Afrique SCIENCE *15(2) (2019) 57 - 69*
ISSN 1813-548X, http://www.afriquescience.net

Traitement électrolytique d'un effluent d'une tannerie artisanale : étude comparative de l'efficacité de l'électrocoagulation avec les électrodes d'aluminium et de la coagulation chimique avec du sulfate d'aluminium

Serge Raoul TCHAMANGO[1,2*], Olivier KAMDOUM[2], David DONFACK[2] et Djamdoudou BABALE[2]

[1] Université de Ngaoundéré, Faculté des Sciences, Département de Chimie, BP 454, Ngaoundéré, Cameroun
[2] Université de Yaoundé I, Faculté des Sciences, Département de Chimie Inorganique, Laboratoire de Chimie Analytique, BP 812 Yaoundé, Cameroun

* Correspondance, courriel : *tchamangos@yahoo.fr*

Résumé

Ce travail a pour objectif le traitement d'un effluent d'une tannerie artisanale de la ville de Maroua (Cameroun) par le procédé d'électrocoagulation. Les expériences d'électrolyse ont été réalisées avec les électrodes d'aluminium, en imposant un courant de 0,4 A, et en variant le temps de traitement de 0 à 40 minutes. Une étude comparative a été menée par rapport au procédé de coagulation chimique avec le sulfate d'aluminium comme coagulant, en ajoutant initialement à l'effluent à traiter les mêmes quantités d'aluminium (nombre de moles) que celles électro-générées. Les investigations ont porté sur l'étude des paramètres physico-chimiques (pH, conductivité) et de pollution (DCO, couleur, turbidité). Les résultats des analyses effectuées indiquent que l'électrocoagulation a permis d'obtenir des abattements de 62,52 ; 99,15 et 97,72 % pour la DCO, la couleur et la turbidité respectivement. La coagulation chimique quant à elle a éliminé la DCO à de 62,49 %, la couleur et de la turbidité à hauteur de 98,29 et 95,51 % respectivement. En comparant les deux procédés de traitement, il ressort que l'électrocoagulation permet d'obtenir un pH presque neutre (< 8) et de diminuer faiblement la conductivité, ce qui n'est pas le cas de la coagulation chimique qui accroît l'acidité de l'effluent à traiter ($pH < 5$) et sa conductivité. En outre, cette étude montre que l'effluent traité par électrocoagulation peut être recyclée (pH proche de la neutralité et faible valeur de la conductivité).

Mots-clés : *électrocoagulation, coagulation chimique, électrodes d'aluminium, effluents.*

Abstract

Electrolytic treatment of artisanal tannery effluents:comparative study of the efficacy of electrocoagulation with aluminium electrodes and chemical coagulation with aluminium sulphate

This work deals to the treatment of an artisanal tannery effluent of the city of Maroua (Cameroon) by electrocoagulation process. The electrolyses experiments were carried out with the aluminium electrodes by imposing a current of 0.4 A, while varying the processing time from 0 to 40 minutes.Chemical coagulation with aluminium sulfate as coagulant agent was also achieved in order to make a comparative study, by initially adding to the effluent to treat the same quantities of aluminium (number of moles) that those electro-generated. The investigations were focused on physico-chemical (pH, conductivity) and pollution parameters

(COD, colour, turbidity). The results of the analyses carried out indicate that electrocoagulation made it possible to obtain removal efficiencies of 62.52,99.15 and 97.72 % for the COD, the color and turbidity respectively.Chemical coagulation as for it eliminated the DCO to 62.49 %, while the color and turbidity removals reached 98.29 and 95.51 % respectively.By comparing both processes, it appears that electrocoagulation permit to obtain an almost neutral pH (< 8) and to decrease the conductivity slightly, which is not the case of the chemical coagulation which increases the acidity of the initial effluent (pH < 5) and its conductivity.Moreover, this study shows that the effluent treated by electrocoagulation can be recycled (pH close to neutrality and low value of conductivity).

Keywords : *electrocoagulation, chemical coagulation, aluminium electrodes, effluents.*

1. Introduction

Le tannage est le processus de transformation des peaux d'animaux (à ressource renouvelable naturelle) en cuir (une matière du marché employée dans la fabrication d'un éventail de produits) La production en cuir, associée aux tissus et aux industries artisanales, est une activité très importante depuis l'antiquité. Elle a une grande rentabilité économique dans beaucoup de pays en voie de développement [3]. Au Cameroun la ville de Maroua, située dans la région de l'extrême nord est reconnue pour la grande activité qui y est développée dans le tannage de peaux d'animaux qui servent à la fabrication du cuir. Deux types de tannage y sont pratiqués : le tannage industriel qui est un procédé qui utilise des sels de chrome et le tannage artisanal réalisé à base des fruits d'acacia. Les fruits d'acacia contiennent du tannin, substance qui rend la peau d'animal à traiter imputrescible et empêche également son rétrécissement [4]. Les conséquences environnementales des activités des tanneries dans cette ville sont désastreuses. En effet, les effluents de tannerie sont classés parmi les plus polluants. La nature de cette pollution est évidente, du fait de l'odeur nauséabonde notoire associée aux déchets de cuir provenant des usines et la présence des produits chimiques toxiques utilisés décharges. En conséquence, les animaux qui s'abreuvent et les personnes qui se baignent dans ces cours d'eau s'exposent à des graves dangers. Cette menace ne provient pas seulement du chrome, ou des teneurs élevées en solides en suspensions (organiques ou inorganiques), en demande chimique en oxygène (DCO) et des autres produits chimiques utilisés lors du tannage industriel, mais aussi des infections bactériennes qui peuvent survenir dans les installations rudimentaires de tanneries artisanales. En effet, dans les années soixante, des cas de contamination par le bacille de charbon des eaux résiduaires industrielles ont déjà été observés en Allemagne [5]. Face à cette situation, il faut trouver les voies et moyens pour résorber cette pollution, sans toutefois mettre fin aux activités de tannage, qui d'ailleurs contribuent de manière significative à nourrir les familles, jouant ainsi un rôle important dans l'économie de la région. Hormis la sensibilisation et la mise en garde des tanneurs et des populations locales, il faut aussi mettre sur pied des méthodes de traitement efficientes, moins coûteuses et qui s'arriment à la préservation de l'environnement. : l'oxydation chimique, la précipitation, la sédimentation, la coagulation-flocculation à l'aide des sels de fer ou d'aluminium, l'adsorption, les techniques de filtration membranaires. Cependant ces techniques présentent des inconvénients majeurs : (i) la production d'une grande quantité de boues, l'augmentation de la salinité de l'effluent à traiter et la génération de la pollution secondaire due aux réactifs chimiques qui interviennent dans le traitement (cas de la coagulation-flocculation) ; (ii) le coût de traitement élevé qui limite l'utilisation des filtres à membranes [6 - 9]. Les techniques biologiques comme la biosorption, la bioaccumulation ou la bioréduction du chrome (VI) en chrome (III) offrent des possibilités potentielles pour traiter les eaux de tannerie. Malgré leur efficacité, la perte de la biomasse lors du traitement limite ces procédés. En outre dans le cas du tannage végétal, la présence des tannins dans les plantes inhibe les traitements

biologiques [10, 11]. Récemment, le bioréacteur à membrane a gagné considérablement de l'importance dans le traitement des effluents aqueux, car il est capable d'enlever les particules en suspension, les composés organiques et inorganiques aussi bien que les métaux lourds. Mais le colmatage de la membrane par certains contaminants est l'inconvénient principal de ce procédé, limitant de ce fait l'expansion de son application [12]. Pour pallier ces défauts, les procédés électrochimiques sont une alternative. Ces nouvelles techniques, qui ont montré leur innocuité vis-à- vis de l'environnement sont en plein essor. Elles ont été efficaces tant pour l'élimination des métaux lourds que sur la destruction des matières organiques réfractaires et difficilement biodégradables [10]. L'électrocoagulation figure dans cette gamme de procédés : l'électrocoagulation est la version électrolytique de la coagulation chimique. C'est un procédé électrolytique de traitement des effluents aqueux au cours duquel le passage de courant dans un électrolyseur contenant des électrodes métalliques (en fer, en aluminium ou des alliages contenant majoritairement ces métaux), permet de libérer des ions métalliques (Fe^{2+}, Fe^{3+} ou Al^{3+}) par oxydation de l'anode [13 - 23]. Durant les dernières décennies, beaucoup d'études ont été menées sur l'électrocoagulation, mettant en exergue la capacité de ce procédé à assurer un effluent traité de bonne qualité avant sa disposition dans l'environnement aquatique [13]. L'objectif de ce travail est le traitement des eaux de rejet d'une tannerie artisanale de la ville de Maroua par le procédé d'électrocoagulation. Une comparaison a été effectuée, en utilisant la coagulation chimique, qui est un procédé analogue, mais où un sel d'aluminium conduit à éliminer la charge polluante. Pour y parvenir, les investigations ont été menées sur l'effet des paramètres physico-chimiques (pH, conductivité) ainsi que ceux de quelques paramètres de pollution (DCO, couleur, turbidité).

2. Méthodologie

L'électrocoagulation est une technique de traitement des eaux, qui fait appel au courant électrique. Ce procédé est aussi la version électrochimique de la coagulation chimique [24]. Lors de l'électrocoagulation, il y a formation des cations métalliques *in situ* par dissolution électrique (électro-dissolution) d'anodes métalliques solubles suite au passage du courant. Il s'ensuit une concentration des espèces colloïdales dans la région proche de l'anode. Les cations coagulants (Fe^{2+}, Fe^{3+} et Al^{3+}) et les hydroxydes métalliques ($Fe(OH)_2$, $Fe(OH)_3$ et $Al(OH)_3$ vont alors « interagir » avec les particules colloïdales chargées négativement et permettre la neutralisation de leur charge et leur coagulation à travers les flocs formés [25 - 27]. Bien que le mécanisme de l'électrocoagulation ressemble beaucoup à celui de la coagulation chimique, les espèces cationiques responsables de la neutralisation des charges des colloïdes et les caractéristiques des flocs coagulés diffèrent dans chacun de ces procédés. Lors de l'électrocoagulation, les coagulants (cations de fer ou d'aluminium) sont obtenus *in situ* par dissolution de l'anode, ce qui n'est pas le cas de la coagulation chimique où ces cations sont produits par la dissolution des sels de fer ou d'aluminium, qui s'accompagne également de la libération des contre-anions [24, 28]. En imposant un courant, le nombre de moles de métal électro-généré est proportionnel à la quantité d'électricité (It) d'après la relation

$$n = \frac{It}{zF} \tag{1}$$

Dans cette relation, n est le nombre de moles de métal électro-généré, I l'intensité de courant imposé, t le temps d'électrolyse, z le nombre d'électrons transférés au cours de l'oxydation anodique du métal ($z = 3$ pour l'aluminium) et F la constante de Faraday ($F = 96.486$ C.mol^{-1}) [29]. Quand l'aluminium est utilisé comme anode, le traitement électrolytique est décrit par les ***Équations ((1) - (4))***.

$$Al \rightarrow Al^{3+}(aq) + 3e \tag{2}$$

$$3H_2O + 3e \rightarrow 3OH^- + \frac{3}{2}H_2 \quad (3)$$

$$Al^{3+}(aq) + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3H^+ \quad (4)$$

A des valeurs élevées de pH, la corrosion cathodique a lieu, selon ***l'Équation*** ci-dessous [30, 31] :

$$Al + 3H_2O + OH^- \rightarrow Al(OH)_4^- + \frac{3}{2}H_2 \quad (5)$$

Les ions Al^{3+} et OH^- produits aux électrodes peuvent réagir pour former des espèces monomériques $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_2^+$ $Al_2(OH)_2^{4+}$ et polymériques $Al_6(OH)_{15}^{3+}$, $Al_7(OH)_{17}^{4+}$, $Al_8(OH)_{20}^{4+}$, $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$, $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$, qui sont finalement transformés en $Al(OH)_3$ [32,33]. La coagulation chimique quant à elle, est une méthode traditionnelle utilisée dans le traitement des eaux polluées [34 - 37]. Lors du processus de coagulation, des coagulants (généralement des sels de fer ou d'aluminium) sont ajoutés dans les effluents à traiter afin d'en éliminer les colloïdes responsables de leur turbidité et de leur couleur. L'ajout d'un coagulant permet au cours d'une hydrolyse la déstabilisation des colloïdes et la neutralisation de leurs charges négatives, ce qui favorise leur agglomération qui conduit à la formation des flocs beaucoup plus volumineux. Ces flocs peuvent être aisément séparés par décantation ou par filtration [34, 38, 39]. Dans le cas où le coagulant est le sulfate d'aluminium, les ***Équations*** suivantes illustrent les processus qui ont lieu :

$$Al_2(SO_4)_3 \rightarrow 2Al^{3+}(aq) + 3SO_4^{2-} \quad (6)$$

$$Al^{3+}(aq) + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3H^+ \quad (7)$$

Les ***Équations*** ci-dessus montrent que les ions sulfate et les protons sont libérés au cours de la coagulation chimique du fait de l'utilisation des réactifs. Ceci à pour effet, d'augmenter la salinité et l'acidité de l'effluent à traiter.

3. Matériel et méthodes

Les mesures de pH et de conductivité ont été réalisées à l'aide d'un pH-mètre et d'un conductimètre Multi340i / SET de WeightWatchers International (WTW). Ces appareils étaient reliés à des électrodes munies d'un capteur de température. Les pesées ont été effectuées par une balance de marque Precia Cristal, dont la précision est de 10^{-4} g. Un agitateur magnétique de marque Stuart a été utilisé pour agiter les solutions durant le traitement. Les mesures de turbidité ont été effectuées à l'aide d'un turbidimètre de marque Lovibond. Les mesures de la Demande Chimique en Oxygène (DCO) et de la couleur ont été réalisées à l'aide d'un spectrophotomètre HACH de type DR 2500 ODYSSEY. Dans le cas de la mesure de la DCO, l'échantillon à analyser a été chauffé au préalable dans un thermostat HACH de type DRB 200. Un générateur de courant de marque ERMES M10-SP-303, dont les valeurs maximales de courant et de tension délivrés (3 A et 30 V) a été utilisé au cours de l'électrolyse. Les expériences d'électrocoagulation ont été réalisées dans un bécher de 500 mL qui jouait le rôle de réacteur. Les électrodes utilisées étaient en aluminium et de dimensions 10 cm x 4 cm x 0,5 cm. Ces électrodes étaient séparées par une grille de polyéthylène d'épaisseur 0,5 cm et immergées dans l'effluent à traiter sur une hauteur de 5 cm. Au cours du traitement, nous avons imposé un courant de 0,4 A et varié le temps de traitement de 10 à 40 minutes. Les électrodes ont été pesées avant et après les expériences pour évaluer la quantité d'aluminium qui a été dissoute. Le sulfate d'aluminium $Al_2(SO_4)_3$. 14 H_2O (Prolabo) a été utilisé lors des expériences de coagulation chimique comme coagulant. Ces

expériences ont été réalisées en ajoutant à l'effluent à traiter une masse de sulfate d'aluminium équivalente à celle de l'anode d'aluminium dissoute lors de l'électrocoagulation (selon la loi de Faraday). La durée d'une expérience était de 10 minutes. L'acide sulfurique 95 % (Prolabo) et la soude NaOH (BDH Analar) de concentration 1 M ont été utilisés pour ajuster le pH de l'effluent avant les manipulations d'électrocoagulation et de coagulation chimique. La tannerie artisanale qui est le lieu de notre étude est située en plein air. Toutes les opérations de tannage se sont déroulées dans les fosses étanches. A quelques mètres de ce lieu, se trouve un cours d'eau saisonnier dans lequel le contenu de ces fosses est après le tannage. Le processus de tannage est décrit par les étapes suivantes :

(i) le salage : les peaux de mouton, de chèvre ou de bœuf sont trempées dans des fosses étanches où se trouve du NaCl. Cette opération permet la conservation de ces peaux ;
(ii) après le salage, ces peaux sont séchées au soleil ;
(iii) pour rendre ces peaux souples, on élimine le sel qu'elles contiennent en les trempant dans les fosses étanches remplies d'eau chaude ;
(iv) la quatrième étape est celle d'épilage-pelanage au cours de laquelle on trempe ces peaux dans d'autres fosses en y ajoutant l'un des produits suivants : la chaux vive, le natron, la cendre de bois, le mélange natron et chaux ou le mélange cendre et chaux. Cette opération se déroule pendant 48 heures et a pour but l'élimination des poils (kératine) et de la matière grasse qui se trouvent dans les peaux ;
(v) le déchaulage qui se fait avec des excréments d'oiseaux : cette opération permet d'abaisser le pH et d'éliminer les derniers poils ;
(vi) tannage : après l'étape de déchaulage, ces peaux sont trempées dans des fosses contenant une solution chaude de fruits d'acacia préalablement pilés. L'action du tanin contenu dans ces fruits rend ces peaux souples et imputrescibles ;
(vii) nourriture et teinture : ces peaux sont séchées et enduites de matières grasses. Elles sont trempées ensuite de nouveau dans des fosses contenant des fruits d'acacia pilés auxquels l'on ajoute des colorants ;
(viii) le séchage : c'est la dernière étape du processus de tannage artisanal. Après cette étape, les peaux présentent un bon aspect.

A la fin du tannage, les fosses sont vidées et le contenu versé dans le cours d'eau saisonnier situé près de la tannerie. Les excréments d'oiseaux et des poils d'animaux utilisés lors du tannage sont recyclés pour fabriquer des briques. Dans le processus de tannage artisanal, contrairement au tannage industriel qui utilise les composés chromés, azotés et du bisulfite de sodium, la pollution qu'il engendre est surtout due à la présence des matières organiques (peaux d'animaux, fruits d'acacia en l'occurrence) et aux colorants utilisés. Ceci nous a amené à étudier l'efficacité de l'électrocoagulation et de la coagulation chimique sur l'élimination de la turbidité, la couleur et la DCO des effluents de la tannerie artisanale.

4. Résultats et discussion

Les effluents issus du tannage que nous avons prélevés dans les fosses présentaient un aspect laiteux à l'origine. Ils contenaient en effet plus de charge polluante par rapport au cas où ils étaient rejetés dans un cours d'eau. Pour cette raison ces effluents ont été dilués avec de l'eau du robinet avant de procéder au traitement. Avant de procéder au traitement des eaux de cette tannerie, nous avons également au préalable mesuré quelques paramètres indicateurs de la pollution qu'elles génèrent. Les caractéristiques de ces eaux sont rassemblées dans le ***Tableau 1***.

Tableau 1 : *Caractéristiques de l'effluent de tannerie avant traitement*

Paramètres	pH	Conductivité ($mS.cm^{-1}$)	Turbidité (FNU)	Couleur (Pt-Co)	DCO ($mg.L^{-1}$)
Valeurs	8,2	1,51	138	5192	205

A la lecture de ce ***Tableau***, l'on note que :

- les valeurs de la DCO et de la couleur sont élevées. En effet, selon les normes environnementales fixées par le Ministère de l'Environnement et de la protection de la nature au Cameroun, les effluents de tanneries doivent présenter avant rejet dans la nature une DCO inférieure à 200 mg. L^{-1} et être incolores [40];
- le pH initial est basique ; ceci peut conduire à la formation de l'ion aluminate $Al(OH)_4^-$ soluble qui limite l'efficacité du traitement [33];
- l'eau de cette tannerie est turbide (turbidité > 50 FNU) [41].

4-1. Étude des paramètres physico-chimiques

4-1-1. Variation du pH

Le pH joue un rôle très important lors de l'électrocoagulation ou de la coagulation chimique, car certaines valeurs de ce paramètre favorisent la formation des hydroxydes métalliques, ou des complexes polymériques d'aluminium ou de fer qui vont provoquer l'agglomération des fines particules colloïdales présentes dans l'effluent [13, 25]. Les résultats relatifs à l'évolution de pH après les expériences d'électrocoagulation et de coagulation chimique sont représentés sur la ***Figure 1***.

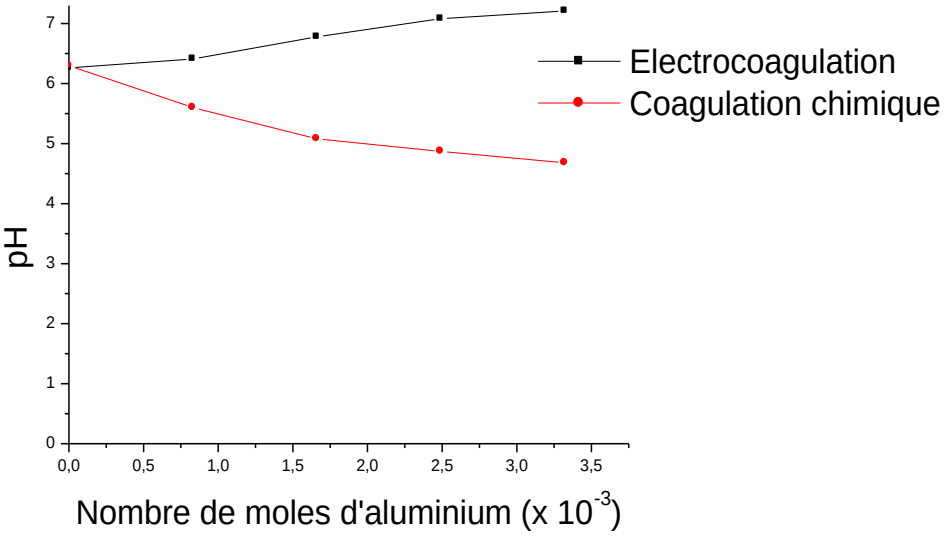

Figure 1 : *Évolution du pH en fonction du nombre de moles d'aluminium*

La ***Figure 1*** présente les résultats de la variation du pH en fonction du nombre de moles d'aluminium au cours du traitement de l'effluent de tannerie par électrocoagulation et par coagulation chimique. Le pH de l'effluent a été ajusté avant traitement 6,26 : (i) pour éviter la formation de l'ion aluminate $Al(OH)_4^-$ en milieu basique. Cette espèce ne contribue pas à la coagulation et a plutôt un effet inhibiteur sur le traitement [33]; (ii) les résultats des travaux antérieurs sur le traitement des effluents aqueux ont montré que lorsque les ions Al^{3+} interviennent lors de la coagulation, le pH optimal se situe entre 6 et 7,5 [36]. L'on

remarque sur cette figure que le pH croît au cours de l'électrocoagulation, mais diminue durant la coagulation chimique. L'augmentation du pH lors de l'électrocoagulation est due à la formation des ions hydroxyle à la cathode d'après ***l'Équation 3***. Par contre, l'hydrolyse des ions Al^{3+} libère les protons au cours de la coagulation chimique, ce qui a pour effet de baisser ce paramètre ***(Équation 7)***.

4-1-2. Variation de la conductivité

La conductivité est un facteur qui conditionne le déroulement d'un traitement électrolytique. Elle est reliée à la chute ohmique IR (tension) par la ***Relation*** :

$$IR = \frac{Id}{A\chi}. \qquad (8)$$

où, I est l'intensité du courant imposé (en A), R la résistance de la solution (en Ω), d la distance entre les électrodes (en m), A la surface active des électrodes (en m^2) et χ la conductivité de la solution (en Sm^{-1}) [27].

Quand la conductivité est faible, la tension est élevée, ce qui peut entraîner la passivation de l'anode d'aluminium par une couche d'alumine [13, 14]. Pour contourner cette situation, l'on a l'habitude d'ajouter au préalable à l'effluent à traiter du chlorure de sodium, les ions chlorure ayant la propriété de détruire le film passif d'alumine qui recouvre l'anode d'aluminium [13]. L'effluent de tannerie que nous avons traité présentait à l'origine une conductivité suffisante, du fait de la présence du sel de cuisine qui intervient dans le processus de tannage. En revanche la coagulation chimique ne dépend pas de la conductivité, mais de l'ajout du coagulant fait varier ce paramètre. Sur la ***Figure 2*** sont représentées les courbes d'évolution de la conductivité en fonction du nombre de moles d'aluminium. Ce paramètre diminue lors de l'électrocoagulation, mais croît quand on augmente la quantité de sulfate d'aluminium dans l'effluent. La diminution de la conductivité peut s'expliquer d'une part par l'élimination de certaines espèces conductrices contenues dans l'effluent par l'hydroxyde d'aluminium, et d'autre part par la diminution de l'acidité de l'effluent (augmentation du pH) suite à la production d'ions hydroxyle à la cathode ***(Équation 3)*** qui neutralisent les protons. En revanche, dans le cas de la coagulation chimique, l'hydrolyse des ions Al^{3+} produit des protons, qui augmentent la conductivité de l'effluent. Les ions sulfate générés lors de la dissolution du sulfate d'aluminium et qui n'interviennent pas dans le processus de coagulation contribuent également à accroître ce paramètre ***(Équations 6 et 7)***.

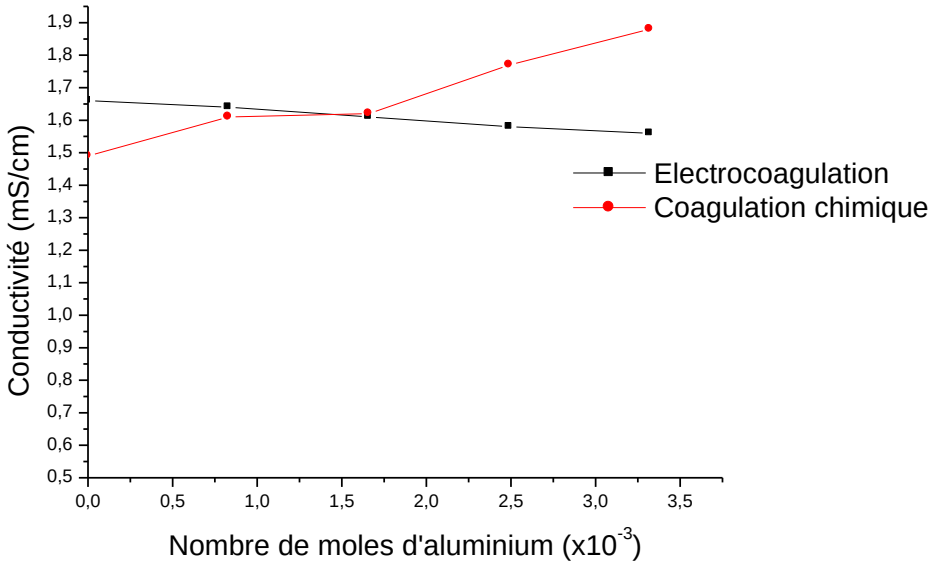

Figure 2 : *Évolution de la conductivité en fonction du nombre de moles d'aluminium*

Nous avons réalisé des expériences complémentaires, qui ont porté sur la perte de masse de l'anode durant l'électrolyse. Ces expériences ont montré que la masse d'aluminium consommée au cours de l'électrocoagulation est supérieure à celle calculée d'après la loi de Faraday (en imposant un courant de 0,4 A pendant 40 minutes). Le rendement anodique (pourcentage de masse de métal réellement dissout ou expérimentale par rapport à la masse attendue ou théorique) était alors de 116 %. Ce pourcentage supérieur à 100 % s'explique par la dissolution chimique de l'anode d'aluminium par les ions chlorure présents dans l'effluent [13, 14].

4-2. Étude des variations des paramètres de pollution

Les effluents que nous avons étudiés contiennent beaucoup de matières organiques et des colorants, ce qui nous a amené à examiner l'efficacité des deux procédés sur l'abattement de la DCO, de la couleur et la turbidité. Les ***Figures 3 à 5*** représentent l'évolution de ces paramètres en fonction de la quantité d'aluminium (nombre de moles). L'on note sur toutes ces figures que les taux d'abattement augmentent avec le nombre de moles d'aluminium. En outre, quel que soit le procédé, la différence entre les abattements n'est pas significative pour chaque paramètre de pollution étudié. Ceci montre que le traitement de l'effluent de tannerie dépend de la quantité d'ions Al^{3+} introduits en solution par dissolution électrolytique de l'anode d'aluminium ou chimique du sulfate d'aluminium.

4-2-1. Variation de la DCO

Les matières organiques consomment, en se dégradant l'oxygène dissous dans l'eau. La présence abondante des matières organiques (ce qui est le cas des effluents de tannerie) peut provoquer l'asphyxie des organismes aquatiques [42]. L'étude de la DCO met en exergue la capacité des deux procédés à éliminer ce paramètre dans les effluents de tannerie. La ***Figure 3*** présente les résultats de l'analyse de la DCO. Sur cette figure, l'abattement de ce paramètre croît et atteint un pic quand le nombre de moles théorique d'aluminium est de 1,66 x 10^{-3}, puis décroît au-delà de cette valeur. La croissance observée s'explique par la formation des hydroxydes d'aluminium qui éliminent les matières organiques dans l'effluent. La décroissance de l'abattement de la DCO qui suit est due à la présence des ions aluminate (pour le procédé d'électrocoagulation), qui a plutôt un effet inhibiteur sur le traitement électrolytique. Pour la coagulation chimique, la dose de coagulant est un obstacle du fait de l'augmentation de l'acidité dans le milieu ***(Équation 7)***. A la fin du traitement l'abattement maximal obtenu est partiel (62,50%) est quasiment identique pour les deux procédés. Cet abattement relativement faible de la DCO serait dû à la présence dans l'effluent de tannerie la matière organique soluble qui n'a pas d'affinité avec l'hydroxyde d'aluminium où les espèces cationiques d'aluminium responsables de la coagulation. Cette observation a été aussi faite par Tchamango et al., et Moreno-Casillas et al., lors de leurs travaux portant respectivement sur l'électrocoagulation des effluents laitiers et les mécanismes d'élimination de la DCO par ce procédé [13, 43]. Bien que plus de 60 % de la DCO soit éliminé après traitement, ce paramètre demeure au-dessus de la norme fixée par le Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature [40].

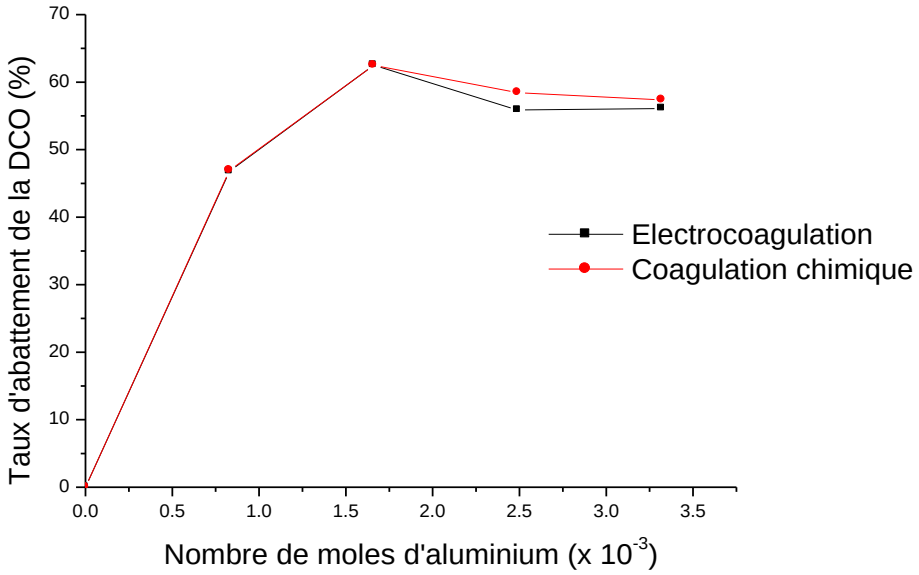

Figure 3 : *Évolution de l'abattement de la DCO en fonction du nombre de moles d'aluminium*

4-2-2. Variation de la couleur

La couleur des effluents d'une tannerie artisanale est due en majeure partie aux matières organiques qu'ils contiennent, et dans ce cas, la pollution due à la couleur joue un rôle négatif dans la transparence de l'eau et son aspect esthétique. Les expériences d'électrocoagulation et de coagulation chimique ont été ainsi menées dans le but d'éliminer la couleur de l'effluent de tannerie. Les résultats obtenus suite à l'élimination de ce paramètre sont représentés sur la ***Figure 4***. L'examen de cette figure montre que l'élimination de la couleur est plus rapide avec le procédé d'électrocoagulation. A titre d'exemple, quand le nombre de moles théorique d'aluminium est 0,83 x 10^{-3}, les abattements obtenus sont 79,87 et 42,80 % respectivement pour l'électrocoagulation et la coagulation chimique. A la fin du traitement (quand le nombre de moles théorique d'aluminium est 3,32 x 10^{-3}), les abattements maximaux respectifs obtenus sont de 99,15 et 98,29 % ; ces valeurs montrent que l'élimination de la couleur via ces procédés est significative.

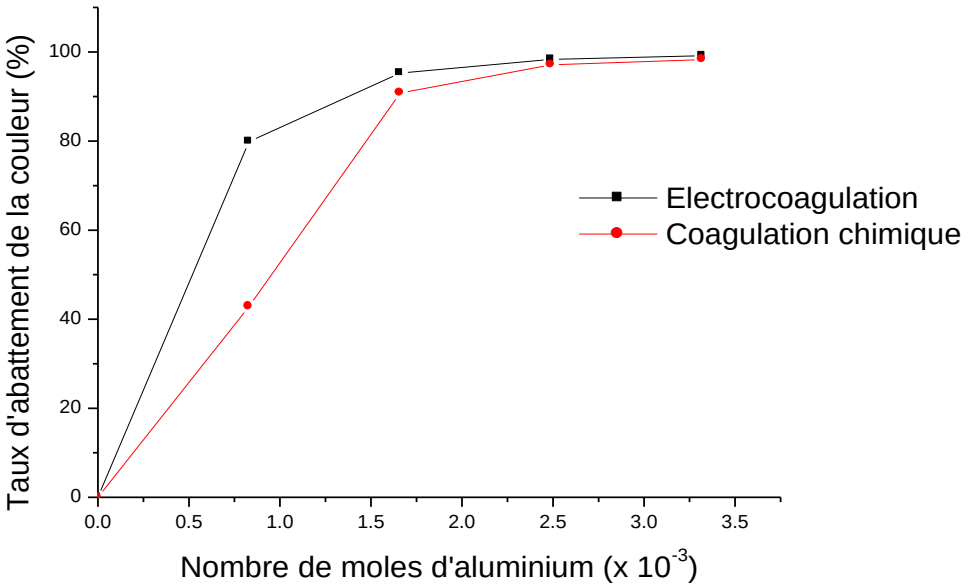

Figure 4 : *Évolution de l'abattement de la couleur en fonction du nombre de moles d'aluminium*

4-2-3. Variation de la turbidité

Sur la ***Figure 5***, l'on note que l'élimination de la turbidité par les deux procédés est rapide. En effet, quand la quantité théorique d'aluminium injectée dans l'effluent est de 0,83 x 10^{-3} moles (après seulement 10 minutes de traitement), les taux abattements obtenus avoisinent 80%. Quand la quantité théorique d'aluminium dissout est de 3,32 x 10^{-3} moles (à la fin du traitement), ces valeurs sont respectivement 97,72 et 95,51 % pour l'électrocoagulation et la coagulation chimique. Ces valeurs finales d'abattement permettent d'avoir une eau traitée limpide, et les valeurs de turbidité inférieures aux normes camerounaises (inférieures à 5 FNU).

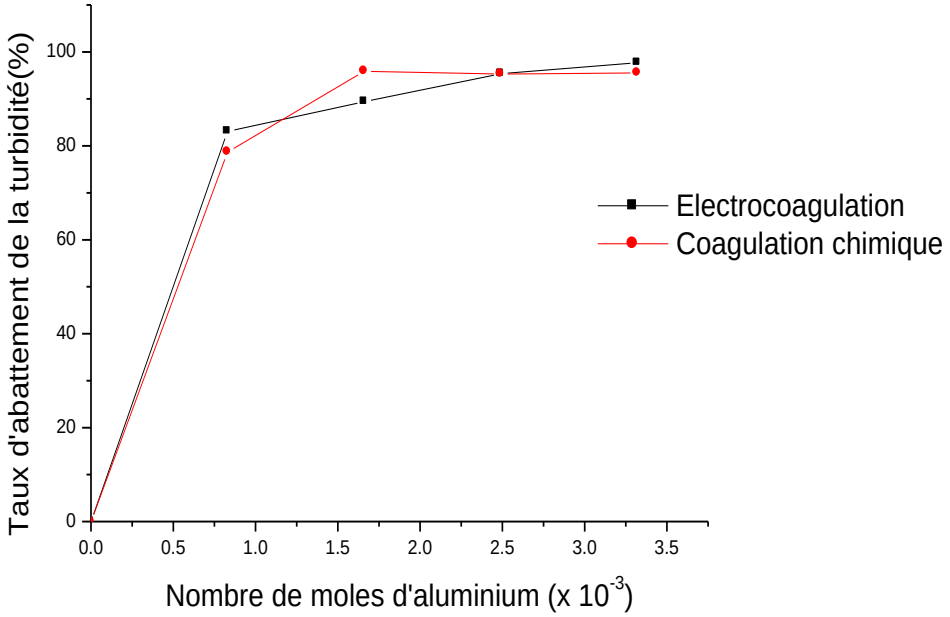

Figure 5 : *Évolution de l'abattement de la turbidité en fonction du nombre de moles d'aluminium*

En comparant l'efficacité des deux procédés, les conclusions suivantes peuvent être faites :

- l'électrocoagulation présente après traitement de l'effluent de tannerie une eau dont le pH est presque neutre et dont la conductivité est relativement faible. Ce qui n'est pas le cas de la coagulation chimique qui présente une eau acide et de conductivité élevée ***(Figures 1 et 2)***. Les eaux issues du traitement par coagulation chimique sont donc corrosives et néfastes pour l'environnement ;
- l'électrocoagulation nécessite beaucoup moins de réactif que la coagulation chimique. En effet, les pesées des électrodes indiquent que la masse d'aluminium dissout après 40 minutes d'électrolyse avec un courant de 0,4 A est de 0,1035 g, tandis que la masse correspondante de sulfate d'aluminium utilisée est de 0,5681 g. Toutefois les quantités d'aluminium nécessaires pour le traitement de l'effluent de tannerie par les deux procédés sont identiques ;
- les abattements de la couleur et de la turbidité sont satisfaisants et supérieurs à 95 %. Mais l'abattement de la DCO est faible ;
- quel que soit le paramètre de pollution, l'électrocoagulation présente les abattements optimaux les plus élevés. Cependant les différences des valeurs d'abattement obtenues au cours du traitement par les deux procédés ne sont pas significatives ;
- tel que présenté sur la ***Figure 6***, le taux d'abattement des paramètres de pollution décroît selon l'ordre suivant quel que soit le procédé : couleur > turbidité > DCO.

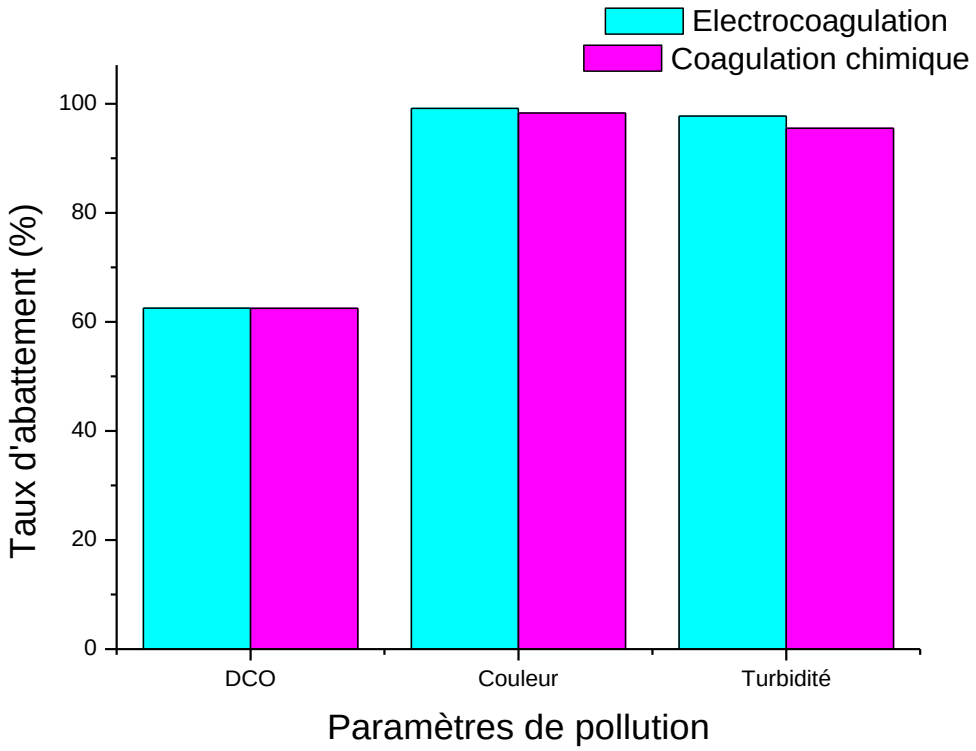

Figure 6 : *Comparaison de l'efficacité des procédés d'électrocoagulation et de coagulation chimique*

5. Conclusion

L'objectif de ce travail était de mettre en exergue le procédé d'électrocoagulation lors du traitement d'un effluent d'une tannerie artisanale. Une étude comparée a été menée vis-à-vis de la coagulation chimique, un procédé physico-chimique couramment utilisé qui utilise les réactifs chimiques. Les résultats obtenus montrent que les abattements de la couleur et de la turbidité via les deux procédés dépassent les 95 %. Par contre l'élimination de la DCO est partielle, ce qui s'explique par la présence de la matière organique soluble dans les effluents de tannerie et qui est réfractaire au phénomène de coagulation. L'étude de la variation de la conductivité électrique et du pH indique que l'ajout du sulfate d'aluminium accroît la conductivité et l'acidité de l'effluent et le rend l'eau traitée corrosive. En revanche, l'eau traitée par électrocoagulation est moins conductrice et présente un pH proche de la neutralité : cette eau peut ainsi être recyclée et réutilisée à d'autres fins. Par rapport à la coagulation chimique l'électrocoagulation utilise moins de réactifs, ce qui augure un coût de traitement plus faible via ce procédé, si l'on envisage un traitement à l'échelle industrielle. Toutes ces observations montrent clairement que le procédé d'électrocoagulation est plus avantageux par rapport au procédé de coagulation chimique

Remerciements

Les auteurs remercient le Ministère Français des Affaires Etrangères (Programme AIRES –SUD N° 7134) et l'Académie des Sciences pour les Pays en voie de Développement (TWAS Research Unit) pour le financement N° 07-052-LDC/CHE/AF/AC. E. NGAMENI et C. P NANSEU-NJIKI sont également remerciés pour l'aide précieuse qu'ils ont apportée à ce travail.

Références

[1] - B. RIVELA, M. MOREIRA, C. BORNHARDT, R. MÉNDEZ, Life cycle assessment as a tool for the environmental improvement of the tannery industry in developing countries. *Environ. Sci. Technol.*, 38 (2004) 1901 - 1909

[2] - A. MARÍA, C. DEZA, G. I. MARTOS, M. NUÑEZ, M. FIORI, C. L. GEREZ, G. FONT, Artisanal tanneries : Potential application of inoculants formulated with lactic acid bacteria. *J Basic Microbiol.*, (2018) 1 - 6

[3] - S. ELABBAS, N. OUAZZANI, L. MANDI, F. BERREKHIS, M. PERDICAKIS, S. PONTVIANNE, M-N. PONS, F. LAPICQUE, J-P LECLERC, Treatment of highly concentrated tannery wastewater using electrocoagulation: Influence of the quality of aluminium used for the electrode, *J. hazard. Mater.*, 319 (2016) 69 - 77

[4] - E. CASTAIGNOS, S. DUCROS, Les effluents de tannerie. Document de l'Association « Pôle Environnement Sud-Aquitain (APESA) », France, (2003)

[5] - P. MEINK, H. STOOFF, H. KOHLSCHÜTTER, Les eaux résiduaires industrielles. Masson et C^{ie} 4ème Edition, Paris, (1970)

[6] - R. ELANGOVAN, L. PHILIP, Performance evaluation of various bioreactors for the removal of Cr(VI) and organic matter from industrial effluent. *Biochem. Eng. J.,* 44 (2009) 174 - 186

[7] - L. KHEZAMI, R. CAPART, Removal of chromium (VI) from aqueous solution by activated carbons : kinetic studies. *J. Hazard. Mater.*, B 123 (2005) 223 - 231

[8] - A. BARAN, E. BIÇAK, S. H. BAYSAL, S. ONAL, Comparative studies on the adsorption of Cr(VI) ions on to various sorbents. *Bioresour. Technol.*, 98 (2007) 661 - 665

[9] - J. BOHDZIEWICZ, Removal of chromium (VI) from underground water in the hybrid complexation-ultrafiltration process. *Desalination*, 123 (2000) 227 - 235

[10] - A. BUSO, L. BALBO, M. GIOMO, Electrochemical removal of tannins from aqueous solutions. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 39 (2000) 494 - 499

[11] - G. MUNZ, D. DE ANGELIS, R. GORI, G. MORI, M. CASARCI, C. LUBELLO, The role of tannins in conventional and membrane treatment of tannery wastewater. *J. Hazard. Mater.,* 164 (2009) 733 - 739

[12] - W. ZUOA, G. ZHANGA, Q. MENG, H. ZHANG, Characteristics and application of multiple membrane process in plating wastewaterreutilization. *Desalination*, 222 (2008) 187 - 196

[13] - G. CHEN, ELECTROCHEMICAL TECHNOLOGIES IN WASTEWATER TREATMENT. *Sep. Purif. Technol.,* 38 (2004) 11 - 41

[14] - S. TCHAMANGO, C. NANSEU-NJIKI, E. NGAMENI, D. HADJIEV, A. DARCHEN, Treatment of dairy effluents by electrocoagulation using aluminium electrodes, *Sci. Total Environ.*, 408 (2010) 947 - 952

[15] - S. R. TCHAMANGO, O. KAMDOUM, D. DONFACK, D. BABALE, Comparison of electrocoagulation and chemical coagulation processes in the treatment of an effluent of a textile factory, *J. Appl. Sci. Environ. Manage.*, 21 (2017) 1317 - 1322

[16] - M. CHANGMAI, M. PASAWAN, M. K. PURKAIT, Treatment of oily wastewater from drilling site using electrocoagulation followed by microfiltration. *Sep. Purif. Technol.,* 210 (2019) 463 - 472

[17] - H. K. HANSEN, S. F. PEÑA, C. GUTTIÉREZ, A. LAZO, P. LAZO, L. M. OTTOSEN, Selenium removal from petroleum refinery wastewater using an electrocoagulation technique. *J. Hazard. Mater.*, 364 (2019) 78 - 81

[18] - S. R. TCHAMANGO, A. DARCHEN, Investigation and optimization of a new electrocoagulation reactor with horizontal bipolar electrodes : Eff ect of electrode structure on the reactor performances. *J. Env. Chem. Eng.,* 6 (2018) 4546 - 4554

[19] - F. Y. ALJABERI, Studies of autocatalytic electrocoagulation reactor for lead removal from simulated wastewater. *J. Env. Chem. Eng.*, 6 (2018) 6069 - 6078

[20] - D. T. MOUSSA, M. H. EL-NAAS, M. NASSER, M. J. AL-MARRI, A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment : potentials and challenges. *J. Environ. Manage*, 186 (2017) 24 - 41

[21] - J. LIU, G. ZHU, P. WAN, Z. YING, B. REN, P. ZHANG, Z. WANG, Current applications of electrocoagulation in water treatment : a review. *Desalin. Water Treat.*, 74 (2017) 53 - 70
[22] - J. N. HAKIZIMANA, B. GOURICH, M. CHAFI, Y. STIRIBA, C. VIAL, P. DROGUI, J. NAJA, Electrocoagulation process in water treatment : a review of electrocoagulation modellingapproaches. *Desalination*, 404 (2017) 1 - 21
[23] - Y. YAVUZ, U. B. OGÜTVEREN, Treatment of industrial estate wastewater by the application of electrocoagulation process using iron electrodes. *J. Environ. Manage.*, 207 (2018) (2018) 151 - 158
[24] - P. HOLT, G. BARTON, M. MARK, C. MITCHELL, A quantitive comparison between chemical dosing and electrocoagulation. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*, 211 (2002) 233 - 248
[25] - M. J. MATTESON, R. L. DOBSON, R. W. GLENN, JR., N. S. KUKUNOOR, W. H. WAITS III, E. J. CLAYFIELD, Electrocoagulation and separation of ultrafine particles. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*, 104 (1995) 101 - 109
[26] - X. CHEN, G. CHEN, P. L. YUE, Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation. *Chem. Eng. Sci.*, 57 (2002) 2449 - 2455
[27] - M. Y. A. MOLLAH, R. SCHENNACH, J. R. PARGA, D. L. COCKE, Electrocoagulation (EC), Science and applications. *J. Hazard. Mater.,* B34 (2001) 29 - 41
[28] - M. Y. A. MOLLAH, P. MORKOVSKY, J. A. G. GOMES, M. KESMEZ, J. PARGA, D. L. COCKE, Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *J. Hazard. Mater.*, B114 (2004) 199 - 210
[29] - N. ADHOUM, L. MONSER, Decolourization and removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by electrocoagulation. *Chem. Eng. Proc.*, 43 (2004) 1281 - 1287
[30] - N. DANESHVAR, A. OLADEGARAGOZE, N. DJAFARZADEH, Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation : An investigation of the effect of operational parameters. *J. Hazard. Mater.*, B129 (2006) 116 - 122
[31] - A. ALINSAFI, M. KHEMIS, M. N. PONS, J. P. LECLERC, A. YAACOUBI, A. BENHAMMOU, A. NEJMEDDINE, Electro-coagulation of reactive textile dyes and textile wastewater. *Chem. Eng. Proc.,* 44 (2005) 461 - 470
[32] - O. T. CAN, M. KOBYA, E. DEMIRBAS, M. BAYRAMOGLU, Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. *Chemosphere*, 62 (2006) 181 - 187
[33] - M. KOBYA, O. T. CAN, M. BAYRAMOGLU, Treament of textile wastewater by electrocoagulation using iron and aluminium electrodes. *J. Hazard. Mater.,* B100 (2003) 163 - 178
[34] - R. DESJARDINS, Le traitement des eaux. 2ème Edition, Presses Internationales Polytechniques, Montréal, (1997)
[35] - DEGREMONT, Mémento technique de l'eau. 9ème Edition, Tome1, Technique et Documentation, Paris, (1989)
[36] - J. RIGAUD, L. M GIRARD, Traitements de surface-Epuration des eaux. 2ème édition, Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, France, (2002)
[37] - C. BINNIE, M. KIMBER, G. SMETHURST, Basic water treatment. 3rd edition, Royal Society of Chemistry, Cambridge, (2002)
[38] - M. MARCHAND, C. TISSIER, Analyse des risques chimiques en milieu marin, l'approche méthodologique européenne. Editions Ifremer, France, (2006)
[39] - C. CARDOT, Techniques appliquées au traitement de l'eau. Collection Technosup, Editions Ellipses, Paris, France, (2002)
[40] - LOI CADRE CAMEROUNAISE N° 96/12 DU 05 AOUT 1996. Document du Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature relatif à la gestion de l'environnement, (1996)
[41] - J. RODIER, L'analyse de l'eau. Dunod, Paris, (1996)
[42] - https://www.afblum.be/bioafb/travelev/polleaux.htm, consulté en février 2019
[43] - H. A. MORENO-CASILLAS, D. L. COCKE, J. A. G. GOMES, P. MORKOVSKY, J. R. PARGA, E. PETERSON, Electrocoagulation mechanism for COD removal. *Sep. Purif.Technol.*, 56 (2007) 204 - 211