

Nom et Prénom : TOUIR JAMAL

Date de soutenance : 21/03/2022

Directeur de Thèse : EL MIDAOU AZZEDDINE

Sujet de Thèse :

Comparaison de l'Électrodialyse, de la Nanofiltration et de l'Osmose inverse dans la réduction des ions nitrates dans les eaux souterraines marocaines

Résumé :

La contamination de l'eau par les nitrates est un problème mondial qui constitue une grave menace pour la santé humaine. Au Maroc, pays caractérisé par des ressources en eau limitées, les eaux souterraines représentent près de 32 % des ressources totales. Cependant, 6% de ces ressources en eau sont estimées avoir des niveaux de nitrates supérieurs à 50 mg/L, le niveau recommandé par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour l'eau potable et dans certaines zones de forte activité agricole la teneur en nitrates dépasse 250 mg/ L. En raison de ces risques pour la santé, une attention considérable a été accordée à la recherche de procédés de traitement efficace pour réduire les concentrations de nitrate à des niveaux sûrs.

Dans la première partie de cette étude, l'efficacité de l'électrodialyse dans la réduction des ions nitrates en utilisant le couple de membranes échangeuses d'ions ACS/CMX, a été menu sur une eau souterraine de la région de Boujaad contenant 1100 mg/l de solides dissous totaux (TDS) et 85 mg/l de la teneur en nitrate. L'optimisation de l'opération a été conduite sur un électrodialyseur industriel ; modèle EUR 6 B 60 P4 à 2 étages permettant une inversion simultanée et périodique de l'hydraulique et de la polarité. Ce pilote permet une production maximale de 24 m³/jour. L'influence du taux de déminéralisation sur le rendement de l'opération a été étudiée. Le travail a permis de définir les conditions opératoires, à savoir : un taux de déminéralisation de 40% et un taux de conversion de 98% en maintenant le pH du compartiment saumure à 7. La qualité physico-chimique de l'eau obtenue est satisfaisante.

Dans la deuxième partie de cette étude, l'efficacité de la réduction des nitrates par deux membranes NF90 40*40 (nanofiltration) et BW30E 40*40 (Osmose inverse) est expérimentalement comparée et évaluée, en utilisant un pilote industriel (E3039) fourni par la société française (TIA) comportant deux modules équipés de diverses membranes commerciales spiralées d'une superficie de 7,6m². Pour atteindre cet objectif, l'influence des conditions opératoires (pression, taux de conversion) sur l'élimination des nitrates a été discutée. Pour comprendre et comparer le transfert des ions dans ces deux membranes, les modèles de transfert de masse SPIEGLER-KEDEM et KEDEM-KATCHALSKY ont été utilisés afin de déterminer les paramètres phénoménologiques : Perméabilité du soluté (Ps) , coefficient de réflexion (σ), concentration de convection (Cconv) et flux de diffusion (Jdiff)Le mécanisme de colmatage de ces deux membranes a été aussi comparé en utilisant le modèle de blocage des pores d'HERMIA. L'étude a montré la faisabilité de ces deux technologies dans la réduction des ions nitrates et ce taux augmente avec l'augmentation de la pression, et diminue avec l'augmentation du taux de conversion, mais la teneur en nitrate reste en dessous des normes maximales admises. Les coefficients de réflexion σ sont presque égaux à l'unité ce qui montre la prédominance de la contribution de la diffusion. Le mécanisme de colmatage de ces deux membranes est décrit par le modèle de formation de gâteau.

La troisième partie de cette étude porte sur la conception, dimensionnement et l'estimation du coût total de l'eau produite par les trois procédés étudiés, pour une capacité de production de 2400m³/j (100 m³/h) correspondant à une consommation d'eau pour 50000 habitants suivant les considérations marocaines en milieu rural. La conception a été réalisée sur la base des résultats expérimentaux obtenus et sur la base de données réelle de dimensionnement et de coûts. Le coût de production d'eau potable estimé est de 1.307 DH/m³, 1.371 DH/m³ et 1.437 DH/m³ pour l'électrodialyse, la nanofiltration et l'osmose inverse, respectivement.

Mots clés : nitrate, membrane, électrodialyse, nanofiltration, osmose inverse, transfert, colmatage, modèle de Spiegler-Kedem, modèle de Hermia, coût de traitement.

Abstract :

The contamination of water with nitrates is a global problem that poses a serious threat to human health. In Morocco, a country characterized by limited water resources, groundwater represents nearly 32% of total resources. However, 6% of these water resources are estimated to have nitrate levels above 50 mg/L, the level recommended by the World Health Organization for drinking water (WHO) and in some areas of high agricultural activity the nitrate content exceeds 250 mg/L. Due to these health risks, considerable attention has been paid to find effective treatment methods to reduce nitrate concentrations to safe levels.

In the first part of this study, the effectiveness of electrodialysis in the reduction of nitrate ions using the pair of ion exchange membranes ACS/CMX, was tested on groundwater from the Boujaad region containing 1100 mg/l of total dissolved solids (TDS) and 85 mg/l of nitrate concentration. The optimization of the operation was carried out on an industrial electrodialyzer; 2-stage EUR 6 B 60 P4 model allowing simultaneous and periodic reversal of hydraulics and polarity. This pilot allows a maximum production of 24 m³/day. The influence of the demineralization rate on the performance of the operation was studied. The work made it possible to define the operating conditions, namely: a demineralization rate of 40% and a conversion rate of 98% while maintaining the pH of the brine compartment at 7. The physicochemical quality of the water obtained is satisfactory.

In the second part of this study, the efficiency of the reduction of nitrates by two membranes NF90 40*40 (nanofiltration) and BW30E 40*40 (Reverse osmosis) is experimentally compared and evaluated, using an industrial pilot (E3039) provided by the French company (TIA) comprising two modules equipped with various commercial spiral membranes with an area of 7.6m². To achieve this objective, the influence of the operating conditions (pressure, conversion rate) on the elimination of nitrates was discussed. To understand and compare the transfer of ions in these two membranes, the SPIGLER-KEDEM and KEDEM-KATCHALSKY mass transfer models were used to determine the phenomenological parameters: Solute permeability (P_s), reflection coefficient (σ), convection concentration (C_{conv}) and diffusion flux (J_{diff}). The fouling mechanism of these two membranes was also compared using the HERMIA pore blocking model. The study showed the feasibility of these two technologies in the reduction of nitrate ions and this rate increases with increasing pressure, and decreases with increasing conversion rate, but the nitrate content remains below standards maximum allowed. The reflection coefficients σ are almost equal to unity which shows the predominance of the contribution of scattering. The fouling mechanism of these two membranes is described by the cake formation model.

The third part of this study concerns the design, sizing and estimation of the total cost of the water produced by the three processes studied, for a production capacity of 2400m³/d (100m³/h) corresponding to a consumption of water for 50,000 inhabitants according to Moroccan considerations in rural areas. The design was carried out on the basis of the experimental results obtained and on the basis of actual sizing and cost data. The estimated drinking water production cost is 1,307 DH/m³, 1,371 DH/m³ and 1,437 DH/m³ for electrodialysis, nanofiltration and reverse osmosis, respectively.

Keywords: nitrate, membrane, electrodialysis, nanofiltration, reverse osmosis, transfer, clogging, Spiegler-Kedem model, Hermia model, Processing cost.