

Efficacité de l'électrocoagulation dans de l'élimination de l'arsenic dans les effluents de la mine de Loulo à Kéniéba (République du Mali)

**Hanni KONE^{1*}, Farmata Koro YARO¹, Agnès TOGO¹,
Aminata SY¹, Domo DJIGUIBA¹, Oumou LY¹,
Bintou BERTHE¹, Mohamed Lamine DOUMBIA¹,
Mamadou Mariam TRAORE¹,
Fily Balla DEMBELE¹**

Résumé

Les activités minières industrielles génèrent d'énormes quantités d'eaux de procédé qui ont généralement divers contaminants dangereux parmi lesquels on peut citer l'arsenic. La méthode utilisée est le procédé de traitement des eaux basée sur la dissolution électrochimique d'un métal sacrificiel qui, une fois dans l'effluent et moyennant les autres réactions connexes telle que l'électrolyse de l'eau, donne des complexes d'hydroxydes métalliques qui vont assurer l'adsorption puis la floculation des particules et des composés polluants dissouts. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'efficacité du procédé de l'électrocoagulation dans l'élimination de l'arsenic dans les eaux usées de Loulo. La teneur en arsenic dans les eaux usées au départ était à 16,4 mg/L, une valeur nettement au-dessus de la norme malienne des eaux de rejets (0,5 mg/L). A l'issu de l'expérimentation qui aura duré un temps d'électrolyse de 30 minutes avec une intensité de 1,50 ampère, le taux d'élimination de l'arsenic est de 99,82% et la teneur d'arsenic passe à 0,02 mg/L. Les paramètres opératoires ont montré que l'électrocoagulation est plus apte à être employée technologiquement en raison de son faible coût opérationnel car elle ne nécessite pas l'usage de produits chimique dans l'élimination de l'arsenic dans les effluents industriel.

Mots clés : Mine de Loulo, effluents arsénieux, élimination de l'arsenic, électrocoagulation

Effectiveness of electrocoagulation in the removal of arsenic in the effluents of the Loulo mine in Kéniéba (Republic of Mali)

Abstract

Industrial mining activities generate huge amounts of process water that typically has a variety of hazardous contaminants including arsenic. The method used is the water

¹ Laboratoire National des Eaux (LNE), Sotuba Mali Univers, Bamako, Mali, email : lineaux@yahoo.fr, (+223) 66 75 37 85/66 75 37 86

*Auteur correspondant : Hanni KONE, hannikone21@yahoo.fr

treatment process based on the electrochemical dissolution of a sacrificial metal which, once in the effluent and through other related reactions such as water electrolysis, gives metal hydroxide complexes that will ensure the adsorption and flocculation of the particles and dissolved polluting compounds. The objective of this study is to evaluate the effectiveness of the electrocoagulation process in the elimination of arsenic in the wastewater of Loulo. The arsenic content in wastewater at baseline was 16.4 mg/L, a value well above the Malian standard for waste water (0.5 mg/L). At the end of the experiment, which lasted 30 minutes of electrolysis with an intensity of 1.50 ampere, the arsenic removal rate was 99.82% and the arsenic content increased to 0.02 mg/L. The operating parameters showed that electrocoagulation is more suitable for use technologically because of its low operational cost because it does not require the use of chemicals in the removal of arsenic in industrial effluents.

Keywords: Loulo Mine, Arsenic Effluents, Arsenic Removal, Electrocoagulation

Introduction

L'arsenic, découvert en 1250, est un élément chimique de la quinzième colonne de la classification périodique des éléments, avec des propriétés intermédiaires entre celles des métaux et des métalloïdes. En raison de sa forte électronégativité, l'arsenic ne possède pas de caractère métallique, c'est donc un élément intermédiaire se rattachant tantôt à un groupe, tantôt à l'autre. Enfin, sa capacité à former des liaisons covalentes stables avec le carbone et l'hydrogène entraîne la formation de composés organiques arséniés, variés d'origine naturelle ou anthropique (PALLIER, 2008). Durant les dernières décennies, un grand intérêt a été porté à la recherche sur la présence et le comportement de l'arsenic dans l'environnement en raison des graves problèmes posés par cet élément très toxique, dont l'élimination des milieux pollués est devenue un enjeu mondial de première importance (RIVERA ZAMBRONO, 2012). Le premier document rapportant l'utilisation de l'Electrocoagulation (EC) pour le traitement des effluents est un brevet américain déposé en 1880 par Webster qui utilisait des électrodes en fer. La même année, une station d'épuration fut construite sur la base de ce brevet, à Salford (Grande-Bretagne) pour traiter les eaux polluées urbaines. 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. La technologie a été optimisée pour minimiser la consommation énergétique et pour augmenter l'efficacité

du traitement (ZODI, 2012). L'électrocoagulation est basée généralement sur le principe des anodes solubles. 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+} ou Al^{3+}) (BELOUDAH, 2020). Elle est considérée comme un procédé complexe avec une multitude de mécanismes synergiques concourant au traitement de la pollution. (ZONGO, 2009) a identifié trois catégories de mécanismes en électrocoagulation. Cette technique permet donc de diminuer le coût d'utilisation des produits chimiques et diminue par le fait même la production finale de boue dont il faut disposer. Le procédé crée un mouvement d'ions et de particules chargées. Cette action permet de rassembler les matières en suspension sous forme de floccs qu'on élimine après par un procédé physique (filtration, décantation, flottation). En utilisant les anodes de fer et d'aluminium, on arrive à faire passer en solution des quantités contrôlables d'ions métalliques indispensables à la création des floccs de taille suffisante (IMENE, 2023). Plusieurs méthodes sont utilisées pour traiter les eaux usées industrielles et l'unité de traitement est choisie en fonction du type d'eau à traiter, du lieu, des installations en place, des coûts, etc. (ASSELIN, 2007). Ces derniers temps, les problèmes occasionnés par les contaminants chimiques, en particulier les métaux, dans l'environnement, suscitent l'attention de la communauté scientifique (KOUADIO, 2023). Quelles que soient les conditions de matrice, l'électrocoagulation floculation (ECF) assure une meilleure élimination de l'As (III) en raison de son oxydation en As (V) à la suite de l'oxydation des espèces ferreuses générées au cœur du réacteur en espèces ferriques. Au contraire, l'As (V) est plus efficacement éliminé au cours du procédé de coagulation floculation (CF), son élimination étant directement liée au potentiel zêta et donc à la déstabilisation de la suspension colloïdale (PALLIER et al., 2008). Cette recherche a permis de démontrer l'efficacité de l'électrocoagulation dans le traitement d'effluents industriels chargés en matière organique. En effet, c'est bien par la formation in situ d'agent coagulant (Al^{3+} , Fe^{2+}) provenant de la dissolution anodique que les différentes eaux usées testées ont été clarifiées (ASSELIN, 2007). L'électrocoagulation (EC) a largement été appliquée avec succès par différents auteurs pour le traitement d'effluents de natures diverses, et notamment en Algérie. Ainsi, (LEMLIKCHI, 2012) a cité l'élimination des ions fluorures dans les eaux du Sud Algérien par électrocoagulation bipolaire en utilisant des électrodes en aluminium. Dans cette étude, elle montre que la concentration en fluorures de $6,0 \text{ mg.L}^{-1}$ a été réduite à moins de $0,8$

mg.L⁻¹ enregistrant ainsi un taux d'abattement de l'ordre de 90%. L'EC a été utilisée pour l'élimination des nitrates Kopal et Ögütveren (2002) et des phosphates (Irdemez et al., 2006) retrouvés dans les eaux de surface et le sol, surtout dans les zones où l'agriculture est la principale activité, sachant qu'ils sont responsables d'un problème majeur qui est l'eutrophisation des eaux de surface. Le traitement de l'eau polluée par les rejets d'une industrie de raffinage mécanique et chimique, caractérisée par une teneur élevée en matières en suspensions, une Demande Chimique en Oxygène (DCO) supérieure à 500 mg.L⁻¹, une concentration en cuivre de l'ordre de 100 mg/L, a permis d'atteindre 99% d'élimination du cuivre et 75% de la Demande Chimique en Oxygène (DCO) par électrocoagulation en utilisant des électrodes en fer et en aluminium Chen et Sheng (2023). Le procédé d'Electrocoagulation (EC) a été utilisé pour le traitement de solutions colorées par différentes substances telles que le bleu de méthylène et le jaune éosine (Golder et al., 2005). Des chercheurs thaïlandais ont isolé des produits naturels à partir des plantes par EC ; celle-ci leur a donné de meilleurs résultats par rapport aux méthodes classiques telles que, l'extraction par solvants ou la chromatographie, où des solvants organiques toxiques doivent être utilisés en grandes quantités et qui peuvent engendrer éventuellement d'autres contaminations (Jumpatong et al., 2006) et (Koby et al., 2006) ont traité par EC des rejets d'usine de traitement de pommes de terre très chargés en composés organiques incluant des carbohydrates, de l'amidon, des protéines, des vitamines, des pectines et des sucres qui sont responsables d'une grande Demande Chimique en Oxygène (DCO), Demande Biologique en Oxygène (DBO) et de matières en suspension. Les résultats obtenus suite à l'élimination de la lignine et du phénol des effluents de papeteries par EC ont prouvé que celle-ci pouvait être une alternative efficace pour le traitement de ce genre d'effluents (Ugurlu et al., 2007). L'électrocoagulation a été appliquée comme prétraitement des rejets des industries de production d'huile d'olive (margines) où la majorité des composés phénoliques responsables de la couleur sombre, de la phyto toxicité etc., ont été polymérisés (Khoufi et al., 2007). L'étude de (HOSNY, 1996) a démontré que l'ajout de NaCl à une émulsion huile/eau diminue la consommation d'énergie pendant le processus d'électroflottation par une augmentation de la conductivité de l'émulsion. (Essadki et al., 2008) ont appliqué également l'électrocoagulation/flottation dans un réacteur en boucle externe à lit fluidisé pour décolorer les eaux usées de l'industrie textile. (Martinez-

Huitle et al., 2009 ; Aoudj et al., 2010) ont appliqué le procédé d'électrocoagulation pour le traitement des eaux usées contenant des colorants textiles industriels. (Yahiaoui et al., 2010) ont traité des eaux usées de l'usine d'huile d'olive par la combinaison d'un réacteur d'ultrafiltration électrochimique et de procédés bipolaires. (Balla et al., 2010) ont appliqué le procédé d'électrocoagulation/flottation pour le traitement de colorants réactifs, dispersés et mélangés dans un réacteur externe à lit fluidisé. Les inconvénients de l'électrocoagulation peuvent également être énoncés. En effet, pour permettre un passage du courant suffisant, l'effluent à traiter doit être suffisamment conducteur et il y a toujours une probabilité d'avoir la formation d'un film d'oxyde passivant la surface des électrodes, ce qui peut diminuer de façon importante l'efficacité du système (Mollah et al., 2001). Un autre désavantage de ce procédé de traitement, selon le type d'effluents industriels et de la position géographique est que les coûts d'opération sont concurrentiels (Chen, 2004). Selon (Calvo et al., 2003) l'électrocoagulation est une technique qui peut traiter efficacement plusieurs types d'effluents mais l'efficacité et les coûts qui y sont reliés ne peuvent être prédits par des modèles. L'étude révèle que l'efficacité de l'électrocoagulation n'est plus à démontrer dans le monde entier pour éliminer les polluants toxiques dans les effluents industriels.

I. Localisation de la Zone d'étude

Le cercle de Kéniéba est situé dans la partie sud-ouest de la région de Kayes. Il est limité au nord par les cercles de Bafoulabé et Kayes ; au sud par la République de la Guinée ; à l'ouest par la République du Sénégal et à l'est par le cercle de Kita (Fig. 1 1a et 1b). Le cercle a environ 618 km de frontière avec les Républiques de la Guinée et du Sénégal et compte 206 villages administratifs répartis entre douze communes : Bayé, Dombia, Kassama (Zone de montagne), Dabia, Dialafara, Faléa, Faraba, Kéniéba, Kourokoto, Guénégoré, Sagalo et Sitakily (zone basse). Il couvre une superficie d'environ 16400 km² pour une population de 197.050 habitants (RGPH, 2011) soit une densité moyenne d'environ 12 habitants/km². La population est composée de 51 % de femmes et de 49 % d'hommes. Le Chef-lieu du cercle de Kéniéba est situé à 415 Km de Bamako à partir de la RN24 (TRAORÉ, 2022). La présente étude a été réalisée dans la commune de Sitakily (Fig.1 1c). Le tableau I ci-après montre les coordonnées géographiques des points d'échantillonnage.

Tableau I : Coordonnées des points d'échantillonnage

Points de prélèvements	Coordonnées géographique (WGS 84 29P)	
	X (Easting)	Y (Northing)
Pool 1	245865	1449047
Tailling Deposit	246465	1449923
Détox	246437	1449867
Return Water Pond	238102	1447517
Return Water Dam	244300	1449489
IN	246378	1449826
Loulo3	241519	1445692
P129	239723	1445072
Infiltration du TSF (D)	246129	1448324
Poul 2	244778	1448447

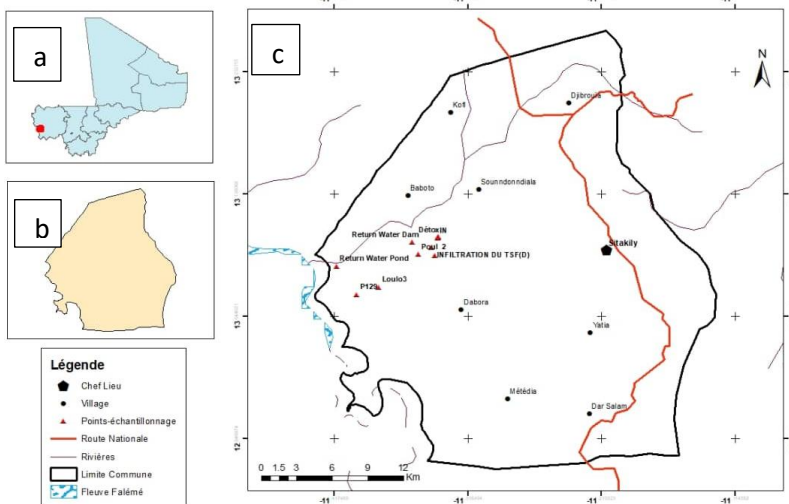


Figure 1 : Localisation géographique de la zone d'étude

- Carte territoriale du Mali
- carte de la commune de Sitakily,
- Localisation des points d'échantillonnage sur la carte de la commune de Sitakily

II. Matériel et méthodes

II.1. Matériels

Pour réaliser notre travail, plusieurs matériels et appareils ont été utilisés. Mise à part la verrerie, l'appareillage employé pour les différentes expériences et analyses sont :

- une Plaque chauffante (l'agitation et le chauffage des mélanges ont été assurés par une plaque chauffante à agitation magnétique) ;

- une cellule électrolytique en plexiglas (c'est une cuve de forme rectangulaire graduée dans laquelle les électrodes sont introduites afin de réaliser l'électrolyse) ;
- les électrodes de fer (Plaques de fer de formes rectangulaires utilisées comme coagulant dans l'EC) ;
- un générateur de courant continu (FPS -305D, DC power supply, 30V-5A) servant à transférer le courant au dispositif à l'aide d'une source d'énergie ;
- la distance inter électrodes (matériaux en polystyrène de formes variables et servant à séparer deux électrodes au cours des essais de l'EC) ;
- le Microwave Plasma Atomic Emission Spectrometers, Agilent (MPAESA) qui mesure la concentration de l'arsenic.

II.2. Méthodes

Environ 150 litres d'échantillons d'eau de procédé de la mine ont été prélevés, conservés et acheminés au laboratoire. Le dispositif expérimental utilisé pour l'EC (Fig.2) est monté intégralement au laboratoire. Il est constitué de : une cellule électrolytique en plexiglas d'un volume effectif de 1000 ml, deux électrodes en fer, un générateur de courant continu (FPS -305D, DC power supply, 30V-5A) et un agitateur magnétique. En vue d'optimiser les conditions relatives à cette technologie, certains choix ont été faits à savoir la nature de l'électrode utilisé, le temps d'électrolyse, la distance inter électrode et l'intensité du courant appliquée aux bornes du générateur. L'élimination est lancée après que les paramètres aient été ajustés. La démarche expérimentale adoptée consiste à prélever un litre d'échantillon d'eau à traiter et l'introduire dans la cuve électrolytique dans laquelle sont immergées deux électrodes. Chaque électrode est connectée aux bornes du générateur sous tension électrique. Les deux électrodes placées parallèlement dans la cuve électrolytique sont 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. L'intensité du courant est contrôlée par un multimètre. Les électrodes sont extraites du réacteur après chaque expérience 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.

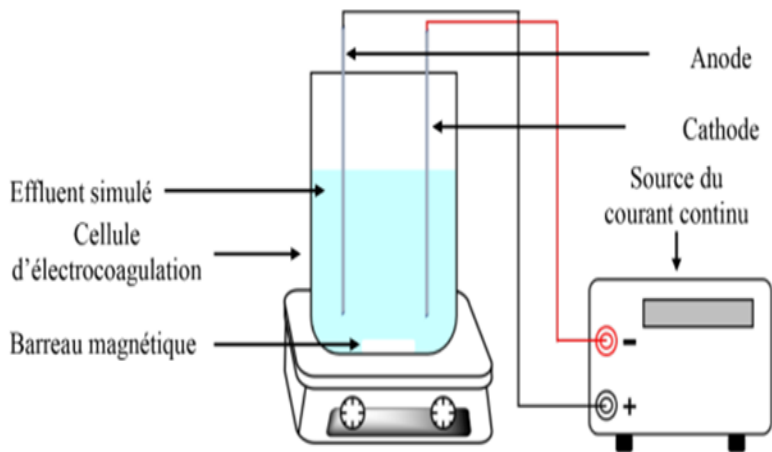


Figure 2 : Schéma du dispositif expérimental utilisé en électrocoagulation

III. Résultats

Le tableau II ci-après présente les résultats obtenus suite à nos essais expérimentaux.

Tableau II : Résultats d'élimination de l'arsenic (As) par électrocoagulation

N° des expériences	Teneur initiale en AS (mg/L)	Intensité (Ampère)	Temps (min)	Distance Electrode (cm)	Taux d'abattement %	Teneur en Arsenic (mg/L)
1	16,4	1,25	60	1,5	95,35	0,77
2		1,5	60	2	97,5	0,41
3		1,5	90	1,5	95,27	0,53
4		1,25	60	1,5	95,09	0,55
5		1	30	1,5	97,23	0,31
6		1,25	90	2	96,43	0,4
7		1,5	60	1	97,86	0,24
8		1	60	1	97,70	0,37
9		1,25	60	1,5	96,07	0,44
10		1	90	1,5	98,30	0,19
11		1	60	2	99,82	0,02
12		1,25	60	1,5	99,01	0,17
13		1,5	30	1,5	99,82	0,02
14		1,25	90	1	98,66	0,15
15		1,25	60	1,5	99,37	0,07
16		1,25	30	1	95,45	0,51
17		1,25	30	2	99,21	0,13
Normes de rejets	≤ 0,5					≤ 0,5

Les 11^{ème} et 13^{ème} expériences montrent une meilleure efficacité d'élimination de l'arsenic mais nous préférons garder celle de la 13^{ème} expérience à cause de son temps de traitement qui est plus court (environ 30 minutes).

L'analyse de la figure 2 ci-après nous indique que le temps (X : A) est un facteur important dans cette étude, il évolue positivement de 30 à 60 minutes et il reste quasi-constant de 60 à 90 minutes. L'intensité du courant (X : B) est un facteur indispensable dans ce procédé, les taux d'abattement croissent avec l'intensité de courant entre 1 à 1,25 ampère (A), à cette limite elle évolue négativement. La distance inter électrode (X : C) est aussi un facteur quasiment indispensable au cours de cette étude elle évolue positivement.

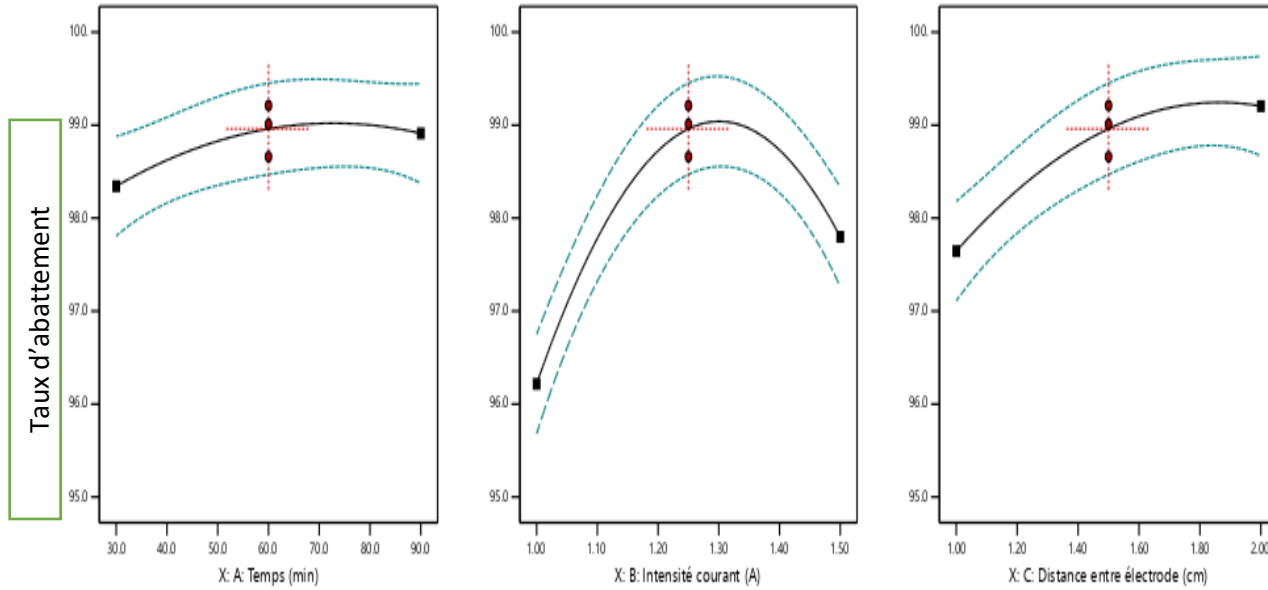


Figure 3 : Facteurs influençant le procédé d'EC

Le temps de traitement et l'intensité sont maintenus constants au milieu de la plage, le taux d'abattement de l'arsenic atteint un maximal de 99,8% (Fig. 4a et 4b) avec une distance inter électrode de 2 cm et une intensité de courant de 1,5 ampère.

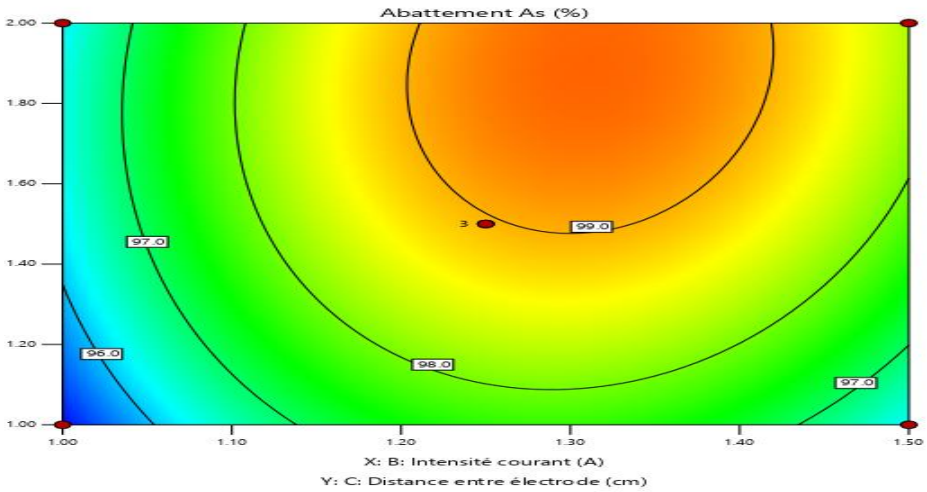


Figure 4a : La courbe du taux d'abattement de l'arsenic (As)

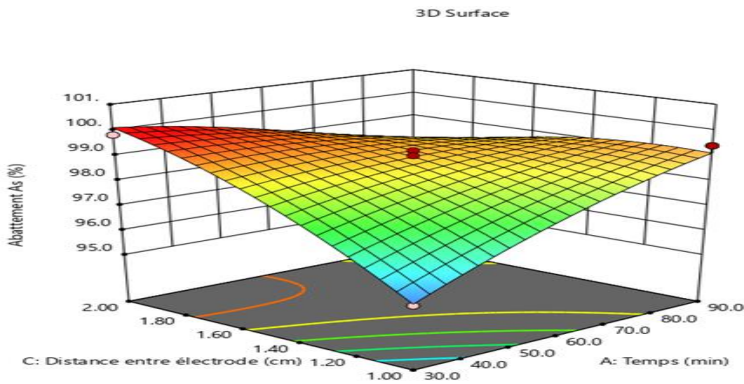


Figure 4b : La courbe du taux d'abattement de l'arsenic sur surface

IV. Discussions

Le procédé d'électrocoagulation est une technologie conçue pour le traitement des effluents industriels à moindre coût. En outre, son utilisation ne demande aucun produit chimique dans le processus de traitement. Notre étude démontre que l'optimisation des paramètres opératoires comme le taux d'abattement de l'arsenic, l'intensité, le temps de l'électrolyse étaient respectivement 99,82%, 1,5 ampères et

de 30 minutes. Au regard de l'optimisation des paramètres opératoires, la concentration finale en arsenic était à 0,02 mg/L. Ces résultats concordent avec les travaux réalisés par (ASSELIN, 2007) sur l'utilisation de l'électrocoagulation dans le traitement des eaux usées industrielles chargées en matière organique où les résultats ont montré que le pourcentage d'élimination de la Demande Chimique en Oxygène (DCO) mesuré lorsque différentes intensités de courant (0,3 ; 0,5 ; 1,0 et 1,5 A) sont appliquées pendant 90 min en présence d'électrodes de fer, le taux d'enlèvement de la DCO varie entre 66 et 77% alors que ce taux est de 67 à 74% d'enlèvement pour des électrodes d'aluminium. L'étude réalisée par (BAKO et al., 2002) sur les paramètres opératoires d'électrocoagulation pour le traitement d'un effluent de textile (exemple du bleu de méthylène) montre que l'influence de la nature de l'anode sur le taux d'élimination du bleu de méthylène. Cependant, cette étude a été effectuée en comparant l'efficacité du traitement des lames de fer avec les lames d'aluminium d'égales dimensions. A un pH proche de la neutralité, le fer permet d'atteindre son maximum d'élimination à 52,4% du bleu de méthylène alors que la lame d'aluminium présente son meilleur taux d'abattement à 39,6% à un pH de 11. Ces résultats sont conformes à la présente étude. Selon (Hanafi et al., 2009), une bonne dégradation des margines a été observée engendrant un rendement maximal (96-99 %). Les travaux réalisés par (Zongo et al., 2011) sur le traitement de deux effluents textiles et un effluent simulé de tannerie par électrocoagulation ont révélé que le traitement de la couleur a permis d'avoir jusqu'à 93 à 99 % d'abattement pour tous les effluents indépendamment de la densité de courant. L'étude menée par (Demirel et al., 2022) a montré que dans le traitement de l'EC, l'élimination de l'arsenic à 99,87 % a été obtenue avec 10 mA/cm², 10 mM de Na₂SO₄ à un pH = 3 après 40 min fournissant une concentration d'effluent de 1,44 µg/L de l'arsenic (As) inférieure à la limite de l'OMS pour l'eau potable. Les travaux réalisés par (Gören et al., 2018) ont montré que les paramètres les plus efficaces étaient le courant, le temps de fonctionnement et l'anode appliqués, l'efficacité d'élimination de l'As (V) dans le réacteur EC, tandis que le pH initial, le diamètre de l'anode Al et le débit d'air ont un effet limité sur l'enlèvement. Le modèle a prédit une concentration résiduelle d'As (V) inférieure à 10 µg/L pour l'optimum condition de fonctionnement (pH 7,03, 0,29 A, 10,5 min, dp 7,5 mm, 613,4 µg/L, h 5,1 cm et Q_{air} 6,4 L/min). L'efficacité maximale d'élimination de l'As (V) et le CO minimal dans le processus EC étaient de près de 99%. L'étude réalisée par (BELOUDAH, 2020) a révélé qu'il ressort une variation vis-à-vis

du temps. Pour $t = 0$ min, on voyait sur le premier tube une couleur sombre, ce qui signifie que l'eau est toujours polluée ce qui veut dire que le procédé de l'électrocoagulation n'a pas commencé. Pour $t=15$ min, sur les quatre tubes on apercevait un léger éclairage de couleur comparativement au premier tube, ce qui signifie que le processus a commencé. Pour $t= 30$ min, on observe un début de pureté de l'eau polluée et cela est dû à la dégradation de l'acide humique par le procédé de l'EC. Selon l'étude réalisée par (Abdulredha et al., 2020) a révélé que l'efficacité de l'élimination de l'arsenic de l'eau à l'aide de l'approche d'électrocoagulation est passée de 88% à 96% dans un environnement alcalin, ce qui est préférable. Les meilleurs paramètres de travail pour l'élimination de l'arsenic incluent une densité de courant de 6 mA/m^2 et un traitement temps de 30 minutes pour atteindre une efficacité d'élimination de l'arsenic de 81%. Le meilleur niveau de pH pour le traitement de l'eau contaminée par l'arsenic a été identifié à 9. Tous les résultats de ces travaux antérieurs cités concordent avec les résultats de la présente étude.

Conclusion

L'étude a permis de démontrer l'efficacité de l'électrocoagulation dans le traitement des effluents miniers notamment l'élimination de l'arsenic dans les eaux de résidus minier de la mine de Loulo. En optimisant les paramètres opératoires dans les meilleures conditions et cela a permis avoir des résultats satisfaisants. A l'issue des séries expérimentales, le taux d'abattement de l'arsenic atteignaient plus de 99% avec une intensité de courant de 1,5 ampère et un temps d'électrolyse de 30 minutes. Cela montre l'importance de cette vieille technologie dans la préservation des ressources naturelles (sol, eau, forêt). Dans le cadre de l'exploitation d'un minerai qui contient des contaminants potentiellement dangereux pour l'environnement, comme l'arsenic, toute mine devrait se munir d'un bassin de polissage ou d'une utilisation permettant le traitement des effluents au besoin. Par conséquent, il serait mieux essentiellement de considérer les caractéristiques particulières de cet élément afin d'éviter tout problème environnemental.

Remerciements

Nous adressons nos remerciements au personnel du Laboratoire National des Eaux (LNE), à la Société Minière de Loulo et aux différentes équipes de recherche au sein du LNE pour leur

accompagnement et leurs facilitations pour la réalisation de cette étude.

Conflit d'intérêts

Les auteurs de cette étude n'ont aucun conflit d'intérêt en relation avec cet article.

Contribution des auteurs

Tous les auteurs ont contribué à la réalisation de cette étude notamment la lecture sur la forme et le fonds du texte, la revue bibliographique etc.

Références bibliographiques

A. Y. GÖREN, M. S. ÖNCEL, E. DEMIRBAS, E. ŞIK and M. KOBYA. Removal of arsenate by electrocoagulation reactor using aluminum ball anode electrodes, IWA Publishing 2018, Water Practice & Technology Vol 13 N°4 doi : 10.2166/wpt.2018.088

Aoudj, S., Khelifa, A., Drouiche, N., Hecini, M., & Hamitouche, H. (2010). Electrocoagulation process applied to wastewater containing dyes from textile industry. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49(11), 1176-1182.

ASSELIN, (2007). Utilisation de l'électrocoagulation dans le traitement des eaux usées industrielles chargées en matière organique. Mémoire de Master en Maître des Sciences (M.Sc.), Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau, Terre et Environnement, Université du Québec, Canada, 13, 136, 205 p.

Balla, W., Essadki, A. H., Gourich, B., Dassaa, A., Chenik, H., & Azzi, M. (2010). Electrocoagulation/electroflotation of reactive, disperse and mixture dyes in an external-loop airlift reactor. *Journal of hazardous materials*, 184(1-3), 710-716.

BELOUDAH, (2020). Etude des propriétés de l'électrocoagulation d'un acide organique, Mémoire de Master. Filière : Hydraulique Spécialité : Hydraulique urbaine. Université Mohamed khider-Biskra, Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie civil et d'Hydraulique, Algérie 32 et 68 p.

Calvo, L. S., Leclerc, J. P., Tanguy, G., Cames, M. C., Paternotte, G., Valentin, G., ... & Lopicque, F. (2003). An electrocoagulation unit for the purification of soluble oil wastes of high COD. *Environmental progress*, 22(1), 57-65.

CHEN (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Sep. Purif. Technol*, 38, 11-41.

CHEN et SHENG. Electrocoagulation of chemical polishing (CMP) wastewater from semiconductor fabrication. *Chemical Engineering Journal*, 2003, 205-211.

Essadki, A. H., Bennajah, M., Gourich, B., Vial, C., Azzi, M., & Delmas, H. (2008). Electrocoagulation/electroflotation in an external-loop airlift reactor—Application to the decolorization of textile dye wastewater: A case study. *Chemical engineering and processing: Process intensification*, 47(8), 1211-1223.

Golder, A. K., Hridaya, N., Samanta, A. N., & Ray, S. (2005). Electrocoagulation of methylene blue and eosin yellowish using mild steel electrodes. *Journal of hazardous materials*, 127(1-3), 134-140.

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.

HOSNY, (1996). Separating oil from oil-water emulsions by electroflotation technique. *Sep. Technol.* 6: 9-17.

IMENE, (2023). Traitement des eaux usées industrielles de l'Unité EMBAG-BBA. Mémoire de Master en Génie des procédés, Spécialité : Gestion des changements environnementaux en méditerranée, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département Génie de l'environnement, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, Algérie, 18 p.

Inoussa ZONGO, Joseph WETHE, Belkacem MERZOUK, Amadou Hama MAÏGA, François LAPICQUE et Jean-Pierre LECLERC. Traitement de deux Effluents Textiles et d'un Effluent Simulé de Tannerie par Électrocoagulation : Etude Énergétique et Effet Des Paramètres Opératoires sur le Traitement Des Polluants ; *European Journal of Scientific Research* ; ISSN 1450-216X Vol.62 No.2 (2011), pp. 216-235

İrdemez, Ş., Demircioğlu, N., & Yildiz, Y. Ş. (2006). The effects of pH on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with iron plate electrodes. *Journal of hazardous materials*, 137(2), 1231-1235.

Jumpatong, K., Phutdhawong, W., & Buddhasukh, D. (2006). Dechlorophyllation by electrocoagulation. *Molecules*, 11(2), 156-162.

Khoufi, S., Feki, F., & Sayadi, S. (2007). Detoxification of olive mill wastewater by electrocoagulation and sedimentation processes. *Journal of Hazardous Materials*, 142(1-2), 58-67.

Kobyas, M., Hiz, H., Senturk, E., Aydinler, C., & Demirbas, E. (2006). Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation. *Desalination*, 190(1-3), 201-211.

KOPARAL et ÖĞÜTVEREN. Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 2002, 83-94

KOUADIO, (2023). Contribution à l'évaluation des niveaux de contamination des eaux et des sols des sites d'orpaillage clandestin et élimination des métaux (Hg, Pb, Cd) et de l'arsenic des eaux polluées, à l'aide des argiles de Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat de l'Université de Felix Houphouët-Boigny en Chimie, Spécialité : Physico-chimie des Matériaux inorganiques, Unité de Formation et de Recherche, Sciences des Structures de la Matière et de Technologie, Université de Felix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire. 1 p.

LEMLIKCHI, (2012). Elimination de la pollution des eaux industrielles par différents procédés d'oxydation et de Co précipitation, Thèse de Doctorat 3^e cycle de Docteur de l'Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, Faculté des Sciences, Département de Chimie, Spécialité : Chimie, Option : Chimie appliquée, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, Algérie, 50 p.

M. YOUSUF, A. MOLLAH, Robert SCHENNACH, Jose R. PARGA, and David L. COCKE. Electrocoagulation (EC)-science and applications/*Journal of Hazardous Materials B84* (2001) 29–41

MARTINEZ-HUITLE and BRILLAS. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: a general review. *Appl. Catal. B-Environ.* 87 (2009) 105–145.

Muhammad ABDULREDHA, Hussein Idrees ISMAEL, Zahraa D. KHALAF and Emad Salaam ABOOD. Adopting electrocoagulation technology for removing arsenic from contaminated water, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 1088 (2022) 012020 IOP Publishing doi: 10.1088/1755-1315/1088/1/012020

PALLIER, (2008). Elimination de l'Arsenic par Coagulation Flocculation et Electrocoagulation d'Eaux Faiblement Minéralisées. Thèse de Doctorat 3^e cycle de Docteur de l'Université de Limoges, Discipline : Chimie et Microbiologie de l'Eau, Ecole Doctorale Science - Technologie – Santé, Faculté des Sciences et Techniques, Groupement de Recherche Eau-Sol-Environnement, Université de Limoges. France 19 p.

PALLIER, V., FEUILLADE-CATHALIFAUD, G., SERPAUD, B., & BOLLINGER, J. Élimination de l'arsenic dans les eaux naturelles faiblement minéralisées.

RIVERA ZAMBRONO, (2012). Développement d'un Procédé d'Élimination de l'Arsenic en Milieu Aqueux, associant Electrocatalyse et Filtration. Thèse de Doctorat 3e cycle de Docteur de l'Université de Grenoble, Spécialité : Chimie et Science du Vivant/Inorganique et Bio-Inorganique, Université de Grenoble, France. v p.

TRAORÉ, (2022). Impact socioéconomique de l'orpaillage dans le cercle de Kéniéba au Mali, *International Journal of Accounting, Finance, Auditing, Management and Economics*, 3(1-2), 251-268
<https://doi.org/10.5281/zenodo.5914551> 255 p.

Tuççe DEMIREL, Fadime Karaer ÖZMEN, Yusuf YAVUZ, and Ali Savaş KOPARAL. The effect of electrocoagulation (EC) on total arsenic, arsenite (As^{3+}) and arsenate (As^{5+}) species removal from model groundwater investigating toxicity and sludge characteristic. *Appl Water Sci* 12, 138 (2022) <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01660-0>

Uğurlu, M., Gürses, A., Doğar, Ç., & Yalçın, M. (2008). The removal of lignin and phenol from paper mill effluents by electrocoagulation. *Journal of environmental management*, 87(3), 420-428.

Yahiaoui, O., Lounici, H., Abdi, N., Drouiche, N., Ghaffour, N., Pauss, A., & Mameri, N. (2011). Treatment of olive mill wastewater by the combination of ultrafiltration and bipolar electrochemical reactor processes. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 50(1), 37-41.

Yibor Fabrice Roland BAKO, Inoussa ZONGO, Yssouf KARANGA, Issa TAPSOBA, Issoufou SAWADOGO et Barthélemy BAGA. Etude des paramètres opératoires d'électrocoagulation pour le traitement d'un effluent de textile : exemple du bleu de méthylène, *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 15(2): 790-802, 799 p.

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 3^e cycle de Docteur de l'Université de Lorraine, Spécialité : Génie des Procédés et des Produits, Ecole Doctorale Ressources Procédés Produits Environnement (RP2E), Laboratoire Réactions et Génie des Procédés (LRGP - UPR 3349 CNRS), Université de Lorraine, France, 25 p.

ZONGO, (2009). Étude Expérimentale et Théorique du Procédé d'Electrocoagulation : Application au traitement de deux effluents Textiles et d'un effluent simulé de Tannerie. Thèse cotutelle de Doctorat 3e cycle de Docteur de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Spécialité : Génie des Procédés et des Produits, Université de Nancy, France et Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement de Ouagadougou (2IE), Burkina Faso. 19 p.