



**HAL**  
open science

## Aspects économique et énergétique de l'électrodialyse d'une solution alcaline au sein d'un schéma de traitement d'un minéral

Brahim Abbad, Azzedine Lounis, Ahmed Chikouche

► **To cite this version:**

Brahim Abbad, Azzedine Lounis, Ahmed Chikouche. Aspects économique et énergétique de l'électrodialyse d'une solution alcaline au sein d'un schéma de traitement d'un minéral. JITH 2007, Aug 2007, Albi, France. 5p. hal-00157616

**HAL Id: hal-00157616**

**<https://hal.science/hal-00157616>**

Submitted on 29 Aug 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# ASPECTS ECONOMIQUE ET ENERGETIQUE DE L'ELECTRODIALYSE D'UNE SOLUTION ALCALINE AU SEIN D'UN SCHEMA DE TRAITEMENT D'UN MINERAI

Brahim. Abbad<sup>1</sup> ; Azzedine.Lounis<sup>2</sup> et Ahmed.Chikouche<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Unité de Développement des équipements solaires. Route de Bou Ismaïl. Alger. Algérie .

<sup>2</sup>Laboratoire des Sciences et Génie des Matériaux. USTHB. BP32El Alia. Alger. Algérie.

*babad80@yahoo.fr; zlounis@yahoo.com*

## Résumé

Le but de ce travail est d'examiner l'aspect consommation énergétique et l'incidence économique au sein du schéma de traitement alcalin d'un minerai. Plus précisément avec l'électrodialyse, technique électromembranaire et l'introduction de l'énergie solaire photovoltaïque peut-on apporter et introduire de nouveaux éléments permettant de faire le choix entre la voie alcaline et la voie acide pour le minerai traité ? Cette technologie propre peut-elle concilier les aspects économique et environnemental de part l'estimation financière, limitation de la consommation de réactifs, le recyclage de l'alcali et la valorisation de sous-produit ?

## 1. DONNEES ESSENTIELLES DU PROBLEME

Dans le domaine de l'industrie énergétique certains minéraux présentent une unicité d'utilisation. Cette contrainte a nécessité la mise au point de techniques d'évaluation permettant d'opérer rapidement une sélection entre les divers gisements potentiels et les différents procédés. Pour choisir un procédé optimal, en termes économiques, il faut appliquer des techniques appropriées en vue d'estimer à la fois les coûts probables en cause et la rentabilité susceptible d'être obtenue.

Le choix du mode de traitement d'un minerai d'uranium, entre la voie acide ou la voie alcaline, est orienté essentiellement par les caractéristiques physico-chimiques du minerai et surtout de la gangue, une présence importante de carbonates alcalins et alcalino terreux consommateurs d'acide sans bénéfice pour la solubilisation du minéral oriente l'hydrométallurgiste vers une lixiviation alcaline [1]. Notons aussi que dans notre cas la molybdénite est présente en quantité sensible Une analyse détaillée suggère de prévoir la récupération de carbonate de soude et le molybdène.

Le but de ce travail est d'examiner l'aspect consommation énergétique et l'incidence économique au sein du schéma de traitement alcalin du minerai. Plus précisément avec l'électrodialyse, technique électromembranaire, peut-on apporter et introduire de nouveaux éléments permettant de renforcer le choix entre le procédé alcalin et le procédé acide pour le minerai traité?

Ce choix sera indissociable du concept de développement durable. Ce dernier associé à l'exploitation des ressources, choix des investissements et l'orientation technologique rendus cohérents avec l'avenir comme avec les besoins du présent. Il s'agit alors de définir des schémas qui concilient les trois aspects économique, social, et environnemental.

## 2. MONTAGE EXPERIMENTAL

Le pilote d'électrodialyse type P1 fonctionne en discontinu, alimenté par un générateur en courant continu type LAMBDA LQ534W, fournissant un courant continu de 0,5A max. Ce pilote est constitué de :

- Trois cuves (diluât, concentrât, électrolyte) d'une capacité d'environ 1,5 litre. Elles sont fabriquées en Plexiglas.
- Trois pompes dont les débits sont : 112 L.h<sup>-1</sup>, 108 L.h<sup>-1</sup> et 110 L.h<sup>-1</sup> respectivement pour le diluât, le concentrât et l' électrodat.
- Un module comportant 19 compartiments de concentration et 19 de dilution (Figure 1).

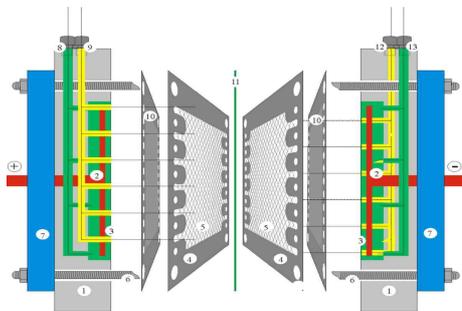


Figure 1 : Schéma d'une cellule d'électrodialyse

- |                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|
| 1: Bloc en polypropylène | 8: porte électrode       |
| 2: Electrodes            | 9: Entrée du concentrât  |
| 3: Electrodat            | 10: Membranes            |
| 4: support grille (PVC)  | 11: Membranes            |
| 5: grille                | 12: Entrée du diluât     |
| 6: tiges filetées        | 13: Entrée du concentrât |
| 7: Cadre en acier        |                          |

### 3. ASPECTS ECONOMIQUES ET ENERGETIQUE

Afin d'évaluer la consommation d'énergie, nous considérons que l'empilement d'électrodialyse suit un comportement ohmique. L'analyse ohmique assume la proportionnalité entre la tension aux bornes du pilote d'électrodialyse et l'intensité de courant. Pour déterminer les plages de fonctionnement ohmique nous avons étudié le phénomène de polarisation et les autres facteurs responsables de la non linéarité de la courbe intensité-potentiel. Dans ces conditions, la puissance dissipée dans le pilote d'électrodialyse, sous une résistance  $R$  et une intensité de courant  $I$ , est donnée par l'équation (1)

$$P = R.I^2 \quad (1)$$

En fonction de la quantité à extraire et de la densité de courant  $i$ , l'énergie nécessaire pour le traitement de 1 m<sup>3</sup> de la solution est donnée par l'équation (2)

$$W = \frac{r.i.\Delta N}{37,3.10^3.\eta} \quad (2)$$

Cette équation montre que l'énergie nécessaire du procédé d'électrodialyse est directement proportionnelle à la résistance spécifique d'une cellule unitaire [2]. Cette dernière peut être décomposée en plusieurs termes: la résistance de la couche limite ( $R_\delta$ ) et les résistances spécifiques du compartiment de concentration ( $R_C$ ), du compartiment de dilution ( $R_d$ ), de la membrane échangeuse de cations ( $R_{MC}$ ) et de la membrane échangeuse d'anions ( $R_{MA}$ ). La détermination précise de tous ces termes est délicate. En raison des changements de concentration, de pH et de température, pour le dimensionnement on a souvent recours à une relation empirique [3]:

$$r_{25} = 50 + \frac{3}{c} \quad (3)$$

où  $c$  (équ/L) désigne la concentration moyenne du circuit de déminéralisation.

La surface totale de membrane (  $S = S_{MEA} + S_{MEC}$  ) nécessaire est reliée à la fraction de membrane réellement utilisée (s) par : 
$$S = \frac{5,36.Q.\Delta N}{i.\eta.s} \quad (4)$$

Elle est inversement proportionnelle à la densité de courant et directement proportionnelle à la quantité  $\Delta N$  équiv.g qui traversent les membranes échangeuses d'ions. Les relations montrent que la densité de courant doit être choisie de manière à obtenir un compromis entre le coût des membranes et le coût de l'énergie nécessaire. En d'autres termes la quantité d'équiv.g déplacée à travers les membranes échangeuses d'ions est proportionnelle à la densité de courant cependant les coûts d'épuration du diluât sont inversement à la densité de courant. Si  $C_t$  désigne le coût total de la quantité unitaire du diluât épuré nous pouvons écrire [4]. 
$$C_t = \frac{A}{i} + B.i + G \quad (5)$$

où  $A$ ,  $B$  et  $G$  sont des constantes pour un empilement donné, lorsque l'électrodialyseur fonctionne suivant un comportement ohmique.

Le premier terme de l'équation (5) représente le coût des membranes, leur renouvellement ainsi que les frais d'exploitation liés à la surface des membranes. Le second terme désigne le coût de l'énergie électrique nécessaire pour extraire les espèces à partir du diluât, enfin le troisième terme les coûts d'investissements indépendants des membranes, la main d'œuvre et autres frais d'exploitation de l'installation. Pour déterminer la densité de courant optimale, on effectue une différenciation de l'équation (5), nous obtenons:

$$\frac{dC}{di} = B - \frac{A}{i^2} \quad (6)$$

$$C_t \text{ sera minimum pour } B - \frac{A}{i^2} = 0 \text{ soit } i_{opt} = \left(\frac{A}{B}\right)^{0,5} \quad (7)$$

$i_{opt}$  est la densité optimale. Cette valeur que nous allons déterminer pour effectuer l'électrodialyse de la solution de lixiviation à un coût minimal. Le rapport  $\frac{A_1}{i}$  comporte deux termes : le coût des membranes et leur renouvellement ( $\frac{A_1}{i}$ ) et les frais d'exploitation liés à la surface des membranes ( $\frac{A_2}{i}$ ) sont reliés par un facteur de proportionnalité  $k$  compris entre 0,5 et 1. Si le coût est rapporté au mètre cube de solution de lixiviation traitée, on obtient pour 250 jours de travail:

$$\frac{A_1}{i} = \frac{C_{M.act} \cdot a_a}{Q.(24 \cdot 250).f_c} \quad (8)$$

où  $f_c$  facteur de charge de l'installation et  $a_a$  annuité d'amortissement  
A partir des équations précédentes on en déduit:

$$\frac{A}{i} = \frac{C_{M.act} \cdot a_i (1+k_1)}{Q.(24 \cdot 250).f_c} \quad (9)$$

Le coût de l'énergie nécessaire est donné par le terme  $B.i$ .

$$B.i = W_{el} \cdot P_{el} \quad (10)$$

où  $W_{el}$  consommation d'énergie  $\text{kwh.m}^{-3}$  et  $P_{el}$  prix de l'énergie électrique ( $\text{DA.kwh}^{-1}$ )

L'estimation de  $i_{opt}$  par une optimisation économique nécessite la connaissance de nombreux paramètres tels que le coût actualisé des membranes, la durée de vie des membranes, le nombre de remplacement des membranes durant la vie de l'installation, le taux d'actualisation, le facteur de charge de l'installation et l'annuité d'amortissement comprenant les charges financières. Le calcul donne  $i_{opt} = 33,8 \text{ mA.cm}^{-2}$ .

En raison du phénomène de polarisation qui limite la densité de courant permise, il est difficile de trouver les conditions optimales de fonctionnement. Il est possible d'augmenter la densité de courant en augmentant le débit de circulation mais les contraintes mécaniques limitent les débits de pompage. Ainsi il apparaît clairement que c'est la limite imposée par la polarisation, plutôt que les résultats de l'optimisation économique, qui va contrôler la densité de courant dans le fonctionnement des installations d'électrodialyse. Le calcul de cette valeur est très délicat pour un empilement réel, la difficulté réside tout particulièrement dans la détermination de l'épaisseur de la couche limite. En conséquence nous opterons pour la représentation graphique de Cowan et Brown [5] qui portent  $U/I$  en fonction de  $\frac{1}{I}$  pour la détermination expérimentale de  $i_{lim} = 21 \text{ mA.cm}^{-2}$ .

Au cours de cet essai nous avons obtenu une solution de lixiviation appauvrie à plus de 85% en molybdène [6].

Nous avons effectué un calcul pour une unité de traitement du minerai d'une capacité de  $20\text{T.j}^{-1}$ , nous aurons à traiter un débit de  $2400 \text{ L.h}^{-1}$  de la solution de lixiviation. Le pH de la solution est d'environ 11. L'acide nécessaire à la neutralisation correspond à une quantité égale à  $275 \text{ éq.m}^{-3}$  c'est à dire un débit de  $0,183 \text{ éq.s}^{-1}$ . La quantité de l'alcali qui peut être récupérée est de  $335 \text{ éq.m}^{-3}$ . En considérant les prix de ces produits, l'énergie consommée  $17 \text{ kwh.m}^{-3}$ , le coût de l'installation ramené au  $\text{m}^3$  de solution traitée de solution traitée. le terme correspondant au coût des membranes, leur renouvellement ainsi que les frais d'exploitation liés à la surface des membranes, il apparaît que la mise en oeuvre de l'électrodialyse, dans le schéma de traitement par voie alcaline, est une opération rentable.

Sachant que dans le cas qui nous préoccupe, l'exploitation se trouve dans des sites isolés. L'énergie nécessaire (17KWh) est considérée dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque comme de moyenne puissance.

Le dimensionnement de l'installation photovoltaïque répondant à la consommation énergétique du pilote ED a été effectué en utilisant le logiciel PV3f de RETSCREEN International. Deux schémas peuvent être envisagés : le premier système est composé de modules photovoltaïques et de batteries et le second est constitué de modules photovoltaïques et de batteries couplés à un groupe diesel

Ce calcul se base sur :

- la ressource solaire (conditions météorologique du site)
- les charges du système (dans notre cas de l'ED et des pompes)
- le stockage (type et nature des batteries, batteries ouvertes,  $100\text{A.h}^{-1}$ , sous 48V)
- le type et la puissance des modules photovoltaïques (75W, de BP Solar)

Les calculs montrent que

- pour le premier système : pour une demande énergétique de 17KWh, 54 modules de 75W occupant une surface de  $34,9 \text{ m}^2$  seront nécessaires. L'énergie renouvelable fournie annuellement est de 6,310 MWh avec un rendement au  $\text{m}^2$  de  $178,6\text{KWh.m}^{-2}$ , un facteur d'utilisation PV de l'ordre de 17,8% et un rendement global du système PV d'environ 7,6%

- pour le second système, 14 modules de 75W occupant une surface de 9 m<sup>2</sup> seront nécessaires. L'énergie renouvelable fournie annuellement est d'environ 2,150 MWh avec un rendement au m<sup>2</sup> de 237,5KWh.m<sup>2</sup>, un facteur d'utilisation PV de l'ordre de 23,4% et un rendement global du système PV d'environ 9,9%.

Un autre aspect et non des moindres a été pris en ligne compte et qui concerne les GES : le premier système nous offre l'avantage de ne pas émettre une quantité de GES de l'ordre de 10,04 t<sub>CO2</sub> par an. L'utilisation du second système permet une réduction d'émission de GES par an de l'ordre de 3,42 t<sub>CO2</sub>.

En fait, comparativement au premier système, l'utilisation de groupe électrogène occasionnera une émission annuelle d'environ 6 t<sub>CO2</sub>

## CONCLUSION

Les essais que nous avons effectués avec une solution de lixiviation réelle démontrent la faisabilité et la rentabilité du procédé. L'introduction d'une technique électro-membranaire comme l'électrodialyse et l'introduction de l'énergie solaire PHOTOVOLTAIQUE peuvent concilier les aspects économique et environnemental de part l'estimation financière, limitation de la consommation de réactifs, le recyclage de l'alcali et la valorisation de sous-produit

## Références

- [1]G. Boutonnet and J.P. Roullier. Economics of uranium ore processing operations. Proceedings of a workshop.Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD).pp 212-224. Paris,. France, 1983.
- [2] L.H. Schaffer and M.S. Minta. Electrodialysis, chapter 6. In principles of desalination. Second Edition, K.S. Spiegler & A.D.K ; Laird PartA. pp 257-357, 1980.
- [3] A. Maurel. Dessalement des eaux par électrodialyse. *Techniques de l'ingénieur* J 2852-1 France, 1985.
- [4] R.H. Perry, D.W. Green and J.D. Maloney. *Chem. Eng. Handbook*. Six Edt. Mc Graw Hill Int. Edt. pp 17-39, 1984.
- [5] D.A. Cowan and J.H. Brown. *Ind. And Eng. Chem.*, vol 51 N°12. pp1445-1448, 1959.
- [6] A.Lounis and C.Gavach. *Hydrometallurgy*, 40, pp 83-86, 1996.