

## Epuration des effluents industriels par électroflottation

Belkacem Merzouk<sup>1</sup>, Khodir Madani<sup>2</sup> et Abdelkrim Sekki<sup>3</sup>

<sup>1)</sup> Département d'Hydraulique, Université Mohamed Boudiaf, M'Sila 28000, Algérie.

<sup>2)</sup> Département de Biologie, Université Abderrahmane Mira, Béjaïa 06000, Algérie.

<sup>3)</sup> Département de Génie des procédés, Université Ferhat Abbas, Sétif 19000, Algérie.

Accepté le 08/04/2009

### ملخص

كان هدف هذا العمل الدراسة التجريبية لتنقية المياه القذرة باستعمال الكهروطفو. خلال المرحلة الأولى، قمنا بتصميم الهيكل التجريبي. و بعد ذلك، درسنا أهم العناصر المؤثرة على هذه الطريقة ( فرق الجهد المطبق، البعد بين قطبي الكهرباء و مدة التنقية) وذلك بالاعتماد على نموذج محاكى للمياه القذرة. تطبيق العناصر المتقايسة على المياه القذرة لمحطة التنقية للمركب ALCOVEL، أظهر تخفيض هائل لقيمة  $DBO_5$ ، DCO، نسبة الكدر، المواد العالقة و اللون. في المرحلة الثانية، قمنا بدراسة فصل بعض المعادن الثقيلة كالحديد، النيكل، النحاس، الزنك، الرصاص و الكاديوم. وقد سمح لنا هذا بتبيان أن مدة التنقية لا تتعدى 15 دقيقة و نسبة التنقية تفوق 99 %.

**الكلمات المفتاحية:** كهروطفو؛ قطب من الألمنيوم؛ كدورة؛ فياض صناعي؛ معادن ثقيلة؛ قياس طيفي.

### Résumé

L'utilisation de l'électricité comme mode direct de traitement des effluents est un domaine en pleine expansion. En effet, la diminution du prix de l'électricité couplée aux facilités d'automatisation de tels procédés rendent ces techniques plus attractives, particulièrement lors de la mise en place de petites unités de traitement. Dans ce travail, un modèle réduit d'électroflottation conçu et réalisé au laboratoire, traite des solutions artificielles (eau et gel de silice  $\text{Ø}_{50} < 25 \mu\text{m}$ ) à différentes tensions (10, 15, 20 et 25 V volts) tout en modulant la distance entre les électrodes (1, 2 et 3 cm), pour optimiser les paramètres de traitement (temps de traitement, écart entre les électrodes, tension d'alimentation). L'application des paramètres optimisés sur les eaux de rejets du complexe industriel ALCOVEL d'Akbou a montré, une réduction de la demande biologique en oxygène ( $DBO_5$ ), la demande chimique en oxygène DCO, la turbidité, les MES et de la couleur de 93.5 %, 90.3 %, 78.7 %, 93.3 % et plus de 93%, respectivement. Dans la deuxième partie, nous avons étudié la séparation de quelques métaux lourds tels que le fer, le nickel, le cuivre le zinc, le plomb et le cadmium. Cela nous a permis de montrer que le taux d'épuration atteint les 99 % et la cinétique d'électroflottation ne dépasse pas les 15 minutes.

**Mots clés :** électroflottation; électrodes en aluminium; turbidité; effluents industriels; métaux lourds, spectrométrie.

### Abstract

The present work purpose is to study experimentally the clarification of wastewater using the electroflotation technique. In a first part, we have realized the bench scale. After that, we have studied the principal parameters (alimentation tension, distance between electrodes, period of treatment) affecting the process using a simulated model of wastewater. The application of the optimized parameters on wastewater of the treatment station of ALCOVEL, showed a high removal of  $BOD_5$ , COD, turbidity, SS and colour. In a second part, we have studied the separation of some heavy metals such as iron, nickel, copper, zinc, lead and cadmium. This, permitted us to show that the kinetic of electroflotation is very quick (<15 min), and the removal rate reach 99%.

**Key words:** electroflotation; aluminum electrodes; turbidity; industrial wastewater; heavy metals; spectrometry.

## 1. INTRODUCTION

Les méthodes conventionnelles pour traiter les eaux usées industrielles consistent principalement en traitements biologiques et physico-chimiques et leurs

Auteur correspondant: mbelkov@yahoo.fr (Belkacem Merzouk)

diverses combinaisons [1-5].

Les traitements biologiques sont meilleurs que d'autres méthodes, mais la toxicité des effluents industriels empêche habituellement la croissance bactérienne limitant ainsi l'efficacité de la dépollution. Les méthodes physico-chimiques sont généralement basées sur l'adsorption (par exemple sur le charbon actif), coagulation-floculation (en utilisant les sels inorganiques ou les polymères), l'oxydation chimique (chloration, ozonisation, etc.) et photodégradation (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, UV/TiO<sub>2</sub>, etc.) [6-12]. (Cependant, ces méthodes de traitements consomment habituellement une quantité importante de produits chimiques, qui conduisent parfois à une pollution secondaire et à un volume énorme de boues [13-15]. L'électroflottation est un procédé qui permet une séparation liquide/solide par flottation grâce à la production de fines bulles d'hydrogène (entre 10 et 40 microns) par électrolyse de l'eau. Ces fines bulles de taille particulièrement bien adaptées, entraînent dans leur mouvement ascensionnel les floccs ainsi formés. À la fin du traitement, il se produit une bonne séparation solide -liquide [14-17].

Historiquement, l'électroflottation a trouvé des applications dans la séparation des minerais, le prétraitement de l'eau usée et dans l'industrie agroalimentaire [18]. Différents essais de concentration en minerais ont été effectués, essentiellement en URSS. Ainsi, la cassitérite, habituellement difficile à flotter, peut être récupérée par électroflottation. Des résultats intéressants ont été également obtenus pour l'extraction du Mn [19].

Ce procédé est actuellement utilisé pour l'épuration des effluents des industries agroalimentaires, textiles, métallurgiques, galvanoplastiques et pour l'usinage électrochimique ; mais aussi pour l'enlèvement du Pb, arsenic, nitrates, et fluorures de l'eau [20-22].

Lors de travaux précédents [23], le système d'électroflottation conçu a été appliqué à une eau usée simulée, constituée d'eau potable et de gel de silice ( $\text{Ø}_{50} < 25\mu\text{m}$ ). Le principal but de cette étude est :

- 1- de trouver la tension optimale d'opération d'électroflottation  $U$ ;
- 2- de déterminer la durée de la clarification  $t$  et l'écart optimal entre les électrodes  $E$ ;
- 3- d'étudier l'efficacité de la clarification, en analysant quelques paramètres essentiels tels que la turbidité;
- 4- de caractériser les particules dans l'eau usée et pour vérifier la validité du traitement.

Afin de réaliser les diverses expériences, notamment, pour fixer la tension optimale, l'écart entre les électrodes et le temps de traitement; il est nécessaire de procéder à un choix du type de pollution pouvant être utilisé. Pour cela, notre choix s'est porté sur la mesure de la turbidité par mesure de la densité optique.

## 2. MATERIELS ET METHODES

Les expériences ont été réalisées dans une installation comprenant un récipient en plexiglas, dans lequel se trouvent deux électrodes en aluminium ( $3.5 \times 2 \times 0,01 \text{ cm}^3$ ) [27-30], installées au milieu du récipient, alimentées par un courant continu à l'aide d'un redresseur, fournissant une tension entre 00 et 30 V et une tension de 00 à 8 A.

Le schéma de principe de cette installation est représenté par la figure 1. Les échantillons à analyser ont été pris d'une hauteur localisée à 5 cm au-dessus du fond du récipient qui contient un litre d'eau.

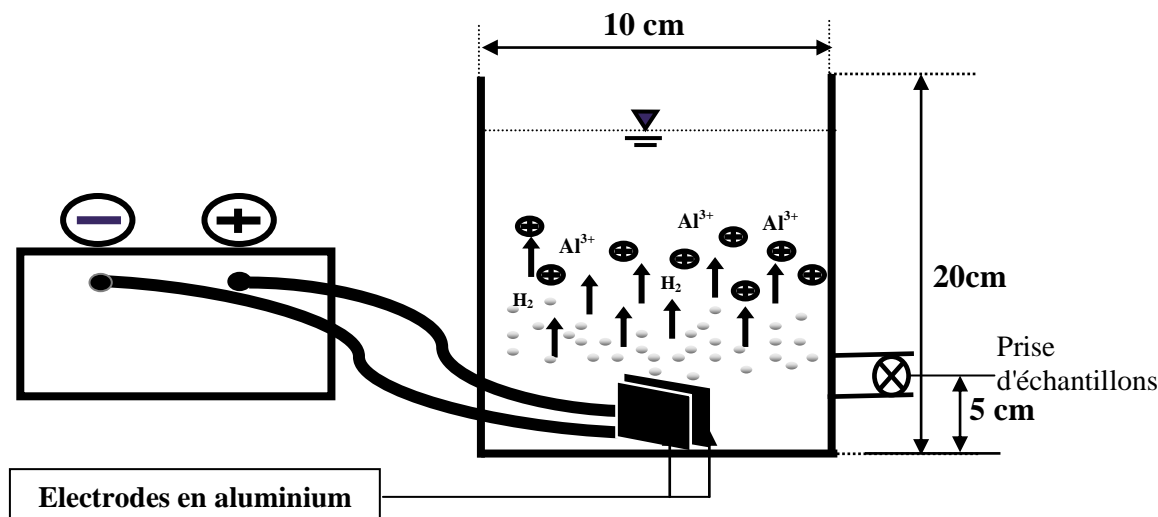


Figure 1. Schéma d'un électroflottateur en batch.

## 2.1 La solution synthétique

La solution synthétique est constituée du gel de silice (FLUKA) (500 mg) et d'un litre d'eau de robinet du réseau d'alimentation en eau potable (AEP).

Une Tamiseuse (Retch  $43 \mu\text{m} < d < 1000 \mu\text{m}$ ) a été utilisée pour caractériser la granulométrie du gel de silice à une dimension  $43 \mu\text{m} < d < 500 \mu\text{m}$ .

## 2.2 Echantillonnage

L'échantillon utilisé est prélevé de la station d'épuration d'ALCOVEL (Algérienne des cotonnades et velours) d'Akbou (W. Béjaïa). Ayant les caractéristiques suivantes (pH=7.8,  $\text{DBO}_5=310 \text{ mg/L}$ ,  $\text{DCO}=620 \text{ mg/L}$ ,  $\text{MES}=300 \text{ mg/L}$ ,  $\text{Turbidité}=765.5 \text{ NTU}$ , couleur >200 cobalt-platine) [24].

## 2.3 Analyse des échantillons

La détermination de la turbidité est réalisée par un spectrophotomètre UV-vis (Shimadzu UVPC1601, Japan) et un turbidimètre. Les mesures de la demande biologique en oxygène ( $\text{DBO}_5$ ), des matières en suspension (MES) et de la demande chimique en oxygène (DCO) selon les *Standard methods* [25]. La

couleur est mesurée à l'aide d'un colorimètre selon le degré ICUMSA. La quantification des métaux (Fe, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd) est réalisée par spectrométrie d'absorption atomique SAA (Shimadzu, Japan) [26,27].

## 3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

En électroflottation avec des électrodes en aluminium, l'anode émet les ions  $\text{Al}^{3+}$ , causant la neutralisation de la charge extérieure des particules (du potentiel zêta) dans l'eau. La cathode produit le gaz  $\text{H}_2$  (par électrolyse), ayant pour conséquence la flottation de la matière en surface.

On trouve trois principales réactions dans le réacteur, à savoir [31] :

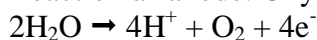
Réaction à l'anode: Oxydation  
 $\text{Al}_{(s)} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3e^-$

Réaction à la cathode: Réduction  
 $3\text{H}_2\text{O} + 3e^- \rightarrow \frac{3}{2} \text{H}_{2(g)} + 3\text{OH}^-$

Réaction de l'hydrolyse:  
 $\text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$

A ces réactions, on peut ajouter pour le cas d'une électroflottation seule (électrodes inertes) les réactions suivantes:

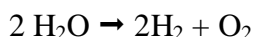
Réaction à l'anode: Oxydation



Réaction à la cathode: Réduction



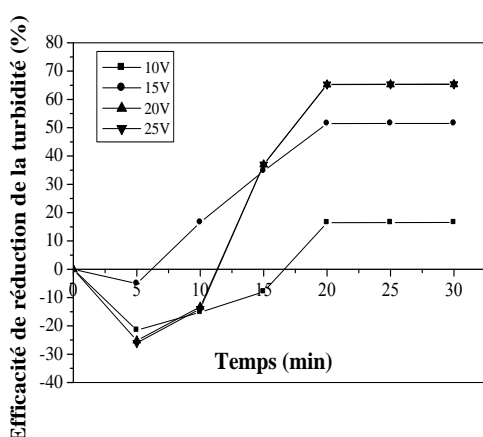
Réaction totale:



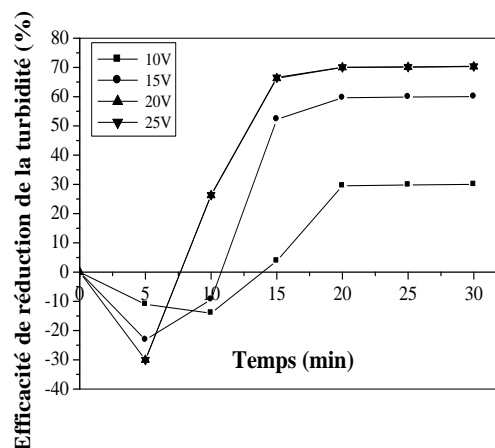
### 3.1. Effet de la tension appliquée sur l'efficacité d'élimination de la turbidité

Pour mesurer la tension optimale de fonctionnement d'électroflottation, l'influence de divers paramètres (tension appliquée, l'écart entre les électrodes, temps de traitement) sur l'efficacité de réduction de la turbidité est représentée sur les figures suivantes.

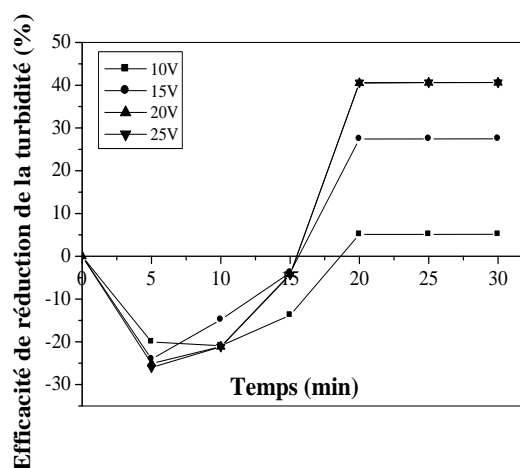
D'après les figures 2-4, les allures des trois courbes sont similaires, ce qui suppose vraisemblablement que les mêmes phénomènes s'y déroulent. Les tensions appliquées (10, 15, 20 et 25 V) et les distances entre les électrodes (1, 2 et 3 cm) ont affecté considérablement la réduction de la turbidité.



**Figure 2.** Effet de la tension appliquée  $U$  sur l'efficacité d'élimination de la turbidité :  $C_0=500$  mg/L, écart entre les électrodes  $E=1$  cm,  $pH$  initial=7.3, conductivité  $\kappa=1.6$  mS/cm.



**Figure 3.** Effet de la tension appliquée  $U$  sur l'efficacité d'élimination de la turbidité :  $C_0=500$  mg/L, écart entre les électrodes  $E=2$  cm,  $pH$  initial=7.3, conductivité  $\kappa=1.6$  mS/cm.



**Figure 4.** Effet de la tension appliquée  $U$  sur l'efficacité d'élimination de la turbidité :  $C_0=500$  mg/L, écart entre les électrodes  $E=3$  cm,  $pH$  initial=7.3, conductivité  $\kappa=1.6$  mS/cm.

Cette dernière augmente quand l'écart entre les électrodes  $E$  diminue et la tension appliquée  $U$  augmente respectivement. Une efficacité de réduction de la turbidité (70.8 %) a été enregistrée à 20 V dans un temps d'exécution de 20 minutes et pour un écart de 01 cm entre les électrodes. L'efficacité négative de la réduction de la turbidité peut être expliquée : durant le passage du

courant électrique, une convection additionnelle apparaisse. Selon Edeline [33], l'aluminium dissous se polymérise sous la forme d'hydroxyde d'aluminium et augmente ainsi la turbidité. Ainsi, la menée de l'efficacité de séparation pour les autres paramètres sera accomplie seulement à la tension optimale 20 V, un écart de 1 cm entre les électrodes et un temps de traitement de 20 min.

#### 4. ETUDE DE CAS – ALCOVEL

Afin de voir l'efficacité du procédé ainsi que le degré de fiabilité des paramètres fixés dans le cas du modèle d'eau usée simulée ; nous avons étudié un échantillon réel, pris des rejets industriels du complexe d'ALCOVEL d'Akbou. Les caractéristiques initiales de l'échantillon étudié sont regroupées dans le tableau 1.

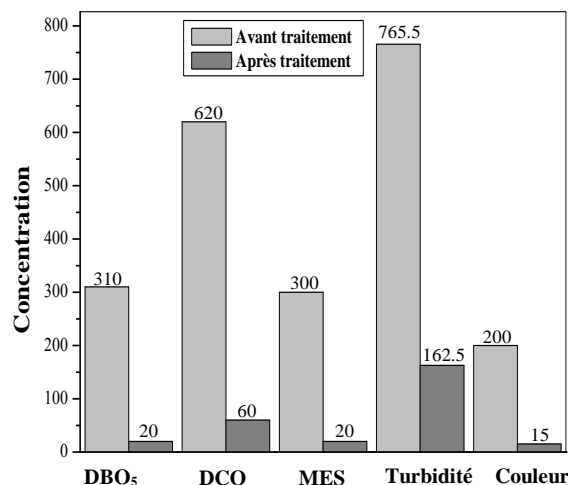
**Tableau 1.** Caractéristiques initiales de l'échantillon utilisé

Caractéristiques	Valeur
pH	8.7
Demande biologique en oxygène DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	310
Demande chimique en oxygène DCO (mg O <sub>2</sub> /L)	620
Matières en suspension MES (mg/L)	300
Turbidité (NTU)	765.5
Couleur (Co-Pt)	> 200
Conductivité $\kappa$ ( $\mu$ S/cm)	3120

Sous l'application des conditions expérimentales optimisées, les caractéristiques finales de l'eau usée utilisée après traitement par électroflottation sont représentées sur la figure 5.

La plupart des particules en suspension qui génèrent la turbidité a été enlevée à 93.3%. En plus, la réduction de la DBO<sub>5</sub> et de la DCO a été de 93.5% et 90.3%, respectivement, montrant que cette technique est aussi efficace pour la matière soluble qu'elle est pour la matière insoluble (turbidité et MES). La grande diminution de la couleur de l'échantillon (> 93%) montre que l'électroflottation est une technique de choix pour la clarification des eaux usées. Il est à noter

que l'incidence sur le pH est presque négligeable.



**Figure 5.** Efficacité de réduction pour différents paramètres: tension appliquée  $U=20$  V, temps de séjour  $t=20$  min, écart entre les électrodes  $E=1$  cm, pH initial=8.7, conductivité  $\kappa=3.12$  mS/cm.

#### 5. SEPARATION DES METAUX LOURDS

Afin de voir l'efficacité de la technique d'électroflottation pour le cas de la séparation des ions métalliques contenus dans les rejets industriels par électroflottation; nous avons analysé des solutions synthétiques contenant quelques métaux lourds, tels que le fer, le nickel, le cuivre, le zinc, le cadmium et le plomb.

Les équations des courbes d'étalonnage des métaux étudiés sont représentées dans le tableau 2.

##### 5.1 En présence des sulfates

Des solutions modèles de CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O, NiSO<sub>4</sub>.6H<sub>2</sub>O, ZnSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O, FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O, PbSO<sub>4</sub> et CdSO<sub>4</sub>.8H<sub>2</sub>O ont été utilisées pour mener les expériences. Toutes les solutions ont été préparées en utilisant de l'eau distillée fraîchement préparée, et ayant les caractéristiques

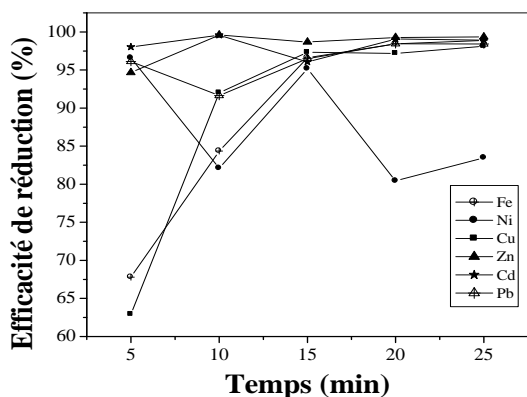
suivantes : concentration initiale  $C_0=100$  mg/L, pH initial=8, et conductivité  $\kappa=2.7$  mS/cm.

**Tableau 2.** Equations des courbes d'étalonnage des métaux étudiés.

Y=a C+b	Coefficient de corrélation	Longueur d'onde (nm)
$Y_{Cu}=0.0723 C+0.0000$	$r^2=0.9988$	324.8
$Y_{Ni}=0.0448 C+0.0071$	$r^2=0.9978$	232.0
$Y_{Zn}=0.1374 C+0.0013$	$r^2=0.9999$	213.9
$Y_{Fe}=0.0532 C+0.0239$	$r^2=0.9898$	248.3
$Y_{Cd}=0.1268 C+0.0024$	$r^2=0.9993$	228.8
$Y_{Pb}=0.0082 C+0.0048$	$r^2=0.9924$	283.3

Y : absorbance, C : concentration (mg/L), a : coefficient d'absorbance atomique, b : le signal de la ligne de base (bruit de fond).

Les résultats expérimentaux sont représentés sur la figure 6.



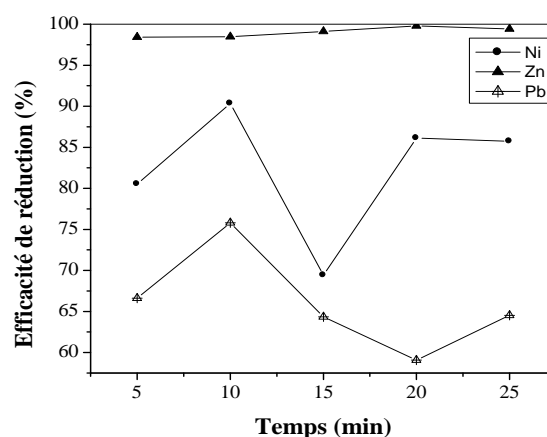
**Figure 6.** Efficacité de réduction de différents métaux - présence des sulfates:  $C_0=100$  mg/L,  $U=20$  V, écart entre les électrodes  $E=1$  cm, pH initial=8, conductivité  $\kappa=2.7$  mS/cm.

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que le procédé d'électroflottation fonctionne pour tous les métaux étudiés. Comparant les résultats obtenus dans cette étude avec d'autres

travaux [34-37], on peut constater que le procédé d'électroflottation a un rendement moyen de 93%, la cinétique d'électroflottation est rapide et ne dépasse pas les 5 minutes (efficacité = 95 – 99%), sauf pour le fer et le cuivre, nécessitent un temps de 15 min pour atteindre plus de 95%. Il est à noter que le pH subit des variations dans le sens de la baisse, ceci est vraisemblablement dû à une neutralisation des ions  $Al^{3+}$  par les ions OH [38].

### 5.2 En présence des chlorures

Afin d'étudier et de clarifier l'influence des ions chlorures sur la cinétique d'électroflottation, nous avons étudié les solutions de  $PbCl_2$ ,  $NiCl_2 \cdot 6H_2O$  et  $ZnCl_2$  à pH initial= , conductivité  $\kappa=2.7$  mS/cm et à une concentration de 100 mg/L. Les résultats expérimentaux sont représentés sur la figure 7.



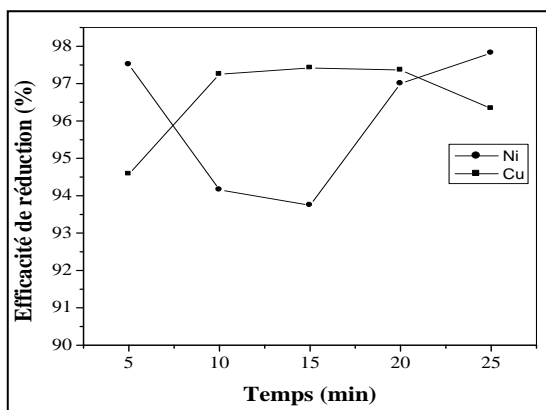
**Figure 7.** Efficacité de réduction de différents métaux - présence des chlorures:  $C_0 = 100$  mg/L,  $U = 20$  V, écart entre les électrodes  $E = 1$  cm, pH initial = 8, conductivité  $\kappa = 2.7$  mS/cm.

La figure 7 montre que la cinétique d'électroflottation de  $NiCl_2$  et de  $PbCl_2$  est plus lente que celle de  $ZnCl_2$ . L'efficacité d'épuration est située entre 75 et 99%, après 10 min seulement.

### 5.3 En présence des nitrates

Des solutions modèles de  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ont été utilisées pour ce cas.

La concentration de chaque solution modèle est 100 mg/L, pH initial=8, et conductivité  $\kappa=2.7$  mS/cm. Les résultats expérimentaux sont représentés sur la figure 8.



**Figure 8.** Efficacité de réduction de différents métaux - présence des nitrates:  $C_0=100$  mg/L,  $U=20$  V, écart entre les électrodes  $E=1$  cm, pH initial=8, conductivité  $\kappa=2.7$  mS/cm.

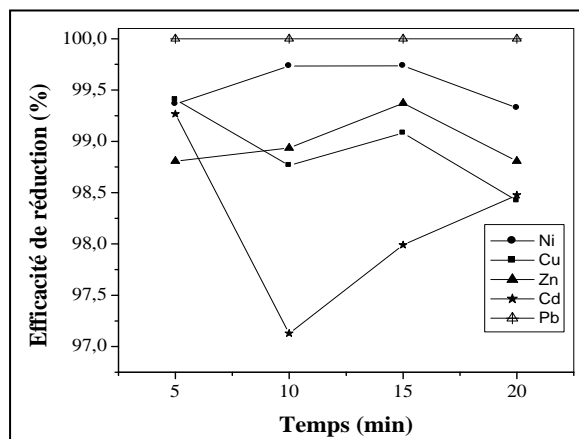
La figure 8 montre que la cinétique d'électroflottation est rapide. Nous constatons aussi que l'efficacité de traitement de  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$  est de 97.5% après 5 minutes de mise en marche, ensuite elle diminue aux environs de 94%, pour reprendre sa valeur initiale à 25 min. Ceci est peut être dû à la masse atomique du nickel.

### 5.4 Cinétique d'électroflottation des solutions polymétalliques

Pour les solutions polymétalliques, nous avons préparé une solution contenant les ions des métaux ; Pb, Zn, Ni, Cu et Cd en présence des sulfates.

La concentration de chaque solution modèle est 100 mg/L, pH initial = 8, et conductivité  $\kappa = 2.7$  mS/cm. Les résultats

expérimentaux sont représentés sur la figure 9.



**Figure 9.** Efficacité de réduction de différents métaux – solution polymétalliques:  $C_0=100$  mg/L,  $U=20$  V, écart entre les électrodes  $E=1$  cm, pH initial=8, conductivité  $\kappa=2.7$  mS/cm.

La figure 9 montre que l'efficacité de traitement des solutions polymétalliques contenant les sulfates est plus rapide que dans le cas d'une solution monométallique (fig. 6-8).

Il est à noter que l'efficacité de traitement est de l'ordre de 99% pour tous les métaux. Pour le sulfate de plomb, nous n'avons enregistré aucune trace.

## CONCLUSIONS

Il ressort de cette étude que :

- Le procédé d'électroflottation possède de nombreux débouchés dans le domaine du traitement des eaux usées.
- L'application des paramètres optimisés sur les eaux de rejets de la station d'épuration d'ALCOVEL d'Akhou a montré, une réduction de la DBO<sub>5</sub>, DCO, la turbidité et des MES de 93.5%, 90.3%, 78.7% et 93.3%, respectivement.
- La grande diminution de la couleur de l'échantillon (> 93%) montre que l'électroflottation est une technique de choix pour la clarification des eaux usées.

- Pour une concentration de 100 mg/L, pH initial 8, et conductivité  $\kappa = 2.7$  mS/cm, le procédé d'électroflottation fonctionne pour tous les métaux étudiés.
- Les anions  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{NO}_3^-$  contenus dans les eaux usées n'influent ni sur la cinétique, ni sur l'efficacité d'épuration des différentes solutions métalliques étudiées.
- La cinétique d'électroflottation est rapide et ne dépasse pas les 15 minutes, le taux d'épuration est acceptable et atteint les 99%.
- L'efficacité de traitement des solutions polymétalliques contenant les sulfates est plus rapide que dans le cas des solutions monométalliques.

Ainsi, dans l'optique d'une réglementation plus stricte, particulièrement avec la future notion de déchets ultimes, l'augmentation de la qualité et la diminution du volume de boues formées font de ce procédé une technique pleine d'avenir.

**Remerciements:** Nous tenons à remercier tout le personnel du complexe ALCOVEL d'Akbou.

## Références

- [1] R.W. Peters, T.J. Walker, J.E. Eriksen, T.K. Cheng, Y. Ku et W.M. Lee, *Wastewater treatment -physical and chemical methods*, J. Water Pollut. Control Fed., Vol. 57, 1985, pp. 503–517.
- [2] J.S. Do et M.L. Chen, *Decolorization of dye containing solutions by electrocoagulation*, J. Applied Electrochem., Vol 24, 1994, pp. 785–790.
- [3] J.Q. Jiang et J.D. Graham, *Enhanced coagulation using Al/Fe (III) coagulants: effect of coagulant chemistry on the removal of color-causing NOM*, Environ. Technol., Vol. 17, 1996, pp. 937–950.
- [4] Y.M. Slokar et A.M. Le Marechal, *Methods of decoloration of textile wastewaters*, Dyes Pigments, Vol. 37, 1998, pp. 335–356.
- [5] A.J. Greaves, D.A.S. Phillips et J.A. Taylor, *Correlation between the bioelimination of anionic dyes by an activated sewage sludge with molecular structure, Part 1: Literature review*, JSDC, Vol. 115, 1999, pp. 363–365.
- [6] P. Thebault, J.M. Cases et F. Fiessinger, *Mechanism underlying the removal of organic micropollutants during flocculation by an aluminum or iron salt*, Water Res., Vol. 15, 1981, pp. 183–189.
- [7] S.F. Kang et H.M. Chang, *Coagulation of textile secondary effluents with Fenton's reagent*, Water Res., Vol. 36, 1997, pp. 215–222.
- [8] C. Hachem, F. Bocquillon, O. Zahraa et M. Bouchy, *Decolourization of textile industry wastewater by the photocatalytic degradation process*, Dyes Pigments, Vol. 49, 2001, pp. 117–125.
- [9] W. Chu et S.M. Tsui, *Modeling of photodecoloration of azo dye in a cocktail photolysis system*, Water Res., Vol. 36, 2002, pp. 3350–3358.
- [10] A. Pala et E. Tokat, *Color removal from cotton textile industry wastewater in an activated sludge system with various additives*, Water Res., Vol. 36, 2002, pp. 2920–2925.
- [11] M.V.B. Zanoni, J. Sene et M.A. Anderson, *Photoelectrocatalytic degradation of remazol brilliant orange 3R on titanium dioxide thin-film electrodes*, J. Photochem. Photobiol. A: Chem., Vol. 157, 2003, pp. 55–63.



- [12] B. Zielinska, J. Grzechuska et A.W. Morawski, *Photocatalytic decomposition of textile dyes on TiO<sub>2</sub> Tytanpol A11 and TiO<sub>2</sub>-Degussa P25*, J. Photochem. Photobiol. A: Chem., Vol. 157, 2003, pp. 65–70.
- [13] T.H. Kim, C. Park, E.B. Shin et S. Kim, *Decolorization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation process*, Desalination, Vol. 150, 2002, pp. 165–175.
- [14] N. Daneshvar, A. Oladegaragoze et N. Djafarzadeh, *Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation: an investigation of the effect of operational parameters*, J. Hazard. Mater., Vol. 129, 2006, pp. 116–122.
- [15] M. Bayramoglu, M. Eyvaz et M. Kobya, *Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation: economical evaluation*, Chem. Eng. J., Vol. 128, 2007, pp. 155–161.
- [16] M. Kobya, O.T. Can, M. Bayramoglu, *Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes*, J. Hazard. Mater., Vol. 100, 2003, pp. 163–178.
- [17] A. Alinsafi, M. Khemis, M.N. Pons, J.P. Leclerc, A. Yaacoubi, A. Benhammou et A. Nejmeddine, *Electrocoagulation of reactive textile dyes and textile wastewater*, Chem. Eng. Process, Vol. 44, 2005, pp. 461–470.
- [18] B.G. Hernlem, et S. Tsai, *Chlorine Generation and Disinfection by Electroflotation*, Journal of Food Science, Vol. 95, Issue 05, 2000, pp. 834-837.
- [19] M. Fouletier, J.B. Mathieu, et P. Noual, *Les applications de l'électrochimie à l'hydrométallurgie*, Edition Pluralis – Paris, 1980.
- [20] M.Y.A. Mollah, R. Schennach, J.R. Parga et D.L. Cocke, *Electrocoagulation (EC) - science and applications*, J. Hazard. Mater., Vol. 84, 2001, pp. 29–41.
- [21] M.Y.A. Mollah, P. Morkovsky, J.A.G. Gomes, M. Kesmez, J.R. Parga et D.L. Cocke, *Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation*, J. Hazard. Mater., Vol. 114, 2004, pp. 199–210.
- [22] P.K. Holt, G.W. Barton et C.A. Mitchell, *The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology*, Chemosphere, Vol. 59, 2005, pp. 355–367.
- [23] B. Merzouk, K. Madani, M. Yakoubi et M. Chibane, *Essais sur le traitement des eaux usées par électroflotation*, JPSI'1-2002, UHBC Chlef, pp.15-17
- [24] B. Merzouk, K. Madani et M. Chibane, *Clarification des eaux usées par électro-flotation*, Séminaire sur la Chimie pour l'environnement, Université de Tiaret, Décembre 2002, pp. 16-18.
- [25] APHA/AWA/WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19 th ed., 1995.
- [26] M. Pinta, *Spectrophotométrie d'absorption atomique*, Techniques de l'Ingénieur, Vol.10, Issue 2825, 1985.
- [27] B. Merzouk, *Traitement des effluents industriels par électroflotation*, Mémoire de Magister, Université de Béjaia, 2003.
- [28] A.E. Wilcock, M. Brwster et G. Peck, *Use of electrochemical technology to remove color and other contaminants from textile mill effluents*,

Environmental Chemistry of Dyes and Pigment, 1996, pp. 61-74.

[29] N.S. Abuzaid, A.A. Bukhari et Z.M. Alhamouze, *Removal of bentonite causing turbidity by electrocoagulation*, Environmental Science Health, A 33, 1998, pp. 1341-1358.

[30] U.B. Ogutveren, N. Gonen et S. Kopalal, *Removal of chromium from aqueous solutions and plating bath rinse by an electrochemical method*, Intern. J. Environmental Studies, Vol. 45, 1994, pp. 81-87.

[31] X. Chen, G. Chen et P.L. Yue, *Investigation on the electrolysis voltage of electro-coagulation*, Chem. Eng. Sci., Vol. 57, 2002, pp. 2449–2455.

[32] M. Khemis, J.P. Leclerc, G. Tanguy, G. Valentin et F. Lapique, *Treatment of industrial liquidwastes by electrocoagulation: Experimental investigations and an overall interpretation model*, Chem. Eng. Science, Vol. 61, 2006, pp. 3602–3609.

[33] F. Edeline, *l'épuration physico-chimique des eaux, théorie et technologie*,

Cebedoc Editeur Lavoisier Tec. et Doc., 1996.

[34] L. Alexandrova, T. Nedialkova et I. Nishkov, *Electroflotation of metal ions in wastewater*, Int. Jour. Miner. Process, Vol. 41, 1994, pp. 285-294.

[35] C. Escobar, C.S. Salazar et M.I. Toral, *Optimisation of the electrocoagulation process for the removal of copper, lead and cadmium in natural waters and simulated wastewater*, J Environ. Manag., Vol. 81, 2005, pp. 384–391.

[36] R.G. Casqueira et M.L. Torem, *Flotation applied to the removal of heavy metals*, CETEM/MCT Env. Techn., Vol. 28, 2003, pp. 1–74.

[37] A. Khelifa, S. Moulay et A.W. Naceur, *Treatment of metal finishing effluent by the electroflotation technique*, Desalination, Vol. 181, 2005, pp. 27–33.

[38] A.V. Eilen, A.C. Dale, S.E. Arild et T.G. Egil, *Electrocoagulation of potable water*, Water Res., Vol. 18, 1984, pp. 1355–1360.