



AVIS DE SOUTENANCE D'UNE THESE DE DOCTORAT

Le Doyen de la Faculté des Sciences a le plaisir d'informer le public qu'une soutenance de
thèse de Doctorat en

«Chimie Fondamentale et Appliquée»

aura lieu le 16/12/2023 à la Faculté des Sciences, Kénitra

La Thèse sera présentée par Mme ZMIRLI ZAKIA

Sous le thème :

**Modélisation et optimisation de l'extraction du minerai d'argent par cyanuration
et traitement des rejets contenant le cyanure et les fluorures par le procédé
d'électrocoagulation**

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Titre	Etablissement
OUDDA HASSAN	Président	Faculté des Sciences, Kénitra
TALEB ABDESLAM	Rapporteur	Faculté des Sciences et Techniques, Mohammedia
BROUZI KHALID	Rapporteur	Ecole Supérieure de Technologie, Salé
EL IDRISSE CHAFIK BRAHIM	Rapporteur	Faculté des Sciences, Kénitra
BEJANNY BOUCHRA	Examineur	Faculté des Sciences et Techniques, Mohammedia
HARCHARRAS MOHAMED	Examineur	Faculté des Sciences, Kénitra
TAHAIKT MUSTAPHA	Examineur	Faculté des Sciences, Kénitra
CHAAIR HASSAN	Co-Directeur de thèse	Faculté des Sciences et Techniques, Mohammedia
SALLEK BRAHIM	Directeur de thèse	Faculté des Sciences, Kénitra





Nom et Prénom : ZMIRLI ZAKIA
Date de soutenance : 16/12/2023
Directeur de Thèse : SALLEK BRAHIM

Sujet de thèse :

Modélisation et optimisation de l'extraction du minerai d'argent par cyanuration et traitement des rejets contenant le cyanure et les fluorures par le procédé d'électrocoagulation

Résumé:

La métallurgie du minerai d'argent ou son extraction est mise en œuvre suivant différentes étapes dont la lixiviation ou la mise en solution du métal par cyanuration (lixiviation au cyanure) est la plus critique. Néanmoins, l'utilisation massive du cyanure génère des rejets de répercussions néfastes considérables sur l'environnement écologique et la santé humaine. Tel est le cas également pour les rejets contenant les fluorures sur les sites des exploitations minières. Le traitement de ces rejets générés s'avère nécessaire.

Dans cette thèse, l'application du plan de *Plackett-Burman* pour le criblage des facteurs qui ont une influence significative sur le rendement d'extraction d'argent par cyanuration a mis en évidence que les trois facteurs : Concentration de cyanure, durée de cyanuration et densité de la pulpe sont les plus influents sur la réponse étudiée. Ces résultats ont servi à l'étude d'optimisation de l'extraction du minerai d'argent par la méthodologie des Surfaces de Réponse (*MSR*) en déterminant les conditions expérimentales optimales permettant d'obtenir un rendement optimal d'argent de 74 % métal tout en rationalisant la consommation de cyanure (1400 ppm de [CN], une densité de pulpe de 1200 et une durée de cyanuration de 5h).

Nous avons ensuite entrepris l'étude de traitement de rejets de cyanure par le procédé d'*EC* dans un réacteur du type *airlift* à marche discontinu. Une efficacité maximale de traitement des effluents cyanurés par *EC* de 98 % a été achevée pour une densité de courant de 68 A.m⁻², une distance inter-électrode de 13 mm et un temps d'électrolyse de 57.5 min.

Pour l'étude du traitement des fluorures par *EC*, l'évaluation statistique par la méthode *ANOVA* « One factor » de l'effet des facteurs (densité de courant (*J*), temps d'électrolyse (*t_e*), *pH*, conductivité (*σ*) et vitesse d'agitation (*V_a*) sur la performance de la défluoruration par *EC* dans un réacteur parfaitement agité a montré que tous les facteurs ont un effet significatif sur la défluoruration. Les résultats obtenus ont été utilisés pour développer des modèles mathématiques représentant la variation du rendement de défluoruration et de deux autres indicateurs de performance, à savoir la consommation d'énergie et la perte en masse d'électrode en fonction des cinq facteurs d'étude. Sous les conditions optimales déterminées par *MSR* (*J* = 40,76 A.m⁻², *t_e* = 23,38 min, *pH* = 7, *σ* = 2374 μs.cm⁻¹ et *V_a* = 102 tr.min⁻¹), la concentration de fluorure a été réduite en dessous des limites recommandées par l'*OMS* (1,5 mg.L⁻¹) avec une consommation énergétique de 54,58 Wh.m⁻³ et une faible perte d'électrode en aluminium (25,2×10⁻³ %). Ces conditions optimales ont été utilisées pour la transposition réussie de la défluoruration du mode discontinu au mode continu.

Finalement, l'étude hydrodynamique du réacteur à marche continue pour la défluoruration de l'eau en appliquant la méthode de Distribution des Temps de Séjour (*DTSS*) nous a permis de diagnostiquer le fonctionnement du réacteur. Cette méthode est conduite par un traçage expérimental sous les conditions d'écoulement prédéfinies. Globalement, le comportement hydrodynamique du réacteur à marche continue est proche d'un écoulement parfaitement agité avec l'existence d'une anomalie et une valeur de la variance adimensionnelle proche d'un (σ² = 0,85).

Mots clés: Extraction d'argent, Cyanuration, Traitement, Rejet de cyanure, Electrocoagulation, Réacteur *airlift*, Décyanuration, Défluoruration, Modélisation, Optimisation, *ANOVA* « One factor », plans d'expériences, plan *Plackett-Burman*, plan *Box-Behnken*, plan composite centré, *DTSS*.

Abstract:

The metallurgy of silver ore or its extraction entails various phases of which cyanide leaching (cyanidation) is the most critical. However, the use of cyanide produces effluent with a significant negative impact on both the ecological environment and human health. This is also valid for discharges containing fluorides flows from mining sites. To achieve the best metal silver extraction while preventing useless cyanide consumption, the cyanidation process must be optimized. The cyanide and fluoride effluents generated at mining sites require efficient treatment before being released into the environment.

Experimentally, the application of the *Plackett-Burman* design has shown that cyanide concentration, cyanidation time and pulp density have the most significant influence on the silver ore extraction. These results were used to optimize the extraction of silver ore using the Response Surface methodology (*RSM*). Silver extraction of 74 % was achieved while rationalizing cyanide consumption (1400 ppm of [CN], a pulp density of 1200 and a cyanidation time of 5 h). An *airlift* reactor was used to apply Electrocoagulation process (*EC*) for the treatment of cyanide wastewater. *RSM* was used to model and optimize cyanide removal. To reach a maximum removal efficiency of 98 %, *EC* process reactor must operate under a current density of 68 A.m⁻² with an inter-electrode distance of 13 mm and for an electrolysis time of 57.5 min.

Defluoridation in a stirred reactor was evaluated using a one-way *ANOVA*. The results showed that defluoridation is strongly affected by current density (*J*), electrolysis time (*t*), *pH*, conductivity (*σ*) and stirring speed (*V_a*). The *MSR* enabled us to model and optimize defluoridation, energy consumption and aluminum electrode consumption. Hence, under optimal conditions (current density of 40.76 A.m⁻², electrolysis time of 23.38 min, *pH* of 7, conductivity of 2374 μs.cm⁻¹ and stirring speed of 102 rpm), the fluoride concentration was reduced below the allowed limits (1.5 mg.L⁻¹) with an energy consumption of 54.58 Wh.m⁻³ and low aluminum electrode loss (25.2×10⁻³ %). The knowledge obtained was used for the defluoridation transposition from batch to continuous mode.

The characterization of the hydrodynamic within the reactor revealed that the hydrodynamic inside it is close to a perfectly stirred reactor with one anomaly observed (σ² = 0.85). The mixing flow pattern inside the reactor is similar to two reactor models: two series reactors of different volumes and a perfectly stirred reactor with a recirculation zone.

Key words: Silver extraction, Cyanidation, Treatment, Cyanide effluent, Electrocoagulation, *airlift* reactor, Defluoridation, Modelling, Optimization, One factor *ANOVA*, *Plackett-Burman* design, *Box-Behnken* design, central composite design, *RTD*.

