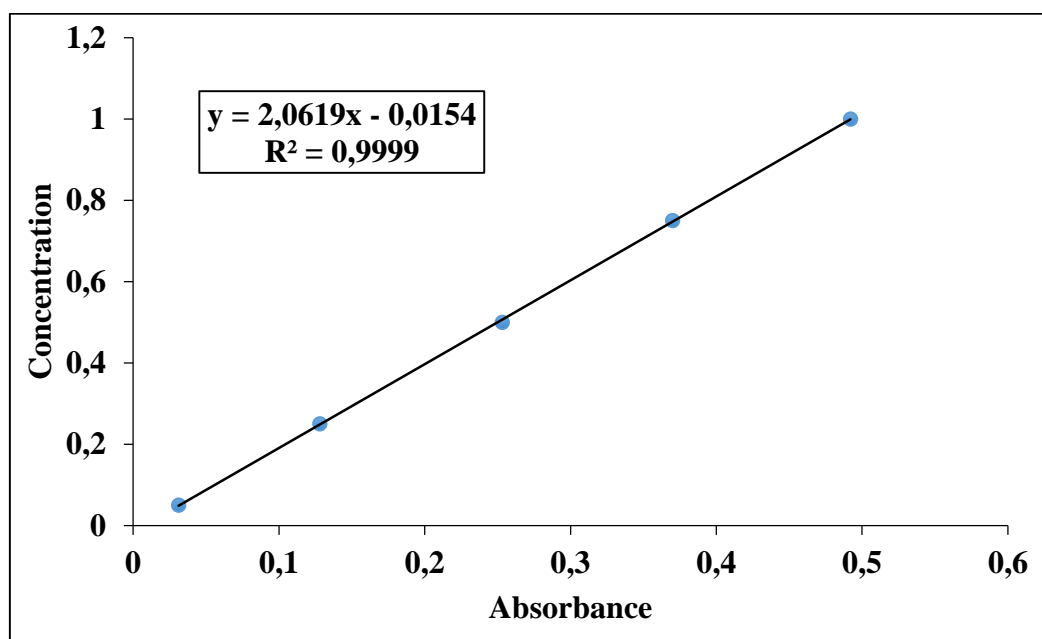


Figure 6: Courbe d'étalonnage du phosphore

3-3-Calcul du pourcentage d'élimination

Le rendement d'élimination de phosphore (%) est déterminé par la relation suivante :

$$P(\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Avec

C_i : Concentration initiale en P (mg/L)

C_f : Concentration finale en P (mg/L)

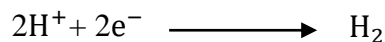
P : Pourcentage d'élimination (%)

CHAPITRE III :
ELIMINATION DU PHOSPHORE
PAR ELECTROCOAULATION

CHAPITRE III : TRAITEMENT DU PHOSPHORE PAR ELECTRICOAGULATION

Comme nous l'avons vu précédemment, l'électrocoagulation est une méthode physicochimique qui est influencé par les paramètres suivants : la conductivité ; La densité de courant ; le pH de la solution ; la concentration initiale; la distance inter- électrodes ; le nombre d'électrodes ; La nature des électrodes. Le travail est porté essentiellement sur l'électrode de fer, puis l'aluminium et le cuivre pour les expériences d'élimination du phosphore.

Dans toutes nos expériences avec les électrodes en fer et dans la solution au cours du traitement par EC, nous avons constaté aux premières minutes de la réaction, un trouble vert jaunâtre, peu de temps après, l'effluent se clarifiait avec formation de boues de couleur brun orangé (couleur de rouille). Les couleurs vert et brun-orangé peuvent probablement être attribuées à la présence des hydroxydes ferreux $\text{Fe}(\text{OH})_2$ et ferriques $\text{Fe}(\text{OH})_3$ dans la solution. Que ce soit avec des électrodes en fer ou en aluminium et lors du procédé d'électrocoagulation, nous avons remarqué un dégagement de bulles de gaz à la cathode. Ce sont des bulles d'hydrogène, qui sont produites suite à l'électrolyse de l'eau qui peut aussi induire de l'oxygène à l'anode (Mollah M.Y.A.et al., 2004).



1- Effet du pH

Le pH initial de l'effluent de l'eau usée est un facteur opératoire important. Il a une influence sur les performances du processus électrochimique. Pour démontrer son effet sur le rendement du traitement, le pH de l'effluent a été varié de la manière suivante pH = 2 ; 4 ; 6 ; 8 et 10 en ajoutant un acide (acide sulfurique) ou une base (la soude). Le temps de traitement électrochimique est fixé à 40 minutes avec un courant imposé de 0,3A et la distance entre les électrodes est de 3 cm. les résultats obtenus sont portés dans le **Tableau 4** et sont représentés sur la **Figure 7**.

Tableau 4 : Effet de pH sur l'élimination du phosphore en fonction du temps

pHi	Intensité de courant (A)	Co (mg/L P)	NaCl (g/L)	d (Cm)	pHf	Perte de masse (g)	Pourcentage d'élimination (%)
2	0,1	10	0,5	3	3,26	0,1659	36,72
4					11,15	0,1232	81,05
6					11,21	0,1525	90,56
8					11,08	0,1567	71,28
10					11	0,1376	61,20

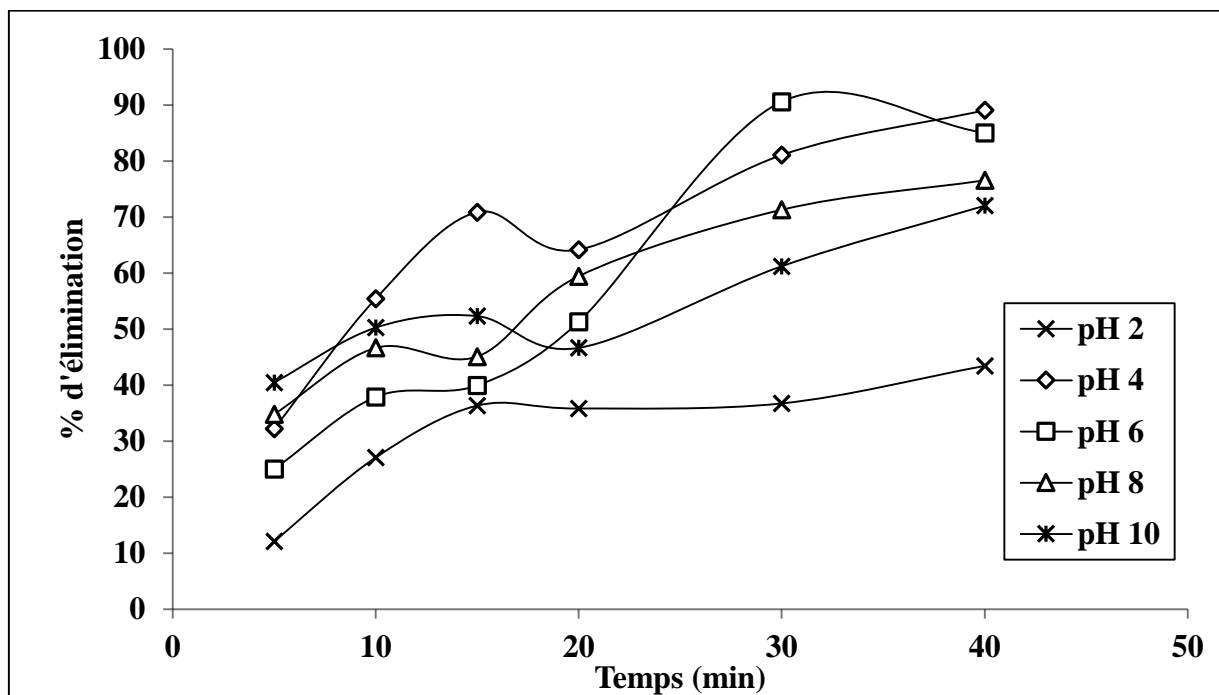


Figure 7: Effet de pH sur l'élimination du phosphore en fonction du temps avec les électrodes de fer

La **Figure 7** montre l'abattement du phosphore en fonction du temps pour différentes valeurs de pH. On remarque une relation importante du traitement avec le pH initial. Le maximum d'élimination (90,56%) est observé à pH = 6 pour 30 min de traitement. Cette importante élimination s'observe pour les pH 4 et 6 (proche de la neutralité) et baisse pour les pH supérieur à la neutralité (8 et 10).

La **Figure 8** montre le pourcentage d'élimination du phosphore en fonction du pH initial pour 30 min de traitement.

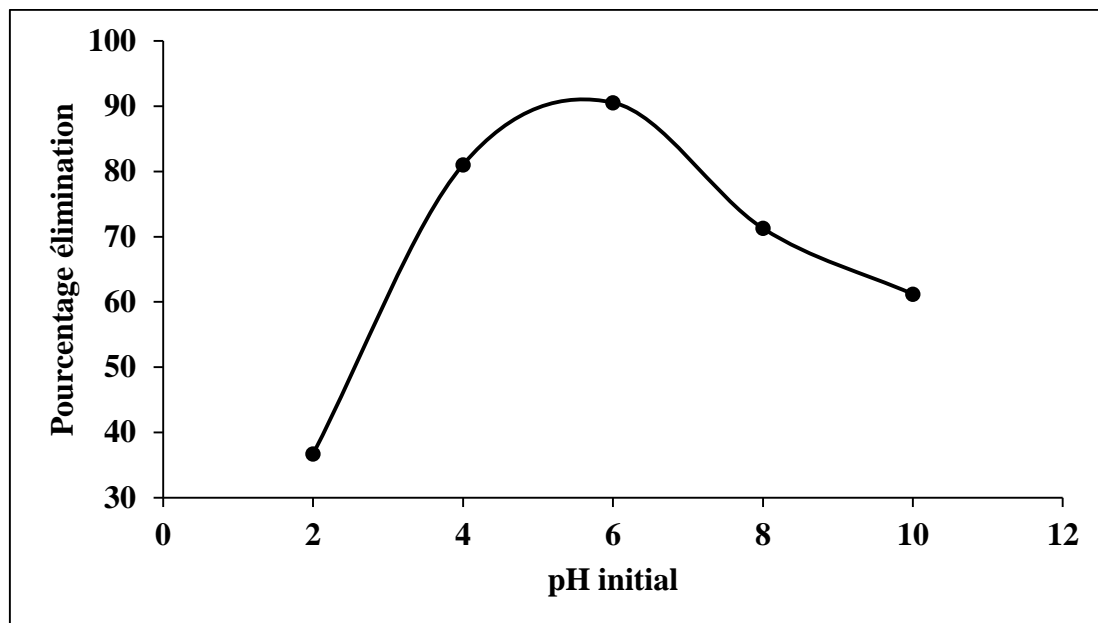


Figure 8: Variation du pourcentage d'élimination du phosphore en fonction du pH initial

L'élimination maximale est obtenue à pH=6. Cet effet de pH sur le processus s'explique par la prédominance d'oxyde de fer $Fe(OH)_2$ un bon agent adsorbant dans le milieu réactionnel. Ainsi, lorsque le pH initial est compris dans l'intervalle 5 à 8,5 ; les hydroxydes de fer se forment efficacement (Pallier 2008). Il n'est plus nécessaire de réguler le pH de la solution. Plusieurs auteurs ont enregistré des pourcentages aussi élevés avec les électrodes en fer dans des gammes semblables entre 5-7 ; avec des pH initiaux de 7 par Bektas et al, 2004 et 6 par Vasudevan et al, 2009. Il apparaît alors qu'à ces pH, la majorité des complexes de fer (coagulants) sont formés et ce sont les pH optima pour l'électrocoagulation dans ce cas. Cependant des pourcentages aussi importants en 40 min avec les électrodes en fer pour un $pH_i = 3$ ont été obtenus par Irdemez et al., 2006 ; Behbahani, M et al., 2010 ; Kobyas et al., 2010. Au cours du traitement, on constate l'augmentation du pH jusqu'au pH basique. La **Figure 9** montre l'évolution du pH final en fonction du pH initial. Cette augmentation est due à la production d'ions OH^- dans le milieu par réduction de l'eau à la cathode (Pallier, 2008).

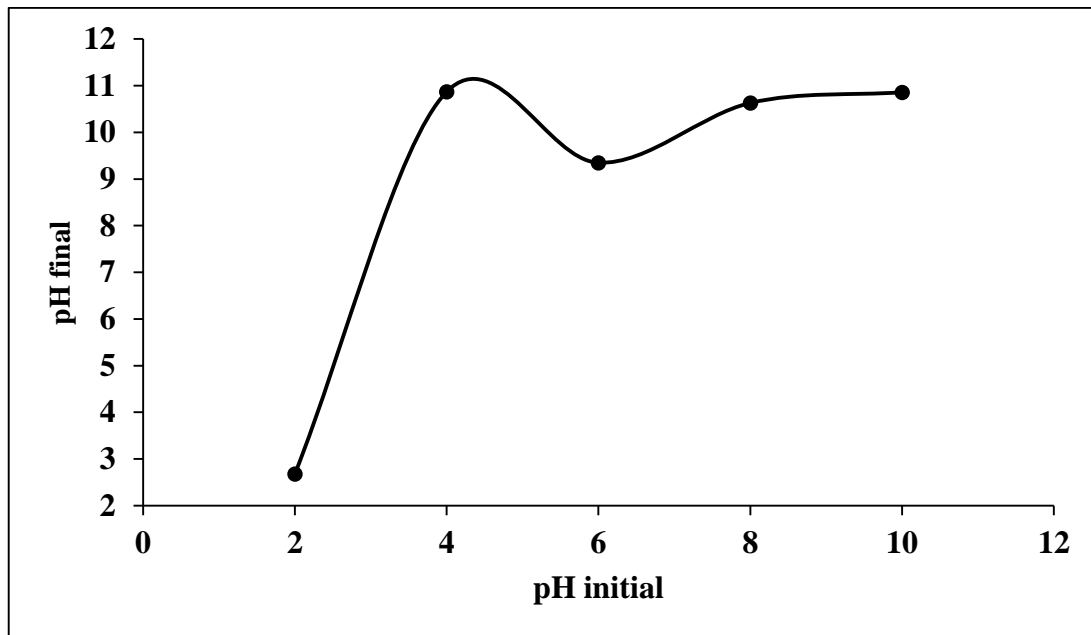


Figure 9: Variation du pH en fonction du pH initial

2- Effet de l'intensité de courant

Dans le processus d'électrocoagulation, l'intensité de courant est un paramètre critique, car c'est le seul paramètre opératoire qui peut être directement contrôlé. Il a été suggéré que l'intensité de courant détermine directement le taux de génération de bulles et le dosage de coagulant. Lorsque la densité de courant augmente, le temps de traitement diminue en raison de la forte dissolution des électrodes. Il en résulte donc davantage, de déstabilisation des particules du polluant (Bennajah, 2007).

Pour étudier l'effet de l'intensité de courant sur la réduction du phosphore, une série d'expériences a été effectuée. L'intensité du courant a été variée de 0,1 à 0,35 A et les paramètres suivants ont été maintenus constants : la distance inter-électrode $d=3$ cm, la concentration de 15 mg/L P en solution, le temps de l'EC = 1h.

La **Figure 10** montre l'effet de l'intensité du courant sur la réduction du taux de phosphore pendant une heure de traitement. Les résultats sont répertoriés dans le **Tableau 5**.

Tableau 5 : Effet de l'intensité du courant sur l'élimination du phosphore en fonction du temps

Intensité de courant	pHi	Co (mg/L P)	NaCl (g/L)	d (Cm)	pHf	Perte de masse (g)	Pourcentage d'élimination (%)
0,10	5,86	15	0,5	3	10,46	0,1438	89,17
0,20	5,72				11,81	0,2535	98,18
0,30	5,88				11,7	0,3865	100
0,35	5,51				11,66	0,4185	100

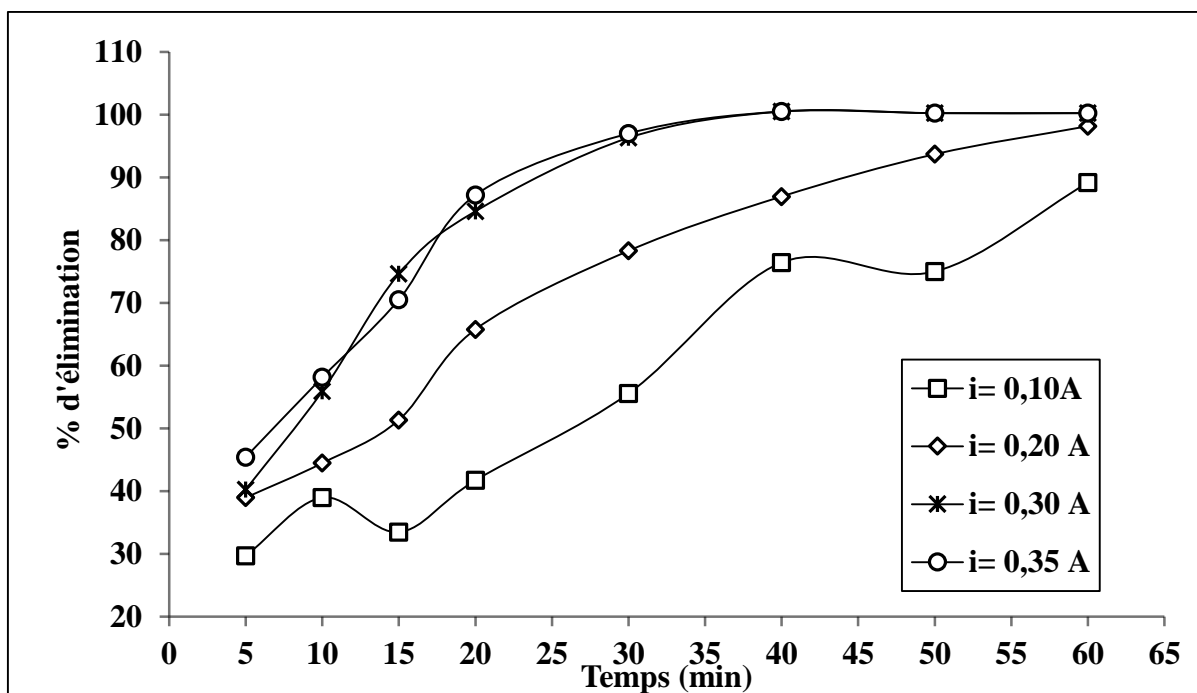


Figure 10: Effet de l'intensité du courant sur l'élimination du phosphore en fonction du temps avec les électrodes de fer

La *Figure 10* montre qu'à plus faible intensité du courant 0,10 A, seulement 89,17% du phosphore a été éliminé en 1h, contrairement à l'intensité du courant la plus élevée 0,35 A, on a une réduction total (100 %) du phosphore déjà à partir de 40 min. Cet écart peut être expliqué par la loi de FARADAY donc une augmentation de l'intensité de courant implique une augmentation de la quantité du coagulant (Fe^{3+}) produite par la dissolution de l'anode en fer. En effet, la quantité de coagulant produite à un temps fixe, dans la cellule d'électrocoagulation est liée au volume de la solution. Donc la présence du coagulant en solution contribue à une augmentation d'efficacité de réduction du phosphore. Les résultats

obtenus ont prouvé que l'augmentation de l'intensité de courant conduit à améliorer l'efficacité de traitement. Cela permet également de réduire le temps de contact du traitement. Selon les expériences, une intensité de courant de 0,3 A semble être suffisante pour une meilleure floculation électrolytique et par un maximum de réduction de phosphore de 100 % à partir de 40 min. Cette intensité sera maintenue pour la suite des expériences. La figure IV-2b montre l'évolution de l'élimination en fonction des intensités.

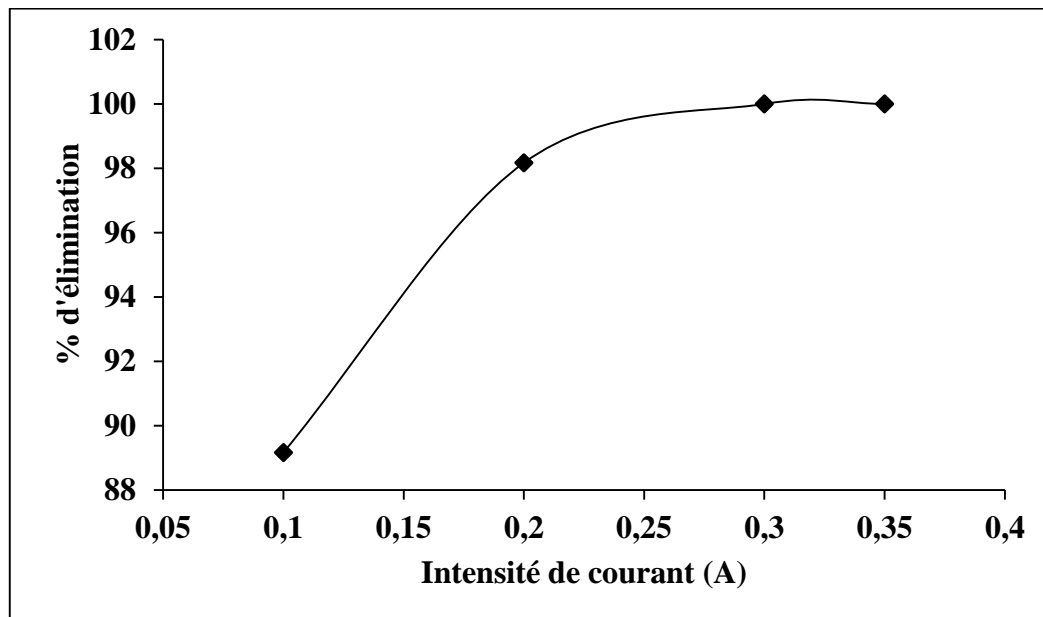


Figure 11: Variation des taux d'élimination de phosphore en fonction de l'intensité de courant avec les électrodes de fer

D'après la *figure 11*, on constate que, pour l'intensité de courant variant entre 0,3 A et 0,35 A, le pourcentage d'élimination reste constante (100%). Ce qui justifie toujours le choix de 0,3A comme intensité seuil de courant pour laquelle le maximum d'élimination est atteint.

3- Effet de concentration initiale en Phosphore

Pour trouver la concentration initiale C_0 optimale, nous avons effectué plusieurs essais à différentes concentrations. Ces essais sont conduits dans les conditions optimales d'intensité de courant (0,3 A). Les concentrations étudiées sont les suivantes : 15, 20, et 30 mg/L P.

La *figure 12* et le *tableau 6* montrent l'effet de la concentration initiale C_0 sur la réduction du taux de phosphore pendant une heure de traitement.

Tableau 6 :Effet de la concentration initiale sur l'élimination du phosphore en fonction du temps

Co (mg/L P)	pHi	Intensité de courant (A)	NaCl (g/L)	d (Cm)	pHf	Perte de masse (g)	Pourcentage d'élimination (%)
15	5,88	0,3	0,5	3	11,70	0,3865	100
20	5,47				11,70	0,3324	100
30	6,61				11,77	0,3247	99,96

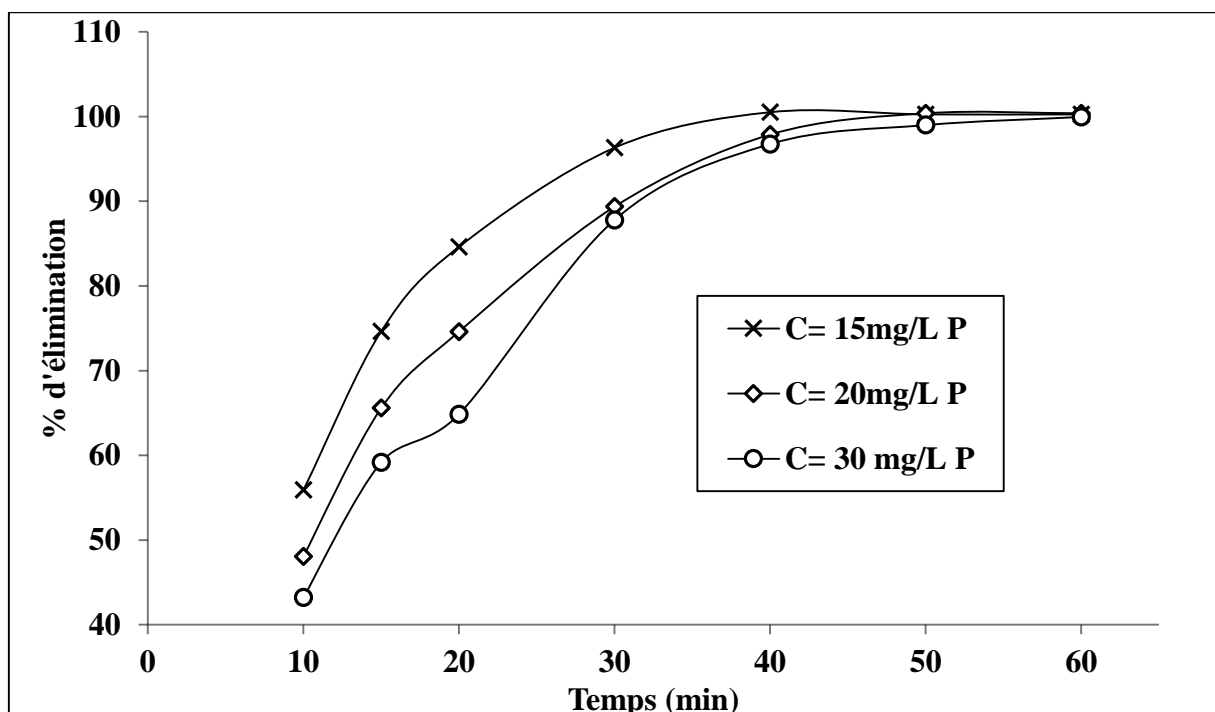


Figure 12:Effet de la concentration initiale sur l'élimination du phosphore en fonction du temps avec les électrodes de fer

Les résultats trouvés montrent que l'augmentation de la concentration initiale conduit à la diminution du rendement de l'EC. Pour une concentration $C_0 = 15 \text{ mg/L}$, nous avons enregistré un rendement d'environ 100 % et le palier est atteint au bout de 40 min. En ce qui concerne les concentrations 20 mg/L P et 30 mg/L P, les rendements de 97,87% et 96,75% sont atteints respectivement. La limitation de la capacité d'adsorption des floes d'hydroxyde métalliques à des concentrations de phosphore élevées explique ce phénomène Behbahani, M. et al., 2010.

Ainsi est-il, le traitement par électrocoagulation s'avère très efficace et aboutit à des taux d'élimination des polluants dépassant les 98 % pour les fortes concentrations (30 mg/L P) et même des taux d'élimination atteignant les 100 % d'élimination sont obtenus pour les moyennes et faibles concentrations (15 mg/L P et 20 mg/L P).

4- La distance inter électrode

Parmi les paramètres influençant l'électrocoagulation, la distance inter-électrode. Pour exprimer son effet sur le procédé et sur le pourcentage d'élimination du phosphore, on l'a variée pour $d=1\text{cm}$ $d=2$ et $d=3\text{cm}$. Nous avons fixé l'intensité de courant à 0,3 A pour une durée de traitement de 1h. L'effet de la distance inter-électrode sur le pourcentage d'élimination du phosphore est donné par le *tableau 7* et la *figure 13* :

Tableau 7 : Effet de la distance inter-électrode sur l'élimination du phosphore en fonction du temps

d (Cm)	Co (mg/L P)	pHi	Intensité de courant (A)	NaCl (g/L)	pHf	Perte de masse (g)	Pourcentage d'élimination (%)
01	15	5,43	0,3	0,5	11,80	0,3332	100
02		5,48			11,28	0,3377	100
03		5,88			11,70	0,3865	100

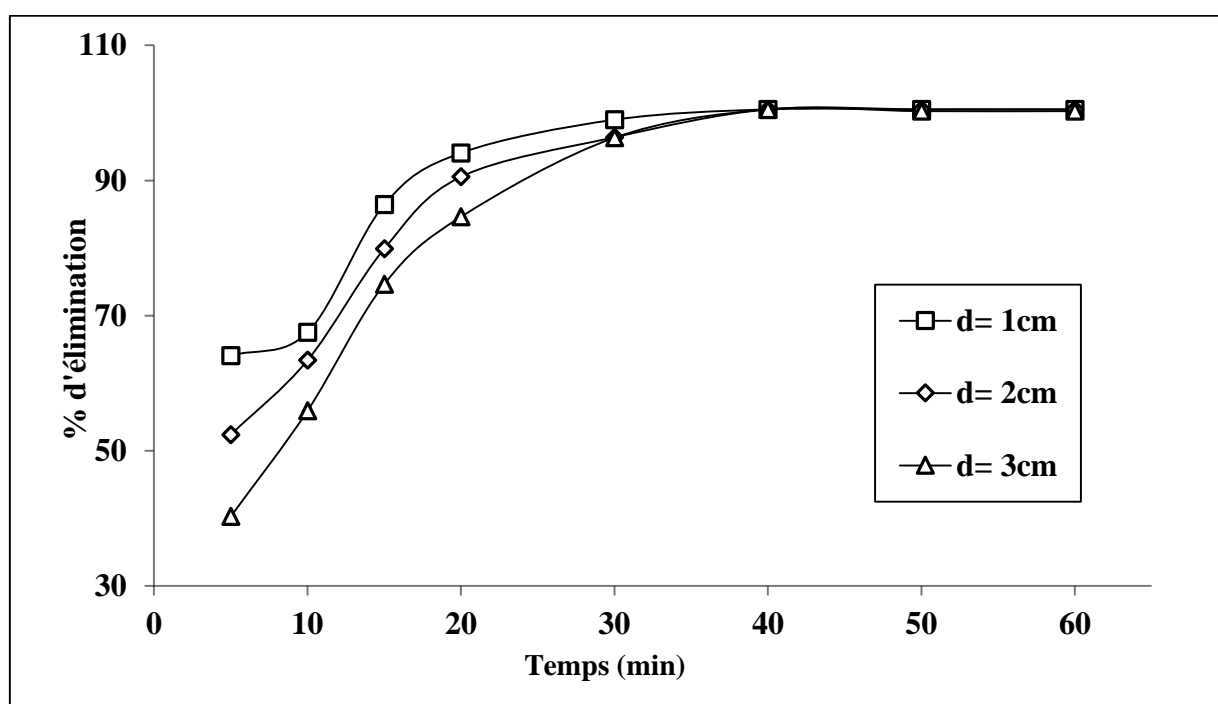


Figure 13: Effet de la distance inter-électrode sur l'élimination du phosphore en fonction du temps avec les électrodes de fer

La *figure 13* résume l'effet de la distance inter-électrodes sur l'efficacité de traitement du phosphore en fonction du temps pour différentes distances inter-électrodes. On remarque une proportionnalité inverse entre la distance et le rendement, du fait que ce dernier augmente avec la diminution de la distance.

Lorsqu'on augmente la distance de 1 cm à 3 cm le taux d'élimination diminue de 98,99% à 96,32 % en 30 min et passe à 100% à partir de 40min.

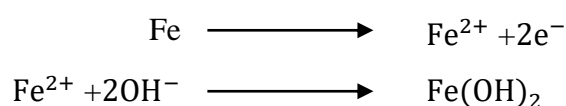
Ce résultat peut être expliqué par le fait que la résistance Ohmique est proportionnelle à la résistance électrolytique, comme il est montré dans l'équation suivante

$$RI = \frac{d}{kS} * I$$

- R: résistance électrolytique.
- d : distance inter électrode en cm.
- S : surface active des électrodes en cm².
- k : conductivité de la solution en S/cm.
- I : intensité du courant en A.

Ainsi d'après la *Figure 13*, on conclue que la distance optimale entre les électrodes est de 1 cm. Cependant, un espacement d'électrodes inférieur à 1cm, nuit l'efficacité d'enlèvement du phosphore, parce que les ions métalliques (ions de fer dans ce cas précis) ne peuvent entrer en contact avec les polluants phosphorés (Corrine Proux, 2008).

Lorsque la distance est grande les ions en solution mettent plus de temps dans leurs déplacements ce qui diminue la production d'hydroxydes de fer responsables de la formation des floes.



D'après les travaux de Yu et al. 2005, il est également démontré que, plus l'espacement entre les électrodes est accru, plus la consommation énergétique est importante.

5- Effet de NaCl

L'augmentation de la conductivité par l'ajout de chlorure de sodium est connue pour réduire la tension U entre les électrodes à une densité de courant constante, en raison de la diminution de la résistance de l'eau polluée (Edeline F. 1996 ; Bayramoglu M. et al., 2004). La

consommation énergétique, qui est proportionnelle à la tension appliquée entre électrodes ($E = U.I.t / V$), devrait donc diminuer. Le choix du chlorure de sodium découle du fait que les ions chlorures réduisent de manière significative les effets indésirables d'autres anions (X. Chen et al., 2002).

Ainsi, l'influence du sel a été étudiée en faisant varier sa concentration (0g/L et 0,5g/L) en milieu réactionnel ; les autres paramètres ont été maintenus constants. Les résultats obtenus sont représentés par le *tableau 8* et par la *figure 14*.

Tableau 8 : Effet de NaCl sur l'élimination du phosphore en fonction du temps

NaCl (g/L)	pHi	Intensité de courant (A)	Co (mg/L P)	d (Cm)	pHf	Perte de masse (g)	Pourcentage d'élimination (%)
0	6,33	0,3	15	3	12,5		83,41
0,5	5,88				11,7	0,3865	100

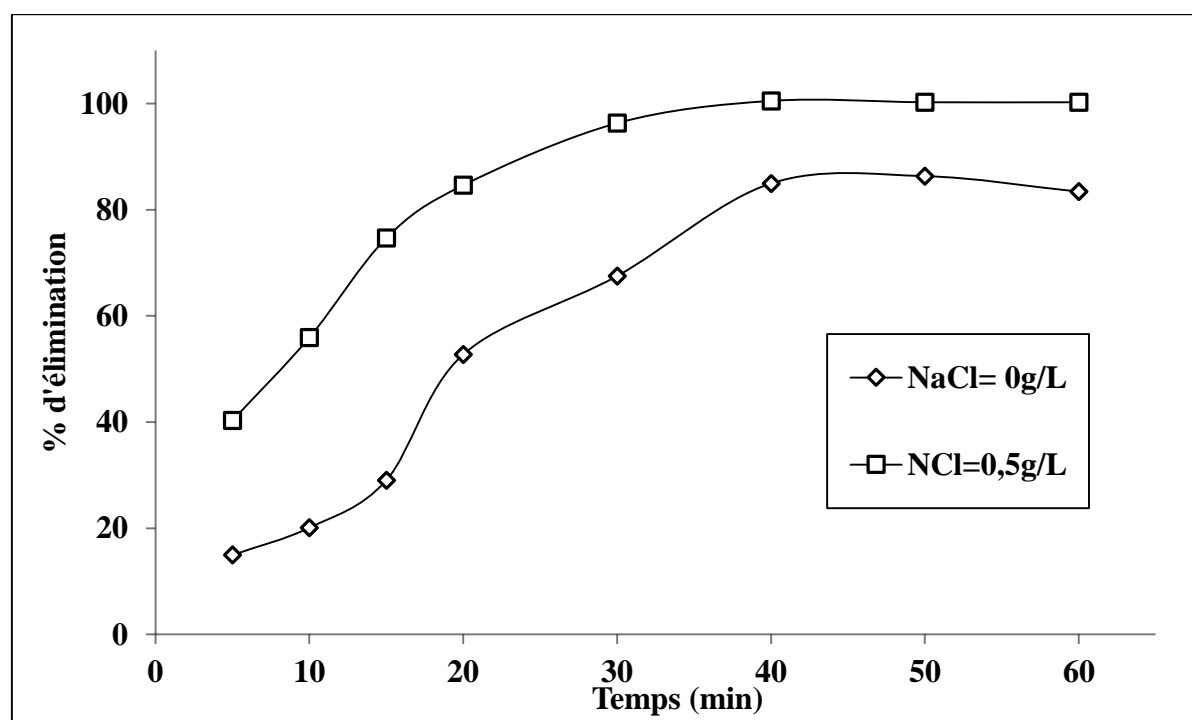


Figure 14: Effet de NaCl sur l'élimination du phosphore en fonction du temps

D'après la *figure 14*, on constate une nette différence de pourcentage d'élimination entre les deux courbes. Ce qui montre directement leur impact sur les conditions opératoires. Dans les

mêmes conditions, on obtient une élimination totale en 40 minutes avec NaCl (100%) que sans NaCl (84,96%). Nous en déduisons que l'élimination du phosphore augmente avec la conductivité.

Des effets similaires de l'amélioration de l'élimination du phosphore des effluents par augmentation de la conductivité ont été rapportés par différents auteurs (D. Duc Nguyen et al., 2016) qui affirment qu'une conductivité élevée est favorable pour une haute performance du procédé d'électrocoagulation.

Pendant le processus de l'EC, il se produit également du chlore. Les réactions se produiront à la surface de l'anode pour générer des produits chlorés (Cl_2 , HOCl , ClO^-), de puissants oxydants, dans la solution (Awad and Galwa, 2005). Aussi la présence de NaCl diminue la taille des bulles de gaz d'hydrogène ce qui a un effet sur la vitesse ascensionnelle des bulles. Celle-ci reste faible quand la taille des bulles diminue. En effet la probabilité de collision des bulles avec les polluants augmente, et par conséquent l'élimination également. Ces auteurs indiquent que les microbulles d'hydrogène sont chargées positivement et elles peuvent neutraliser les polluants (Marrucci G et Al.1967 ; Oliveira R.C.G. et Al.1999 ; Strickland J.R. 1980).

6- Effet du temps de contact

L'étude du paramètre temps d'électrolyse est très importante. Afin de déterminer le temps d'électrolyse optimale, nous avons suivi l'évolution du rendement d'élimination du phosphore en fonction du temps.

Les *figures 11 ; 12 ; 13 et 14* montrent l'évolution de l'élimination de phosphore de l'effluent traité avec les électrodes de fer dans le temps.

Nous constatons que le pourcentage d'élimination de phosphore augmente au cours du temps. Plus le temps de contact augmente, plus le pourcentage d'élimination augmente. Cette augmentation est d'autant plus rapide que l'intensité de courant est élevée (*figure 11*).

Des résultats trouvés et illustrés dans les *figures 11 ; 12 ; 13 et 14*, nous observons une évolution progressive du pourcentage d'élimination de phosphore en fonction du temps jusqu'à atteindre le palier (100%) au bout de 40 min de temps de contact.

7- Effet de la nature des électrodes

Dans cette manipulation, nous avons étudié l'efficacité du traitement vis-à-vis des électrodes. Trois électrodes ont été mises à l'étude. Il s'agit des électrodes d'aluminium, de fer et de cuivre. Les conditions opératoires choisies pour cette comparaison sont : la concentration

initiale (Co) en phosphore de la solution traitée est de 30 mg/L P, la distance inter électrodes de 3 cm et l'intensité de courant i est fixée à 0,3A. Les courbes représentant le pourcentage en fonction du temps d'électrolyse sont données dans la *figure 15* ci-dessous :

Tableau 9 : Effet de la nature des électrodes sur l'élimination du phosphore en fonction du temps

Electrodes	pHi	Intensité de courant (A)	Co (mg/L P)	NaCl (g/L)	d (Cm)	pHf	Perte de masse (g)	Pourcentage d'élimination (%)
Aluminium	6,61	0,3	30	0,5	3	9,42	0,1066	100
Fer	5,37					11,77	0,3247	100
Cuivre	6,63					11,93	0,2497	93,89

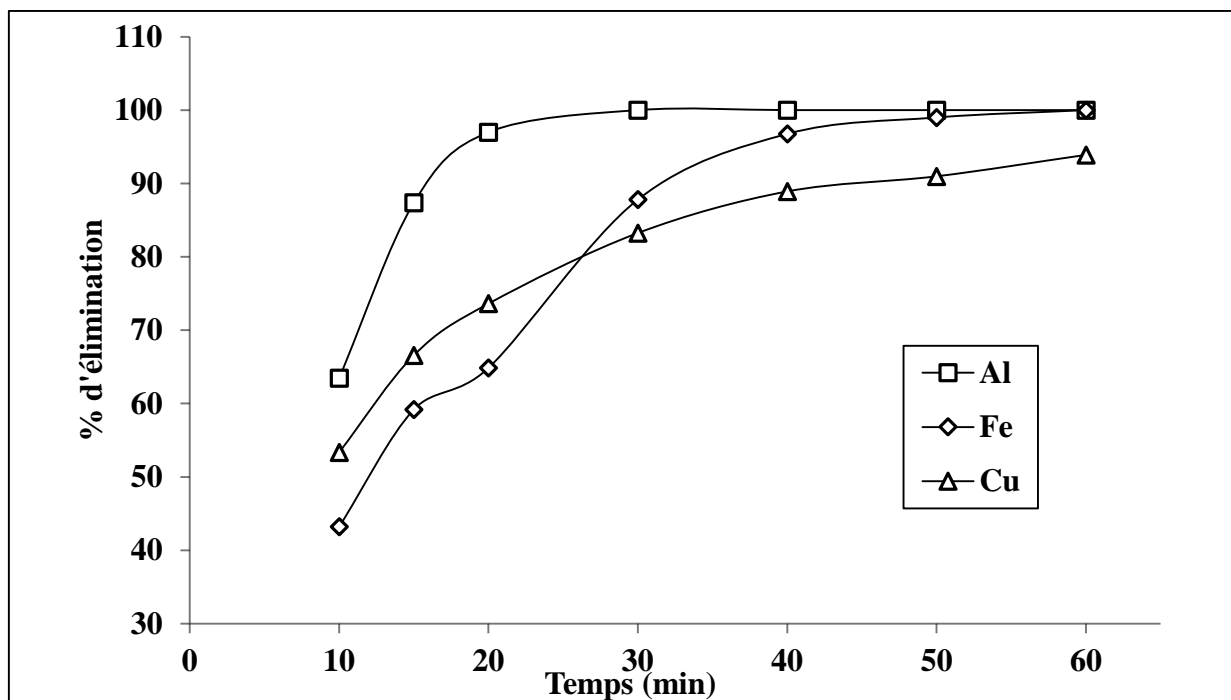


Figure 15: Effet de la nature des électrodes sur l'élimination du phosphore en fonction du temps.

D'après les résultats obtenus, on remarque que les pourcentages d'élimination obtenus après 40 min sont de 88,91 %, 96,75 % et 100% pour le cuivre, le fer et l'aluminium respectivement. Nous en déduisons alors que l'aluminium est plus adapté dans ce cas. Irdemez *et al.* 2006 également a rapporté un abattement de 100% avec des électrodes d'aluminium. De plus l'aluminium est moins coûteux que le cuivre et il est présent en grande quantité comparé au cuivre.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce travail avait pour objectif l'étude de l'élimination du phosphore des eaux usées par la technique d'électrocoagulation (EC). Ainsi, notre recherche a comporté deux parties.

La première s'est axée sur l'étude de l'effet de pH ; de l'intensité de courant ; de la concentration initial de polluant ; la densité de courant et du temps de contact sur l'élimination du phosphore. Tandis que, la deuxième s'est axée à l'étude de l'influence de la nature des électrodes sur les performances de la technique d'EC.

L'évaluation des paramètres opératoires sur le procédé d'EC a permis de conclure que l'élimination du phosphore est totale pour 15 mg/L avec une intensité de courant de 0,3 A pendant 40 min. Le pH optimal se situe entre 5 et 7. La distance inter-électrode est de l'ordre de 1 cm. Quant aux électrodes, le traitement avec les électrodes d'aluminium et de fer sont plus efficaces que celui du cuivre.

A titre de perspective, d'autres travaux peuvent être mené à savoir ,l'étude de l'influence de certains polluants (DCO, ammonium, nitrate, nitrite) sur le traitement du phosphore; du nombre et de la position (horizontale et verticale) ainsi que du mode de connexion des électrodes ; de la caractérisation de la boue formée lors du traitement par EC et enfin l'étude de la technique en mode continu (effet de la recirculation de l'eau sur le traitement du phosphore).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Alfa-Sika Mande Seyf-Laye, Tchakala Ibrahim, Dougna Akpénè, Amenuvevega, Djaneye-Boundjou Gbandi, Bawa L. Moctar and Chen Honghan, Investigation of different electrodes in electrocoagulation of domestic wastewater treatment (2018), *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology* 50-54.
- [2] Ameziane Nour-eddine, Khenoussi Abdelaziz, Benaabidate Lahcen, (2013). Effet de l'épuration par électrocoagulation sur la pollution des effluents de l'hôpital Mohamed V de Meknès ; *European Scientific Journal* December 2013, edition vol.9, No.36 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e- ISSN 1857- 7431.
- [3] Ayraud V, (2005). Détermination du temps de résidence des eaux souterraines : application au transfert d'azote dans les aquifères fracturés hétérogènes. Thèse de doctorat ; Université de Rennes 1 en science de la terre.
- [4] Bayramoglu M., Kobya M., Can O.T., Sozbir M. (2004). Operating cost analysis of Electrocoagulation of textile dye wastewater. *Separation and Purification Technology*, 117-125.
- [5] Behbahani, M., Alavi Moghaddam, M. R. and Arami, M., A Comparison Between Aluminum and Iron Electrodes on Removal of Phosphate from Aqueous Solutions by Electrocoagulation Process (2011). *Int. J. Environ. Res.*, 5(2):403-412, Spring 2011 ISSN: 1735-6865.
- [6] Bektas N., Akbulut H., Inan H., Dimogolo A. Removal phosphate from aqueous solutions by electrocoagulation. *J. Hazard. Mater*, 106(2-3):101-105, 2004.
- [7] D. Duc Nguyen, H. Hao Ngo, W. Guo, T. Thanh Nguyen, SoonW. Chang, A. Jang, Yong S. Yoon (2016). Can electrocoagulation process be an appropriate technology for phosphorus removal from municipal wastewater? *Science of the Total Environment* 563–564 (2016) 549-556.
- [8] Edeline F. (1996). L'épuration physico- chimique des eaux. Editions Cebedoc, Liège.
- [9] Franck Yovo, Evaluation du potentiel épuratoire de *Thalia geniculata* en vue de la mise en place d'un système autonome de traitement des eaux grises du quartier AGLA, (2017). Thèse de doctorat ; Université d'Abomey-Calavi.
- [10] Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 199-210.

- [11] Hanafi, F., Sadif, N., Assobhei, O. & Mountadar, M. (2009). Traitement des margines par électrocoagulation avec des électrodes plates en aluminium. *Revue des sciences de l'eau*, 22 (4), 473–485. doi : 10.7202/038326ar
- [12] Inoussa Zongo, (2009). Etude expérimentale et théorique du procédé d'électrocoagulation: application au traitement de deux effluents textiles et d'un effluent simulé de tannerie, thèse de doctorat ; Université de Lorraine.
- [13] Irdemez S., Demircioglu N., Yildiz Y.S., et al. The effects of current density and phosphate concentration on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation using aluminum and iron plate electrodes. *Sep. Purif. Technol.*, (2006),52(2):218-223.
- [14] Kehila Y., Aina M., Mezouari F., Matejka G., Mama D., (2007). Quelles perspectives pour l'enfouissement technique et le stockage éco-compatible des résidus solides dans les PED vis-à-vis des impacts sur l'hydrosphère urbaine ?, Actes des JSIRAUF, Hanoi, 6-9.
- [15] M.Y.A. Mollah, R. Schennach, J.R. Parga, D.L. Cocke (2001). Electrocoagulation (EC) science and applications, *J. Hazard. Mater.*, 84, 29–41
- [16] Makhoukh M., Sbaa M., Berrahou A., Van Clooster M, (2011). Contribution à l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'Oued Moulouya (MAROC ORIENTAL), *Larhyss Journal*, 9: 149-169.
- [17] Makoutodé M., Assani A.K., Ouendo E.M., V.D., Agueh Diallo P, (1999). Qualité et mode de gestion de l'eau de puits en milieu rural au Bénin : cas de la sous-préfecture de grand-popo, *Médecine d'Afrique Noire*, 46 (11) : 529-534.
- [18] Marrucci G. et L. Nicodemo (1967). Coalescence of gaz bubbles in aqueous solutions of inorganics electrolytes, *Chem. Eng.Sci.*, 22, 1257-1265.
- [19] Mekhalif Faiza, « Réutilisation des eaux résiduaires industrielles épurées comme eau d'appoint dans un circuit de refroidissement», mémoire de magistère (2009) ; Université du 20 Août 1955-skikda.
- [20] Metahri Mohamed Said (2012). « Elimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées par des procédés mixtes, cas de la step EST de la ville de TIZI OUZOU». Thèse de doctorat Université Mouloud Maameri de Tizi Ouzou.
- [21] Mollah M.Y.A., Morkovsky P., Gomes J.A.G., Kesmez M., Parga J., Cocke D.L. (2004).
- [22] Mounir Bennajah, (2007).Traitement des rejets industriels liquide par électrocoagulation / électroflotation en réacteur airlift, thèse de doctorat ; Université de Toulouse.

- [23] Naim, R., Kisay, L., Park, J., Qaisar, M., Zulfikar, A. B., Noshin, M. and Jamil, K. (2010). Precipitation Chelation of Cyanide Complexes in Electroplating Industry Wastewater, *Int. J. Environ. Res.*, 4 (4), 735-740.
- [24] Oliveira R.C.G., G.Gonzalez et J.F. Oliveira (1999). Interfacial studies on dissolved gas flotation of oil droplets for water purification. *Colloids. Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*, 154, 127-135.
- [25] Ouafae El Hachemi (2012). Traitement des eaux usées par lagunage naturel en milieu désertique (oasis de figuig) : performances épuratoires et aspect phytoplanctonique, thèse de doctorat de l'Université de Mohamed Premier.
- [26] Pallier Virgine (2008). Elimination de l'arsenic par coagulation floculation et électrocoagulation d'eaux faiblement minéralisées, Thèse de doctorat ; Université de Limoges.
- [27] Rahmani, A., Nouri, J., Kamal Ghadiri, S., Mahvi, A. H. and Zare M. R. (2010). Adsorption of fluoride from water by Al^{3+} and Fe^{3+} pretreated natural Iranian zeolites, *Int. J. Environ. Res.*, 4 (4), 607-614.
- [28] Rahmani, A., Nouri, J., Kamal Ghadiri, S., Mahvi, A. H. and Zare M. R. (2010). Adsorption of fluoride from water by Al^{3+} and Fe^{3+} pretreated natural Iranian zeolites, *Int. J. Environ. Res.*, 4 (4), 607-614.
- [29] Ramelina Andrianahasina Miharifeno (2011). Conception et réalisation d'une cellule d'électrocoagulation pour le traitement des eaux, mémoire de Master.
- [30] Ricordel, C. Darchen, A. Hadjiev, D. Electrocoagulation–electroflotation as a surface water treatment for industrial uses. *Separation and Purification Technology* 74 (2010) 342–347.
- [31] Salim 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, thèse de doctorat, Université de Lorraine.
- [32] Scheen A.J., Giet D, (2012). Rôle de l'environnement dans les maladies complexes : pollution atmosphérique et contaminants alimentaires, *Rev Med Liège*, 67: 226-233.
- Strickland J.R. (1980). Laboratory results of cleaning produced water by gaz flotation. *Soc. Petrol. Eng. J.*, June 1980, 175-190.
- [33] Tchibozo D., Agassounon M., Ayi-Fanou L., Lozes E., Fadonougbo R., Anago G.D.J., Agbangla C., Ahanhanzo C, (2012). Impacts sanitaires liés à l'usage des eaux de puits, à

l'assainissement et à l'aménagement à Gbôdjê dans l'arrondissement de Godomey au Bénin, *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 6(2): 592-602.

[34] Vandermeersch S, (2006). Etude comparative de l'efficacité des traitements d'épuration des eaux usées pour l'élimination des micro-organismes pathogènes, Diplôme d'Etudes Spécialisées en Gestion de l'Environnement de l'Université Libre de Bruxelles, 81p.

[35] X. Chen, G. Chen, P.L. Yue (2002). Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation. *Chem. Eng. Sci.*, 57, 2449–2455.